

- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

ISSN 1671-6833  
CN 41-1339/T  
CODEN ZDXGAN

# 郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE

2014.5

第35卷 第5期  
Vo1.35 No.5  
2014年9月出版

ISSN 1671-6833



万方数据

## 目 次

### 计算机与控制工程

一种慢性植入式微丝电极性能的改进·····	师 黎, 陈建威, 王松伟(1)
电力系统切换动态建模与励磁控制研究·····	李健勇, 赵 峰, 丁青青(6)
一种新颖的基于边缘检测的车辆阴影去除方法·····	李浩亮, 水清河, 范文兵, 杨潇楠(11)
基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建·····	毛晓波, 张志超(15)
激光微加工系统通信协议设计·····	李纪云, 牛志玲, 裴红星(19)
基于 DSP + GPRS 的远程在线电能质量监测系统设计·····	周 勇, 朱明丽, 杜 霞, 王洪林(23)
水泥回转窑系统的结构分布式控制·····	陈铁军, 赵 洁(27)
未知环境中考虑姿态稳定性的自主机器人路径规划·····	王东署, 朱训林(31)
基于 HLS 协议的流媒体直播系统的研究和改进·····	····· 罗淑贞, 耿恒山, 徐祥男, 孙豪赛, 高 艳, 李 钦, 谢 因(36)
磁耦合电能传输系统两类建模法的等效性分析·····	栗安鑫, 张江飞, 张祖洸(40)
一种改进的中文分词在主题搜索中的应用·····	许智宏, 张月梅, 王 一(44)
区间值犹豫模糊 WOWA 算子及其在决策中的应用·····	····· 蔡丽娜, 陈树伟, 周 威, 黄海滨, 梁 玉(49)

### 土木与交通工程

软土结构性分析与扰动评价·····	刘海涛, 郭院成(54)
基于多目标等效风荷载的变截面门式刚架抗风优化·····	王艳萍, 黄友钦, 吴玖荣, 唐雁腾(59)
充填泥袋筑堤关键技术的离心模型试验研究·····	王雪奎, 王年香, 顾行文, 朱群峰(64)
层状岩体单轴压缩破坏特征与数值模拟研究·····	贾善坡, 罗金泽, 吴 渤, 席增强(69)
某既有剪力墙开洞粘钢加固方法研究·····	赵更歧, 李 庆, 全江伟(74)
用无机胶粘贴 CFRP 布加固损伤组合梁受弯性能·····	陈伟宏, 马景明, 崔双双(79)
聚乙二醇改性沥青性能研究·····	甘新立, 张 楠, 刘 羽(84)
掺废混凝土块的钢管再生混合轴压短柱试验研究·····	张卫东, 王振波, 孙文彬(87)

### 机械工程

基于 ANSYS Workbench 磨粉机减速器箱体动态特性分析·····	李大磊, 代朝磊, 牛鹏辉(92)
汽车人机工程综合评价指标体系研究·····	李银霞, 刘曼曼, 高俊杰(96)
基于局部均值分解的机械振动信号趋势项消除方法·····	赵志科, 张晓光, 王 新(100)

### 化学与材料工程

单分散尺寸可控的聚苯乙烯微球制备·····	张 翔, 魏浩栋, 姚纪蕾, 张 冰(105)
Al-P 中间合金对过共晶铝硅合金组织及切削性能的影响·····	····· 赵红亮, 丁紫阳, 李怀武, 任书卿, 张 洋(109)
哈兹列特连铸连轧 AA5052 铝合金铸嘴挂渣成分及形成机理研究·····	····· 卢广玺, 王 鹏, 关绍康, 周 崇, 贾志翔, 辛萧洋(112)
白酒糟高温好氧堆肥过程中氮素转化规律及堆肥周期探究·····	····· 郭夏丽, 王兴胜, 朱正威, 王 岩(116)
1, 4-丁二醇-二乙二醇二元物系真空下气液平衡研究·····	····· 陈卫航, 李清亚, 蒋元力, 孙书培, 张晓明(120)
地温空调井布局方式对地下水流场和温度场的影响分析·····	····· 窦 明, 张 彦, 米庆彬, 任 辉, 邓元玲, 张华云(124)

CONTENTS

【Computer and Control Engineering】

- The Enhancement of a Chronically implanted Microwire Electrode Performance ..... SHI Li, CHEN Jian-wei, WANG Song-wei (1)
- Switched Dynamic Modeling and Excitation Control of Power Systems ..... LI Jian-yong, ZHAO Feng, DING Qing-qing (6)
- A Novel Vehicles Shadow Removal Method Based on Edge Detection ..... LI Hao-liang, SHUI Qing-he, FAN Wen-bing, YANG Xiao-nan (11)
- Single Image Super-resolution Reconstruction Based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition ..... MAO Xiao-bo, ZHANG Zhi-chao (15)
- Laser Micro Processing System Communication Protocol Design ..... LI Ji-yun, NIU Zhi-ling, PEI Hong-xing (19)
- Design of an Online Power Quality Monitoring Equipment Based on DSP and GPRS ..... ZHOU Yong, ZHU Ming-li, DU Xia, WANG Hong-lin (23)
- The Structurally Distributed Control of Cement Rotary Kiln System ..... CHEN Tie-jun, ZHAO Jie (27)
- Path Planning of Autonomous Robot Considering Attitude Stability in Unknown Environment ..... WANG Dong-shu, ZHU Xun-lin (31)
- Research and Improvement of Streaming Media Live System Based on HLS Protocol ..... LUO Shu-zhen, GENG Heng-shan, XU Xiang-nan, SUN Hao-sai, GAO Yan, LI Qin, XIE Yin (36)
- Two Modeling Methods Equivalent Analysis of the Magnetic Coupling Power Transmission System ..... LI An-xin, ZHANG Jiang-fei, ZHANG Zu-long (40)
- Application of an Improved Chinese Word Segmentation Technology in Topic Search ..... XU Zhi-hong, ZHANG Yue-mei, WANG Yi (44)
- Interval-valued Hesitant Fuzzy WOWA Operator and Its Application in Decision Making ..... CAI Li-na, CHEN Shu-wei, ZHOU Wei, HUANG Hai-bin, LIANG Yu (49)

【Civil and Traffic Engineering】

- Evaluation of Structure and Disturbance of Soft Ground ..... LIU Hai-tao, GUO Yuan-cheng (54)
- Wind Effect Optimization of Portal Frames with Varying Sections Based on ESWLs for Multi-targets ..... WANG Yan-ping, HUANG You-qin, WU Jiu-rong, TANG Yan-teng (59)
- Centrifuge Model Test on the Key Technology of Embankment with Filled Soil Bags ..... WANG Xue-kui, WANG Nian-xiang, GU Xing-wen, ZHU Qun-feng (64)
- Numerical Analysis and Failure Characteristics of Uniaxial Compression for Interlayered Rock Mass ..... JIA Shan-po, LUO Jin-ze, WU Bo, XI Zeng-qiang (69)
- Study on Strengthening Methods of RC Shear Wall with Openings in Service by Bonding Steel Plate ..... ZHAO Geng-qi, LI Qing, QUAN Jiang-wei (74)
- Flexural Behavior of Damaged Composite Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with Inorganic Adhesive ..... CHEN Wei-hong, MA Jing-ming, CUI Shuang-shuang (79)
- Research on Performance of PEG Modified Asphalt ..... GAN Xin-li, ZHANG Nan, LIU Yu (84)
- Experimental Study on the Behavior of Concrete Filled Steel Tubes with Waste Concrete Block Subjected to Axial Load ..... ZHANG Wei-dong, WANG Zhen-bo, SUN Wen-bin (87)

【Mechanical Engineering】

- Dynamic Analysis for the Gearbox of Milling Machine Based on ANSYS Workbench ..... LI Da-lei, DAI Chao-lei, NIU Peng-hui (92)
- Research on the Comprehensive Evaluation Indexes System of Vehicle Ergonomics ..... LI Yin-xia, LIU Man-man, GAO Jun-jie (96)
- Trend Elimination Method of Mechanical Vibration Signal Based on Local Mean Decomposition ..... ZHAO Zhi-ke, ZHANG Xiao-guang, WANG Xin (100)

【Chemical and Material Engineering】

- Preparation of Monodisperse Size-controlled Polystyrene Microspheres by Dispersion Polymerization ..... ZHANG Xiang, WEI Hao-dong, YAO Ji-lei, ZHANG Bing (105)
- Effects of Al-P Master Alloy Modification on Microstructure and Machinability in Hypereutectic Al-Si Alloys ..... ZHAO Hong-liang, DING Zi-yang, LI Huai-wu, REN Shu-qing, ZHANG Yang (109)
- Study on Composition and Mechanism of Nozzle Cavity Slag of Hazelett Continuous Casted and Rolled AA5052 Aluminum Sheet ..... LU Guang-xi, WANG Peng, GUAN Shao-kang, ZHOU Chong, JIA Zhi-xiang, XIN Xiao-yang (112)
- Study of Nitrogen Transformation and Composting Period in High Temperature Aerobic Composting of Vinassee ..... GUO Xia-li, WANG Xing-sheng, ZHU Zheng-wei, WANG Yan (116)
- Study on Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium for the Binary System 1, 4-Butylene glycol- Diethylene Glycol under Vacuum ..... CHEN Wei-hang, LI Qing-ya, JIANG Yuan-li, SUN Shu-pei, ZHANG Xiao-ming (120)
- Impact of Ground Temperature Air-conditioning in Different Layouts on Groundwater Flow Field and Temperature Field ..... DOU Ming, ZHANG Yan, MI Qing-bin, REN Hui, DENG Yuan-ling, ZHANG Hua-yun (124)



本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《万方数据系统》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《工程机械文摘》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《电子科技文摘》

郑州大学学报(工学版)  
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxue Ban)  
双月刊 (1980年创刊)  
第35卷 第5期 总第137期 2014年9月10日

Journal of Zhengzhou University  
(Engineering Science)  
Bimonthly (Started in 1980)  
Vol.35 No.5 Sum No.137 Sep.10, 2014

主管单位 河南省教育厅  
主办单位 郑州大学  
出版单位 《郑州大学学报(工学版)》编辑部  
电子信箱 gxb@zzu.edu.cn  
地 址 河南省郑州市科学大道100号(450001)  
电 话 (0371)67781276 67781277  
主 编 辛世俊  
副 主 编 李秀明  
印刷单位 河南金河印务有限公司  
发行范围 国内外公开发行人  
征 订 处 全国各地邮政局  
发行单位 河南省邮政发行局

Administrated by The Education Department  
of Henan Province  
Sponsored by Zhengzhou University  
Edited & Published by Editorial Board of Journal of  
Zhengzhou University  
E-mail gxb@zzu.edu.cn  
Address No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China  
Telephone (0371)67781276 67781277  
Chief Editor XIN Shi-jun  
Executive Chief Editor LI Xiu-ming  
Printed by Henan Jinhe Printing Co., Ltd.  
Distributed by Publishing Trading Corporation,  
P.O.B.782, Beijing 100011, China

中国标准刊号: ISSN 1671-6833  
CN 41-1339/T

定价: 10.00元

邮发代号: 36-232



电力系统切换动态建模与励磁控制研究

李健勇<sup>1</sup>, 赵 峰<sup>2</sup>, 丁青青<sup>3</sup>

(1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘 要:** 针对紧急情况下切机操作后的励磁控制问题, 建立了 IEEE 三机互联电力系统的切换控制数学模型, 通过预置状态反馈完成了系统的耗散 Hamilton 实现并设计了切换励磁控制器. 将切换子系统的 Hamilton 函数作为多 Lyapunov 函数, 证明了闭环系统在任意切换路径下的渐近稳定性. 仿真结果表明所设计的切换励磁控制器能有效提高电力系统的暂态稳定性.

**关键词:** 电力系统; 切换系统; 耗散 Hamilton 实现; 励磁控制

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.002

0 引言

区域电网互联发展和用电负荷增加使电网事故频频发生, 互联电网大停电带来的巨大社会影响和经济损失迫使世界各国将电力系统安全提升到国家安全的高度. 当电力系统的安全稳定运行条件遭到破坏而进入紧急状态或极端紧急状态时, 需要采取紧急控制措施维持系统的稳定性<sup>[1-3]</sup>.

目前电力系统紧急控制研究主要集中在切机切负荷算法、混杂系统建模和稳定性分析等方面<sup>[4-6]</sup>. 在基于反馈控制的电力系统紧急控制研究中, J. N. Peng 等研究了切机操作与超导储能装置的协调控制问题<sup>[7]</sup>, 文献[8]提出了高压直流输电设备的紧急支援控制策略.

励磁控制是提高电力系统暂态稳定性的重要手段<sup>[9-10]</sup>. 由于 Hamilton 函数方法能够充分利用系统内在的结构特点进行控制器设计, 近年来在电力系统励磁控制研究中得到了成功应用<sup>[11-12]</sup>. 注意到切换子系统的 Hamilton 函数在一定条件下能够构成多 Lyapunov 函数, Zhu 等研究了切换耗散 Hamilton 系统在任意切换路径下的稳定问题, 提出了两机电力系统的切换动态模型和稳定性<sup>[13-14]</sup>.

笔者研究 IEEE 三机互联电力系统在紧急状态下的切换系统建模和励磁控制问题, 建立了电力系统的切换非线性系统模型, 基于耗散 Hamilton 实现设计了切换控制器, 证明了闭环系统的渐近稳定性. 仿真结果验证了笔者所设计切换控制器的有效性.

1 电力系统切换动态模型

图 1 为 IEEE 三机互联电力系统.

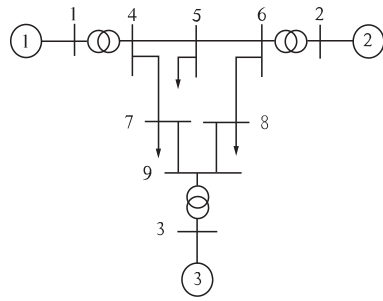


图 1 三机区域互联电力系统结构图  
Fig. 1 Configuration of a three-machine multi-area interconnected power system

假设在紧急情况下, 系统中至少有 1 台发电机工作, 则图 1 所示电力系统可能的工作状态有 7 种.

I. 切除 1 台发电机: (a)  $i = 1, 2; j = 3$ ; (b)  $i$

收稿日期:2014-03-06; 修订日期:2014-06-02  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473265); 河南省教育厅科学技术重点研究项目(13A520379)  
作者简介:李健勇(1969-), 男, 河南孟州人, 郑州轻工业学院, 副教授, 硕士, 主要从事复杂网络控制及电力系统稳定控制研究, E-mail:lijianyong@zzuli.edu.cn.  
通讯作者:赵峰, E-mail:zhaofeng@zzu.edu.cn.

$= 1, 3; j = 2; (c)i = 2, 3; j = 1.$

Ⅱ. 切除2台发电机:  $(e)i = 1; j = 2, 3; (f)i = 2; j = 1, 3; (g)i = 3; j = 1, 2.$

Ⅲ. 3台发电机同时工作:  $(h)i = 1, 2, 3.$

记  $i \in \{1, 2, 3\}$  为发电机编号,  $j \in \{0, 1\}$  表示发电机的运行状态, 其中  $j = 0$  表示电机被切除,  $j = 1$  表示电机联网运行.

(1) 发电机联网运行时, 其动态可表示为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{ij} = \omega_{ij} - \omega_0, \\ \dot{\omega}_{ij} = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi} - \frac{D_i}{M_i} (\omega_{ij} - \omega_0) - \frac{\omega_0}{M_i} P_{eij}, \\ \dot{E}'_{qij} = -\frac{E'_{qij}}{T'_{d0i}} - \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} I_{dij} + \frac{E_{fdij}}{T'_{d0i}}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$P_{eij} = G_{ii} E'^2_{qij} + E'_{qij} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} E'_{qkj} \sin(\delta_{ij} - \delta_{kj}), \quad (2)$$

$$I_{dij} = -E'_{qij} B_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} E'_{qkj} \cos(\delta_{ij} - \delta_{kj}). \quad (3)$$

式中:  $\delta_{ij}$  为发电机功角;  $\omega_{ij}$  为转子角速度;  $\omega_0$  为转子同步角速度;  $P_{mi}$  为机械功率;  $P_{eij}$  为电磁功率;  $M_i$  为转动惯量;  $D_i$  为阻尼系数;  $E'_{qij}$  为  $x'_{di}$  后电势;  $T'_{d0i}$  为  $d$  轴开环暂态时间常数;  $x_{di}$  和  $x'_{di}$  分别为  $d$  轴电抗和暂态电抗;  $I_{dij}$  为  $d$  轴电流;  $G_{ii}$  和  $B_{ii}$  分别为第  $i$  台发电机节点电导和电纳;  $B_{ik}$  为第  $i$  台和第  $k$  台发电机节点互电纳;  $E_{fdij}$  为励磁电压.

(2) 当发电机被切除时, 其动态可以表示为

$$\dot{\delta}_{ij} = 0, \dot{\omega}_{ij} = 0, \dot{E}'_{qij} = 0. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_{1j1}, x_{1j2}, x_{1j3}; x_{2j1}, x_{2j2}, x_{2j3}; x_{3j1}, x_{3j2}, x_{3j3}]^T \\ &= [\delta_{1j}, \omega_{1j} - \omega_0, E'_{q1j}; \delta_{2j}, \omega_{2j} - \omega_0, E'_{q2j}; \\ &\quad \delta_{3j}, \omega_{3j} - \omega_0, E'_{q3j}]^T, \end{aligned}$$

$$\mathbf{f}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) = [f_{1j1}(\mathbf{x}), f_{1j2}(\mathbf{x}), f_{1j3}(\mathbf{x}); f_{2j1}(\mathbf{x}), f_{2j2}(\mathbf{x}), f_{2j3}(\mathbf{x}); f_{3j1}(\mathbf{x}), f_{3j2}(\mathbf{x}), f_{3j3}(\mathbf{x})]^T$$

$$\mathbf{g}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) = [g_{1j}, g_{2j}, g_{3j}]^T$$

其中: 当  $j = 1$  时,  $f_{ij1}(\mathbf{x}) = \omega_{ij} - \omega_0$ ,  $f_{ij2}(\mathbf{x}) = \frac{\omega_0}{M_i} (P_{mi} - P_{eij}) - \frac{D_i}{M_i} (\omega_{ij} - \omega_0)$ ,  $f_{ij3}(\mathbf{x}) = -\frac{E'_{qij}}{T'_{d0i}} -$

$$\frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} I_{dij}, \mathbf{g}_{1j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{g}_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_{3j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \text{当 } j = 0 \text{ 时, } f_{ij1} = 0, f_{ij2} = 0, f_{ij3} =$$

$$0, g_{ij} = 0_{3 \times 3}. \mathbf{u} = [u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}]^T, u_{ij} = \frac{E_{fdij}}{T'_{d0i}}. \text{ 同时}$$

为书写方便, 令  $a_i = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi}$ ,  $b_i = \frac{D_i}{M_i}$ ,  $c_i = \frac{\omega_0}{M_i} G_{ii}$ ,  $d_i = \frac{\omega_0}{M_i}$ ,  $e_i = \frac{1}{T'_{d0i}}$ ,  $h_i = \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}}$ . 综合式(1) ~ (4)

可以得到三机互联电力系统的切换非线性数学模型

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_{\lambda(t)} \mathbf{u}. \quad (5)$$

式中:  $\lambda(t): [t_0, +\infty) \rightarrow \Lambda = \{1, \dots, 7\}$  为切换路径.

## 2 耗散 Hamilton 实现

采用 Hamilton 函数方法对系统进行稳定性分析和控制器设计的关键步骤是完成受控系统的耗散实现.

定义1 考虑切换非线性系统(5), 如果存在连续可微函数  $H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  使得系统为

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J}_{\lambda(t)} - \mathbf{R}_{\lambda(t)}) \frac{\partial H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) \mathbf{u}. \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{J}_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  为反对称矩阵;  $\mathbf{R}_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  为半正定矩阵, 则系统(6)称为系统的耗散 Hamilton 实现,  $H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  称为切换子系统的 Hamilton 函数.

为完成电力系统切换数学模型的耗散 Hamilton 实现, 引入预置状态反馈控制<sup>[12]</sup>

$$u_{ij} = -\frac{2c_i h_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + v_{ij}. \quad (7)$$

则在预置反馈控制(7)作用下, 系统动态可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij1} = x_{ij2}, \\ \dot{x}_{ij2} = a_i - b_i x_{ij2} - c_i x_{ij3}^2 - d_i x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \sin(x_{ij1} - x_{kj1}), \\ \dot{x}_{ij3} = -(e_i + h_i B_{ii}) x_{ij3} + v_{ij} + h_i \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}). \end{cases} \quad (8)$$

选择子系统的 Hamilton 函数为

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^3 \left[ -\frac{a_i}{b_i} x_{ij1} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3}^2 + \frac{1}{2d_i} x_{ij2}^2 + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{2h_i} x_{ij3}^2 \right] - \sum_{i=1}^3 x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}). \end{aligned} \quad (9)$$

则当  $j = 1$  时, 有

$$\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial x_{ij1}} = -\frac{a_i}{d_i} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij3}^2 + x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \sin(x_{ij1} - x_{kj1}), \quad (10)$$

$$\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial x_{ij2}} = \frac{1}{d_i} x_{ij2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij3}} = 2 \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} x_{ij3} - \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}); \quad (12)$$

当  $j = 0$  时,有

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij1}} = 0, \frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij2}} = 0, \frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij3}} = 0. \quad (13)$$

从而电力系统切换数学模型可以转化为

$$\dot{x} = [J_{\lambda(t)} - R_{\lambda(t)}] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_{\lambda(t)} u, \quad (14)$$

其中:  $J_{\lambda(t)} = \text{diag}\{J_{ij}(x), J_{ij}(x), J_{ij}(x)\}$ ,  $R_{\lambda(t)} = \text{diag}\{R_{ij}(x), R_{ij}(x), R_{ij}(x)\}$ .

当  $j = 1$  时,

$$\begin{cases} J_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 0 & d_i & 0 \\ -d_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ R_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_i d_i & 0 \\ 0 & 0 & h_i \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (15)$$

当  $j = 0$  时,

$$J_{ij}(x) = 0, R_{ij}(x) = 0. \quad (16)$$

显然  $J_{\lambda(t)}$  为反对称矩阵,  $R_{\lambda(t)}$  为半正定矩阵,故(14)为系统的耗散 Hamilton 实现.

### 3 切换励磁控制器设计

基于电力系统切换数学模型的耗散 Hamilton 实现,可以利用各切换子系统的 Hamilton 函数构成多 Lyapunov 函数,并结合系统结构特性设计反馈控制器.具体地,选择切换控制器

$$v = -K g_{\lambda(t)}^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} = -K \begin{bmatrix} 2 \frac{c_1}{d_1} x_{1j1} x_{1j3} + \frac{e_1 + h_1 B_{11}}{h_1} x_{1j3} - \sum_{k=1, k \neq 1}^3 B_{1k} x_{kj3} \cos(x_{1j1} - x_{kj1}) \\ 2 \frac{c_2}{d_2} x_{2j1} x_{2j3} + \frac{e_2 + h_2 B_{22}}{h_2} x_{2j3} - \sum_{k=1, k \neq 2}^3 B_{2k} x_{kj3} \cos(x_{2j1} - x_{kj1}) \\ 2 \frac{c_3}{d_3} x_{3j1} x_{3j3} + \frac{e_3 + h_3 B_{33}}{h_3} x_{3j3} - \sum_{k=1, k \neq 3}^3 B_{3k} x_{kj3} \cos(x_{3j1} - x_{kj1}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中:  $j = 1, K = \text{diag}\{k_1, k_2, k_3\} > 0$  为反馈增益

矩阵.考虑到预置状态反馈(7),原系统的励磁控制器为

$$u_i = -\frac{2c_i h_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} - k_i \left[ 2 \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} x_{ij3} - \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}) \right]. \quad (18)$$

在上述反馈控制器作用下,闭环系统成为

$$\dot{x} = [J_{\lambda(t)} - (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T)] \frac{\partial H(x)}{\partial x}. \quad (19)$$

为分析闭环系统稳定性,首先对切换耗散 Hamilton 系统给出下面一般性结论<sup>[13]</sup>.

**假设 1** 对切换耗散 Hamilton 系统(6),如果  $\forall i \neq j \in \Lambda, \forall x, y \in R^n, \Delta H_i = H_i(x) - H_i(y)$  和  $\Delta H_j = H_j(x) - H_j(y)$  具有相同符号,即  $\text{sign}(\Delta H_i) = \text{sign}(\Delta H_j)$ ,所有的 Hamilton 函数具有相同的变化趋势.

**引理 1** 对切换耗散 Hamilton 系统(6),若假设 1 成立,则系统在任意切换路径  $\lambda(t)$  下稳定.

若对  $\forall i \in \Lambda, R_i(x) \geq 0$ ,存在  $l \in \Lambda$  使得:①第  $l$  子系统关于  $y_l = R^{\frac{1}{2}}(x)$  零状态可检测;②

对任意正数  $c > 0$ ,集合  $D_c^l = \{x \in R^n \mid H_l(x) = c, R^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial H_l}{\partial x} = 0\}$  是一有限集,则系统(6)在任意切换路径下渐近稳定.

对电力系统,注意到在控制律(18)作用下,对所有子系统有

$$\begin{aligned} \dot{H}(x) &= \left( \frac{\partial H(x)}{\partial x} \right)^T [J_{\lambda(t)} - (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} \\ &= - \left( \frac{\partial H(x)}{\partial x} \right)^T (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \leq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

故所有子系统的 Hamilton 函数都具有相同的变化趋势,满足假设 1,系统在任意切换路径下稳定.

下面以电机全部并网运行时的子系统为例分析系统的渐近稳定性.首先对该子系统,有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{111} & \dot{x}_{112} & \dot{x}_{113} & \dot{x}_{211} & \dot{x}_{212} & \dot{x}_{213} & \dot{x}_{311} & \dot{x}_{312} & \dot{x}_{313} \end{bmatrix}^T = [J - R] \frac{\partial H}{\partial x} + g u. \quad (21)$$

其中:  $J = \text{diag}\{J_{11}, J_{21}, J_{31}\}$ ;  $R = \text{diag}\{R_{11}, R_{21}, R_{31}\}$ ;  $g = \text{diag}\{g_{11}, g_{21}, g_{31}\}$ ;  $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ .

令  $x_e = (\delta_{1e}, \omega_0, E'_{1qe}, \delta_{2e}, \omega_0, E'_{2qe}, \delta_{3e}, \omega_0, E'_{3qe})^T$  为系统的平衡点,将系统状态作如下变量



代换  $x = x' + x_e$ . 为简便起见,将  $x'$  仍记为  $x$ .

可以验证子系统关于  $y = R^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial H}{\partial x}$  零状态可检测. 实际上,该式可以表示为

$$\begin{cases} x_{ij2} = 0, \\ 2 \frac{c_i}{d_i} (x_{ij1} + \delta_{ie}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) + \\ \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} (x_{ij3} + E'_{iqe}) - \\ \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \cos[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})] = 0. \end{cases} \quad (22)$$

其中  $i = 1, 2, 3, j = 1$ .

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij1} = 0, \\ \dot{x}_{ij2} = a_i - c_i (x_{ij3} + E'_{iqe})^2 - d_i (x_{ij3} + E'_{iqe}) \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \sin[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})], \\ \dot{x}_{ij3} = -\frac{2c_i h_i}{d_i} (x_{ij1} + \delta_{ie}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) - (e_i + h_i B_{ii}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) + h_i \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \cos[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})]. \end{cases} \quad (23)$$

由式(22)和式(23)可得  $x \equiv x_e$ , 该子系统零状态可检测. 进一步,对任意  $c > 0$ ,式(22)和

$$\begin{aligned} H(x) = & - \sum_{i=1}^3 x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}) + \\ & \sum_{i=1}^3 \left( -\frac{a_i}{b_i} x_{ij1} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij1}^2 + \frac{1}{2d_i} x_{ij2}^2 + \right. \\ & \left. \frac{e_i + h_i B_{ii}}{2h_i} x_{ij3}^2 \right) = c. \end{aligned} \quad (24)$$

的解集为有限集,故闭环系统渐近稳定.

4 仿真

为验证笔者所设计的切换控制器的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建 IEEE 三机系统进行仿真研究. 发电机的容量分别为  $S_{M1} = 5\,000\text{ MVA}$ ,  $S_{M2} = 1\,000\text{ MVA}$ ,  $S_{M3} = 3\,000\text{ MVA}$ . 第 5, 7, 8 节点上的负荷容量分别为  $S_5 = 3\,000\text{ MVA}$ ,  $S_7 = 2\,900\text{ MVA}$ ,  $S_8 = 400\text{ MVA}$ . 发电机参数如表 1 所示.

表 1 发电机参数

Tab. 1 Generator parameters

发电机	$x_d/\text{p. u.}$	$x'_d/\text{p. u.}$	$x_q/\text{p. u.}$	$M/\text{s}$	$T'_{d0}/\text{s}$
1	1.305	0.296	0.474	3.7	1.01
2	1.863	0.257	0.578	4.5	1.51
3	1.863	0.257	0.578	4.5	1.51

假设系统在  $t = 0\text{ s}$  时联网运行,第 3 台电机由于故障在 5 s 时切除. 仿真结果如图 2 和图 3 所示.

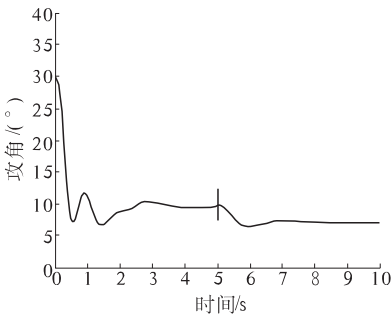


图 2 切机前后功角响应曲线  
Fig. 2 Response of the rotor angle

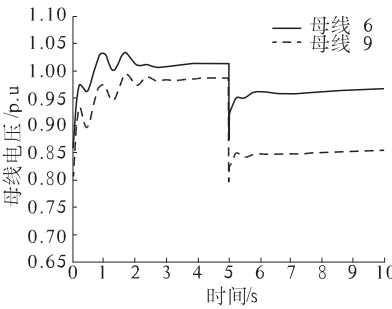


图 3 切机前后母线电压响应曲线  
Fig. 3 Responses of the bus voltages

从仿真结果可知,笔者所设计的控制器在电力系统发生切机操作时能有效提高系统的稳定性.

5 结论

研究了 IEEE 三机电力系统发生切机操作时的励磁控制问题. 首先建立了系统的切换非线性系统控制数学模型,通过预置状态反馈完成了系统的耗散 Hamilton 实现,然后基于切换 Hamilton 系统理论设计了状态反馈切换励磁控制器,分析了闭环系统的稳定性. 仿真结果表明笔者所设计的控制器能有效提高系统的暂态稳定性. 笔者所提建模与控制器设计方法可以方便地推广到大型多机系统.

## 参考文献:

- [1] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-5.
- [2] DANIEL R V, PAVELLA M. A comprehensive approach to transient stability control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1446-1460.
- [3] 林舜江, 刘明波, 周欣, 等. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.
- [4] ZHANG Xue-min, MEI Sheng-wei, WU Sheng-yu. Transient stability and emergency control[J], Science in China, Series E: Technological Science, 2009, 52(2): 420-428.
- [5] 刘凯, 彭志炜, 黄忠, 等. 基于混和逻辑动态模型的混杂电力系统及其电压稳定性分析方法研究[J]. 继电器, 2008, 36(10): 15-18.
- [6] YU Yi-xin, WANG Dong-tao. Dynamic security risk assessment and optimization of power transmission system[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2008, 51(6): 713-723.
- [7] PENG J N, SUN Y Z, WANG H F. Co-ordinated emergency control of generator-tripping and SMES based on Hamiltonian system theory[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(5-6): 352-360.
- [8] LI X Y. A nonlinear emergency control strategy for HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 153-159.
- [9] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 4-20.
- [10] 刘宪林, 杨建, 王明东. 励磁控制系统灰色预测 PID 控制仿真研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 70-72.
- [11] 刘艳红, 宋伟华, 王杰. 包含 SVC 和非线性负荷的电力系统耗散实现与控制[J], 控制理论与应用, 2010, 27(1): 47-52.
- [12] WANG Y, CHENG D, LI C, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based  $L_2$  disturbance attenuation control of multi-machine power systems[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2003, 48(8): 1428-1433.
- [13] ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen. Study on the stability of switched dissipative Hamiltonian systems[J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2006, 49(5): 578-591.
- [14] ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen. On the modeling and stability analysis of switched two-machine power systems[C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, Chongqing, China: 7192-7197.

## Switched Dynamic Modeling and Excitation Control of Power Systems

LI Jian-yong<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>2</sup>, DING Qing-qing<sup>3</sup>

(1. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The excitation control of power systems under generator tripping emergency measurement is investigated. First, a switched dynamic model for a typical IEEE three-machine multi-area power system is developed. Then, the switched power system is transformed to an equivalent switched dissipative Hamiltonian system via pre-feedback control. A state feedback switching controller is constructed based on the dissipative Hamiltonian realization. Using the Hamiltonian functions of the subsystems as multiple Lyapunov functions, it is shown that the closed-loop system is asymptotically stable under arbitrary switching path. Simulation results demonstrate that the proposed controller can effectively improve the transient stability of the power system.

**Key words:** power system; switched system; dissipative Hamiltonian realization; excitation control

电力系统切换动态建模与励磁控制研究

李健勇<sup>1</sup>, 赵 峰<sup>2</sup>, 丁青青<sup>3</sup>

(1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

**摘 要:** 针对紧急情况下切机操作后的励磁控制问题, 建立了 IEEE 三机互联电力系统的切换控制数学模型, 通过预置状态反馈完成了系统的耗散 Hamilton 实现并设计了切换励磁控制器. 将切换子系统的 Hamilton 函数作为多 Lyapunov 函数, 证明了闭环系统在任意切换路径下的渐近稳定性. 仿真结果表明所设计的切换励磁控制器能有效提高电力系统的暂态稳定性.

**关键词:** 电力系统; 切换系统; 耗散 Hamilton 实现; 励磁控制

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.002

0 引言

区域电网互联发展和用电负荷增加使电网事故频频发生, 互联电网大停电带来的巨大社会影响和经济损失迫使世界各国将电力系统安全提升到国家安全的高度. 当电力系统的安全稳定运行条件遭到破坏而进入紧急状态或极端紧急状态时, 需要采取紧急控制措施维持系统的稳定性<sup>[1-3]</sup>.

目前电力系统紧急控制研究主要集中在切机切负荷算法、混杂系统建模和稳定性分析等方面<sup>[4-6]</sup>. 在基于反馈控制的电力系统紧急控制研究中, J. N. Peng 等研究了切机操作与超导储能装置的协调控制问题<sup>[7]</sup>, 文献<sup>[8]</sup>提出了高压直流输电设备的紧急支援控制策略.

励磁控制是提高电力系统暂态稳定性的重要手段<sup>[9-10]</sup>. 由于 Hamilton 函数方法能够充分利用系统内在的结构特点进行控制器设计, 近年来在电力系统励磁控制研究中得到了成功应用<sup>[11-12]</sup>. 注意到切换子系统的 Hamilton 函数在一定条件下能够构成多 Lyapunov 函数, Zhu 等研究了切换耗散 Hamilton 系统在任意切换路径下的稳定问题, 提出了两机电力系统的切换动态模型和稳定性<sup>[13-14]</sup>.

笔者研究 IEEE 三机互联电力系统在紧急状态下的切换系统建模和励磁控制问题, 建立了电力系统的切换非线性系统模型, 基于耗散 Hamilton 实现设计了切换控制器, 证明了闭环系统的渐近稳定性. 仿真结果验证了笔者所设计切换控制器的有效性.

1 电力系统切换动态模型

图 1 为 IEEE 三机互联电力系统.

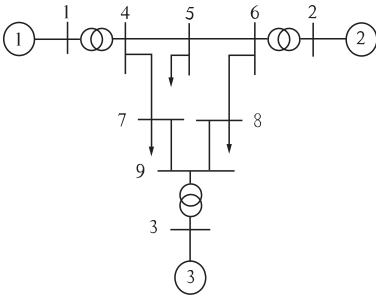


图 1 三机区域互联电力系统结构图  
Fig. 1 Configuration of a three-machine multi-area interconnected power system

假设在紧急情况下, 系统中至少有 1 台发电机工作, 则图 1 所示电力系统可能的工作状态有 7 种.

I. 切除 1 台发电机: (a)  $i = 1, 2; j = 3$ ; (b)  $i$

收稿日期:2014-03-06; 修订日期:2014-06-02  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473265); 河南省教育厅科学技术重点研究项目(13A520379)  
作者简介:李健勇(1969-), 男, 河南孟州人, 郑州轻工业学院, 副教授, 硕士, 主要从事复杂网络控制及电力系统稳定控制研究, E-mail:lijianyong@zzuli.edu.cn.  
通讯作者:赵峰, E-mail:zhaofeng@zzu.edu.cn.



$= 1, 3; j = 2; (c)i = 2, 3; j = 1.$

Ⅱ. 切除2台发电机:  $(e)i = 1; j = 2, 3; (f)i = 2; j = 1, 3; (g)i = 3; j = 1, 2.$

Ⅲ. 3台发电机同时工作:  $(h)i = 1, 2, 3.$

记  $i \in \{1, 2, 3\}$  为发电机编号,  $j \in \{0, 1\}$  表示发电机的运行状态, 其中  $j = 0$  表示电机被切除,  $j = 1$  表示电机联网运行.

(1) 发电机联网运行时, 其动态可表示为

$$\begin{cases} \dot{\delta}_{ij} = \omega_{ij} - \omega_0, \\ \dot{\omega}_{ij} = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi} - \frac{D_i}{M_i} (\omega_{ij} - \omega_0) - \frac{\omega_0}{M_i} P_{eij}, \\ \dot{E}'_{qij} = -\frac{E'_{qij}}{T'_{d0i}} - \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} I_{dij} + \frac{E_{fdij}}{T'_{d0i}}. \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$P_{eij} = G_{ii} E'^2_{qij} + E'_{qij} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} E'_{qkj} \sin(\delta_{ij} - \delta_{kj}), \quad (2)$$

$$I_{dij} = -E'_{qij} B_{ii} + \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} E'_{qkj} \cos(\delta_{ij} - \delta_{kj}). \quad (3)$$

式中:  $\delta_{ij}$  为发电机功角;  $\omega_{ij}$  为转子角速度;  $\omega_0$  为转子同步角速度;  $P_{mi}$  为机械功率;  $P_{eij}$  为电磁功率;  $M_i$  为转动惯量;  $D_i$  为阻尼系数;  $E'_{qij}$  为  $x'_{di}$  后电势;  $T'_{d0i}$  为  $d$  轴开环暂态时间常数;  $x_{di}$  和  $x'_{di}$  分别为  $d$  轴电抗和暂态电抗;  $I_{dij}$  为  $d$  轴电流;  $G_{ii}$  和  $B_{ii}$  分别为第  $i$  台发电机节点电导和电纳;  $B_{ik}$  为第  $i$  台和第  $k$  台发电机节点互电纳;  $E_{fdij}$  为励磁电压.

(2) 当发电机被切除时, 其动态可以表示为

$$\dot{\delta}_{ij} = 0, \dot{\omega}_{ij} = 0, \dot{E}'_{qij} = 0. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_{1j1}, x_{1j2}, x_{1j3}; x_{2j1}, x_{2j2}, x_{2j3}; x_{3j1}, x_{3j2}, x_{3j3}]^T \\ &= [\delta_{1j}, \omega_{1j} - \omega_0, E'_{q1j}; \delta_{2j}, \omega_{2j} - \omega_0, E'_{q2j}; \\ &\quad \delta_{3j}, \omega_{3j} - \omega_0, E'_{q3j}]^T, \end{aligned}$$

$$\mathbf{f}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) = [f_{1j1}(\mathbf{x}), f_{1j2}(\mathbf{x}), f_{1j3}(\mathbf{x}); f_{2j1}(\mathbf{x}), f_{2j2}(\mathbf{x}), f_{2j3}(\mathbf{x}); f_{3j1}(\mathbf{x}), f_{3j2}(\mathbf{x}), f_{3j3}(\mathbf{x})]^T$$

$$\mathbf{g}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) = [g_{1j}, g_{2j}, g_{3j}]^T$$

其中: 当  $j = 1$  时,  $f_{ij1}(\mathbf{x}) = \omega_{ij} - \omega_0$ ,  $f_{ij2}(\mathbf{x}) = \frac{\omega_0}{M_i} (P_{mi} - P_{eij}) - \frac{D_i}{M_i} (\omega_{ij} - \omega_0)$ ,  $f_{ij3}(\mathbf{x}) = -\frac{E'_{qij}}{T'_{d0i}} -$

$$\frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}} I_{dij}, \mathbf{g}_{1j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{g}_{2j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_{3j} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \text{当 } j = 0 \text{ 时, } f_{ij1} = 0, f_{ij2} = 0, f_{ij3} =$$

$$0, g_{ij} = 0_{3 \times 3}. \mathbf{u} = [u_{1j}, u_{2j}, u_{3j}]^T, u_{ij} = \frac{E_{fdij}}{T'_{d0i}}. \text{ 同时}$$

为书写方便, 令  $a_i = \frac{\omega_0}{M_i} P_{mi}$ ,  $b_i = \frac{D_i}{M_i}$ ,  $c_i = \frac{\omega_0}{M_i} G_{ii}$ ,  $d_i = \frac{\omega_0}{M_i}$ ,  $e_i = \frac{1}{T'_{d0i}}$ ,  $h_i = \frac{x_{di} - x'_{di}}{T'_{d0i}}$ . 综合式(1) ~ (4)

可以得到三机互联电力系统的切换非线性数学模型

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_{\lambda(t)} \mathbf{u}. \quad (5)$$

式中:  $\lambda(t): [t_0, +\infty) \rightarrow \Lambda = \{1, \dots, 7\}$  为切换路径.

## 2 耗散 Hamilton 实现

采用 Hamilton 函数方法对系统进行稳定性分析和控制器设计的关键步骤是完成受控系统的耗散实现.

定义1 考虑切换非线性系统(5), 如果存在连续可微函数  $H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  使得系统为

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{J}_{\lambda(t)} - \mathbf{R}_{\lambda(t)}) \frac{\partial H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}_{\lambda(t)}(\mathbf{x}) \mathbf{u}. \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{J}_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  为反对称矩阵;  $\mathbf{R}_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  为半正定矩阵, 则系统(6)称为系统的耗散 Hamilton 实现,  $H_{\lambda(t)}(\mathbf{x})$  称为切换子系统的 Hamilton 函数.

为完成电力系统切换数学模型的耗散 Hamilton 实现, 引入预置状态反馈控制<sup>[12]</sup>

$$u_{ij} = -\frac{2c_i h_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + v_{ij}. \quad (7)$$

则在预置反馈控制(7)作用下, 系统动态可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij1} = x_{ij2}, \\ \dot{x}_{ij2} = a_i - b_i x_{ij2} - c_i x_{ij3}^2 - d_i x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \sin(x_{ij1} - x_{kj1}), \\ \dot{x}_{ij3} = -(e_i + h_i B_{ii}) x_{ij3} + v_{ij} + h_i \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}). \end{cases} \quad (8)$$

选择子系统的 Hamilton 函数为

$$\begin{aligned} H(\mathbf{x}) &= \sum_{i=1}^3 \left[ -\frac{a_i}{b_i} x_{ij1} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3}^2 + \frac{1}{2d_i} x_{ij2}^2 + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{2h_i} x_{ij3}^2 \right] - \sum_{i=1}^3 x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}). \end{aligned} \quad (9)$$

则当  $j = 1$  时, 有

$$\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial x_{ij1}} = -\frac{a_i}{d_i} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij3}^2 + x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \sin(x_{ij1} - x_{kj1}), \quad (10)$$

$$\frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial x_{ij2}} = \frac{1}{d_i} x_{ij2}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij3}} = 2 \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} x_{ij3} - \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}); \quad (12)$$

当  $j = 0$  时,有

$$\frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij1}} = 0, \frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij2}} = 0, \frac{\partial H(x)}{\partial x_{ij3}} = 0. \quad (13)$$

从而电力系统切换数学模型可以转化为

$$\dot{x} = [J_{\lambda(t)} - R_{\lambda(t)}] \frac{\partial H(x)}{\partial x} + g_{\lambda(t)} u, \quad (14)$$

其中:  $J_{\lambda(t)} = \text{diag}\{J_{ij}(x), J_{ij}(x), J_{ij}(x)\}$ ,  $R_{\lambda(t)} = \text{diag}\{R_{ij}(x), R_{ij}(x), R_{ij}(x)\}$ .

当  $j = 1$  时,

$$\begin{cases} J_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 0 & d_i & 0 \\ -d_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ R_{ij}(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_i d_i & 0 \\ 0 & 0 & h_i \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (15)$$

当  $j = 0$  时,

$$J_{ij}(x) = 0, R_{ij}(x) = 0. \quad (16)$$

显然  $J_{\lambda(t)}$  为反对称矩阵,  $R_{\lambda(t)}$  为半正定矩阵,故(14)为系统的耗散 Hamilton 实现.

### 3 切换励磁控制器设计

基于电力系统切换数学模型的耗散 Hamilton 实现,可以利用各切换子系统的 Hamilton 函数构成多 Lyapunov 函数,并结合系统结构特性设计反馈控制器.具体地,选择切换控制器

$$v = -K g_{\lambda(t)}^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} = -K \begin{bmatrix} 2 \frac{c_1}{d_1} x_{1j1} x_{1j3} + \frac{e_1 + h_1 B_{11}}{h_1} x_{1j3} - \sum_{k=1, k \neq 1}^3 B_{1k} x_{kj3} \cos(x_{1j1} - x_{kj1}) \\ 2 \frac{c_2}{d_2} x_{2j1} x_{2j3} + \frac{e_2 + h_2 B_{22}}{h_2} x_{2j3} - \sum_{k=1, k \neq 2}^3 B_{2k} x_{kj3} \cos(x_{2j1} - x_{kj1}) \\ 2 \frac{c_3}{d_3} x_{3j1} x_{3j3} + \frac{e_3 + h_3 B_{33}}{h_3} x_{3j3} - \sum_{k=1, k \neq 3}^3 B_{3k} x_{kj3} \cos(x_{3j1} - x_{kj1}) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

其中:  $j = 1, K = \text{diag}\{k_1, k_2, k_3\} > 0$  为反馈增益

矩阵.考虑到预置状态反馈(7),原系统的励磁控制器为

$$u_i = -\frac{2c_i h_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} - k_i \left[ 2 \frac{c_i}{d_i} x_{ij1} x_{ij3} + \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} x_{ij3} - \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}) \right]. \quad (18)$$

在上述反馈控制器作用下,闭环系统成为

$$\dot{x} = [J_{\lambda(t)} - (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T)] \frac{\partial H(x)}{\partial x}. \quad (19)$$

为分析闭环系统稳定性,首先对切换耗散 Hamilton 系统给出下面一般性结论<sup>[13]</sup>.

**假设 1** 对切换耗散 Hamilton 系统(6),如果  $\forall i \neq j \in \Lambda, \forall x, y \in R^n, \Delta H_i = H_i(x) - H_i(y)$  和  $\Delta H_j = H_j(x) - H_j(y)$  具有相同符号,即  $\text{sign}(\Delta H_i) = \text{sign}(\Delta H_j)$ ,所有的 Hamilton 函数具有相同的变化趋势.

**引理 1** 对切换耗散 Hamilton 系统(6),若假设 1 成立,则系统在任意切换路径  $\lambda(t)$  下稳定.

若对  $\forall i \in \Lambda, R_i(x) \geq 0$ ,存在  $l \in \Lambda$  使得:①第  $l$  子系统关于  $y_l = R^{\frac{1}{2}}(x)$  零状态可检测;②

对任意正数  $c > 0$ ,集合  $D_c^l = \{x \in R^n \mid H_l(x) = c, R^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial H_l}{\partial x} = 0\}$  是一有限集,则系统(6)在任意切换路径下渐近稳定.

对电力系统,注意到在控制律(18)作用下,对所有子系统有

$$\begin{aligned} \dot{H}(x) &= \left( \frac{\partial H(x)}{\partial x} \right)^T [J_{\lambda(t)} - (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T)] \frac{\partial H(x)}{\partial x} \\ &= - \left( \frac{\partial H(x)}{\partial x} \right)^T (R_{\lambda(t)} + K g_{\lambda(t)} g_{\lambda(t)}^T) \frac{\partial H(x)}{\partial x} \leq 0. \end{aligned} \quad (20)$$

故所有子系统的 Hamilton 函数都具有相同的变化趋势,满足假设 1,系统在任意切换路径下稳定.

下面以电机全部并网运行时的子系统为例分析系统的渐近稳定性.首先对该子系统,有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{111} & \dot{x}_{112} & \dot{x}_{113} & \dot{x}_{211} & \dot{x}_{212} & \dot{x}_{213} & \dot{x}_{311} & \dot{x}_{312} & \dot{x}_{313} \end{bmatrix}^T = [J - R] \frac{\partial H}{\partial x} + g u. \quad (21)$$

其中:  $J = \text{diag}\{J_{11}, J_{21}, J_{31}\}$ ;  $R = \text{diag}\{R_{11}, R_{21}, R_{31}\}$ ;  $g = \text{diag}\{g_{11}, g_{21}, g_{31}\}$ ;  $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ .

令  $x_e = (\delta_{1e}, \omega_0, E'_{1qe}, \delta_{2e}, \omega_0, E'_{2qe}, \delta_{3e}, \omega_0, E'_{3qe})^T$  为系统的平衡点,将系统状态作如下变量

代换  $x = x' + x_e$ . 为简便起见,将  $x'$  仍记为  $x$ .

可以验证子系统关于  $y = R^{\frac{1}{2}}(x) \frac{\partial H}{\partial x}$  零状态可检测. 实际上,该式可以表示为

$$\begin{cases} x_{ij2} = 0, \\ 2 \frac{c_i}{d_i} (x_{ij1} + \delta_{ie}) (x_{ij3} + E'_{iqe}) + \\ \frac{e_i + h_i B_{ii}}{h_i} (x_{ij3} + E'_{iqe}) - \\ \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{kqe}) \cos[(x_{ij1} - \\ x_{kj1}) - (\delta_{ke} - \delta_{ie})] = 0. \end{cases} \quad (22)$$

其中  $i = 1, 2, 3, j = 1$ .

此外,经变量置换后该子系统可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij1} = 0, \\ \dot{x}_{ij2} = a_i - c_i (\frac{x}{ij3} +)^2 - d_i (x_{ij3} + \\ E'_{i3e}) \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{k3e}) \\ \sin[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{k1e} - \delta_{i1e})], \\ \dot{x}_{ij3} = - \frac{2c_i h_i}{d_i} (x_{ij1} + \delta_{ie}) (x_{ij3} + E'_{i3e}) - \\ (e_i + h_i B_{ii}) (x_{ij3} + E'_{i3e}) + \\ h_i \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} (x_{kj3} + E'_{k3e}) \\ \cos[(x_{ij1} - x_{kj1}) - (\delta_{k1e} - \delta_{i1e})]. \end{cases} \quad (23)$$

由式(22)和式(23)可得  $x \equiv x_e$ ,该子系统零状态可检测. 进一步,对任意  $c > 0$ ,式(22)和

$$H(x) = - \sum_{i=1}^3 x_{ij3} \sum_{k=1, k \neq i}^3 B_{ik} x_{kj3} \cos(x_{ij1} - x_{kj1}) + \\ \sum_{i=1}^3 \left( - \frac{a_i}{b_i} x_{ij1} + \frac{c_i}{d_i} x_{ij1}^2 + \frac{1}{2d_i} x_{ij2}^2 + \right. \\ \left. \frac{e_i + h_i B_{ii}}{2h_i} x_{ij3}^2 \right) = c. \quad (24)$$

的解集为有限集,故闭环系统渐近稳定.

4 仿真

为验证笔者所设计的切换控制器的有效性,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建 IEEE 三机系统进行仿真研究. 发电机的容量分别为  $S_{M1} = 5\,000\text{ MVA}$ ,  $S_{M2} = 1\,000\text{ MVA}$ ,  $S_{M3} = 3\,000\text{ MVA}$ . 第 5, 7, 8 节点上的负荷容量分别为  $S_5 = 3\,000\text{ MVA}$ ,  $S_7 = 2\,900\text{ MVA}$ ,  $S_8 = 400\text{ MVA}$ . 发电机参数如表 1 所示.

表 1 发电机参数

Tab. 1 Generator parameters

发电机	$x_d/\text{p. u.}$	$x'_d/\text{p. u.}$	$x_q/\text{p. u.}$	$M/\text{s}$	$T'_{d0}/\text{s}$
1	1.305	0.296	0.474	3.7	1.01
2	1.863	0.257	0.578	4.5	1.51
3	1.863	0.257	0.578	4.5	1.51

假设系统在  $t = 0\text{ s}$  时联网运行,第 3 台电机由于故障在  $5\text{ s}$  时切除. 仿真结果如图 2 和图 3 所示.

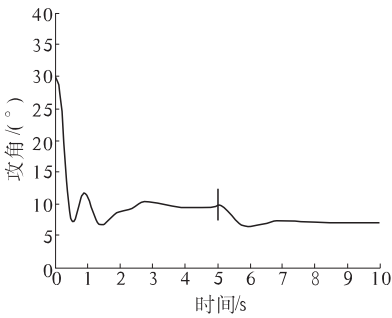


图 2 切机前后功角响应曲线  
Fig. 2 Response of the rotor angle

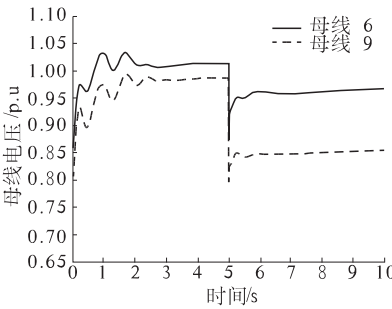


图 3 切机前后母线电压响应曲线  
Fig. 3 Responses of the bus voltages

从仿真结果可知,笔者所设计的控制器在电力系统发生切机操作时能有效提高系统的稳定性.

5 结论

研究了 IEEE 三机电力系统发生切机操作时的励磁控制问题. 首先建立了系统的切换非线性系统控制数学模型,通过预置状态反馈完成了系统的耗散 Hamilton 实现,然后基于切换 Hamilton 系统理论设计了状态反馈切换励磁控制器,分析了闭环系统的稳定性. 仿真结果表明笔者所设计的控制器能有效提高系统的暂态稳定性. 笔者所提建模与控制器设计方法可以方便地推广到大型多机系统.



## 参考文献:

- [1] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-5.
- [2] DANIEL R V, PAVELLA M. A comprehensive approach to transient stability control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1446-1460.
- [3] 林舜江, 刘明波, 周欣, 等. 暂态电压安全紧急切负荷控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 18-24.
- [4] ZHANG Xue-min, MEI Sheng-wei, WU Sheng-yu. Transient stability and emergency control[J], Science in China, Series E: Technological Science, 2009, 52(2): 420-428.
- [5] 刘凯, 彭志炜, 黄忠, 等. 基于混和逻辑动态模型的混杂电力系统及其电压稳定性分析方法研究[J]. 继电器, 2008, 36(10): 15-18.
- [6] YU Yi-xin, WANG Dong-tao. Dynamic security risk assessment and optimization of power transmission system[J]. Science in China, Series E: Technological Sciences, 2008, 51(6): 713-723.
- [7] PENG J N, SUN Y Z, WANG H F. Co-ordinated emergency control of generator-tripping and SMES based on Hamiltonian system theory[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(5-6): 352-360.
- [8] LI X Y. A nonlinear emergency control strategy for HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 153-159.
- [9] 卢强, 梅生伟, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 4-20.
- [10] 刘宪林, 杨建, 王明东. 励磁控制系统灰色预测 PID 控制仿真研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 70-72.
- [11] 刘艳红, 宋伟华, 王杰. 包含 SVC 和非线性负荷的电力系统耗散实现与控制[J], 控制理论与应用, 2010, 27(1): 47-52.
- [12] WANG Y, CHENG D, LI C, et al. Dissipative Hamiltonian realization and energy-based  $L_2$  disturbance attenuation control of multi-machine power systems[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 2003, 48(8): 1428-1433.
- [13] ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen. Study on the stability of switched dissipative Hamiltonian systems[J]. Science in China, Series F: Information Sciences, 2006, 49(5): 578-591.
- [14] ZHU Li-ying, WANG Yu-zhen. On the modeling and stability analysis of switched two-machine power systems[C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, Chongqing, China: 7192-7197.

## Switched Dynamic Modeling and Excitation Control of Power Systems

LI Jian-yong<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>2</sup>, DING Qing-qing<sup>3</sup>

(1. School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The excitation control of power systems under generator tripping emergency measurement is investigated. First, a switched dynamic model for a typical IEEE three-machine multi-area power system is developed. Then, the switched power system is transformed to an equivalent switched dissipative Hamiltonian system via pre-feedback control. A state feedback switching controller is constructed based on the dissipative Hamiltonian realization. Using the Hamiltonian functions of the subsystems as multiple Lyapunov functions, it is shown that the closed-loop system is asymptotically stable under arbitrary switching path. Simulation results demonstrate that the proposed controller can effectively improve the transient stability of the power system.

**Key words:** power system; switched system; dissipative Hamiltonian realization; excitation control

# 一种新颖的基于边缘检测的车辆阴影去除方法

李浩亮, 水清河, 范文兵, 杨潇楠

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对普通基于 HSV 颜色空间算法的缺陷, 提出了一种新颖的车辆阴影消除方法. 通过自适应混合高斯模型 (AGMM) 进行背景建模得到视频序列背景和前景, 使用改进的高斯-拉普拉斯 (LOG) 边缘检测算子对前景图像和阈值分割后的前景进行两次边缘检测, 最后对两次检测后的前景边缘进行相减, 保留车辆运动区域. 实验结果表明, 提出的新颖算法能有效去除与车辆特性相近的光照阴影.

**关键词:** 混合高斯; LOG 边缘算子; 阴影去除

**中图分类号:** TP391

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.003

## 0 引言

运动车辆检测的目的是为了把运动车辆从背景图像中提取出来, 为后续的跟踪及行为理解做重要的基础工作. 由于车辆检测系统的大多数视频传感器都在露天环境下工作, 光照阴影会随着运动车辆采集到视频序列中. 现有的阴影去除方法大致可以分为三种. ①基于阴影模型的方法, 此方法主要是利用视频场景、运动车辆、光照条件等先验信息, 建立阴影模型, 通过模型来判定每个像素是否属于阴影区域, 此方法需要较丰富的先验信息, 有很大的局限性, 且运算复杂<sup>[1]</sup>. ②基于纹理的方法, 通过提取前景区域和背景对应区域的纹理特征, 对其相似性进行判断. 对于阴影较深、纹理特征不明显的情况, 此方法效果不佳<sup>[2]</sup>. ③基于 HSV 特性的方法, 主要利用阴影的色度不同来判别阴影区域<sup>[3]</sup>, 但是对于阴影与车辆色度相近的视频序列, 检测效果不理想.

针对上述方法中存在的问题, 笔者提出一种基于 LOG 边缘检测的阴影去除方法, 首先用混合高斯模型对视频图像建模提取背景, 检测出前景车辆, 结合形态学运算方法<sup>[4]</sup>, 通过两次不同方法的边缘提取来去除车辆阴影, 最后的实验结果表明, 该方法对特征丰富的车辆适用性较强, 并且不受车辆与阴影色度特性相近以及阴影区域纹理特性不明显的影

## 1 混合高斯模型

首先把某点在一段时间内的值设为一个像素集  $\{X_1, \dots, X_t\} = \{I(x_o, y_o, i); 1 \leq i \leq t\}$ , 由该像素建立由  $K$  个高斯分布模型组成的高斯混合模型<sup>[5]</sup>

$$P(X_t) = \sum_{i=1}^K w_{i,t} \eta(X_t, u_{i,t}, \sum_{i,t}); \quad (1)$$

$$\eta(X_t, \mu_t, \sum) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n} \left| \sum \right|^{\frac{1}{2}}} \exp \left[ -\frac{1}{2} (X_t - \mu_t)^T \sum^{-1} (X_t - \mu_t) \right], \quad (2)$$

式中:  $w_{i,t}$  是第  $i$  个高斯分布在时刻  $t$  的权值;  $\sum_{i=1}^K w_{i,t} = 1$ ;  $u_{i,t}$  是指第  $i$  个高斯分布在时刻  $t$  的均值;  $\eta$  是高斯概率密度函数;  $\sum$  是协方差;  $n$  表示  $X_t$  的维数.  $K$  一般取  $3 \sim 5$ ,  $K$  个高斯分布按优先级  $p_{i,t} = w_{i,t} / \sigma_{i,t}$  从高到底进行排列, 为方便计算, 协方差可近似于  $\sum_{k,t} = \sigma_{k,t}^2 I$ .

当某一帧新图像进入时, 用新的像素值  $X_t$  与  $K$  个高斯分布匹配, 匹配条件为  $|X_t - \mu_{i,t}| < d\sigma_{i,t}$ , 若都不匹配, 用新的高斯分布代替最小优先级高斯分布<sup>[6]</sup>, 若与第  $K$  个高斯分布匹配, 则对各高斯分布进行更新, 方法如下

$$\mu_{k,t} = (1 - \alpha) \mu_{k,t-1} + \alpha X_t, \quad (3)$$

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61306106)

作者简介: 李浩亮 (1978-), 男, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事数字图象处理、数模混合集成电路设计方面的研究, Email: iehlli@zzu.edu.cn.

$$(\sigma_{k,t})^2 = (1 - \alpha)(\sigma_{k,t-1})^2 + \alpha(X_t - \mu_{k,t})^T(X_t - \mu_{k,t}),$$

(4)

$$w_{i,t} = (1 - \beta)w_{i,t-1} + \beta,$$

(5)

式中:  $\alpha$  是平均值和标准差更新参数,也是模型学习率;  $\beta$  为权值更新率.

据模型更新方法可知具有较大权值和较小协方差的高斯分布可能是图像背景. 由于模型中  $K$  各高斯分布按优先级从大到小排列, 设定阈值  $T$  选取  $M$  个高斯分布作为背景, 选取规则为  $M = \operatorname{argmin}(\lambda > T)$ , 其中  $\lambda = \sum_{i=1}^m w_i: \sum_{i=1}^K w_i$ .

2 LOG 边缘检测算子

LOG 算子 (Laplace of Gaussian) 源自 Marr 提出的视觉理论中边缘提取思想. 用 LOG 算子提取图像边缘<sup>[7]</sup> 过程分三步: ① 采用二位高斯低通滤波器对输入图像信号平滑滤波; ② 用二维拉普拉斯算子进行图像增强操作; ③ 利用二阶导数中的零交叉点检测边缘.

对于二维的图像信号, 需要使用高斯函数进行平滑处理, 即用高斯函数  $G(x, y, \sigma)$  和原始图像  $f(x, y)$  做卷积, 以消除空间尺度小于尺度因子  $\sigma$  的变化, 得到平滑后的图像

$$I(x, y) = G(x, y, \sigma) \cdot f(x, y),$$

(6)

$$G(x, y, \sigma) = \left(\frac{\pi}{2}\sigma^2\right)\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right).$$

(7)

然后用拉普拉斯算子  $\nabla^2$  获得平滑后图像的二阶方向导数

$$\gamma(x, y) = \nabla^2[I(x, y)] = \nabla^2[G(x, y)] \cdot f(x, y),$$

(8)

$$\nabla^2[G(x, y)] = \frac{1}{\pi\sigma^4}\left(1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)\exp\left(\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right).$$

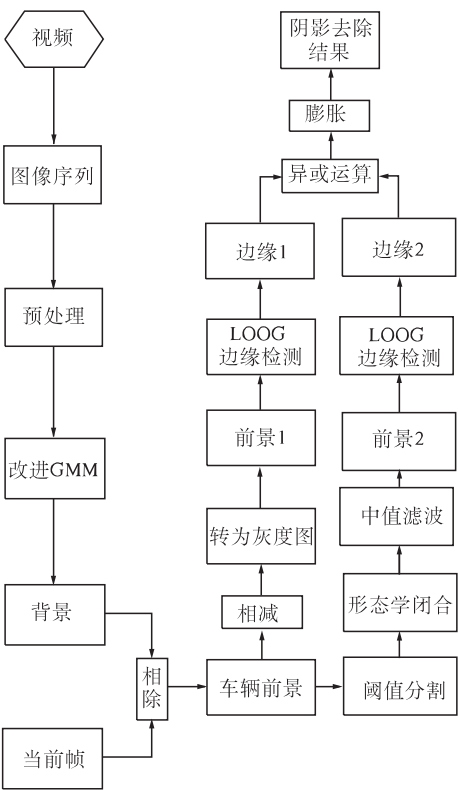
(9)

通过求取  $\gamma(x, y)$  的零交叉点的轨迹即为图像的边缘.

3 基于边缘检测的运动车辆阴影去除算法

3.1 算法流程

本算法主要分为两个部分, 首先使用混合高斯模型进行背景建模提取视频序列的背景, 用当前帧减去背景图像, 提取运动车辆前景, 然后使用 LOG 边缘算子分别对前景图像和经过阈值分割后的前景图像进行边缘提取. 对两次提取后的前景图像进行异或操作, 最后对所得图像膨胀, 得到最终阴影去除结果. 算法流程如图 1 所示.



1 算法流程图  
Fig.1 Algorithm flow chart

3.2 快速高斯背景建模

针对混合高斯运算复杂、背景重构速度慢的缺点, 笔者使用动态的学习率  $\alpha$  和权值更新率  $\rho$ , 在初始的前  $N$  帧图像采用如下更新方法

$$\alpha = \begin{cases} 1/t & (t > N) \\ \alpha' & (t < N) \end{cases};$$

$$\rho = \begin{cases} 1/M_t & (t < N) \\ \alpha'/w_{i,t} & (t > N). \end{cases}$$

(10)

式中:  $N$  为定值;  $\alpha'$  为高斯模型的原始学习率;  $t$  为流过的视频帧数;  $M_t$  为匹配次数. 初始阶段, 采用较大的学习率  $\alpha$  和权值更新率  $\rho$ , 迅速构建出背景图像, 随着帧数增加,  $\alpha$  变为原始学习率  $\alpha'$ ,  $\rho$  渐渐稳定, 背景模型趋于稳定, 这样就能够快速准确地建立背景模型.

3.3 去除空洞和孤立点

笔者采用形态学闭合操作和中值滤波去除空洞和孤立点, 首先通过构建一个  $4 \times 4$  的结构元素  $B$  对经过背景减法所得的前景像素集  $A$  进行闭操作,  $A \cdot B = (A \oplus B) \oplus B$ , 图像经过闭运算之后, 可以将目标内部的空洞在基本保持原目标大小与形态的同时进行了连接和填充. 中值滤波把图像像素序列中某一点的值, 用该邻域中各点值的中值来代替, 中值滤波对图像噪声的抑制效果好, 可以



有效地去除孤立点,同时能有效地保护边缘清晰度,文中采用默认的  $3 \times 3$  邻域范围.

3.4 改进的 LOG 边缘检测

对二维图像信号平滑滤波的过程时,函数的平滑度是由尺度因子  $\sigma$  来决定的,不同空间尺度因子对应不同的 LOG 算子, $\sigma$  取值太小会得到太多的边缘信息,引入很多噪声, $\sigma$  取值过大时,虽然能抑制噪声,但是图像边缘细节也被消除了,检测效果不理想.

为了保证边缘提取的准确度,并且抑制噪声,本算法用 4 个不同的尺度因子分别对二维图像信息进行平滑操作,每个尺度因子对应不同模版,经过证明,卷积因子的模版宽度  $\geq 8.5\sigma$  时,曲线包含 99.7% 的能量面积,故笔者选取模版宽度  $\geq 8.5\sigma$ . 选取的尺度因子对应的模版尺寸如表 1.

表 1 不同  $\sigma$  所对应的模版尺寸

Tab. 1 Template sizes corresponded by different $\sigma$	
$\sigma$	模版尺寸 $n \times n$
0.2	$3 \times 3$
0.5	$5 \times 5$
1.0	$9 \times 9$
1.5	$13 \times 13$

然后分别用这 4 个边缘算子进行边缘检测,求四次检测出的边缘的二值化图像,并求其对应点的灰度绝对值和

$$I(x,y) = |I_1(x,y)| + |I_2(x,y)| + |I_3(x,y)| + |I_4(x,y)|,$$

(11)

其中:

$$\angle^2[I_1(x,y)] = \angle^2[I_2(x,y)] = 0,$$

$$\angle^2[I_3(x,y)] = \angle^2[I_4(x,y)] = 0.$$

(12)

设定阈值  $M$ ,对灰度值大于  $M$  的认定为边缘,小于  $M$  的认定为噪声,这样不仅抑制了噪声,也能保证图像边缘检测的准确率.

4 试验结果

为了验证算法的有效性,笔者选取实验视频 highwayII\_raw.avi 与文献[3] 中所属算法做了对比,笔者实验条件为:Inter(R) Core(TM) i5-2430 2.4 GHz CPU,2 GB 内存,Matlab R2010a 平台下编程实现,实验参数设定为: $K = 5, \alpha = \beta = 0.01, N = 100$ ,前景阈值  $T = 0.85$ ,阈值  $M = 255$ . 图 2 为视频的第 115 帧图像检测结果.

该视频是在光照强度比较大的条件下拍摄,阴影区域颜色较深,不能根据阴影区域的纹理特性来

消除车辆阴影,而且如图 2(c) 所示,由于光照强度和拍摄距离的影响,使得此视频前景图像转换为 HSV 颜色空间后特性区别不明显,使用文献[3] 中所述基于 HSV 颜色空间的方法容易把前景也误检测为阴影,从图 2(g) 与(h) 对比中可以看出,应用本文算法后,能够有效的去除阴影区域.

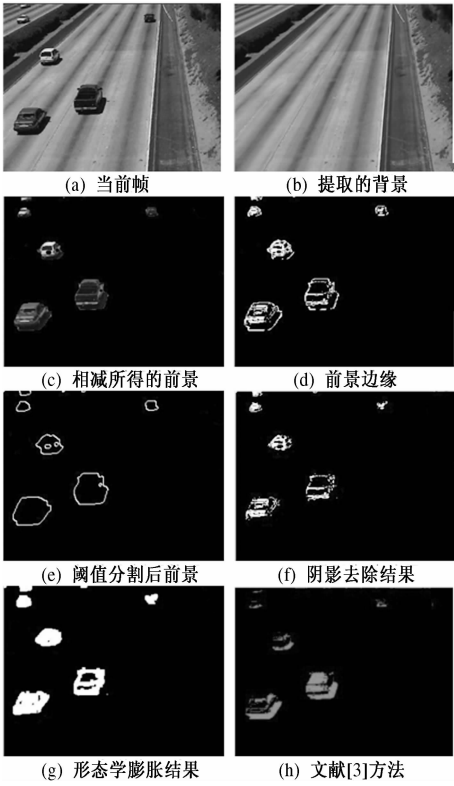


图 2 实验结果仿真图

Fig. 2 Simulation result figure

为了进一步评估文中算法的性能,笔者采用前景检测率  $\xi$  和阴影检测率  $\tau$  两个参数<sup>[8]</sup>

$$\xi = \frac{HP_F}{HP_F + HN_F}; \tau = \frac{HP_S}{HP_S + HN_S},$$

(13)

式中: $HP_F$  为检测正确的车辆像素点; $HN_F$  表示被错误的检测为阴影的车辆像素点; $HP_S$  为正确的阴影像素点; $HN_S$  为错误的判定为前景车辆的像素点. 首先对待检测视频序列进行手动分割提取参考模版,然后与经本文算法检测到的结果进行对比,从表 2 中可以看出,笔者算法的前景检测率和阴影检测率都要高于文献[3] 中基于 HSV 颜色空间的阴影去除算法.

表 2 算法对比结果

Tab. 2 The results of algorithm comparisom		
	文献[3] 方法	笔者算法
前景检测率 $\xi/\%$	62.43	77.59
阴影检测率 $\tau/\%$	87.06	93.42

5 结论

针对常用的基于 HSV 颜色空间特性去除阴影算法不能很好的检测前景车辆和阴影特性相近的情况,笔者提出了一种基于 LOG 边缘检测算法的车辆阴影去除方法.运用目标车辆与阴影区域的物理特性去除阴影,并在算法中加入形态学闭合和中值滤波操作,去除噪声,增加了算法的准确性,该方法对边缘特征信息越丰富的车辆检测率越高.另外实验采用改进的混合高斯建模方法,加快了背景重构的运算速度,节约了整个算法的运行时间.实验表明,该算法能快速有效地去除车辆阴影.

参考文献:

[1] 杨志邦,徐成,周旭,等.一种基于统计模型的前景阴影消除算法[J].小型微型计算机系统,2013,34(2):423-428.  
[2] 张玲,程义民,葛仕明,等.基于纹理的运动阴影检

测方法[J].光电工程,2008,35(1):80-84.  
[3] 林庆,徐柱,王士同,等. HSV 自适应混合高斯模型的运动目标检测[J]. 计算机科学,2010,37(10):254-256.  
[4] 张震,李丹丹. 自适应双阈值的运动目标检测算法[J]. 郑州大学学报:工学版. 2013,34(6):15-19.  
[5] STAUFFER C,GRIMSON W. Learning patterns of activity using real-time tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(8):747-757.  
[6] SCHINDLER K,WANG Han-zi. Smooth foreground-background segmentation for video processing [J]. Lecture Notes in Computer Science,2006(3852):581-590.  
[7] 杨东华,李久贤. Marr 边缘检测算法的研究[J]. 中国图像图形学报,2006,11(6):823-826.  
[8] PRATI A, Mikic TRIVEDI M M, et al. Detecting moving shadows: Alogorithms and evaluation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2003,25(7):971-987.

A Novel Vehicles Shadow Removal Method Based on Edge Detection

LI Hao-liang, SHUI Qing-he, FAN Wen-bing, YANG Xiao-nan

(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Since outdoor sports vehicle shadows exist in the process of vehicle detection, this paper proposes a novel method of vehicle shadow elimination. With the adaptive Gaussian mixture model (AGMM) for background modeling, we can get the background and the frame of the video sequence, we can use the improved Laplace of Gaussian function (LOG) edge detection operator to conduct two times edge detection to the foreground image and the foreground of threshold segmentation. Finally, for keeping the vehicle movement area, we should have the foreground edges of the two times detecting results subtracted. This experimental result shows that the novel algorithm can effectively remove the light shadow which is close to the vehicle characteristics.

**Key words:** Gaussian mixture; LOG edge operator; shadow removal

文章编号:1671-6833(2014)05-0015-04

# 基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建

毛晓波, 张志超

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对已有的单幅图像超分辨率重建算法大都无法同时兼顾重建质量和运算速度的问题, 提出了基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建算法. 首先用二维经验模态分解法将一幅低分辨率图像分解为不同复杂程度的图层; 然后对包含高频细节信息的第一个图层用改进核岭回归法重建, 以保证重建质量; 对包含较少信息的后几个图层用双三次插值法重建, 以提高重建速度; 最后用二维经验模态分解逆变换将重建后的各层图像合成一幅完整的高分辨率图像. 实验结果表明该算法充分结合了三者的优势, 在保证重建图像质量的同时, 提高了算法的运算速度.

**关键词:** 超分辨率重建; 二维经验模态分解; 改进核岭回归; 双三次插值

**中图分类号:** TP311 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.004

## 0 引言

图像超分辨率重建是指用信号处理和图像处理的方法, 通过软件算法的方式将已有的低分辨率图像转换成高分辨率图像的技术<sup>[1]</sup>. 它在视频监控、图像打印、刑侦分析、医学图像处理、卫星成像等领域有较广泛的应用<sup>[2]</sup>, 因而具有很高的研究应用价值. 输入与输出均为单幅图像的超分辨率重建称为单幅图像超分辨率重建. 根据是否依赖训练样本, 超分辨率重建分为图像增强的超分辨率重建(无训练样本)与基于学习的超分辨率重建(有训练样本)<sup>[1]</sup>. 图像增强的超分辨率重建, 只对图像的显示效果进行增强, 可将其归为图像插值<sup>[1]</sup>. 此类方法的计算复杂度低, 未从本质上提高分辨率, 适用于对重建图像质量要求不高但速度要求较高的场合. 基于学习的单幅图像超分辨率重建是近年来研究的一个热点<sup>[3]</sup>. 如 Chang 等提出基于流形学习的方法<sup>[4]</sup>, Freeman 等提出用马尔科夫网络的方法<sup>[5]</sup>, Kim 等提出改进核岭回归方法<sup>[6]</sup>. 这类算法重建图像质量高, 但通常算法复杂度高、速度较慢, 且需要大量的训练数据, 不适用于实时性要求较高的场合.

针对这一问题, 笔者提出一种基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建算法, 该算法

将图像插值的超分辨率算法与基于学习的超分辨率算法相结合, 充分利用二维经验模态分解能分层提取图像信息的特点, 改进核岭回归法对图像高频细节信息的高质重建优势及双三次插值运算速度快的优势. 首先用二维经验模态分解法将一幅低分辨率图像分解为不同复杂程度的图层; 然后对包含图像高频细节信息的第一层用改进核岭回归法进行超分辨率重建, 以保证重建质量, 对包含趋势信息和亮度信息的其它层用双三次插值法进行超分辨率重建, 以提高运算速度; 最后将各层重建图像合成一幅完整的高分辨率重建图像.

## 1 原理及方法

### 1.1 二维经验模态分解

二维经验模态分解(Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD)能将图像逐步分解为一系列具有不同频率的 IMF 分量和残余项  $R$ , 先提取出的 IMF 分量包含主要的高频细节信息, 最后的残余项  $R$  包含了图像的大致走向和亮度信息. 对于一幅大小为  $M \times N$  的图像  $f(x, y)$ , 二维 EMD 实现过程如下<sup>[7]</sup>:

(1) 对所给图像曲面求取所有局部极大值和极小值;

(2) 对极大值点和极小值点分别用径向基函

收稿日期:2014-05-16; 修订日期:2014-07-21

基金项目:教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114101110005);河南省重大科技攻关计划资助项目(102101210100);河南省教育厅科学技术研究重点项目资助项目(14A410001)

作者简介:毛晓波(1965-),男,河南开封人,郑州大学教授,博士,研究方向:仿生机器视觉、智能仪器仪表,E-mail:mail-mxb@zzu.edu.cn.

数法进行曲面拟合,得到极大值点包络曲面和极小值点包络曲面,将两曲面数据求平均得到均值包络曲面数据;

(3)用原曲面减去均值包络曲面;

(4)判断是否满足终止条件,即每个 IMF 满足(1)信号极值点与过零点数量必须相等,或最多相差一个,(2)在任一时间点上,由信号极大值定义的上包络和极小值定义的下包络局部均值为零.

重复(1)~(3),直到满足给定的终止条件,得到第 1 层二维固有模态函数 IMF1,用原图像减去第 1 层模态函数得到第 1 层残差  $R$ . 对残差重复(1)~(4),依次得到图像的  $N$  层固有模态函数和第  $N$  层残差, $N$  取 4.

1.2 改进的核岭回归方法

Kim 等将高频细节重建看成回归问题,提出一种基于学习的单幅图像超分辨率重建算法,将核匹配追踪和梯度下降相结合,对核岭回归法的正则化代价函数进行优化,同时采用自然图像先验模型进行边缘清晰化处理<sup>[6]</sup>.

首先对高分辨率图像进行模糊和下采样得到低分辨率图像,然后分别对高、低分辨率图像采样得到图像块对,组成训练图像对集. 对于给定的训练数据点集  $\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\} \subset \mathbb{R}^M \times \mathbb{R}^N$ , 对每一个回归量的独立凸代价函数求和并分别最小化:

$$o(\{f^1, \dots, f^N\}) = \sum_{i=1, \dots, N} (\frac{1}{2} \sum_{j=1, \dots, l} (f^i(x_j) - y_j^i)^2 + \frac{1}{2} \lambda \|f^i\|_H^2).$$

(1)

式中: $y_j = [y_j^1, \dots, y_j^N]^T$ ;  $H$  为再生核希尔伯特空间. 正则化代价函数的最小值可表示为

$$f^i(\cdot) = \sum_{j=1, \dots, l} a_j^i k(x_j, \cdot).$$

(2)

式中: $i = 1, \dots, N$ ;  $k$  为希尔伯特空间  $H$  的再生核. 将式(2)代入式(1)可得

$$\mathbf{A} = (\mathbf{K} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{Y}.$$

(3)

式中: $\mathbf{Y} = [y_1^T, \dots, y_l^T]^T$ ;  $\mathbf{A}$  的第  $i$  列是第  $i$  次回归的系数向量  $\mathbf{a}^i = [a_1^i, \dots, a_l^i]^T$ <sup>[6]</sup>. 由上式知,核岭回归的训练和测试时间复杂度很高,分别为  $o(l^3)$  和  $o(M \times l)$ . 采用 Tappen 提出的自然图像先验模型框架解决重建图像主边缘有振铃伪影的问题.

改进核岭回归法是基于学习的单幅图像超分辨率重建算法中的典型算法,其对高频细节丰富的图像重建质量较高,但时间复杂度高,运算量大.

1.3 基于二维 EMD 的单幅图像超分辨率重建

改进的核岭回归法对高频细节丰富的图像重建效果很好,但其耗时较长. 而双三次插值法运算简单,对包含低频信息的图像重建质量较好<sup>[8]</sup>. 结合二者的优势,笔者提出了基于二维 EMD 的单幅图像超分辨率重建算法.

先对高分辨率图像 Butterfly 进行高斯模糊和 4 倍下采样,得到一幅低分辨率图像,如图 1 所示. 用二维 EMD 分解此 LR 图像,得到 IMF1、IMF2、IMF3 和残余项  $R$ ,为了便于观察,只给出其中的细节图,如图 2(a)~(d)所示,IMF1 包含了主要的高频细节信息. 对包含高频细节信息的 IMF1,采用改进核岭回归的方法重建,重建放大 4 倍,如图 2(e)所示. 对 IMF2、IMF3 和残余项  $R$  用双三次插值法重建,重建放大 4 倍,如图 2(f)~(h)所示. 可看出,由改进核岭回归法重建的重建 IMF1 效果很好.

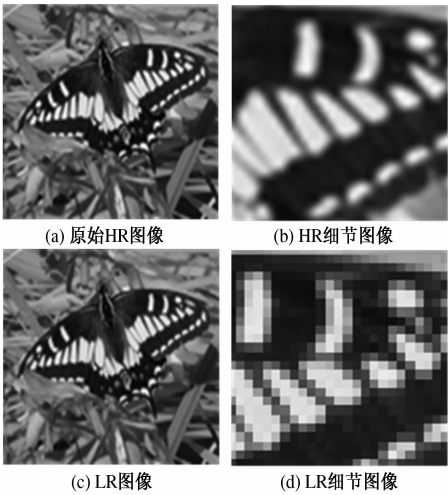


图 1 HR 与 LR 图像  
Fig. 1 HR and LR image

2 实验结果与分析

笔者算法对图像中包含高频细节信息的部分用改进核岭回归法重建,可以保证重建图像质量;在包含较少信息的部分用运算简单的双三次插值方法,可以减少运算时间,提高算法的效率. 相比于改进核岭回归法对整个图像进行重建,笔者算法运算量小且速度快,更具优势.

为了进一步验证本文算法的有效性,将本文算法和改进核岭回归法、双三次插值法的重建效果进行对比. 选 peppers、fabric、butterfly 和 lotus 四幅图像进行实验,重建效果如图 3 所示. 由于图像的峰值信噪比 PSNR、视觉效果及运算速度是衡

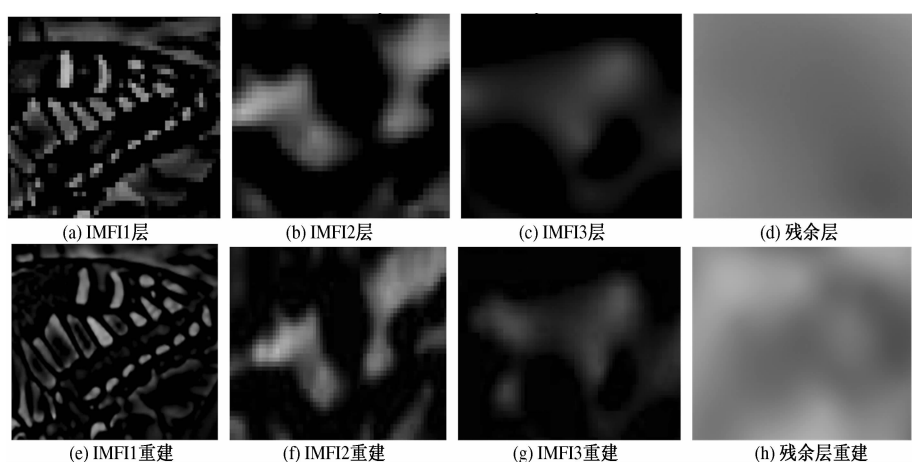


图 2 LR 图像的二维 EMD 分解及其重建图像

Fig. 2 BEMD of the LR image and the reconstructed image

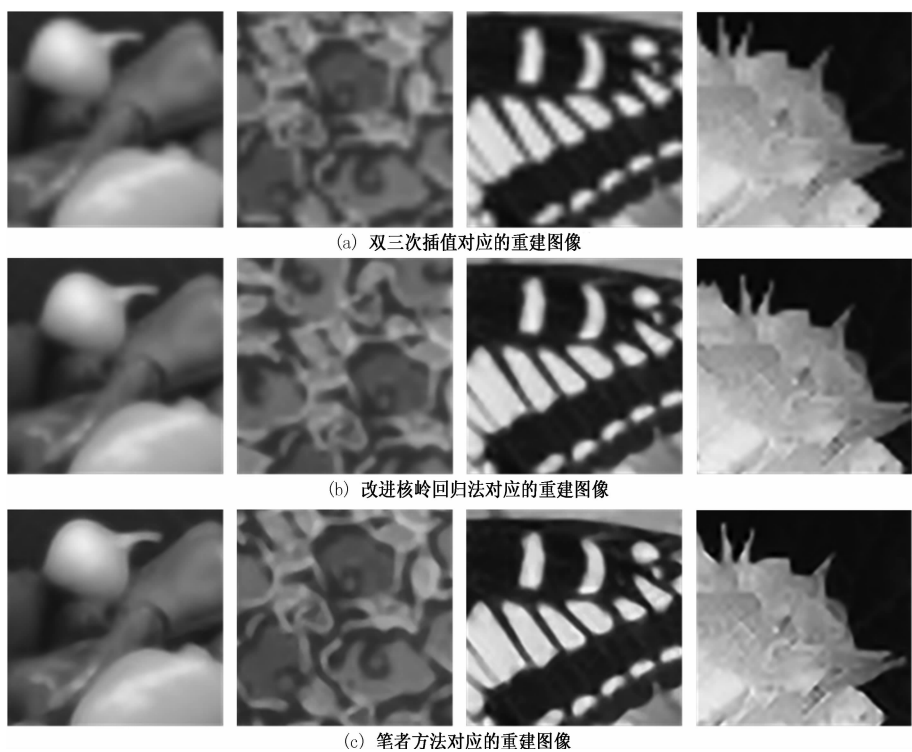


图 3 三种算法的重建效果比较

Fig. 3 The simulation results of the three algorithms

量重建图像质量的常用标准<sup>[8]</sup>,笔者给出了三种说明本文算法的有效性,如表 1 所示. 算法的峰值信噪比 PSNR 及各自的耗时,以客观

表 1 3 种算法的重建性能指标比较

Tab.1 The reconstruction performance comparison of the three algorithms

		peppers	fabric	butterfly	lotus
PSNR/dB	双三次插值方法	28.897 9	21.577 1	22.312 4	24.942 3
	改进核岭回归法	29.126 8	21.878 0	23.328 1	26.342 1
	笔者方法	29.254 7	22.074 1	24.024 8	27.068 9
耗时/s	双三次插值法	0.348 5	0.359 6	0.359 1	0.358 4
	改进核岭回归法	44.730 3	213.984 8	166.485 4	137.480 4
	笔者方法	27.193 3	105.899 4	100.545 4	84.819 5



由图 3 可以看出,双三次插值方法重建出的图像边缘呈锯齿状,重建效果较差;笔者算法和改进核岭回归法重建出的图像边缘清晰,说明本文算法有较好的视觉效果.由表 1 的 PSNR 这一指标看出,双三次插值方法的 PSNR 最小,改进核岭回归法的 PSNR 居中,笔者方法的 PSNR 最大,一般认为峰值信噪比越大,图像质量越好<sup>[8]</sup>,因而笔者算法在 PSNR 这一指标上优于其它两种方法.由表 1 中的耗时指标可以看出,双三次插值法耗时最少,本文算法居中,核岭回归法耗时最长,表明笔者算法在运算速度上优于核岭回归法.

综合上述三项指标看出,双三次插值法运算速度快,但重建质量较差;改进的核岭回归法重建质量较高,但运算速度慢;笔者算法的重建质量显著高于双三次插值法,与改进的核岭回归法相当,且在运算速度上显著优于改进的核岭回归法.

### 3 结论

将二维经验模态分解法能分层提取图像高频细节信息的特点,改进核岭回归法对图像高频细节信息的高质重建的优势和双三次插值运算简单的特点结合起来,提出基于二维经验模态分解的单幅图像超分辨率重建算法.实验结果和衡量指标表明,笔者算法不仅有着较好的视觉效果,且有效地提高了峰值信噪比和运算速度,是一种实时

有效的图像超分辨率重建方法.

### 参考文献:

- [1] 苏衡,周杰,张志浩.超分辨率图像重建方法综述[J].自动化学报,2013,39(8):1202-1213.
- [2] 吴炜,杨晓敏,余艳梅,等.核偏最小二乘算法的图像超分辨率算法[J].电子科技大学学报,2011,40(1):105-110.
- [3] 陈杰,朱秀昌.一种基于彩色化的单幅彩色图像超分辨率重建[J].南京邮电大学学报:自然科学版,2013,33(4).
- [4] CHANG Hong, YEUNG Dit-yan, XIONG Yi-min. Super-resolution through neighbor embedding[C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2004:275-282.
- [5] FREEMAN W T, PASZTOR E C, CARMICHAEL O T. Learning low-level vision[J]. International journal of computer vision, 2000, 40(1):25-47.
- [6] KIM K I, KWON Y. Example-based learning for single-image super-resolution[M]//Pattern Recognition. Springer Berlin Heidelberg, 2008:456-465.
- [7] 宋立新,高凤娇,郝朝晖.二维 EMD 分解方法的比较与改进[J].电子与信息学报,2008,30(12):2890-2893.
- [8] 杨宇翔.图像超分辨率重建算法研究[D].合肥:中国科学技术大学自动化系,2013.

## Single Image Super-resolution Reconstruction Based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition

MAO Xiao-bo, ZHANG Zhi-chao

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that most learning-based super-resolution algorithms are not competent to take both the reconstruction quality and computing speed into account, a novel single image super-resolution reconstruction based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD) is proposed. Firstly, a low-resolution image is decomposed into several layers with different complexities by BEMD, which contains various details. Then, the first IMF be reconstructed with high frequency details by improved kernel ridge regression algorithm in order to ensure the quality of image and the other IMFs containing fewer details be reconstruct by bicubic interpolation in order to improve the speed. Finally, the reconstructed IMFs are merged into a high-resolution image. Experimental results demonstrate that the proposed method make full use of the advantages of the above algorithms, which not only ensure the quality of the reconstruction image, but also improves the computational speed.

**Key words:** single image super-resolution reconstruction; BEMD; improved kernel ridge regression; bicubic interpolation

文章编号:1671-6833(2014)05-0019-04

# 激光微加工系统通信协议设计

李纪云<sup>1</sup>, 牛志玲<sup>1</sup>, 裴红星<sup>2</sup>

(1. 河南职业技术学院 信息工程系, 河南 郑州 450046; 2. 郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**为实现自主研制的激光微加工系统图形加工控制,设计了一种激光微加工系统上下位机之间串行通信协议.在自主研制的激光微加工系统中,复杂的待加工图形经图像处理最终形成  $m$  行  $\times n$  列的二值图形,每行由交替变换的连续需要和不需要加工的多条线段构成,这些信息构成加工轨迹设定值.由帧首、字节数、功能代码、传输内容(加工轨迹设定值)、校验和帧尾构成一帧数据,以串行通信的方式传输给下位机控制器并等待反馈,下位机控制器对接收到的每帧数据进行检查,若无误则执行,检查结果或执行结果反馈给上位机,上位机根据反馈帧确定下一步数据处理方式.结果表明:采用数据帧反馈的形式,提高了通信的可靠性.

**关键词:**激光微加工;运动轨迹;线段图形;通讯协议;帧数据反馈

**中图分类号:** TP312, TH164 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.005

## 0 引言

激光微加工对象广泛、条件易满足及精度、性价比和自动化程度较高等优点,在集成电路芯片的制造、计算机外设以及通讯、激光雕刻、激光打标等方面的应用范围十分广泛<sup>[1-2]</sup>.

激光微加工过程是将源图像经上位机处理成符合下位机要求的图形,并发送到下位机,下位机运动控制系统控制激光光源或平台运动,完成加工.对激光微加工系统的研究,主要侧重三个方面:一是图像处理研究,由于激光加工的结果是非彩色图像,所以一般把图像处理为二值或灰度图像.二值图像只能体现图像的轮廓,转换为矢量图可防止放大后出现锯齿现象<sup>[3]</sup>.灰度图像能表现出一定的层次感<sup>[4-5]</sup>.文献[6]将 NURBS(非均匀有理 B 样条)图形应用到激光雕刻控制系统中,实现了复杂的 NURBS 图形的雕刻.另一方面是下位机的设计和控制的研究<sup>[7-8]</sup>.第三是整个控制系统及效率方面的研究,如针对传统激光加工只能控制单机的问题,文献[9]通过 USB 总线接口,实现一台上位机控制多台下位机以提高工作效率.文献[10]完成矢量图的转换并通过专用控制卡控制下位机完成加工过程.文献[11]从操作系统底层出发,开发了激光雕刻系统驱动程序,简

化激光雕刻机的使用,提高了性能和效率.

在这些研究中,都未提及到如何将处理后的图形信息下载到下位机.笔者以自行研制的激光微加工系统为例,详细描述了上位机与下位机通信协议的设计.并且将图形变换为可连续加工的线段,提高了加工效率.

## 1 激光微加工系统组成

在激光微加工系统中,微小的激光光斑作用在被加工物体表面,光斑与被加工物体按照设定方式相对运动,在被加工物体表面烧蚀出所需图形.由于控制光源移动很难保证光束的质量,且被加工物机电运动控制较容易满足加工精度要求.因此,在自主研制的激光微加工系统中,采用激光光源固定、工件运动的方式.

### 1.1 激光微加工系统的组成

激光微加工系统的组成如图 1 所示.光源经扩束、短焦距物镜聚焦形成微小的光斑作用于待加工工件上,工件置于  $X-Y$  平台上,平台的移动带动工件运动.同时,计算机通过 CCD 采集工件的图像.系统中,  $X-Y$  平台的运动由运动控制系统驱动步进电机完成.

### 1.2 目标设定值的获取

目标设定值分为规则图形、文本和复杂图形

收稿日期:2014-03-07;修订日期:2014-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10974183)

作者简介:李纪云(1974-),女,河南南阳人,河南职业技术学院副教授,硕士,研究方向为计算机软件与应用, E-mail: leeeteacher@163.com.

3 种.

①规则图形. 加工轨迹为直线、折线、圆或圆弧等规则图形,需完成特征信息提取;

②文本. 特征灰度和背景灰度无重叠,直接二值化处理后进行缩放取得;

③复杂图形. 经去噪、轮廓提取、边缘方向估计<sup>[12-13]</sup>形成二值图像,缩放后取得.

1.3 运动模式设定

待加工的工件放置在  $X-Y$  平台上,其运动模式可以分为 4 种.

①直线运动模式. 主要用于快速定位,包括相对定位和闭环(绝对)定位;

②折线运动模式. 主要用于待加工图形为多段折线的情况;

③圆弧运动模式. 主要用于待加工图形为圆弧(包括圆)的情况;

④复杂图形模式. 对于其他比较复杂的图形,需要进行图像处理,变换为线段数据库,下载至控制器,由控制器控制完成加工.

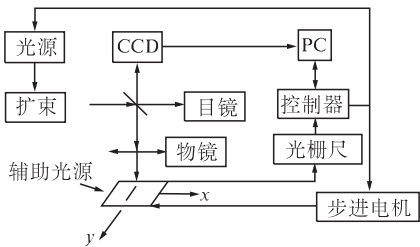


图 1 激光微加工组成框图  
Fig.1 Laser micro processing system composition block diagram

1.4 加工轨迹的形成

对于规则图形,只需将特征信息下载至控制器,控制器即可完成对加工过程的控制.

对于文本及复杂图形,处理后的二值图像,设由  $m$  行  $\times n$  列个点组成,每一行由多条线段组成,每条线段代表连续需要加工的点或连续不需要加工的点. 加工过程控制采用行扫描的方式,每一行需要传输的数据包括此行的线段数、每条线段的起点和终点、每条线段是需要加工还是不需要加工.

2 通信协议设计

上位机和运动控制系统之间采用 RS232 总线进行通信,RS232 本身并不包含专用通信协议,所以,要实现系统的通信,就需要根据软硬件设计的实际情况,完成通信协议的设计.

通信接口:采用 RS232 串行通信接口,波特率:9 600 bps,8 位数据位,1 位停止位,无奇偶校验位.

2.1 设计原则

采用反馈等待重传方式,即上位机每次只发送一帧数据,等待下位机接收并执行相应指令后,将结果反馈给上位机,上位机根据反馈信息确定下一步动作.

通过帧首判断是否为通信开始,通过帧尾确定一帧数据是否完成,通过校验位判断数据传输是否正确.

2.2 通信协议设计

2.2.1 帧结构设计

按照通信协议设计原则,结合激光微加工系统需要传输的数据及指令,通信的帧结构由 6 部分内容组成,如表 1 所示.

表 1 通信协议帧结构  
Tab.1 Communication protocol frame structure

帧首	字节数	功能代码	传输内容	校验和	帧尾
2 Byte	1 Byte	1 Byte	—	2 Byte	1 Byte

帧首表示一帧数据的开始,同时作为是否开始接收一帧数据的标志,在本系统中,约定为 BEH,EBH;字节数表示当前帧中,所有数据占用的字节数;功能代码为当前帧数据所代表的功能标志码;传输内容表示当前帧中所要发送的数据内容;使用校验和的方式判断当前帧传送的数据是否正确. 具体方法是把表 1 中,前 4 部分数据相加,结果保留 1 个字节,超出部分舍弃,把结果拆分为高位(H)和低位(L)两部分. 校验和所占的 2 个字节中,每个字节的高位设置为 5,则校验和为 5L,5H;帧尾表示此帧数据结束,本系统中,约定为 0DH.

2.2.2 功能代码及传输内容设计

按照微加工系统能够执行的加工及控制方式,功能代码分为 10 种,其中反馈信号 1 种.

① $X-Y$  平台复位命令. 功能代码:01H. 传输内容占用 1 字节,表示复位时步进电机的速度. 此帧共 8 字节.

② $X-Y$  平台相对定位命令. 功能代码:02H. 平台在  $x,y$  方向上分别移动的步数. 传输内容占用 7 字节,分别为  $x$  方向移动步数低位(1 字节), $x$  方向移动步数高位(1 字节),方向位(00H 表示正向,10H 表示逆向,1 字节), $y$  方向(同  $x$  方向),移动速度(1 字节). 此帧共 14 字节.

③X-Y 平台闭环定位命令. 功能代码 03H. 以光栅尺坐标作为反馈信号,平台移动到指定坐标点. 传输内容占用 7 字节,分别为  $x$  点坐标低位(1 字节), $x$  点坐标高位(1 字节),空置位(1 字节), $y$  点坐标(同  $y$  点坐标),移动速度(1 字节). 此帧共 14 字节.

④下载线段式图形(总检索表). 功能代码: 04H. 传输内容占用 4 字节,分别为行数低位(1 字节),行数高位(1 字节),扫描次数(1 字节),偏移步距(1 字节). 此帧数据共 11 字节. 其中,行数表示整幅图形需要打印的行数,扫描次数和激光光斑大小以及图像处理中采用的精度有关,偏移步距是每扫描完一次后,向下偏移的步数,与激光光斑以及电机的步距有关.

⑤下载线段行检索表. 功能代码: 05H. 传输内容占用  $4 \times$  行数字节,分别为行号 1(2 字节),行号 1 线段数(2 字节), $\dots$ ,行号  $n$ (2 字节),行号线段数(2 字节). 此帧共  $4 \times$  行数 + 7 字节.

⑥下载行内容. 功能代码: 06H. 传输内容占用  $6 \times$  (当前行线段数 + 1) + 2 字节,分别为行号  $n$ (2 字节),起始点  $x$  坐标(3 字节), $y$  坐标(3 字节),中间点 1 的  $x$  坐标(3 字节), $y$  坐标(3 字节), $\dots$ ,中间点  $n$  的  $x$  坐标(3 字节), $y$  坐标(3 字节),终点  $x$  坐标(3 字节), $y$  坐标(3 字节). 此帧共  $6 \times$  (当前行线段数 + 1) + 9 字节.

⑦执行线段图形命令. 功能代码: 07H. 传输内容占用 1 字节,表示平台移动速度. 此帧共 8 字节.

⑧折线加工数据. 功能代码: 08H. 加工图形为折线. 传输内容占用  $8 \times$  (折点数 + 1) 字节,分别为第  $n$  条折线  $x$  方向和  $y$  方向各 4 字节,前 2 字节为移动步数,第三字节为方向位(00H 表示正向,10H 表示逆向),第 4 字节为加工位(10H 为有光,00H 为无光). 此帧共  $8 \times$  (折点数 + 1) + 7 字节.

⑨圆弧加工数据. 功能代码: 09H. 加工图形为圆弧. 传输内容占用 22 字节,分别为移动速度(1 字节),圆心、起点、终点  $x$  和  $y$  坐标,半径,各 3 字节. 此帧共 29 字节.

⑩反馈信号. 功能代码: F0H. 传输内容占用 7 字节,分别为状态信息(00H 为正常,01H 为数据接收错误,请求重发,重发次数达到 3 次时,提示通信错误,02H 为执行错误,状态信息占用 1 字节),坐标信息(当前光栅尺指示的  $x$ 、 $y$  坐标,共 6 字节). 此帧共 14 字节.

2.3 通信协议流程

上下位机之间的通信协议流程如图 2、3 所示.

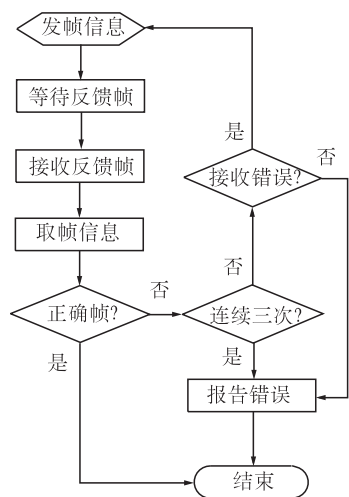


图 2 上位机通信协议流程

Fig. 2 PC communication protocol process

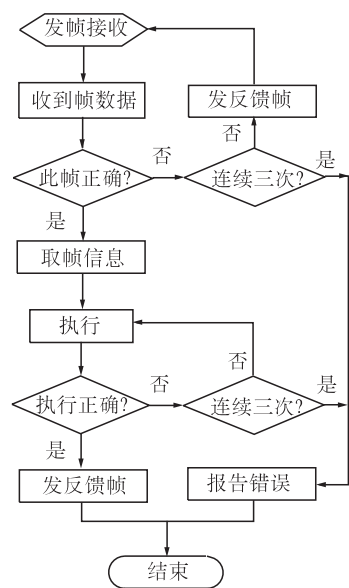


图 3 下位机通信协议流程

Fig. 3 Lower computer communication protocol process

3 结论

规则图形只需要把特征数据传输给控制器即可. 对于复杂图形,如果采用点阵形式进行数据传送和控制,除对通信造成不必要的负担外,还会因为需要对每个像素点判断是否需要进行加工而极大降低加工效率. 采用行扫描加工连续线段的模式,可以大大降低数据的复杂度,便于控制器对加工轨迹的控制,同时提高加工效率.

通过帧首和帧尾判断通信的开始和结束,校

验位判断传输的正确性,反馈等待重传方式,确保了数据传输和加工控制的正确性,从而提高了系统运行的可靠性。

### 参考文献:

- [1] 张建华,葛红宇,李宏胜.微细加工用两轴联动压电平台控制系统研究[J].制造技术与机床,2012(8):125-128.
- [2] 陶凯,丁桂甫,杨卓青,等. MEMS 中永磁材料的微细加工技术研究进展[J].传感器与微系统,2011,30(5):1-4,7.
- [3] 张金龙,宋文学.位图矢量化在激光雕刻技术中的应用[J].制造技术与机床,2010(12):104-106.
- [4] 王伟,刘晓东,陈彦丽.基于多级误差扩散的多灰度图像激光雕刻算法研究[J].应用激光,2006,26(2):17-20.
- [5] 蔡京甫,文方,刘其斌.符合激光雕刻特点的图像处理方法[J].计算机工程与设计,2008,29(23):6041-6043.
- [6] 王世勇,李迪. NURBS 图形激光雕刻算法及其嵌入式实现[J].华南理工大学学报:自然科学版,2010,38(6):112-117.
- [7] 符永宏,潘国平,华希俊,等.可实现特殊激光微加工工艺的控制系统[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(2):205-208,213.
- [8] 邬泳,傅星,刘春阳,等.激光微加工系统及其控制单元的研究[J].电子技术应用,2009(11):30-32.
- [9] 赵永礼,杨寅华,王红.基于 USB 总线的激光三维雕刻控制系统[J].计算机工程,2010,36(22):239-241.
- [10] 张天,王新政,唐道华.基于 Delphi 的激光雕刻上位机软件设计与实现[J].桂林理工大学学报,2012,32(1):131-135.
- [11] 王世勇,李迪.图形直驱式激光雕刻控制系统[J].组合机床与自动化加工技术,2010(9):34-38.
- [12] PAPARI G, PETTOV N. Edge and line oriented contour detection: State of the art [J]. Image and Vision Computing, 2011, 29(2): 79-103.
- [13] ZHOU G Y, CUI Y, CHEN Y L, et al. SAR image edge detection using curvelet transform and Duda operator [J]. Electronics Letters, 2010, 46(2): 167-169.

## Laser Micro Processing System Communication Protocol Design

LI Ji-yun<sup>1</sup>, NIU Zhi-ling<sup>1</sup>, PEI Hong-xing<sup>2</sup>

(1. Department of Information Engineering Institute, Henan Polytechnic, Zhengzhou 450046, China; 2. School of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A design method of serial communication protocol was developed between PC and lower computer to realize graphics processing control in self-developed laser micro processing system. Through the image processing, irregular picture was changed into binary image formed by m rows and n columns. Each row consists of many segments with alternate need and need not machined. All the rows were setting value. A frame, transferred to lower controller using serial communication, was composed of start text (STX), bytes, function code, data, check-sum and end text (ETX). Before execution, each received frame would be checked. The result of review and execution need feedback to PC. The feedback frame was the evidence determined if the frame needs to be resent. The data frame feedback method can improve the reliability of communication.

**Key words:** laser micro-processing; track of movement; graph of segments; communication protocol; frame feedback



# 基于 DSP + GPRS 的远程在线电能质量监测系统设计

周 勇<sup>1</sup>, 朱明丽<sup>1</sup>, 杜 霞<sup>2</sup>, 王洪林<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 兰考县供电有限责任公司, 河南 兰考 475300)

**摘 要:** 为了实现对电能质量的远程在线监测, 采用 TMS320F28335 32 位浮点型数字信号处理器, 对现场的电压电流数据进行采集, 通过无线数据传输单元传到上位机, 并在 LabVIEW 环境下实现了对电能质量的远程实时监测与分析. 测试结果表明, 该系统具有工作稳定、不受地域限制等优点, 能够较好地满足监测电能质量和记录暂态事件的要求.

**关键词:** 电能质量; 在线监测; 数字信号处理器; 通用分组无线服务技术

**中图分类号:** TM711 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.006

## 0 引言

所谓电能质量是指“导致用户设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率偏差”<sup>[1]</sup>. 随着科学技术的不断发展, 现代工业、商业及居民用户的用电设备对电能的质量提出了更高的要求. 然而, 由于配电网中整流器、变频调速装置、电弧炉、电气化铁路以及各种电力电子设备不断增加, 对供电系统的电能质量造成了不同程度的影响.

要想解决这些问题, 首先就需要对供电系统的电能质量进行长时间的在线监测, 进而掌握其变化规律, 找出某些指标超标的原因, 为改善电能质量提供依据. 随着计算机技术和无线通讯技术的普及和应用, 基于网络技术的分布式长时间连续在线监测将是供电系统电能质量监测技术的发展趋势<sup>[2]</sup>. 笔者将介绍基于数字信号处理器 (DSP) 和通用分组无线服务技术 (GPRS) 的远程在线电能质量监测系统的结构和功能, 并对其测试结果进行讨论.

## 1 系统总体设计

### 1.1 设计目标

按照国家相关标准对所有监测点 (尤其是偏远地区节点) 的电能质量指标实施在线监测, 通过 GPRS 网络以远程网络服务器监测分析界面进行呈现, 并能够按照需要对有关数据进行存储和查询, 以帮助技术人员掌握当前或过去某段时间

的电能质量信息.

### 1.2 系统工作模式

系统工作模式分为现场监测模式和远程监测模式两种. 现场监测模式可以使用普通计算机与监测装置 RS232 串行口连接, 通过上位机软件对所监测节点的电能质量进行实时分析处理以及历史数据查询. 远程监测模式可以在远程实现现场监测并对不同节点的电能质量进行对比分析.

## 2 系统硬件设计

硬件设计主要分为基于 TMS320F28335 的下位机控制运算平台设计、同步采样触发单元设计、16 位高精度八通道 A/D 采样单元设计、基于 GSM 网络的 GPRS 无线数据传输单元设计、USB 大容量数据存储单元及和配套供电电源设计共 7 个主要部分. 其基本结构如图 1 所示.

### 2.1 基于 TMS320F28335 的控制单元设计

现场数据采集装置采用 TMS320F28335 32 位浮点 DSP 芯片作为装置的控制计算核心, 与以往的定点 DSP 相比, 该器件具有精度高、成本低、功耗小、性能高、外设集成度高以及存储量大等优点. 在保持时钟速率 150 MHz 不变的情况下, TMS320F28335 浮点控制器与 TI 前代数字信号控制器相比, 性能平均提高 50%, 在进行快速傅立叶变换等复杂计算时, 与作用相当的 32 位定点技术相比, 性能提升了一倍多<sup>[3]</sup>.

由于 DSP 不仅要承担数据采集、存储和传输

收稿日期:2014-05-30; 修订日期:2014-07-19

作者简介:周勇 (1957-), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 研究方向为电能质量分析与控制, E-mail: zhouy@zzu.edu.cn.

的控制任务,还要进行电压、电流、功率、谐波等电能质量基本参数的计算,需要占用较多的随机存储器空间.因此,在片内  $34\text{ k} \times 16\text{-bit}$  SRAM 的基础上,外扩  $256\text{ k} \times 16\text{-bit}$  SRAM,型号选用 IS61LV25616AL.

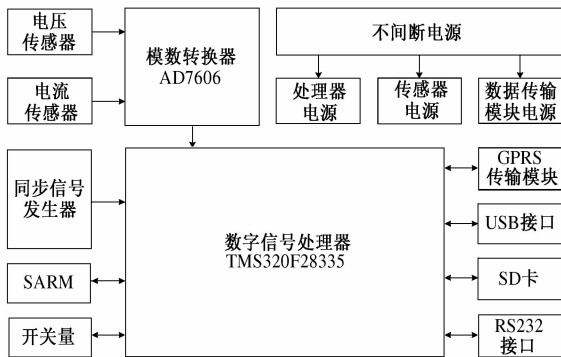


图1 硬件结构框图  
Fig.1 Hardware block diagram

## 2.2 同步采样触发单元设计

根据相关标准的要求,监测系统需要检测  $2 \sim 50$  次谐波分量.由香农采样定理可知,采样单元应对 PT 和 CT 的二次侧信号进行每周期不少于 100 点的等间隔采样.然而,实际电网的频率并非绝对标准的  $50\text{ Hz}$ .因此,为了避免由于频谱泄漏引起的谐波分量测量误差,在采样的触发单元采用了集成锁相环芯片 CD4046,它将依据实时电压信号产生 128 倍频触发信号.

## 2.3 A/D 转换单元设计

对于三相四线系统,需要同时测量三相电压、电流及中线电流,另外为了监测中线故障,还要测量中线电压,这样共有 8 个电量信号需要测量.这些信号都通过电压变换器或电流变换器转换成  $\pm 5\text{ V}$  的电压,然后进入 A/D 转换单元.

根据功率计算的要求,各相的电压和电流必须进行同步采样.为保证测量的精度达到设计要求,采用 ADI 公司的 AD7606 芯片,它是 ADI 公司推出的新一代 16 位、8 通道、同步采样、双极性输入、单电源供电的模拟数字转换器.该芯片集成包括模拟输入箝位保护、二阶抗混叠滤波器、跟踪保持放大器、16 位电荷再分配逐次逼近型 ADC 内核、数字滤波器、 $2.5\text{ V}$  基准电压源及缓冲、高速串行及并行接口. AD7606 采用  $5\text{ V}$  单电源供电,不再需要正负双电源,并支持  $\pm 10\text{ V}$  或  $\pm 5\text{ V}$  双极性信号输入.所有通道均能以高达  $200\text{ k}$  sps 的速率进行采样,同时输入端箝位保护电路可以承受最高达  $\pm 16.5\text{ V}$  的电压.另外,AD7606 内部的信号调理电路中已经包含了低噪声、高输入阻抗

的信号调理电路,其等效输入阻抗完全独立于采样率且固定为  $1\text{ M}\Omega$ .同时输入端集成了具有  $40\text{ dBd}$  的抗混叠抑制特性滤波器,不再需要外部驱动和滤波电路.电压(电流)变换器的输出信号无需再经过运放来缓冲就可以直接接入 AD7606.

## 2.4 GPRS 无线数据传输单元设计

本系统中的无线数据传输单元采用了 WG-8010 GPRS DTU 无线数据传输模块,它以无线分组交换技术为基础,采用 IP 数据网络协议,提高了现有的 GSM 网的数据业务传输速率,最高可达  $170\text{ kb/s}$ ,具有“实时在线”、“高速传输”、“按量收费”等特点,能够较好地满足监测系统远程、实时、在线等方面的要求<sup>[4]</sup>. WG-8010 GPRS DTU 无线数据传输模块提供了标准的 RS232 数据接口,可以与通过 232 接口电平转换芯片与 DSP 的 SCI 接口相连来完成与远程监测系统的数据传输.

## 2.5 USB 大容量数据存储单元设计

监测系统的历史数据查询与分析都依赖于日常的监测数据,然而高精度、高采样率的数据采集必然带来庞大数据量,因此大容量的储存单元设计是非常必要的.考虑到 USB 接口的高速性能以及 U 盘、移动硬盘等大容量存储器接口的兼容性,设计中采用了 CH376 USB 文件管理芯片,该芯片支持 USB 设备方式和 USB 主机方式,并且内置了 USB 通讯协议的基本固件、处理 Mass-Storage 海量存储设备的专用通讯协议的固件、SD 卡的通讯接口固件、FAT16 和 FAT32 以及 FAT12 文件系统的管理固件,支持常用的 USB 存储设备(包括 U 盘/USB 硬盘/USB 闪存盘/USB 读卡器)和 SD 卡(包括标准容量 SD 卡和高容量 HC-SD 卡以及协议兼容的 MMC 卡和 TF 卡).通讯接口支持 8 位并口、SPI 接口或者异步串口,与 DSP 的通讯非常方便.

## 2.6 监测装置电源设计

为了保障监测系统能够连续稳定的运行,该装置采用后备式 UPS(Uninterrupted Power Supply)作为基本电源.装置内部的电源设计包含  $1.8\text{ V}$  DSP 核心电源设计、 $3.3\text{ V}$  I/O 口数字电源设计、 $5\text{ V}$  模拟电源设计和  $\pm 15\text{ V}$  传感器电源设计及其接口设计.将以上各单元模块封装在一个标准的 4U 机箱内,整个装置的外观如图 2 所示.

# 3 系统软件设计

## 3.1 DSP 下位机程序设计

基于 TMS320F28335 的 DSP 下位机程序采用

TI 公司研发的集成开发环境 CCS v4 (Code Composer Studio version 4.12) 进行编译、调试和下载,主要包括 DSP 初始化程序、数据采集程序、数据处理程序、越限检测程序、数据存储程序和传输程序等,程序流程图如图 3 所示。



图 2 监测装置外观图  
Fig.2 Monitoring device appearance

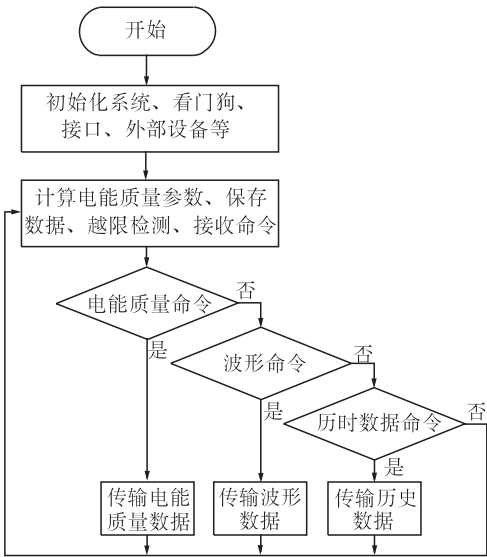


图 3 DSP 程序流程图  
Fig.3 Program flow chart of DSP

装置上电后,首先运行初始化程序,对 DSP 系统时钟、I/O 接口、定时器、SCI 接口、SPI 接口、外部设备、看门狗等进行初始化,然后循环运行数据采集、电能质量参数运算、越限检测和存储程序,在收到上位机指令后,根据指令分别运行相应子程序,并向上位机发送数据。

3.2 上位机监测分析软件设计

上位机监测分析软件采用美国国家仪器 (NI) 公司的 LabVIEW 进行开发. 该开发环境以图形化编辑语言 G 编写程序,具有许多强大的模块节点和计算能力,能进行各种电能质量指标的分析 and 计算,同时还具有强大的网络功能,能进行远程设备控制和数据传输,非常适合电能质量监测分析软件的开发<sup>[5]</sup>. 客户端监测分析软件主要包括上位机通信程序、数据库程序、电能质量分析

程序、暂态事件记录程序和 Web 发布程序等. 图 4 ~ 图 6 分别给出了 3 个监测界面。

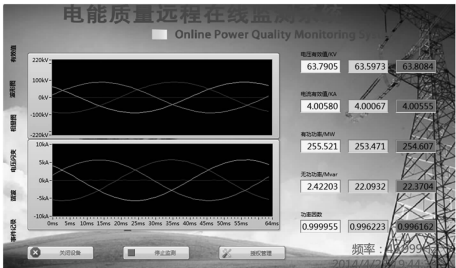


图 4 电压/电流实时波形与有效值  
Fig.4 Real-time waveform of voltage and current and RMS



图 5 实时谐波分析与频谱  
Fig.5 Real-time harmonic analysis and frequency spectrum



图 6 三相不平衡实时分析  
Fig.6 Real-time analysis of three phase imbalance

该系统能够完成基波电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数、2 ~ 50 次稳态谐波分量的有效值和含有率、总谐波含有率、三相电压及电流不平衡度、三相电压及电流量序分量、电压偏差等稳态指标的测量;根据检测数据,可绘制出三相电压和电流的波形图、基波有效值曲线、频率图谱和电压电流矢量图;当出现电压偏差越限、谐波越限、三相不平衡越限、电压骤降、电压骤升和短时电压中断时,可将检测数据记录在对应的数据文件里,以便在需要时查阅。

4 实验及分析

为了验证该系统的测量精度和性能,采用 JCD4060 三相精密测试电源对该系统进行了测试

实验. 由于篇幅所限,只给出部分电压测量结果如 表 1 所示.

表 1 三相电压精度测试数据  
Tab.1 Test data of three-phase voltage accuracy

输入电压 电源	测量值/V			相对误差/%		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
120	120.16	119.99	120.18	0.13	-0.01	0.15
110	110.13	109.95	110.15	0.11	-0.05	0.05
100	100.09	99.99	100.12	0.09	-0.01	0.12
90	90.07	89.96	90.08	0.07	-0.04	0.09
80	80.02	79.87	80.09	0.02	-0.04	0.11
60	60.07	60.00	60.05	0.11	0	0.08
40	40.05	39.95	40.04	0.12	-0.13	0.10
20	19.98	19.97	20.02	-0.10	-0.10	0.10

由表 1 可以看出,三相电压有效值的相对测量误差分布在  $-0.10\% \sim 0.15\%$  之间. 从其他测量结果可以看出,该系统电流有效值的测量精度为  $0.17\%$ , 功率测量精度为  $0.51\%$ , 谐波电压的测量精度为  $1.6\%$ , 谐波电流的测量精度为  $1.8\%$ , 负序电压的测量精度为  $1.4\%$ , 负序电流的测量精度为  $1.6\%$ . 由此可见,测量精度满足国家标准要求.

5 结论

实测结果表明,笔者所设计的基于 DSP + GPRS 的远程在线电能质量监测系统设计方案合理,系统工作稳定,响应速度快,能够满足监测电能质量和记录暂态事件的要求;采用 GPRS 通讯,实现了远程数据传输,大大降低了监测成本和人

工投入;基于 LabVIEW 平台开发的上位机监测分析软件不仅功能丰富,而且界面友好,使监测人员可以很快地掌握系统的操作方法.

参考文献:

[1] 王宪磊. 电能质量与在线监测方法研究[J]. 科技创新导报,2012,10 (10):1-4.  
[2] 许丽霞. 电能质量监测技术的发展[J]. 电气工程应用,2014,29(1):27-29.  
[3] 孙攀,张广明. 基于 DSP 的电能质量监测系统设计[J]. 自动化仪表,2012,33(1):82-86.  
[4] 谢奕,欧阳森,黄义峰,等. 基于 GPRS 的电能质量监测系统的开发 [J]. 低压电器, 2009 (21):37-40.  
[5] 张达润. 电能质量在线监测系统在供电网的应用[J]. 电气技术, 2014,14(3):103-105.

Design of an Online Power Quality Monitoring Equitment Based on DSP and GPRS

ZHOU Yong<sup>1</sup>, ZHU Ming-li<sup>1</sup>, DU Xia<sup>2</sup>, WANG Hong-lin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Lankao Power Supply Co., Ltd, Lankao 475300, China)

**Abstract:** In order to realize the online remote monitoring of power quality, the 32-bit TMS320F28335 float-ing-point digital signal processor is applied to collect on-site voltage and current data, which is uploaded to the host computer through the wireless transmission unit, and the real-time power quality monitoring and analysis is realized in LabVIEW environment. Test results show that the system have advantages such as stability of op-eration and geographical adaptability, and can thus well meet the requirements of power quality monitoring and transient event recording.  
**Key words:** power quality, online monitoring; digital signal processor (DSP); general packet radio service (GPRS)

文章编号:1671-6833(2014)05-0031-05

# 未知环境中考虑姿态稳定性的自主机器人路径规划

王东署<sup>1</sup>, 朱训林<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 数学系, 河南 郑州 450001)

**摘要:**未知环境中自主机器人合理的路径规划是进行探索任务的前提. 传统的路径规划方法侧重于研究从起始点到目标点的无碰路径, 很少考虑机器人自身运动的平稳性. 研究了室外未知环境中考虑机器人姿态稳定性以及能量损耗的路径规划方法, 该方法分 3 步: ①梯度计算, 计算运动区域的梯度; ②节点探测, 运动区域被划分为平坦区域和非平坦区域, 辨识每个平坦区域的中心位置, 即节点; ③路径评估, 根据提出的评估函数, 规划出从当前位置经过中间节点到目标点的最优路径. 通过和传统规划方法获得的路径比较, 仿真验证了所提方法的有效性.

**关键词:**自主机器人; 路径规划; 能量损耗; 数字高程图; 数字梯度图; 姿态稳定

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.008

## 0 引言

随着自主移动机器人在人类生产生活中的应用越来越广泛, 其工作环境变得越来越多样化, 更多地出现在室外未知的复杂环境中. 这些未知复杂环境通常是人类难以达到的或非常危险的区域, 如星际探索、地下资源勘探以及地震、核事故或生化袭击发生后的救灾场所. 这些危险区域促使机器人研究人员将研究重心转向复杂环境中真实世界的挑战, 遥操作自主机器人在这些环境的路径规划技术就成为主要的研究热点之一.

在很多未知复杂的应用环境中, 传统的机器人路径规划方法是规划出一条从起始点到目标点的、避开高梯度区域的无碰最短路径<sup>[1]</sup>. 然而经验丰富的遥操作人员认为这样规划出来的路径并不合理, 因为机器人在这种路径上运动时要不断调整运动方向, 降低了运动的安全性, 增加了打滑或陷入某个陷阱的几率, 甚至可能造成侧翻, 最终导致机器人损坏和整个探索任务的失败<sup>[2]</sup>.

因此, 路径规划中仅仅考虑无碰的安全最短路径是不够的, 还应考虑机器人自身运动的平稳性. 国内外诸多学者在此方面进行了一定的探索<sup>[2-6]</sup>, 如王鸿鹏等<sup>[2]</sup>以轮式滑动转向移动机器人作为研究对象, 建立了运动打滑模型, 讨论了打滑

因素对移动机器人运动平稳性的影响.

在移动机器人路径规划的指标函数中, Rowe 等<sup>[7]</sup>提出了复杂环境中以能量损耗为评价指标的路径规划算法, 此后 Sun 等<sup>[8]</sup>对其进行了推广, 霍伟等<sup>[9]</sup>对 Rowe 等提出的方法进一步推广至平面区域中机器人的路径规划. 此后, 许多学者开始在路径规划中引入能量指标, 结合其他智能优化算法, 如人工势场法<sup>[10]</sup>、遗传算法<sup>[11]</sup>、蚁群-遗传算法<sup>[12]</sup>等规划出了合理的路径.

笔者在前述研究的基础上, 针对自主移动机器人在室外未知复杂环境中的路径规划问题, 提出了一种新的规划思想: ①该思想吸收了自主机器人遥操作人员的控制思想, 在进行路径规划时除考虑路径因素外, 还同时考虑了机器人侧翻和打滑对规划结果的影响; ②遇到障碍物时, 并非全部采取绕行的避障策略, 在面对坡度较小的障碍物时, 直接从障碍物上翻越过去, 面对坡度较大的障碍物时才采取绕行的策略; ③把备选路径运行时消耗的能量也作为评价路径的性能指标之一, 规划出最优的无碰路径. 通过与传统路径规划方法进行比较, 仿真验证了笔者方法的有效性.

## 1 路径规划方法

设自主机器人运行在室外未知的复杂环境

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2013-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174085); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20114101110005)

作者简介: 王东署(1973-), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机器人智能控制研究, E-mail: wangdongshu@zzu.edu.cn.



中,利用三维激光传感器获得周围环境的信息.路径规划方法由以下 3 步组成.

(1)梯度计算. 利用 3 维激光传感器采集环境信息,作为数字高程图的信息来源. 数字高程图中的某个网格用  $G_{\text{height}}(xn, yn)$  表示,  $xn$  和  $yn$  是决定网格在  $x$ - $y$  坐标平面中位置的参数,  $G_{\text{height}}(xn, yn)$  表示网格所包含区域的最大高度,具体含义如图 1 所示. 经过对采集到的数据进行插值处理后,可以得到数字高程图,用 Matlab 软件仿真后,可以得到如图 2 所示的虚拟数字高程图.

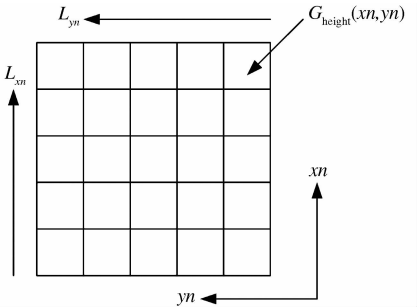


图 1 数字高程图的定义

Fig.1 Definition of digital height map

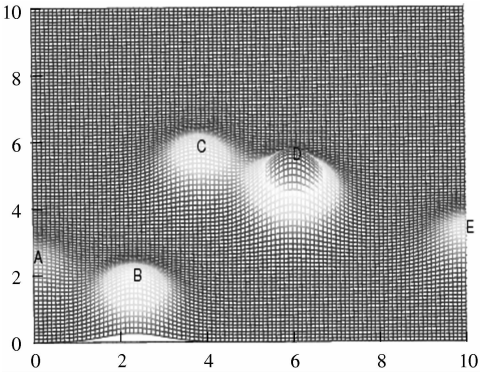


图 2 虚拟的数字高程图

Fig.2 Virtual digital height map

在得到区域环境的数据信息图后,对得到的数据组做进一步的处理,对每个网格中的所有网格的高程值进行重新赋值计算,采取的方法是:分别计算当前网格的高程值和与其相邻的其他网格的高程值之差的绝对值的最大值赋值给当前网格,如图 3 所示,对于中间的网格,如网格 B,会有 8 个相邻的网格,而对于边界上的非顶点网格(如网格 A3)有 5 个相邻网格,4 个顶点的网格(如网格 A)则只有 3 个相邻的网格. 按照这种操作对每个网格进行相应的赋值计算,把数字高程图上的每个网格的梯度全部计算一遍,这样就形成了一个新的基于网格的地图,即数字梯度图,图 2 中的数字高程图所对应的数字梯度图如图 4 所示,其

上的每个网格用  $G_{\text{grad}}(xn, yn)$  表示.

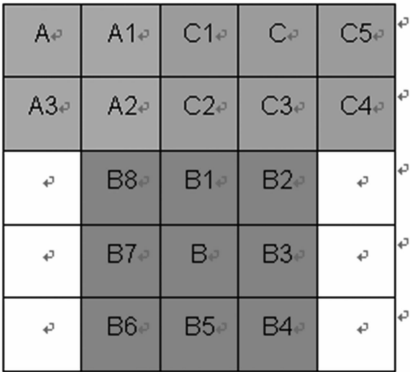


图 3 数据转换的三种情况

Fig.3 Three cases of data transform

(2)节点探测. 所谓节点是指在复杂环境中人为定义的一个特殊区域,在这个区域中机器人很容易就可以翻越过去,并可以在该区域做无侧翻的转动操作.

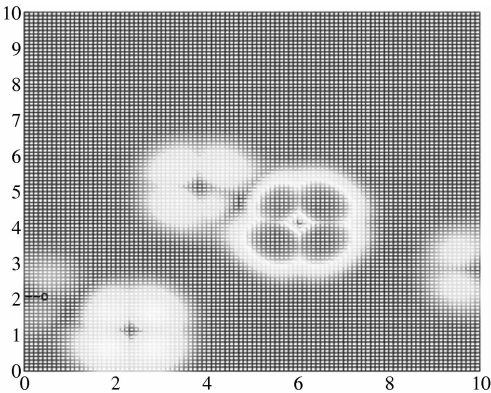


图 4 数字梯度图示意图

Fig.4 Digital gradient map

在小节(1)中已经建立了 DGM 图,按照一定的评价规则从中选出环境中的平坦区域,这里设定一个阈值  $H_{\text{threshold}}$  用来探测机器人是否位于平坦区域. 如果 DGM 图中的某一个网格的梯度值  $G_{\text{grad}}(xn, yn) \geq H_{\text{threshold}}$  的值,那么该网格  $G_{\text{grad}}(xn, yn)$  就被认为位于平坦区域. 相应的把平坦区域的中心叫做节点,并用它来表征平坦区域,如图 5 所示. 按照这样的甄选规则对整个环境区域进行遴选,整个区域环境中就会有很多个节点. 在探测出环境区域里的节点后,根据机器人的攀爬能力,设定一个坡度作为机器人能否翻越障碍物的阈值,这里阈值取  $30^\circ$ . 每两个节点之间会定义一条边界(路径),机器人选择的路径就是由边界和节点组成的线路.

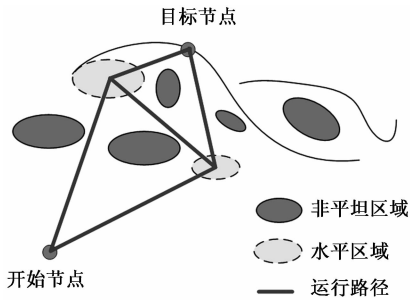


图5 机器人运动节点和路径简图

Fig.5 Nodes and edges graphics

(3) 路径评估. 路径规划时机器人沿着这些边线运动,且应使机器人尽可能多地通过这些水平区域向目标点移动. 利用状态空间的盲目搜索中的一般图搜索方法规划从起始点经其他节点到达目标点的备选路径.

定义评估函数来对这些备选路径进行评估,定义如下

$$Cost = \sum_{\text{path}} \{ (k_{\text{pos}} \cdot \Delta \text{roll} \cdot \Delta \text{yaw}) + (k_{\text{roll}} \cdot \Delta \text{roll}) + l + mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta) l \}, \quad (1)$$

式中: $\Delta \text{roll}(\circ)$  表示机器人与水平面间的横滚角; $\Delta \text{yaw}(\circ)$  表示路径上每个位置处的侧摆角; $l(m)$  表示路径上每部分的长度; $k_{\text{pos}}$  和  $k_{\text{roll}}$  是系数;评估函数中第1项  $k_{\text{pos}} \cdot \Delta \text{roll} \cdot \Delta \text{yaw}$  表示控制机器人打滑的代价;第2项  $k_{\text{roll}} \cdot \Delta \text{roll}$  表示控制机器人侧翻的代价;第3项  $l$  表示路径冗余的代价;第4项表示机器人运动中沿某条路径运动时所消耗的能量.

## 2 能量计算的说明

能量的计算原理如下:设移动机器人运行环境的地形图已知,且由一系列的平面三角形组成. 移动机器人的能量消耗可以定义为机器人在各三角形表面上运动时摩擦力与重力消耗能量之和,同时引入各向异性来解决当地形表面过于陡峭而导致机器人侧翻或者动力不足的问题. 如图6所示,机器人由从  $P_1$  点沿直线运动到  $P_2$  点所消耗的能量  $E$  可由下式给出

$$E = mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta) l. \quad (2)$$

式中: $m$  为机器人的质量; $\mu$  为该平面的摩擦系数, $\alpha$  和  $\beta$  分别为机器人所在的平面以及机器人的运动方向与水平面的夹角.

假设机器人匀速运动,转弯时无能量损耗. 如图7所示,机器人运行过程中有3个禁止区域(用角度表示). 第1个是禁止通行区域(用角度  $\alpha_1$  表示),表示上坡时坡度太陡机器人上不去的区域.

另外两个禁止区域是侧翻区域(用角度  $\alpha_2$  表示),表示机器人重心的投影点超出了支撑点构成的凸多边形而发生侧翻的区域. 除了这3个禁止区域外,另一个特殊的区域是制动区域(用角度  $\alpha_3$  表示),表示机器人下坡获得能量和加速度的区域. 图7中的常规区域是机器人可以自由通行的区域.

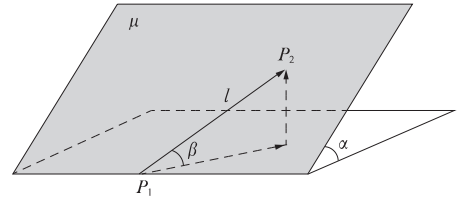


图6 能量消耗示意图

Fig.6 Energy consuming graphics

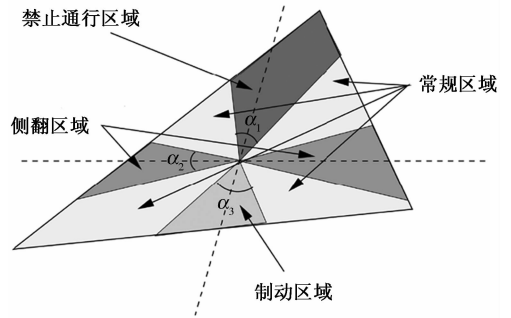


图7 四个区域示意图

Fig.7 Four districts graphics

在制动区域,当机器人沿一定的运动方向  $\beta$  下坡时,有  $\mu \cos \alpha + \sin \beta < 0$ ,使机器人获得能量进而加速运动. 所以,下坡时为使机器人保持匀速运动,应施加一个制动力  $-mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta)$  来避免机器人加速运动. 制动区域  $\alpha_3$  的两个临界制动角度  $\beta_0$  可通过下式计算得到

$$\mu \cos \alpha + \sin \beta_0 = 0. \quad (3)$$

当机器人在这两个临界制动角所组成的制动区域中运动时,下坡时获得的能量被用于制动,机器人在此范围内运动时不消耗能量. 所以前述公式(2)表示的能量计算公式只在机器人运行于常规区域中才使用.

## 3 路径规划算法实现

### 3.1 本算法的实现

在梯度计算阶段,每个网格的大小设为  $1 \text{ m}^2$ ,  $L_{xn}$  和  $L_{yn}$  均取  $100 \text{ m}$ ,这样数字高度图上的网格数为  $10\,000$  个. 路径规划阶段,系数  $k_{\text{pos}} = 0.1$ ,  $k_{\text{roll}} = 10$ . 在仿真环境中,设定A、B、C、D和E5座小山坡,坡度分别为  $10^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $50^\circ$  和  $15^\circ$ ,其俯视

图如图 2 所示,路径规划的起点设在节点 A 附近,目标点设在节点 E 附近.

节点探测阶段所产生的节点和边线(红色直线)如图 8 所示.一共规划出了 5 条路径,分别记为 A-E、A-B-E、A-B-C-E-C-E、A-C-B-E. 然后根据评估函数(1),分别计算不同路径的代价,结果如表 1 所示.运动过程中设机器人匀速运动,转弯时消耗能量为零,参照公路的摩擦力系数,室外未知环境的摩擦力系数取 0.4(大于一般公路的摩擦系数),表中所有数据都进行了取整处理.把所获得的 5 条路径的总代价进行比较,最后获得的最优路径是 A→B→E 的路径,即路径 2.在表 1 中,由于笔者所提方法采用“直线路径”(俯视图中的效果,实际运行路径为三维曲线),这里吸收了自主机器人遥操作人员的控制思想,在实际工作环境中控制机器人沿“直线路径”运动,避免机器人运动过程中运动方向的频繁转换,可有效避免打滑因素对机器人运行平稳性的影响,所以表 1 中的前 5 条路径的打滑代价均为 0.

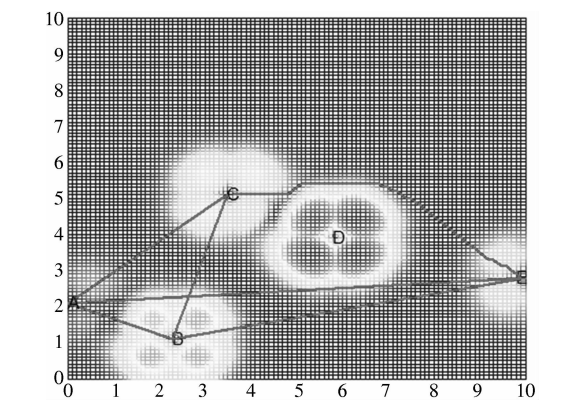


图 8 笔者算法获得的路径(俯视图)  
Fig. 8 Path Obtained by Proposed Method (Planform)

表 1 不同路径的代价比较

Tab. 1 Cost Comparison among Different Paths

序号	所经节点	打滑	侧翻 代价	距离	消耗 能量	总 代价
1	A→C→E	0	963	118	3 440	4 521
2	A→B→E	0	335	102	3 148	3 585
3	A→C→B→E	0	640	165	6 542	7 347
4	A→B→C→E	0	1023	139	5 579	6 741
5	A→E	0	35	98	3 859	3 992
6	图 9 所示路径	407	1002	101	3 984	5 494

3.2 传统方法实现

传统方法包含 3 个阶段. ①梯度计算,障碍物探测和路径规划.第 1 步的梯度计算和该方法完全相同. ②障碍物探测,引入一个坡度阈值

$H_{threshold}$ ,把数字梯度图上的网格划分为自由空间的网格和有障碍物空间的网格.坡度值大于  $H_{threshold}$  的网格被认为是含有障碍物的网格. ③路径规划,在自由空间中采用最短路径搜索方法来规划一条从起点 A 到终点 E 的最短路径.利用该方法获得的最短路径如图 9 所示(俯视图).

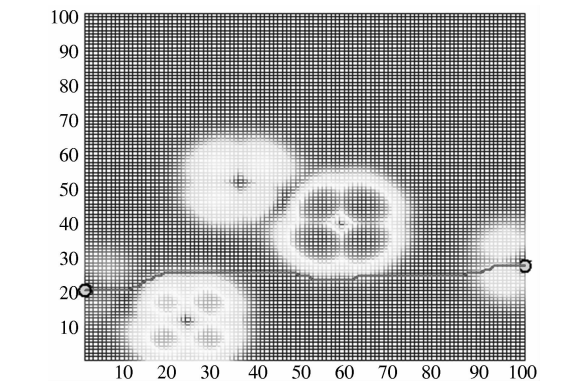


图 9 传统方法获得的路径(俯视图)  
Fig. 9 Path Obtained by Traditional Method (Planform)

3.3 讨论

采用笔者所提方法获得的最优路径是表 1 中的路径 2,虽然最短路径是路径 5,但由于路径 2 的能量消耗小于路径 5 的对应项,使得路径 2 的总代价小于路径 5 的总代价,故路径 2 为规划的最优路径.

利用传统方法获得的最优路径的打滑和侧翻代价都较大,虽然路径 6 和路径 2 相比,距离代价相差不大,但路径 6 的打滑以及侧翻代价之和远大于路径 2 的侧翻代价,消耗能量也大于路径 2 的对应项,这是由于在机器人运动过程中,传统方法总是迫使机器人不断调整运动方向,增加了打滑和侧翻的风险,同时也增加了能量消耗,而这正是机器人实际运动控制中应尽量避免的.

4 结论

设计了针对非平坦复杂区域中自主机器人的路径规划,该方法与传统方法的区别主要有两点: ①除考虑路径因素外,还考虑了打滑和侧翻因素对规划结果的影响,并考虑了路径的能量损耗,使规划的最优路径更安全、更合理; ②在机器人遇到障碍物时,并非全部采用躲避绕行的策略,而是根据障碍物的坡度,确定机器人采用绕行或者直接从障碍物上面越过的原则,减少了运行中频繁更换运动方向导致的打滑或侧翻的风险. 把该方法规划的最优路径与传统方法规划的路径进行了对比分析,仿真结果验证了笔者所提方法的有效性.

## 参考文献:

- [1] LIU Hui, NORBERT S, STEFFEN J, et al. A Floyd-Dijkstra Hybrid Application for Mobile Robot Path Planning in Life Science Automation[C]. 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Seoul, Korea, 2012; 279 – 284.
- [2] 王鸿鹏. 复杂环境下轮式自主移动机器人定位与运动控制研究[D]. 天津: 南开大学信息技术科学学院, 2009.
- [3] MICHAEL B, BERND B, DIRK S. Towards autonomously traversing complex obstacles with mobile robots with adjustable chassis[C]. 2012 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), 61 – 64.
- [4] SHEN C C, KE J H, CHENG H L. Trajectory planning for stair climbing in the leg-wheel hybrid mobile robot Quattroped[C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 1229 – 1234.
- [5] AHMED E, ACHIM W. Lyapunov stability study for a special actuated holonomic wheeled mobile robot[C]. 2011 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 1962 – 1967.
- [6] OHKI T, NAGATANI K, YOSHIDA K. Safety path planning for mobile robot on rough terrain considering instability of attitude maneuver[C]. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 55 – 60.
- [7] ROWE N C, ROSS R S. Optimal grid-free path planning across arbitrarily contoured terrain with anisotropic friction and gravity effects[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(5): 540 – 553.
- [8] ZHENG Sun, JOHN H R. Finding energy minimizing paths on terrains[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 102 – 114.
- [9] 霍伟, 刘大维, 王江涛. 基于局部最小能量的移动机器人路径规划[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(4): 99 – 104.
- [10] LI Guang-hui, ATSUSHI Y, HAJIME A. An efficient improved artificial potential field based regression search method for robot path planning[C]. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1227 – 1232.
- [11] NAFISEH S. Mobile robot path planning by new structured multi-objective genetic algorithm[C]. 2011 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR), 79 – 83.
- [12] IMEN C, ANIS K. smartPATH: A Hybrid ACO-GA Algorithm for Robot Path Planning[C]. WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational intelligence, 1 – 8.

## Path Planning of Autonomous Robot Considering Attitude Stability in Unknown Environment

WANG Dong-shu<sup>1</sup>, ZHU Xun-lin<sup>2</sup>

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Mathematics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Suitable path planning is precondition of autonomous robot exploration in unknown complex environments. Traditional path planning methods focus particularly on planning an un-colliding path from the start position to the goal and robot attitude stability is seldom considered. A new path planning approach considering robot's attitude stability and energy consumed in outdoor complex environment is proposed, which consists of three steps: (1) gradient calculation, gradients of the rough terrain are calculated; (2) node detection, terrain is divided into flat regions and rough regions according to height threshold; central position of each flat region is recognized as the node; (3) path evaluation, the optimal path from current position to destination through intermediate nodes is planned based on the cost evaluation function. Compared with the conventional approach, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through simulations.

**Key words:** autonomous robot; path planning; energy consumed; digital height map; digital gradient map; attitude stability

基于 HLS 协议的流媒体直播系统的研究和改进

罗淑贞<sup>1</sup>, 耿恒山<sup>1</sup>, 徐祥男<sup>1</sup>, 孙豪赛<sup>2</sup>, 高艳<sup>1</sup>, 李钦<sup>1</sup>, 谢因<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学 计算机科学与软件学院, 天津 300401; 2. 天津理工大学 自动化学院, 天津 300384; 3. 天津滨海新区环球网络电视有限公司, 天津 300202)

摘要: 对基于 HTTP live streaming(简称 HLS)协议的流媒体直播系统的工作原理以及结构进行了系统的介绍,利用网络数据分析仪来深入研究客户端与服务器的交互传输过程,剖析了这种技术应用于网络电视直播时所存在的视频流索引文件重复下载的冗余问题,在一定程度上造成了网络流量的浪费,降低了传输效率. 针对这类问题提出了一种改善的方法——标志法,即在 .m3u8 文件中添加一个新标签,并通过计算推导和实验验证把改善前后的效果进行了定量分析和对比,实验结果表明该方法可有效降低流量浪费率,提高传输性能,具有较大的可行性.

关键词: HLS; TV; 冗余; 视频流索引; 标志法

中图分类号: TP393.0 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.009

0 引言

HTTP Live Streaming 是 Apple 公司针对 iphone,ipad 等移动终端设备开发的一种基于 HTTP 的自适应流媒体协议<sup>[1]</sup>,而 HLS 技术是将媒体源编码为不同编码速率的多个流,客户端根据网络带宽状况的变化选择不同编码速率的替换流,实现带宽波动时的流媒体自适应切换<sup>[2-4]</sup>.

由于数据通过 HTTP 协议传输,所以完全不用考虑防火墙或者代理的问题,而且分段文件的时长很短,客户端可以很快地选择和切换码率,以适应不同带宽条件下的播放<sup>[5]</sup>. 当这种技术应用于电视直播时,为了满足客户端进行一定时间的时移观看功能,在服务器与客户端的交互传输过程中会存在视频流索引文件重复下载所造成的冗余问题,浪费流量和资源且影响了性能,为此笔者提出了一种方法——标志法来有效改善这种情况,并通过实验把改善前后的效果进行了对比,充分验证了这种方法的可行性.

1 HLS 技术工作原理以及结构

如图 1 所示,HLS 技术由 3 部分组成:服务组件、视频分布存储和客户端软件部分. 首先对视频数据进行录入,编码,然后服务器软件的流分段程序将媒体视频流分解成一系列简短的 .ts 媒体文

件,这些 .ts 文件被放置在 web 服务器上. 这个流分段程序同时还创建一个索引文件,该索引文件包含元数据以及一个 .m3u8 媒体文件的列表,且索引文件的 URL 发布到 web 服务器上,客户端软件即可读取索引,请求媒体文件,并将其显示出来<sup>[6-8]</sup>.

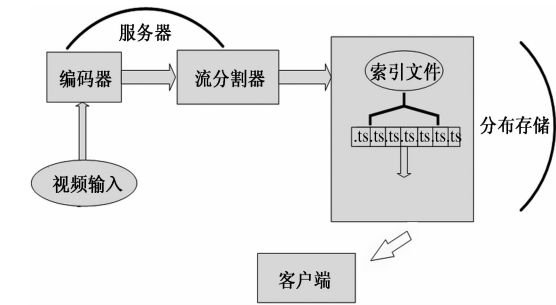


图 1 HLS 技术结构图  
Fig.1 The structure of HLS system

2 服务器与客户端之间的传输过程以及出现的问题

针对应用 HLS 技术的电视直播情况,下面以客户端和服务端之间的交互传输为例详细分析其过程以及出现的视频流索引文件重复下载的问题,在这里采用网络数据分析仪来实现分析和检测,且下述图例均是在网络数据分析仪上截取的.

收稿日期:2014-04-25;修订日期:2014-07-03  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(31100711)  
通信作者:耿恒山(1952-),男,河北徐水人,河北工业大学教授,主要研究方向为计算机网络、自动控制.



2.1 传输过程以及视频流索引文件重复下载的问题

图 2 为客户端与服务器之间的传输视频流.

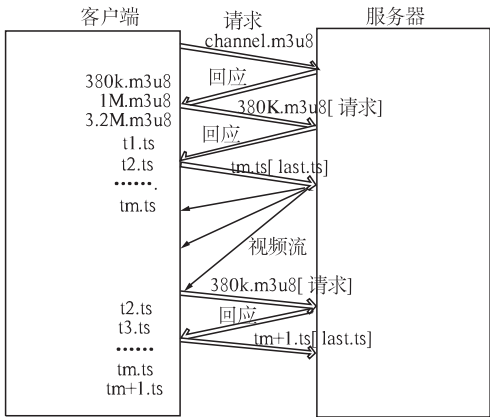


图 2 客户端和服务端之间传输视频流  
Fig.2 Transmit video streaming between server and clients

其中一定时间内获得的. ts 索引文件的个数  $k$  是由服务器上用于直播的缓存来决定的.

$$k = \frac{\text{设定的时移时间}}{\text{分段文件的时长}} \quad (1)$$

假设设定进行时移的时间是 1 h, 那么直播的缓存就要储存 1 h 的. ts 索引文件. 若分段文件的时长是 2 s 或是 5 s, 其个数  $k$  就为 1 800 或 720. 进而再根据客户端播放器的缓存来决定间隔多长时间取. ts 索引文件, 如果缓存上的. ts 文件数量满足客户端的需求, 就暂时不用取, 若不满足就要去申请, 所以索引文件的个数很大, 很容易产生冗余, 降低传输效率. 下面以设置时移时间为 2 h, 分段文件的时长 10 s, 且供选择的带宽分别是 380 k、1 M、3.2 M 为例来具体阐述其过程.

如图 2 所示, 客户端首先向服务器发送一个请求频道的. m3u8 索引文件, 服务器立刻发出回应, 如图 3(a) 为具体实现步骤, 且回应的. m3u8 文件的内容如图 3(b) 所示. 通过内容可以明显看出, 传输过来的索引文件有 3 个带宽, 大约为 380 k、1 M、3.2 M, 从而系统可以根据实时网络的情况来以不同带宽传输视频流. (在这里以频道 CCTV12 为例).

如图 2 所示, 频道的网络状态确定之后, 就要开始传输视频流, 此时客户端就会申请包含. ts 视频流索引的. m3u8 文件, 服务器给出回应并把. m3u8 索引文件发给客户端, 此时若需要传输序列号为 27 043 的. ts 视频流片段, 那么客户端就会再次发送申请, 服务器回应并给出其播放地址, 从而可播放该序列号的视频段内容, 上述过程如图 4(a) 所示. 回应的. m3u8 索引文件的具体内容如图 4(b) 所示.

```
192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPRequest GET /teletest/storage/CCTV12/teletest_all/CCTV12.m3u8
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPResponse HTTP/1.1 Status:Partial content,URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/CCTV12.m3u8
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/CCTV12.m3u8
(a) 请求, 回应当下载. m3u8索引文件

#EXTM3U.
#EXT-X-STREAM-INF:PROGRAM-ID=1,BANDWIDTH=385840, CODECS="mp4a.40.2,avcl
77.30",RESOLUTION=320x240,Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000.m3u8
#EXT-X-STREAM-INF:PROGRAM-ID=1,BANDWIDTH=1021840, CODECS="mp4a.40.2,avcl
77.30",RESOLUTION=640x480,Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D9000000.m3u8
#EXT-X-STREAM-INF:PROGRAM-ID=1,BANDWIDTH=3247840, CODECS="mp4a.40.2,avcl
77.32",RESOLUTION=720x576,Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D30000000.m3u8
(b) m3u8索引文件的内容
```

图 3 发出频道申请以及回应的具体内容  
Fig.3 Send channel request and respond the contents

```
192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPRequest GET /teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000.m3u8
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPResponse HTTP/1.1 Status:Partial content,URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000...
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000.m3u8
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000.m3u8
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000.m3u8
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPRequest GET /teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPResponse HTTP/1.1 Status:Partial content,URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
124.*.*.11 192.*.*.124.*.*.11 HTTP HTTPPayload URL:/teletest/storage/CCTV12/teletest_all/teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts
(a) 申请. ts 视频流索引文件并回应
```

```
#EXTM3U.#EXT-X-VERSION:1.# Created with *****
#EXT-X-MEDIA-SEQUENCE:26328.#EXT-X-ALLOW-CACHE:NO.#EXT-X-TARGETDURATION:20.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-26327.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-26328.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-26329.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-26330.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-26331.ts.#EXTINF:10,no
.....
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27040.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27041.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27042.ts.#EXTINF:10,no
desc:Teletest_all-audio_eng%3D64000-video%3D3000000-27043.ts.#EXTINF:10,no
(b) m3u8索引文件的具体内容
```

图 4 发出视频流申请以及回应的具体内容  
Fig.4 Send streaming request and respond the contents

如图 4(b) 所示, . m3u8 索引文件的具体内容是从序列号为 26 327 到 27 043 的. ts 视频流索引.

如图 2 所示, 服务器向客户端传送序列号为 27 043 的视频流片段之后, 客户端就会向服务器再次发出申请, 申请更新后的. m3u8 索引文件, 从而才可以下载下一个即序列号为 27 044 的视频流片段, 如图 5(a) 所示. 更新后的. m3u8 索引文件的具体内容如图 5(b) 所示.

如图 5(b) 所示, 更新后的. m3u8 文件内容是从序列号为 26 328 到 27 044 的. ts 视频流索引.

由此可见, 更新后的索引文件和前一个索引文件的内容是存在很大冗余的, 带宽的浪费率很高, 很大程度耗费流量, 降低效率.

2.2 冗余问题所带来的弊端

当使用手机或者电视进行时, 通常都是以高带宽进行传输, 则流量的浪费率计算过程如下.

根据 2.1 节叙述, 传输的一个. m3u8 索引文件的内容大小是 1 448, 如图 6 所示.



由图 10(b)可知,经由改进方案后的.m3u8 索引文件,其内容为序列号为 27 043 和序列号为 27 044 的索引文件.与改进前图 10(a)(序列号 26 328 到 27 044 的索引文件)相比较,大大降低了冗余度,改善效果很明显.

根据公式(2)并可得出流量的浪费率

$$\eta = \frac{1\,448 \times 1}{1\,448 \times 1 + 1\,448 \times 280} = 0.37\% . \quad (4)$$

可得其流量被浪费的比率为 0.37%,与改进前流量浪费率 1.4% 相比,有效节省了流量.

经过大量的实验,当改变时移时间或是视频流片段时间时,改进前后的带宽的浪费率如表 1 所示.由表中可得出,改进后的效果较为明显,冗余度大大降低,有效提高了传输的性能.改善方法是非常可行的.

表 1 不同情况下带宽浪费率的比较

Tab.1 The bandwidth wastage rates in different situation between and after improvement

时移 时间/h	分段文件 时长/s	带宽浪费率 (改善前)/%	带宽浪费率 (改善后)/%
1	2	0.2	0.04
	5	0.5	0.10
	10	0.9	0.21
2	2	0.3	0.08
	5	0.8	0.19
	10	1.4	0.37
5	2	0.7	0.22
	5	1.9	0.54
	10	3.6	1.17

4 结论

针对基于 HLS 技术的流媒体直播系统进行

了深入的研究,剖析了了当中所存在的问题,并立足于现状,提出了解决方案,能够提高工作效率,提升性能,但是针对冗余问题提出的解决方案有所不足,当进行直播时,若网络状态出现极其不好的时候,可能会出现视频流段没有被完全下载的情况.但是出现这种情况的概率还是很小的,所以这个方案还是非常具有可行性的,可以预见,会有很广泛的应用前景.

参考文献:

[1] 朱倩. 新一代流媒体 HLS 关键技术的研究及实现 [D]. 辽宁:大连理工大学信息学院,2011.

[2] 李云飞,谢伟凯,鲁晨平,等. 面向直播 HTTP Streaming 系统的 HTTP 缓存服务器行为优化 [J]. 计算机工程与应用,2012,40(3):168-174.

[3] 凌艳群. 基于 HTTP 的流媒体系统关键技术研究及实现 [D]. 辽宁:大连理工大学信息学院,2011.

[4] 李光大. 基于 HTTP 直播的移动流媒体系统的设计与实现 [D]. 华中科技大学计算机学院,2011.

[5] HTTP Live streaming draft-pantos-http-live-streaming-11 [EB/OL]. [2013-04-16]. <http://tools.ietf.org/html/draft-pantos-http-live-streaming-11>

[6] Apple Inc. HTTP Live Streaming Architecture: Technical report [R], 2010.

[7] Open IPTV Forum-Release 2 Specification, HTTP Adaptive Streaming [R]. Draft V0.06 June 7, 2010.

[8] 金达,叶庆伟,狄红卫,等. 基于 HLS 的流媒体播放系统的设计与实现 [J]. 信息技术, 2013,29(40): 103-104.

Research and Improvement of Streaming Media Live System Based on HLS Protocol

LUO Shu-zhen<sup>1</sup>, GENG Heng-shan<sup>1</sup>, XU Xiang-nan<sup>1</sup>, SUN Hao-sai<sup>2</sup>, GAO Yan<sup>1</sup>, LI Qin<sup>1</sup>, XIE Yin<sup>3</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. School of Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Binhai New Area Universal Network Television Ltd, Tianjin 300202, China)

**Abstract:** This paper systematically introduces the working principle and structure of streaming media living system based on HTTP live streaming protocol(also known as HLS). It makes a deep research on interact transmission process between client and server with the network data analyzer and analyzes detailedly the redundancy problem of video index files being repeatedly downloaded when applying this technology in network television broadcast. But the current technology brings about the waste of network traffic and the reduction of transmission efficiency. In view of these problems, we put forward an improved mark-method technique which add a new tag in m3u8 file. A calculation was carried out to testify the method and it proved it can effectively reduce the waste of net flow rate, improve the transmission performance and have great feasibility.

**Key words:** HLS; TV; redundancy; video streaming index file; mark-method

文章编号:1671-6833(2014)05-0040-04

# 磁耦合电能传输系统两类建模法的等效性分析

栗安鑫<sup>1</sup>, 张江飞<sup>1</sup>, 张祖洸<sup>2</sup>

(1. 机械工业第六设计研究院有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 国网安徽阜阳供电公司 基建部, 安徽 阜阳, 236001)

**摘要:**以磁耦合无线电能传输系统为对象,应用耦合模理论给出了磁谐振系统的动力学模型,从能量的磁场耦合和衰减特性角度阐释了其中关键参数的电路含义,进而导出了输出功率和传输效率表达式.结合等效电路法的有关输出功率和传输效率结论,证实了两者在该层面的一致性.最后,给出了系统输出功率、传输效率与传输距离、工作频率之间的实验关系曲线,说明了理论分析结果的正确性,间接验证了两类建模方法在输出功率和传输效率方面的一致性.

**关键词:**磁谐振;无线电能传输;等效电路;耦合模理论;耦合系数

**中图分类号:** TM74 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.010

## 0 引言

最近几十年来,无线电能传输技术得到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>,特别是感应耦合电能传输(ICPT)技术,具有传输效率高、供电安全可靠等特点,在电动汽车充电、射频识别(RFID)、生物医学供电等方面被广泛应用<sup>[4-5]</sup>,然而 ICPT 技术的传输距离较短,在一定程度上限制了其发展应用.近年来发展起来的近场谐振磁耦合无线电能传输技术<sup>[6-7]</sup>,具有传输距离远,频率可调等优点,逐渐引起专家学者的兴趣.目前对近场谐振磁耦合无线电能传输系统的研究主要是对其传输特性进行分析,具体包括:①通过建模分析导出系统的输出功率和传输效率表达式,分析系统参数对二者的影响;②优化系统参数,提高输出功率和传输效率.分析系统传输特性,首先要建立系统模型,目前常用的建模方法有等效电路法<sup>[8]</sup>和耦合模理论<sup>[9]</sup>.等效电路法从电路理论和工程应用角度出发,通过电路等效和阻抗反射导出系统参数间关系并对系统传输特性分析,发展比较成熟,在系统建模中应用较多.基于磁耦合理论的耦合模理论法,主要是从物理学角度对系统建模分析,与等效电路法相比,适用于品质因数较高、传输距离较大的近场谐振磁耦合系统<sup>[10]</sup>,近年被广泛用于磁耦合电能传输系统建模.

目前,关于谐振磁耦合无线电能传输系统的建模分析大多是分别利用等效电路法或耦合模理论,同时利用两类方法分别从物理和电路角度对系统建模分析的研究较少.文献[10]分别利用两类方法初步对两传输线圈的谐振磁耦合电能传输系统进行建模,导出两种建模方式下系统传输效率相同,但未对系统的输出功率特性进行分析.笔者拟以近场谐振磁耦合无线电能传输系统为对象,利用耦合模理论对传输系统建模分析,结合电路理论知识,导出系统的输出功率和传输效率表达式,通过与等效电路建模方法下导出的输出功率和传输效率表达式对比,得出两类建模方法对系统建模分析具有等效性的结论,并在此基础上对系统的输出功率和传输效率进行分析.最后,通过理论计算和实验测量验证两种建模分析方法在输出功率和传输效率层面的一致性和理论分析的正确性.

## 1 耦合系统建模分析

谐振磁耦合无线电能传输系统的传输结构如图 1 所示,由驱动源、传输线圈和负载组成.其中,驱动源为高频交流电源,电压为  $U$ ,平均值为  $V$ ,由  $E$  类谐振逆变电路产生.传输网络中,线圈的传输距离为  $D$ ;  $L_p$ 、 $L_s$  分别为发射和接收线圈;电容  $C_a$ 、 $C_b$  分别与  $L_p$  和  $L_s$  相连,用来调节两线圈谐

收稿日期:2014-04-30;修订日期:2014-06-19

作者简介:栗安鑫(1984-),男,河南周口人,硕士,研究方向为电力电子,磁谐振无线电能传输,E-mail:lianxin324@126.com.

振频率,尽量使谐振频率与驱动频率相等,以使系统在强耦合谐振状态工作,使负载得到最大的输出功率和最优的传输效率。

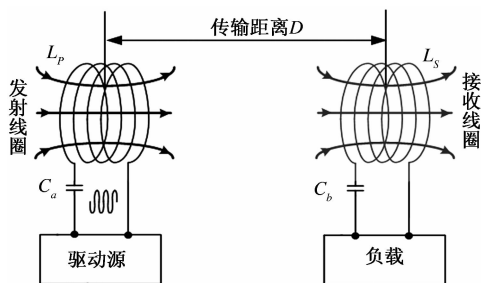


图1 传输系统结构框图

Fig.1 Structure diagram of the transfer system

利用耦合模理论对图1所示的谐振磁无线电能传输系统建模,得到系统的矩阵微分方程

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} a_p \\ a_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (j\omega_0 - \Gamma) & j\kappa \\ j\kappa & (j\omega_0 - \Gamma - \Gamma_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V e^{-j\omega t} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: $a_p$ 、 $a_s$ 分别为表征发射和接收线圈能量的特征复变量,线圈包含的能量分别为 $|a_p|^2$ 、 $|a_s|^2$ ;  $\omega_0$ 为线圈谐振频率,发射和接收线圈相同; $\omega$ 为系统工作频率,且有 $\omega_a = \omega_0 - \omega$ ;  $\Gamma$ 为线圈内部电阻损耗引起的衰减率, $\Gamma_L$ 为负载损耗引起的衰减率; $\kappa$ 为线圈耦合系数; $V e^{-j\omega t}$ 为系统驱动源。

对式(1)所示的微分方程求解可得

$$\begin{bmatrix} a_p \\ a_s \end{bmatrix} = \frac{V e^{-j\omega t}}{\begin{bmatrix} \kappa^2 + \Gamma(\Gamma + \Gamma_L) - \omega_a^2 + j(2\Gamma + \Gamma_L)\omega_a \\ \Gamma + \Gamma_L - j\omega_a \\ j\kappa \end{bmatrix}}. \quad (2)$$

系统在谐振状态下工作时,依据能量与功率之间的关系可知由一次侧发射线圈流入二次侧接收线圈的总功率为

$$P_{sp} = \frac{d|a_s|^2}{dt} = 2j\kappa a_p a_s^* - 2(\Gamma + \Gamma_L)|a_s|^2 = 2\Gamma[(\Gamma + \Gamma_L)^2 + \omega_a^2] + 2(\Gamma + \Gamma_L)\kappa^2. \quad (3)$$

假设系统在理想状态下工作,即系统工作频率 $\omega$ 和谐振频率 $\omega_0$ 相等( $\omega_a = 0$ )。那么,由文献[10]可知,系统输出功率 $P_L$ 和传输效率 $\eta$ 为

$$P_L = 2\Gamma_L |a_s|^2 = \frac{2\Gamma_L \kappa^2 V^2}{[\kappa^2 + \Gamma(\Gamma + \Gamma_L)]^2}, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_L + P_{RP} + P_{RS}} = \frac{\Gamma_L \kappa^2}{\Gamma(\Gamma + \Gamma_L)^2 + (\Gamma + \Gamma_L)\kappa^2}. \quad (5)$$

由式(4)和(5)可知:系统的输出功率 $P_L$ 与驱动电压 $V$ 、线圈间耦合系数 $\kappa$ 和系统衰减率 $\Gamma$

有关;传输效率与耦合系数 $\kappa$ 和系统衰减率 $\Gamma$ 有关。

对于图1所示的磁耦合无线电能传输系统,从电路角度而言,发射线圈 $L_p$ 和接收线圈 $L_s$ 的等效电感、等效电阻分别为 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ ,且有 $L_1 = L_2 = L$ ,  $R_1 = R_2 = R$ 。系统在高频状态下工作时,线圈辐射电阻远小于其等效电阻,辐射电阻损耗常忽略不计;发射线圈 $L_p$ 和接收线圈 $L_s$ 之间的互感记为 $M$ 。从能量耦合角度对磁耦合系统分析可知,系统的能量传输与线圈间的能量耦合系数有关;从电路角度进行分析可知,能量传输与线圈互感有关,因此线圈间能量耦合系数 $\kappa$ 与线圈互感 $M$ 存在某种定量关系。综合以上分析,结合电路理论中线圈互感与耦合系数的关系和文献[6]可知,磁耦合电能传输系统中耦合系数 $\kappa$ 与线圈互感 $M$ 满足

$$\kappa = \frac{\omega}{2} \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\omega}{2} k. \quad (6)$$

对传输系统中单个发射线圈 $L_p$ 或接收线圈 $L_s$ 进行分析,可把发射线圈 $L_p$ 等效成电阻 $R$ 、电感 $L$ 和电容 $C$ 的串联谐振电路。假想电感和电容中的能量随时间按指数规律衰减,衰减的快慢取决于谐振电路微分方程特征根的实部,记为衰减率 $\Gamma$ ,且有

$$\Gamma = R/(2L). \quad (7)$$

将式(6)和(7)带入式(4),经过重新整理可得传输系统输出功率 $P_L$ 为

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{R_L V_p^2}{R(R + R_L)} \frac{k^2 Q^2}{[1 + k^2 Q^2]^2}. \quad (8)$$

式中:系统品质因数满足 $Q_1 = Q_2 = \omega/(2\Gamma)$ ,  $Q_L = \omega/(2\Gamma_L)$ ,  $Q_{2L} = Q_2 Q_L / (Q_2 + Q_L)$ ,  $Q^2 = Q_1 Q_{2L}$ 。

同理,将式(6)、(7)带入式(5)可得传输效率

$$\eta = \frac{R_L}{R + R_L} \cdot \frac{k^2 Q^2}{1 + k^2 Q^2}. \quad (9)$$

由式(8)和(9)分别可以看出:系统的输出功率 $P_L$ 与接收线圈等效电阻 $R$ 、负载电阻 $R_L$ 、输入电压 $V$ 、品质因数 $Q$ 和耦合系数 $k$ 有关;传输效率 $\eta$ 与接收线圈等效电阻 $R$ 、负载电阻 $R_L$ 、品质因数 $Q$ 和耦合系数 $k$ 有关。对于固定的系统,线圈等效电阻 $R$ 、负载电阻 $R_L$ 、输入电压 $V$ 一定,仅有耦合系数 $k$ 和品质因数 $Q$ 可变,因此系统的输出功率 $P_L$ 和传输效率 $\eta$ 都仅与耦合系数 $k$ 和品质因数 $Q$ 有关。

从电路理论的另一个角度对系统进行分析,可得到图1所示的谐振磁耦合电能传输系统的耦



合等效电路模型,如图 2 所示. 图中,发射线圈和接收  $L_p$ 、 $L_s$  的等效电容分别为  $C_1$ 、 $C_2$ ,二者分别与两线圈外加电容之和记为  $C_p$ 、 $C_s$ ,且有  $C_p = C_s = C$ .  $i_p$ 、 $i_s$  分别为流过发射和接收线圈的电流,平均值为  $I_p$ 、 $I_s$ , $R_L$  为负载的等效电阻.

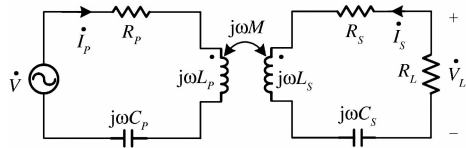


图 2 传输系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the transfer system

由文献[9]可知,利用等效电路法对系统建模分析,可得图 2 所示电路的相量方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+j(\omega L-1/(\omega C)) & j\omega M \\ j\omega M & R+j(\omega L-1/(\omega C)) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_p \\ \dot{I}_s \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中: $V$  为高频交流电源电压; $V_L$  为负载端电压.

通过分析推导出系统输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  的表达式分别为

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{V_p^2 R_L}{R(R+R_L)} \frac{k^2 Q^2}{(1+k^2 Q^2)^2}; \tag{11}$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_T} = \frac{\frac{1}{2} |I_s|^2 R_L}{\frac{1}{2} |I_p|^2 \cdot R + \frac{1}{2} |I_s|^2 (R+R_L)} = \frac{R_L}{R+R_L} \frac{k^2 Q^2}{1+k^2 Q^2}. \tag{12}$$

由式(8)、(9)和式(11)、(12)对比可知:分别利用耦合模理论、等效电路法得到的系统输出功率和传输效率完全相同,从理论上验证了两类建模分析方法在该层面的一致性结论.

2 最大输出功率分析

由于在忽略辐射电阻损耗的情况下耦合模理论和等效电路建模分析方法导出的系统输出功率相同,笔者取式(8)或(11)对系统的最大输出功率进行分析. 下面以式(8)为例,对系统最大输出功率进行分析. 若想得到系统的最大输出功率  $P_{L\max}$ ,则系统输出功率  $P_L$  与耦合系数  $k$ 、品质因数  $Q$  需满足

$$\frac{\partial P_L}{\partial k} = 0 \text{ 或 } \frac{\partial P_L}{\partial Q} = 0. \tag{13}$$

对式(13)求解得耦合系数与品质因数之间满足  $kQ = 1$  时,得到输出功率最大值  $P_{L\max}$ ,且表

达式为

$$P_{L\max} = \frac{1}{8} \frac{R_L V_p^2}{R(R+R_L)}. \tag{14}$$

由上面分析可知:在某一固定的耦合系数  $k$  或品质因数  $Q$  值时,可得到系统输出功率最大值  $P_{L\max}$ ;系统传输效率  $\eta$  与耦合系数  $k$ 、品质因数  $Q$  成正比,且当  $k$ 、 $Q$  值趋近无穷时,可得系统最大传输效率  $\eta$ .

下面的工作是通过理论计算和实验结果分析系统输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  与耦合系数  $k$  和品质因数  $Q$  的关系. 由于系统的耦合系数  $k$  与线圈传输距离  $D$  的三次方成反比<sup>[7]</sup>,即  $k \propto (R_1 R_2 / D)^3$ ;品质因数  $Q$  与系统工作频率  $f$  近似成正比 ( $Q = 2\pi f L / R$ ),因此可以通过改变传输距离  $D$  和工作频率  $f$  对输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  的影响来间接验证耦合系数  $k$  和品质因数  $Q$  对输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  的影响.

3 实验研究分析

为了验证系统输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  与耦合系数  $k$  和品质因数  $Q$  之间的关系,设计了一台实验样机,且系统处于最佳工作状态如图 3 所示. 图中,高频交流驱动电源由  $E$  类谐振逆变电路产生,其输入电压值范围为 12 ~ 24 V,逆变出的高频电源频率为 1 MHz. 为了确保线圈谐振工作频率与驱动源工作频率相同,两传输线圈  $L_p$ 、 $L_s$  分别加 680 pF 电容. 系统参数如表 1 所示.

表 1 传输系统实验参数

Tab. 1 Experiment parameters of the transfer network

参数	数值	参数	数值
电感 $L_1 / \mu\text{H}$	68	电容 $C_1 / \text{nF}$	11
电感 $L_2 / \mu\text{H}$	1.65	电容 $C_2 / \text{nF}$	1
负载电阻/ $\Omega$	12	线圈匝数	11
导线直径/mm	4.6	线圈半径/cm	10
线圈电感/ $\mu\text{H}$	35.2	线圈内阻/ $\Omega$	1.5
谐振电容/pF	700	谐振频率/MHz	1

由  $kQ = 1$  时可得系统最大输出功率可知:当固定系统工作频率  $f = 930 \text{ kHz}$ ,即品质因数  $Q = 14.8$ ,线圈传输距离  $D = 9 \text{ cm}$  时,可得到系统的最大传输功率. 分别通过理论计算和实验测量得出线圈在不同传输距离  $D$  下的驱动源输出有功功率  $P_T$  和输出功率  $P_L$  值,可分别得到输出功率  $P_L$ 、传输效率  $\eta$  与传输距离  $D$  间的关系曲线如图 4 所示. 由图 4 可知:当系统在传输距离  $D = 8 \text{ cm}$  时得到最大的输出功率  $P_L$ ,与理论分析结果基本



一致;系统的传输效率  $\eta$  与传输距离  $D$  成反比,系统输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  的实际测量值和理论计算结果基本吻合. 间接验证了 ECM 和 CMT 建模方法的有效性和理论分析结果的正确性,同时也证实了两类建模分析方法在输出功率和传输效率层面的一致性结论.

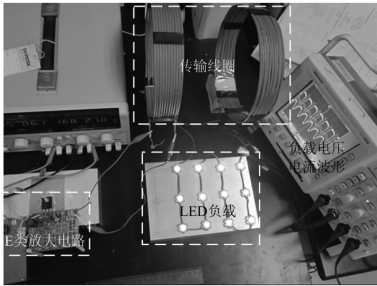


图 3 系统实验电路图

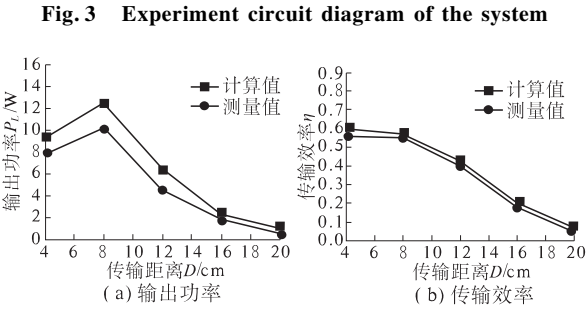


图 4 输出功率、传输效率与传输距离  $D$  间关系曲线

Fig. 4 Power& Efficiency as a function of transfer  $D$

同理,由  $kQ=1$  时可得系统最大输出功率可知:当固定线圈传输距离  $D=10\text{ cm}$ ,即互感  $M=2.16\text{ }\mu\text{H}$ ,系统工作频率为  $995\text{ kHz}$  时可得到系统的最大传输功率. 分别通过理论计算和实验测量得出不同工作频率  $f$  下的驱动源输出有功功率  $P_T$  和输出功率  $P_L$  值,得到输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  与工作频率  $f$  的关系曲线分别如图 5 所示. 由图 5 可知:系统输出功率  $P_L$  和传输效率  $\eta$  的实际测量值和理论计算值基本一致,并且在工作频率  $f=950\text{ kHz}$  时得到最大的输出功率  $P_L$  和最优传输效率  $\eta$ ;与理论分析结果基本吻合,进一步验证了理论分析结果的正确性和 ECM 和 CMT 建模方法的

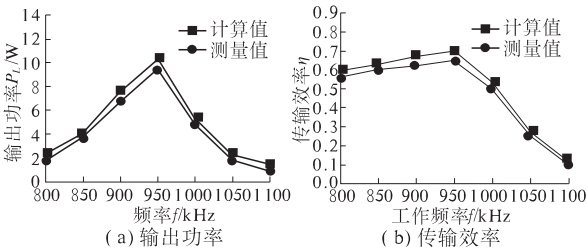


图 5 输出功率、传输效率与工作频率  $f$  间关系曲线

Fig. 5 Power& Efficiency as a function of frequency  $f$

有效性结论.

4 结论

以磁谐振耦合无线电能传输系统为研究对象,利用耦合模理论思想构建了系统电路模型,结合电路理论知识导出了系统输出功率和传输效率表达式,通过与传统等效电路法导出结果的对比分析,得出两类建模方法在该层面的一致性结论. 最后通过理论计算和实验结果间接验证了两类建模方法的一致性.

参考文献:

[1] SAMPLE A P, MEYER D A, SMITH J R. Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544 – 554.

[2] CANNON B L, HOBURG J F, STANCIL D D, et al. Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics [J]. 2009, 24(7): 1819 – 1825.

[3] 傅文珍,张波,丘东元,等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报,2009,29(18):21 – 26.

[4] 王璐,陈敏,徐德鸿. 磁悬浮列车非接触紧急供电系统的工程化设计[J]. 中国电机工程学报,2007,27(18): 67 – 70.

[5] GUOXING W, WENTAI L, SIVAPRAKASAM M, et al. Design and analysis of an adaptive transcutaneous power telemetry for biomedical implants [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2005, 52(10): 2109 – 2117.

[6] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317(83): 82 – 86.

[7] RAMRAKHYANI A K, MIRABBASI S, CHIAO M. Design and optimization of resonance-based efficient wireless power delivery systems for biomedical implants [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2011, 5(1):48 – 63.

[8] 翟渊,孙跃,戴欣,等. 磁共振模式无线电能传输系统建模与分析[J]. 中国电机工程学报,2012, 32(12): 155 – 160.

[9] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 167 – 172.

# 一种改进的中文分词在主题搜索中的应用

许智宏, 张月梅, 王 一

(河北工业大学 计算机科学与技术学院, 天津 300401)

**摘 要:** 主题搜索的核心内容是以中文分词为基础的内容匹配, 而中文分词的准确性以及对未登记词的识别率问题仍是目前主题搜索的瓶颈. 提出了一种改进最大匹配中文分词算法 IMMM, 通过词库预处理、未登录词处理和歧义消除等策略, 并将主题分类和分词词典的存储相结合, 构造了一个主题搜索系统. 实验证明, 改进后的算法较传统的搜索算法在搜索准确率方面有了较大的改进, 系统整体搜索效率有明显提高.

**关键词:** 最大匹配; 主题搜索; 词库; 中文分词

**中图分类号:** TP3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.011

## 0 引言

随着网络技术的发展、Web2.0 时代的到来以及信息需求的变化, 互联网上每天都有海量信息生成、共享和更新, 通用搜索无论是软件还是硬件都面临着巨大的挑战. 为了解决这一问题, 人们提出了基于主题搜索技术<sup>[1-3]</sup>. 它将重点放在特定领域的信息挖掘上, 它的出现为人们获取准确的 Web 信息提供了方便. 信息检索一般是基于关键词索引技术, 以词作为索引必须首先切分出单个的中文词语, 这样就到达了查询数据量广的优点, 但是难于表达丰富的信息量却成了查询的瓶颈. 所以中文分词的准确性、正确性直接影响到查询结果.

中文分词指的是将一个汉字序列切分成一个单词的过程<sup>[4]</sup>. 传统的中文分词算法分为三类: 基于字符串匹配的分词方法、基于理解的分词方法和基于统计的分词方法<sup>[5]</sup>. 这三类分词方法有着各自的特点和不足. 第一类分词法是按照一定的策略将汉字字符串与一个词典中的词进行匹配<sup>[6]</sup>. 第二类分词法通过让计算机模拟人对句子的理解, 由于汉语语言知识的笼统、复杂, 难以将各种语言信息组织成机器可直接读取的形式, 所以目前基于理解的分词系统还处于初始阶段. 第三类分词法所统计的对象是多元的. 最常见的是

基于字与字之间的结合频率<sup>[7]</sup>来决定.

## 1 中文分词在主题搜索中的应用

### 1.1 中文分词在主题搜索中的应用

图 1 所示为整个搜索引擎的架构, 其中索引建立与查询系统主要是中文分词和文档检索. 用户输入关键词或语句, 经过中文分词, 将分词的结果作为查询的依据, 对爬行回来的文档或网页进行检索, 最终返回结果.

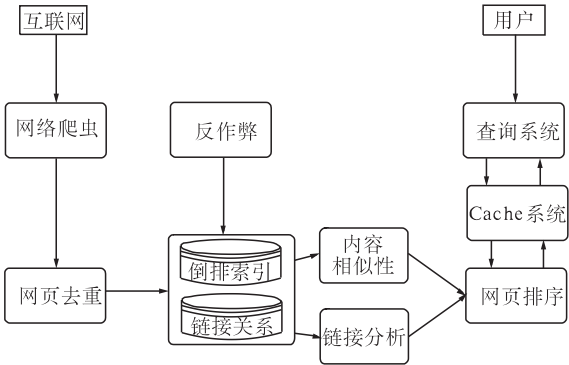


图 1 搜索引擎整体架构

Fig. 1 The overall architecture of search engine

在搜索引擎中使用的分词方法, 有其特定的要求<sup>[8]</sup>. ①时间开销不能太大; ②在准确率和时间开销上找到一个平衡点; ③分词的切分粒度应该尽可能使长词优先匹配; ④要求识别出来的未登记词要尽可能的准确; ⑤搜索引擎的分词使用

收稿日期:2014-05-27; 修订日期:2014-07-17

基金项目:河北省高等学校科学技术研究青年基金项目(20111122)

作者简介:许智宏(1970-), 女, 河北张家口人, 河北工业大学副教授, 博士, 主要从事分布式计算研究, E-mail: xuzhihong@scse.hebut.edu.cn.

的词典要符合互联网用户词语习惯;⑥搜索引擎分词在处理网页文本和用户查询时需要使用同样的分词方法。

搜索引擎对分词的特定要求使得一般的中文分词算法并不能很好地提升搜索引擎的效率。综合传统的三类中文分词算法的思想,作者将实现基于字符串匹配的分词方法的改进。

## 2 基于字符串匹配分词算法机制分析

### 2.1 正向、逆向最大匹配算法

正向最大匹配算法 FMMM 的基本思路是在计算机中存放一个已知的词表。假设词表中有最长长度为  $N$  的字符,那么被处理文档的前  $N$  个字符就被作为匹配字符串  $z$ ,令  $z$  和词表中的词条进行依次对比,如果词表中存在词条与  $z$  相同,那么匹配成功, $z$  便作为一个词被切分出去,假如没有匹配成功,就将  $z$  从末尾处减去一个字符,组成新的  $z$ ,再次与词表中的词条进行匹配,如果匹配成功,则切分出去,否则继续减少  $z$  的字符,重复此过程,直至匹配成功<sup>[9]</sup>。

逆向最大匹配算法 RMMM 基本策略与正向最大匹配算法的思路基本相同,不同的是匹配的方向不同,前者是自左向右,而后者是自右向左。

### 2.2 最大匹配算法分析

来自统计结果显示利用正向最大匹配的错误率为  $1/169$ ,逆向最大匹配方法的错误率为  $1/245$ <sup>[10]</sup>。从结果来看错误率貌似很低,但是就是这样的错误率在现实生活中还是不能被接受的,所以必须对错误率进行降低。由结果可知逆向最大匹配的错误率要小于正向最大匹配,但是由于逆向词表的建立与维护都存在一定的难度<sup>[11]</sup>,所以逆向最大匹配并不能很好地应用于实际操作中。

## 3 最大匹配算法的改进及应用

### 3.1 查询系统构建

查询系统是主题搜索的重要组成部分,也是中文分词的重要应用领域,中文分词的改进主要将在其中发挥效应,重新构建的系统共可分为3个大模块。

(1)信息树词表的构建、更新与维护。为了实现高效率的中文分词,构建一个高效的词表是基础前提,本算法的实现也是基于词表的良好维护与更新。

(2)最大匹配。应用最大匹配对用户的输入的字符串进行词条匹配,其中对匹配成功与匹配

失败的词条进行处理。

(3)未登记词的判断与处理。此功能模块主要对上以模块匹配失败的词条进行记录、存储,并当再次出现时进行频率更新,更新信息树词表。

### 3.2 词表的构建、更新与维护

为了构建高效的词表,必须考虑3个方面:对词典查询速度;词典存储利用率;词典维护的效率。主题搜索的主旨即根据用户定制的主题内容进行搜索,所以在构建词表时将词表的内容分类储存,本算法中词表分为2个主要模块,3个层次:第一个模块是主题分类,第二个模块(未登记词条)是第一个模块中不存在词条。他们的关系如图2所示。

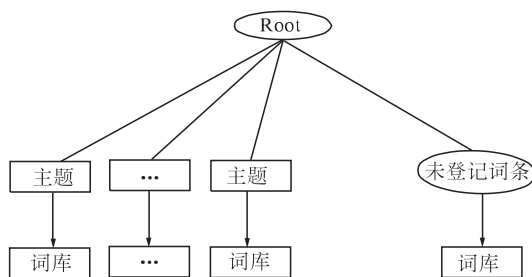


图2 主题与词库关系图

Fig.2 Figure between theme and thesaurus

笔者主要研究中文分词在主题搜索中的应用,所以为搜索的每个分类建立了相应的词库,词库的结构如图3所示,每个分类下的词条存储都改变以往的存储方式,将该主题(相关主题信息)下能组成词汇的汉字建立索引表,按字典中26个英文字母排序排列,每个字组成的词汇按照词汇再次按照索引顺序排序<sup>[12]</sup>。 $W(i,1,1)W(i,1,2) \cdots W(i,1,k) \cdots W(i,j,1)W(i,j,2) \cdots W(i,j,k)$ ,第一个值  $i$  是第一个汉字在索引中的顺序,第二个值  $j$  表示该词在以该汉字开头的词条中长度为  $j$ ,第三个值  $k$  表示在长度为  $j$  的词条中的位置。

对于未登记词条中词条的排序按主题分类下词库的构建进行,未登记词条词库的结构在每一词条增加频率属性  $F$ ,词库表中属性的设置为: $W(i,1,1,F)W(i,1,2,F) \cdots W(i,1,k,F) \cdots W(i,j,1,F)W(i,j,2,F) \cdots W(i,j,k,F)$ ,便于在判断时作为参考。例如第一次分词中出现一个未能分词成功的词“工大”,那么未登记词库中增加词条“工大”,并且初始化“工大”的词频  $F$  等于1,如果以后的分词过程中再次出现未能分词成功的词中含



业领域,词条数量达 30 多万条.系统首先通过分词系统 ictclas4j 实现分词处理,然后将分词结果在 Nutch 搜索结果中进行索引检索,返回结果.

4.1 实验结果分析

由于不同的搜索引擎采取不同的爬虫、分词方法,并不能笼统的说那个算法在搜索引擎中性

能好,当前百度搜索引擎分词主要采用双向最大匹配算法 BMMM,google 采用的是逆向最大匹配算法 RMMM<sup>[13]</sup>.为此我们将主要搜索引擎中的分词算法应用在相同的环境中,得出的结果如表 1 所示.

表 1 部分主题词搜索返回结果  
Tab.1 Part returns results of the keyword search

分词算法	主题词数量/个	搜索测试次数	平均返回结果	最差准确率/%	最高准确率/%	平均准确率/%
BMMM	100	200	9 186	85.51	97.30	91.45
Nutch	100	200	7 820	80.54	93.81	87.15
RMMM	100	200	8 768	83.82	96.43	90.10
IMMM	100	200	9 223	85.30	98.12	91.71

实验采用相同的实验环境对不同的算法进行了对比,表 1 中的结果表明,百度采用的 BMMM 算法要比 google 的 RMMM 以及 Nutch 的要好,经过我们改进的最大匹配算法 IMMM 与 BMMM 算法相差并不太多,从结果来看分词的正确率还有 8.29% 的错误,原因可能是词表中并不能真正的包含所有词汇,而且对词表的修复需要系统的长时间使用,才能实现未登记词对词表的更新.所以经过长时间的词表更新与维护系统的正确率必将得到很好的提高.整个实验过程顺利并且达到了预期的目的.

5 结论

笔者为主题搜索构建了信息树的词表,使得主题搜索中的搜索效率显著提高,在此基础上实现了最大匹配的准确实现,并在算法的实现过程中对已建立的词表进行不断自我完善.

同时,算法也存在一些不足的地方,中文的结构相比于英文要复杂的多,而主题搜索的词表建立过程中并不能真正准确的实现分类,这使分词的匹配难免出现错误,随着算法的不断运用,词表中词量将不断增多,匹配过程将变得耗时、低效,因此词库在自我完善的同时需要进行维护、更新,而这也将是需要进一步研究的问题.

参考文献:

[1] CHO J. Crawling the web:Discovery and maintenance of large—scale Web data[D]; PhD. Thesis Stanford

University,2001.  
[2] 王新,刘晓霞.基于关联规则挖掘的垂直元搜索引擎研究[J].计算机工程,2011,37(4):76-77,80.  
[3] 王旭仁,杨硕,宋蓓.房地产垂直搜索引擎的设计和实现[C].2011 年信息技术、服务科学与工程管理国际学术会议,2011:174-177.  
[4] 何嘉.基于遗传算法优化的中文分词研究[D]西安:电子科技大学电子系,2012.  
[5] 付年均,彭昌水,王慰.中文分词技术及其实现[J].软件导刊,2011,10(1):18-21.  
[6] 万建成,杨春花.书面汉语的全切分分词算法模型[J].小型微型计算机系统,2006,24(7):1247-1251.  
[7] 钱揖丽,郑家恒.文本切分知识获取及其应用[J]计算机工程与应用,2003(2):63-64.  
[8] 张敏.Web 文本信息检索的方法研究[D]北京:清华大学,2003,07.  
[9] 黄魏,高兵,刘异,等.基于词条组合的中文文本分类方法[J].科学技术与工程,2010,10(1):85-88.  
[10] COME D E. Internetworking With TCP/IP Vol I: Principles, Protocols, and Architectures 5th Edition [M].2005.  
[11] 何国斌,赵晶璐.基于最大匹配的中文分词概率算法研究[J].计算机工程,2010,36(5):173-175.  
[12] 闻玉彪,贾时银,邓世坤,等.一种改进的最大匹配算法中文分词算法[J].计算机技术与发展,2011,21(10):92-94.  
[13] 周满英.百度和谷歌的中文分词技术浅析[J].中国索引,2011(2):44-46.



## Application of an Improved Chinese Word Segmentation Technology in Topic Search

XU Zhi-hong, ZHANG Yue-mei, WANG Yi

(Hebei University of Technology, School of Computer of Science and Engineering, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The topic search's core is the contents of the match which is based on the Chinese word segmentation, but the Chinese word segmentation's accuracy and unregistered word's recognition is still the bottleneck of the topic search. This paper proposed an improved maximum matching of word segmentation algorithm IMMM. In improved algorithm designed thesaurus pretreatment, unknown word processing and disambiguation strategy, combined subject categories and sub-word dictionary storage, finally construct a topic search system. The algorithm results show that the improved algorithm is better than traditional algorithms, and the search accuracy rate has been greatly improved. The system's efficiency is improved.

**Key words:** maximum matching; topic search; thesaurus; Chinese word segmentation

(上接第 43 页)

- [10] KIANI M, GHOVANLOO M. The circuit theory behind coupled-mode magnetic resonance-based wireless power transmission [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(8): 1-10.

## Two Modeling Methods Equivalent Analysis of the Magnetic Coupling Power Transmission System

LI An-xin<sup>1</sup>, ZHANG Jiang-fei<sup>1</sup>, ZHANG Zu-long<sup>2</sup>

(1. SIPPR Engineering Group Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China; 2. Fuyang City Power Supply Corporation of State Grid, Fuyang 236001, China)

**Abstract:** With the magnetic resonant coupling wireless power transfer system as the research object in this paper, the magnetic resonance system dynamic model is made by using coupling mode theory, from the energy field coupling and decay characteristic angle explains the circuit meaning of the key parameters, and then the system output power and transmission efficiency expression are derived in this paper. Through contrast analysis of the output power and transmission efficiency expression which is derived by equivalent circuit method, it is concluded that the two kinds of modeling method with consistency conclusion as to the same coupling system. Finally, the quantitative relationships between the output power and coupling coefficient and between the transfer efficiency and coupling coefficient are given, which verify the correctness of the theoretical analysis results, and the consistency of two kinds of modeling method in the output power and transmission efficiency is verified indirectly.

**Key words:** magnetic resonant; wireless power transmission; equivalent circuit; couple mode theory; coupling coefficient



# 区间值犹豫模糊 WOWA 算子及其在决策中的应用

蔡丽娜<sup>1,2</sup>, 陈树伟<sup>1</sup>, 周威<sup>1</sup>, 黄海滨<sup>2</sup>, 梁玉<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国电蚌埠发电有限公司, 安徽 蚌埠 233411)

**摘要:** 为了对以区间值犹豫模糊集形式表达的决策信息进行有效融合, 基于区间值犹豫模糊集和 WOWA (Weighted Ordered Weighted Average) 算子的特性, 定义了一种区间值犹豫模糊 WOWA 算子, 该算子不仅考虑数据自身的重要性, 而且考虑数据排序后所在位置的重要性, 因此, 能够考虑更多的决策信息. 然后, 讨论了区间值犹豫模糊 WOWA 算子的性质, 并给出了一种基于区间值犹豫模糊 WOWA 算子的群决策方法. 最后, 用实例验证了该算子和决策方法的有效性和正确性.

**关键词:** 区间值犹豫模糊集; WOWA 算子; 决策

**中图分类号:** TP3; C934

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.012

## 0 引言

为了有效刻画决策中的模糊不确定性, 专家学者相继给出了几种模糊集. 传统模糊集<sup>[1]</sup>用  $[0, 1]$  上的一个单值来表示元素对集合的隶属度, 直觉模糊集<sup>[2]</sup>用隶属度、非隶属度和犹豫度表示元素的隶属函数, 模糊多重集<sup>[3]</sup>允许元素多次出现, 犹豫模糊集<sup>[4]</sup>允许以  $[0, 1]$  中几个可能值的集合的形式表示元素对集合的隶属程度. 有时专家在给出评价信息时, 通常在几个可能的区间值之间犹豫. 如工厂选址中, 由于某备选方案位置的特殊性, 导致专家在对该方案位置属性评价时难以用精确的数值表示, 而是在区间数  $[0.4, 0.5]$  和  $[0.7, 0.8]$  之间犹豫不决, 此时, 就可以用  $\{[0.4, 0.5], [0.7, 0.8]\}$  这种区间值犹豫模糊集<sup>[5-6]</sup>的形式来表达专家的评价信息, 从而对这种模糊不确定性决策问题进行有效刻画, 并在一定程度上避免了评价中的信息损失.

为了对以区间值犹豫模糊集形式表达的决策信息进行有效处理, 需对它的信息融合方式进行研究. 聚合算子是种强大的信息融合工具, 常用的有加权平均 (Weighted Average, WA) 算子<sup>[7]</sup>, 有序加权平均 (Ordered Weighted Average, OWA) 算子<sup>[8]</sup>, 加权有序加权平均 (Weighted Ordered Weighted Average, WOWA) 算子<sup>[9-10]</sup>等. 其中,

WOWA 算子有效结合了 WA 算子和 OWA 算子的优点, 考虑数据本身的重要性, 且考虑数据排序后所在位置的重要性有更好的特性. 因此, 基于区间值犹豫模糊集和 WOWA 算子, 笔者给出一种区间值犹豫模糊 WOWA 算子, 讨论它的性质, 并给出一种基于区间值犹豫模糊 WOWA 算子的群决策模型, 最后用实际决策问题对其进行验证.

## 1 基础知识

**定义 2.1**<sup>[5-6]</sup>: 设  $X$  为一参考集, 则关于  $X$  的区间值犹豫模糊集为

$$\tilde{E} = \{ \langle x, \tilde{h}_{\tilde{E}}(x) \rangle \mid x \in X \}, \quad (1)$$

式中:  $\tilde{h}_{\tilde{E}} = \tilde{h}_{\tilde{E}}(x)$  为区间值犹豫模糊元素, 表示集合  $X$  中的元素  $x$  隶属于  $\tilde{E}$  的可能区间数的集合, 且这些可能区间数都是  $[0, 1]$  的子集.

区间值犹豫模糊集也可由区间值模糊集的隶属函数的并的形式来定义.

**定义 2.2**<sup>[5]</sup>: 令  $\gamma_i (i = 1, 2, \dots, n)$  为区间值隶属函数,  $\tilde{M} = \{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n\}$  为它们的集合, 则称  $\tilde{h}_{\tilde{M}} : \tilde{h}_{\tilde{M}}(x) = \bigcup_{\gamma \in \tilde{M}} \{\gamma(x)\}$  为由集合  $\tilde{M}$  诱导得到的区间值犹豫模糊集.

区间值犹豫模糊集的思想是: 其允许某一对

收稿日期: 2014-03-20; 修订日期: 2014-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61175055); 教育部高校博士点专项科研基金资助项目 (20114101110005)

通信作者: 陈树伟 (1977-), 男, 河南新乡人, 博士, 研究方向: 模糊控制与决策近似推理; E-mail: swchen@zhu.edu.cn.

象隶属于集合的程度以几个可能区间值的集合的形式表示,比犹豫模糊集更能对决策中的不确定性进行有效刻画,并防止决策中的信息损失.

**定义 2.3<sup>[5]</sup>:** 设  $\tilde{h}_1(x)$  和  $\tilde{h}_2(x)$  为两个区间值犹豫模糊元素. 且,  $\tilde{h}_1(x) = \{\gamma_1(x) | \gamma_1(x) \in \tilde{h}_1(x)\}$ ,  $\tilde{h}_2(x) = \{\gamma_2(x) | \gamma_2(x) \in \tilde{h}_2(x)\}$ , 则有以下运算:

$$(1) (\tilde{h}_1(x))^c = \{(\gamma_1(x))^c | \gamma_1(x) \in \tilde{h}_1(x)\};$$

$$(2) \lambda \tilde{h}_1(x) = \{\lambda \gamma_1(x) | \gamma_1(x) \in \tilde{h}_1(x)\};$$

$$(3) \tilde{h}_1(x) \oplus \tilde{h}_2(x) = \{\gamma_1(x) + \gamma_2(x) - \gamma_1(x) \cdot \gamma_2(x) | \gamma_1(x) \in \tilde{h}_1(x), \gamma_2(x) \in \tilde{h}_2(x)\}.$$

其中,  $\lambda > 0$ .

**定义 2.4<sup>[5]</sup>:** 对于一个区间值犹豫模糊元  $\tilde{h}(x) = \{\gamma(x) | \gamma(x) \in \tilde{h}(x)\}$ ,  $m$  为  $\tilde{h}(x)$  中区间数的个数, 则它的得分函数和偏差函数分别为

$$s(\tilde{h}(x)) = \frac{\sum_{\gamma(x) \in \tilde{h}(x)} ((\gamma(x))^- + (\gamma(x))^+)}{\#2m}, \quad (2)$$

$$e(\tilde{h}(x)) = \left[ \frac{1}{m} \sum_{\gamma(x) \in \tilde{h}(x)} \left( \frac{(\gamma(x))^-}{2} + \frac{(\gamma(x))^+}{2} - s(\tilde{h}(x)) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

由得分函数和偏差函数得到两区间值犹豫模糊元素的比较法则. 对于  $\tilde{h}_1(x)$  和  $\tilde{h}_2(x)$  2 个区间值犹豫模糊元素,  $s(\tilde{h}_1(x))$  和  $s(\tilde{h}_2(x))$  是  $\tilde{h}_1(x)$  和  $\tilde{h}_2(x)$  的得分函数,  $e(\tilde{h}_1(x))$  和  $e(\tilde{h}_2(x))$  是  $\tilde{h}_1(x)$  和  $\tilde{h}_2(x)$  的偏差函数, 则有

$$(1) s(\tilde{h}_1(x)) < s(\tilde{h}_2(x)), \text{ 则 } \tilde{h}_1(x) < \tilde{h}_2(x);$$

$$(2) s(\tilde{h}_1(x)) > s(\tilde{h}_2(x)), \text{ 则 } \tilde{h}_1(x) < \tilde{h}_2(x);$$

$$(3) s(\tilde{h}_1(x)) = s(\tilde{h}_2(x)), \text{ 且 } e(\tilde{h}_1(x)) < e(\tilde{h}_2(x)), \text{ 则 } \tilde{h}_1(x) > \tilde{h}_2(x);$$

$$(4) s(\tilde{h}_1(x)) = s(\tilde{h}_2(x)), \text{ 且 } e(\tilde{h}_1(x)) > e(\tilde{h}_2(x)), \text{ 则 } \tilde{h}_1(x) < \tilde{h}_2(x);$$

$$(5) s(\tilde{h}_1(x)) = s(\tilde{h}_2(x)), \text{ 且 } e(\tilde{h}_1(x)) = e(\tilde{h}_2(x)), \text{ 则 } \tilde{h}_1(x) \approx \tilde{h}_2(x).$$

## 2 区间值犹豫模糊 WOWA 算子

**定义 3.1:** 设  $\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n$  为区间值犹豫模糊元素,  $\mathbf{p}$  和  $\mathbf{w}$  为两  $n$  维权向量, 其中,  $0 \leq p_i \leq 1$ , 且  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ ,  $0 \leq w_i \leq 1$ , 且  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ , 则定义 IVHFWOWA 算子为

$$f_{\text{IVHFWOWA}}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) + \bigoplus_{i=1}^n (\omega_i \tilde{h}_{\sigma(i)}) + \left\{ \left[ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \gamma_{\sigma(i)}^-)^{\omega_i}, 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \gamma_{\sigma(i)}^+)^{\omega_i} \right] \right\} \\ \gamma_{\sigma(1)} \in \tilde{h}_{\sigma(1)}, \gamma_{\sigma(2)} \in \tilde{h}_{\sigma(2)}, \dots, \gamma_{\sigma(n)} \in \tilde{h}_{\sigma(n)}.$$

式中:  $f_{\text{IVHFWOWA}}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n)$  为  $\tilde{H}^n \rightarrow \tilde{H}$  的映射;  $\tilde{h}_{\sigma(i)}$  为第  $i$  大的区间值犹豫模糊元素;  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$  为 IVHFWOWA 算子的权向量,  $\omega_i = w^* \left( \sum_{j \leq i} p_{\sigma(j)} \right) - w^* \left( \sum_{j < i} p_{\sigma(j)} \right)$ ,  $w^*$  是在点  $(0, 0)$  和点  $\left( \frac{1}{n}, \sum_{j=1}^n w_j \right)$  之间插值得到的单调增函数.

IVHFWOWA 算子的相关权向量  $\omega$  由  $\mathbf{p}$  和  $\mathbf{w}$  计算获得, 向量  $\mathbf{p}$  考虑数据自身的重要性,  $\mathbf{w}$  考虑数据排序后位置的重要性. 因此, IVHFWOWA 算子能够考虑更多的信息, 具有更好的特性.

研究 IVHFWOWA 算子, 得到下面的定理.

**定理 3.1:** 令  $f_{\text{IVHFWOWA}}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n)$  是一个 IVHFWOWA 算子, 且  $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$  和  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$  为  $n$  维权向量, 则有

$$(1) f_{\text{IVHFWOWA}}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) \text{ 的相关权向量 } \omega \text{ 满足 } \sum_{i=1}^n \omega_i = 1.$$

$$(2) \text{ 对于 } i = 1, 2, \dots, n, \text{ 如果 } p_i = \frac{1}{n}, w_i \neq 0, \text{ 且 } (\tilde{h}'_1, \tilde{h}'_2, \dots, \tilde{h}'_n) \text{ 为 } (\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) \text{ 的任意置换, 则有 } f(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) = f(\tilde{h}'_1, \tilde{h}'_2, \dots, \tilde{h}'_n).$$

$$(3) \mathbf{w} = \left( \frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n} \right)^T \text{ 时, IVHFWOWA 算子退化为只与权向量 } \mathbf{p} \text{ 相关的区间值犹豫模糊}$$

WA 算子; $\boldsymbol{p} = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right)^T$  时,退化为只与权重向量  $w$  相关的区间值犹豫模糊 OWA 算子.

(4) 当两权向量  $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{w} = \left(\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}\right)^T$  时, IVHFWOWA 算子退化为区间值犹豫模糊算术平均算子: $f_{IVHFA}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) = \frac{1}{n} \bigoplus_{i=1}^n (\tilde{h}_i)$ .

(5) 当  $\boldsymbol{\omega} = (1, 0, 0, \dots, 0)^T$  时, IVHFWOWA 算子退化为区间值犹豫模糊最大算子:  $IVHFMAX(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) = \max_{1 \leq i \leq n} (\tilde{h}_i) = \tilde{h}_{\sigma(1)}$ .

(6) 当  $\boldsymbol{\omega} = (0, 0, \dots, 1)^T$  时,退化为区间值犹豫模糊最小算子:  $IVHFMIN(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) = \min_{1 \leq i \leq n} (\tilde{h}_i) = \tilde{h}_{\sigma(n)}$ .

(7) 若  $(\tilde{h}'_1, \tilde{h}'_2, \dots, \tilde{h}'_n)$  和  $(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n)$  为任意两区间值犹豫模糊元素组,  $\gamma_i \in \tilde{h}_i$ ,  $\tilde{\gamma}'_i \in \tilde{h}'_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 且满足  $\gamma_i^- \leq (\gamma'_i)^-, \gamma_i^+ \leq$

$(\gamma'_i)^+$ , 则有  $f_{IVHFWOWA}(\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_n) \leq f_{IVHFWOWA}(\tilde{h}'_1, \tilde{h}'_2, \dots, \tilde{h}'_n)$ .

3 基于 IVHFWOWA 算子的决策方法

给出一种多属性群决策问题的描述,并给出基于 IVHFWOWA 算子的群决策方法. 一个多属性群决策问题可以描述如下.

设有  $m$  个方案  $\tilde{A} = \{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_m\}$ ,  $n$  个属性评价指标  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 属性权向量为  $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ , 满足  $0 \leq \omega \leq 1$ , 且  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ .  $t$  个专家  $E_s (s = 1, 2, \dots, t)$  参与决策, 专家权向量为  $\boldsymbol{e} = (e_1, e_2, \dots, e_s)^T$ , 专家  $E_s (s = 1, 2, \dots, t)$  对  $\tilde{A}_i (i = 1, 2, \dots, m)$  在  $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$  下的评价信息为  $(\tilde{h}_{\tilde{A}_i}(x_j))^{(s)}$ . 各专家提供的评价矩阵  $\tilde{H}^{(s)} (s = 1, 2, \dots, t)$  如表 1 所示.

表 1 评价矩阵  $\tilde{H}^{(s)} (s = 1, 2, \dots, t)$

Tab.1 The evaluation matrix  $\tilde{H}^{(s)} (s = 1, 2, \dots, t)$

	$x_1$	$x_2$	$\dots$	$x_n$
$\tilde{A}_1$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_1} - (x_1))^{(s)}$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_1} - (x_2))^{(s)}$	$\dots$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_1}(x_n))^{(s)}$
$\tilde{A}_2$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_2} - (x_1))^{(s)}$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_2} - (x_2))^{(s)}$	$\dots$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_2}(x_n))^{(s)}$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$\tilde{A}_m$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_m} - (x_1))^{(s)}$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_m} - (x_2))^{(s)}$	$\dots$	$(\tilde{h}_{\tilde{A}_m}(x_n))^{(s)}$

(1) 化评价矩阵  $\tilde{H}^{(s)} (s = 1, 2, \dots, t)$  为标准评价矩阵  $B^{(s)} = (b_{ij}^{(s)})_{m \times n} (s = 1, 2, \dots, t)$ . 对于效益型属性, 评价信息值越大越好. 成本性属性, 则越小越好, 因此需对成本型属性的评价信息求补集以此来标准化.

(2) 用 IVHFWOWA 算子把  $t$  个单人决策矩阵  $B^{(s)} = (b_{ij}^{(s)})_{m \times n} (s = 1, 2, \dots, t)$  整理为综合评价矩阵  $B = (b_{ij})_{m \times n}$ . 其中,  $B^{\sigma(s)}$  表示  $(b_{ij}^{\sigma(s)})_{m \times n}$ ,  $b_{ij}^{\sigma(s)}$  表示  $b_{ij}^{(s)} (s = 1, 2, \dots, t)$  中第  $s$  大的区间值犹豫模糊元素,  $b_{ij} = f_{IVHFWOWA}(b_{ij}^{\sigma(1)}, b_{ij}^{\sigma(2)}, \dots, b_{ij}^{\sigma(t)}) = \bigoplus_{s=1}^t \omega'_s b_{ij}^{\sigma(s)}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, p = e, w^*$  是在点  $(0, 0)$  和点  $\left(\frac{s}{n}, \sum_{j=1}^{j \leq s} w_j\right), (s = 1, 2, \dots, t)$  之间插值得到的单调增函数,  $\omega'_s = w^* \left(\sum_{y=1}^{y \leq s} p_{\sigma(y)}\right) -$

$w^* \left(\sum_{y=1}^{y < s} p_{\sigma(y)}\right), s = 1, 2, \dots, t, \omega' = (\omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_t)^T$  为  $f_{IVHFWOWA}(b_{ij}^{\sigma(1)}, b_{ij}^{\sigma(2)}, \dots, b_{ij}^{\sigma(t)})$  的相关权重向量.

(3) 用 IVHFWOWA 算子对  $B = (b_{ij})_{m \times n}$  中第  $i (i = 1, 2, \dots, m)$  行中的  $b_{ij} (j = 1, 2, \dots, n)$  进行信息融合, 得到  $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$  的综合属性  $b_i (i = 1, 2, \dots, m), b_i = f_{IVHFWOWA}(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in}) = \bigoplus_{j=1}^n \omega''_j b_{i\sigma(j)}$ . 式中:  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, p = \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T, \omega'' = (\omega''_1, \omega''_2, \dots, \omega''_n)^T$  为  $f_{IVHFWOWA}(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$  的相关权重向量,  $\omega''_j = w^{**} \left(\sum_{x=1}^{x \leq j} p_{\sigma(x)}\right) - w^{**} \left(\sum_{x=1}^{x < j} p_{\sigma(x)}\right), j = 1, 2, \dots, n, w^{**}$  是在点  $(0, 0)$

和点 $\left(\frac{j}{n}, \sum_{x=1}^{x < j} \omega'_j\right), (j = 1, 2, \cdots, n)$  之间插值得到的单调增函数,  $b_{i\sigma(j)}$  为  $B$  中第  $i(i = 1, 2, \cdots, m)$  行中第  $j$  大区间值犹豫模糊元素.

根据定义 2.4 对每个方案的综合属性信息  $b_i (i = 1, 2, \cdots, m)$  进行大小比较, 排序越靠前表明该方案的综合属性值越高, 该方案越好.

4 实例分析

某公司由于生产需要, 需要采购机器. 有 3 个厂商  $\tilde{A}_i (i = 1, 2, 3)$  可供选择, 公司请 4 名专家  $E_s (s = 1, 2, 3, 4)$  来参与决策, 指定了价格  $(x_1)$ , 质

量  $(x_2)$ , 售后服务  $(x_3)$  和厂商信誉  $(x_4)$  4 个属性作为评价指标. 属性权向量和专家权向量分别为  $\omega = (0.2, 0.25, 0.25, 0.3)^T, e = (0.3, 0.2, 0.3, 0.2)^T$ . 试选出最佳厂商. 4 个专家给出的评价矩阵如表 2, 表 3, 表 4 和表 5 所示:

其中,  $\omega' = (0.18, 0.32, 0.42, 0.08)^T, \omega'' = (0.08, 0.325, 0.415, 0.18)^T, \tilde{A}_i (i = 1, 2, 3)$  的综合属性  $b_i (i = 1, 2, 3)$  的得分函数分别为:  $s(b_1) = 0.8149, s(b_2) = 0.7346, s(b_3) = 0.6907$ .

因此,  $s(b_1) > s(b_2) > s(b_3)$ , 即, 厂商  $\tilde{A}_1$  的综合评价价值最高, 是最佳选择.

表 2 专家  $E_1$  给出的评价矩阵  $\tilde{H}^{(1)}$

Tab. 2 The evaluation matrix  $\tilde{H}^{(1)}$  given by expert  $E_1$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$\tilde{A}_1$	{[0.4, 0.5]}	{[0.5, 0.6]}	{[0.3, 0.4], [0.5, 0.6], [0.5, 0.7]}	{[0.6, 0.8], [0.7, 0.8]}
$\tilde{A}_2$	{[0.4, 0.6], [0.5, 0.7]}	{[0.6, 0.8]}	{[0.2, 0.3]}	{[0.5, 0.7]}
$\tilde{A}_3$	{[0.6, 0.7]}	{[0.7, 0.9]}	{[0.5, 0.5]}	{[0.5, 0.6], [0.5, 0.7]}

表 3 专家  $E_2$  给出的评价矩阵  $\tilde{H}^{(2)}$

Tab. 3 The evaluation matrix  $\tilde{H}^{(2)}$  given by expert  $E_2$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$\tilde{A}_1$	{[0.5, 0.6], [0.5, 0.7]}	{[0.5, 0.7], [0.6, 0.7]}	{[0.6, 0.8]}	{[0.6, 0.7]}
$\tilde{A}_2$	{[0.6, 0.8]}	{[0.6, 0.7]}	{[0.4, 0.5], [0.3, 0.5]}	{[0.5, 0.7], [0.6, 0.7]}
$\tilde{A}_3$	{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]}	{[0.5, 0.6], [0.7, 0.8]}	{[0.5, 0.6], [0.5, 0.7], [0.6, 0.8]}	{[0.4, 0.6]}

表 4 专家  $E_3$  给出的评价矩阵  $\tilde{H}^{(3)}$

Tab. 4 The evaluation matrix  $\tilde{H}^{(3)}$  given by expert  $E_3$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$\tilde{A}_1$	{[0.5, 0.6], [0.6, 0.7]}	{[0.5, 0.7]}	{[0.5, 0.6], [0.6, 0.8]}	{[0.7, 0.8]}
$\tilde{A}_2$	{[0.5, 0.6], [0.6, 0.8]}	{[0.5, 0.6], [0.5, 0.7], [0.6, 0.7]}	{[0.5, 0.6], [0.6, 0.7]}	{[0.5, 0.6]}
$\tilde{A}_3$	{[0.6, 0.7]}	{[0.5, 0.6], [0.6, 0.8]}	{[0.5, 0.7]}	{[0.4, 0.5]}

表 5 专家  $E_4$  给出的评价矩阵  $\tilde{H}^{(4)}$

Tab. 5 The evaluation matrix  $\tilde{H}^{(4)}$  given by expert  $E_4$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
$\tilde{A}_1$	{[0.2, 0.3], [0.3, 0.5]}	{[0.7, 0.8], [0.6, 0.9], [0.8, 0.9]}	{[0.7, 0.8]}	{[0.5, 0.5]}
$\tilde{A}_2$	{[0.6, 0.7]}	{[0.5, 0.6]}	{[0.3, 0.5], [0.4, 0.6]}	{[0.6, 0.7], [0.7, 0.8]}
$\tilde{A}_3$	{[0.3, 0.4], [0.4, 0.5], [0.4, 0.6]}	{[0.4, 0.5], [0.5, 0.6]}	{[0.6, 0.8], [0.7, 0.8]}	{[0.5, 0.7]}

5 结论

基于区间值犹豫模糊集和 WOWA 算子的特

性, 给出了一种具备区间值犹豫模糊 WA 算子和区间值犹豫模糊 OWA 算子等多种算子良好特性的 IVHFWOWA 算子, 实现了对以区间值犹豫模

糊集形式表达的决策信息的有效聚合. 讨论了该算子的性质,给出了一种基于 IVHFWOWA 算子的群决策方法,并用实例验证了它们的正确性和有效性.

参考文献:

[1] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information Control, 1965, 8(3): 338 – 353.

[2] ATANASSOV K. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87 – 96.

[3] MIYAMOTO S. Remarks on basics of fuzzy sets and fuzzy multisets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 156(3): 427 – 431.

[4] TORRA V. Hesitant fuzzy sets[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2010, 25(6): 529 – 539.

[5] 陈树伟,蔡丽娜. 区间值犹豫模糊集[J]. 模糊系统与数学,2013, 27(6): 1 – 7.

[6] CHEN Na, Ze Shui-xu, MEI Xia. Interval-valued hesitant preference relation and their application to group decision making [J]. Knowledge Based System, 2013, 37: 528 – 540.

[7] YAGER R R. On mean type aggregation[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1996, 26(2): 209 – 220.

[8] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183 – 190.

[9] TORRA V. The weighted OWA operator[J]. International Journal of Intelligent System, 1997, 12(2): 153 – 166.

[10] LU X W. Some properties of the weighted OWA operator[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2006, 36(1): 118 – 127.

Interval-valued Hesitant Fuzzy WOWA Operator and Its Application in Decision Making

CAI Li-na<sup>1,2</sup>, CHEN Shu-wei<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1</sup>, HUANG Hai-bin<sup>2</sup>, LIANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Guodian Bengbu Generating Co. , Ltd. , Bengbu 233411, China)

**Abstract:** In order to aggregate the information expressed in the form of interval-valued hesitant fuzzy sets , we propose in this paper an interval-valued hesitant fuzzy WOWA ( Weighted Ordered Weighted Average) operator. The novelty of this operator is that it not only considers the importance of data , but also considers the importance of location where the data is sorted. Then , some properties of interval-valued hesitant fuzzy WOWA operator are discussed , and one decision making method based on the interval-valued hesitant fuzzy WOWA operator is presented. Finally , an illustrative example is provided to verify the rationality and effectiveness of the proposed operator and decision making method. The research in this paper has certain theoretical value and application prospect.

**Key words:** interval-valued hesitant fuzzy set; WOWA operator; decision making

文章编号:1671-6833(2014)05-0054-05

# 软土结构性分析与扰动评价

刘海涛<sup>1,2</sup>, 郭院成<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 华北水利水电学院 土木工程系, 河南 郑州 450045)

**摘要:** 结构性软土一般具有明显的结构屈服应力, 外界扰动导致软土地基的结构屈服应力减小、压缩性增加。在分析软土压缩变形过程中的孔隙比及应力变化特征的基础上, 采用五段折线表示扰动结构性软土的压缩曲线, 并在此基础上提出虚拟前期固结压力的概念。通过对结构性软土扰动状况进行定量化分析, 利用对数形式结合虚拟前期固结压力定义软土的扰动度, 使扰动度的定义与  $e-\lg p$  曲线相结合进而利于土体扰动强度和变形的计算分析, 并指出扰动结构性软土地基的沉降计算应合理考虑土体形成过程中的欠固结问题。工程算例显示笔者计算方法能够合理的预测扰动软土的最终沉降。

**关键词:** 结构性; 扰动土; 虚拟前期固结压力; 沉降计算

**中图分类号:** U416.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.013

## 0 引言

天然饱和软土在沉积过程中处于欠压密状态, 形成特有的片架结构<sup>[1]</sup>。原状软土的结构性使其具有超固结土的部分特性<sup>[2-5]</sup>。

研究结构性软土扰动状况对了解和认识软土的工程特性具有重要意义, 很多学者研究了土体扰动的评价方法<sup>[2-8]</sup>。在研究结构性土体压缩曲线的基础上, 从孔隙比变化的角度对土体扰动程度进行评价, 孔隙比对应的应力可以取原状土的自重应力或结构屈服应力; Nagaraj<sup>[5]</sup>基于结构性土体的力学特征从结构屈服应力角度给出土体扰动程度的评价方法, 并通过室内试验于 2003 年对扰动度的定义进行了改进; 王军<sup>[6]</sup>考虑到受扰动的软土地基的力学参数难以通过室内试验模拟准确测定, 以十字板试验测定的不排水强度为特征量来定量评价地基处理的扰动程度; 王立忠, 李玲玲<sup>[7]</sup>用原状土的结构屈服应力与上覆自重应力之间的差值定义原状土体的结构强度, 定义原位扰动度来评价土体在原位的扰动程度; 刘维正等<sup>[8]</sup>采用屈服应力比、应力灵敏度及衡量土体结构性对变形影响的稳定指数作为定量分析和评价土体结构性的指标。笔者在前人研究成果的基础

上分析软土扰动损伤机理, 基于扰动土虚拟前期固结压力的概念建议了一种新的软土扰动度表示方法, 研究表明采用虚拟前期固结压力定义软土扰动度的概念更加符合扰动软土的力学特征及演变发展规律, 并易于工程实践应用。

## 1 软土压缩曲线研究

### 1.1 扰动软土压缩曲线分析

地基勘探过程中, 不同地层的土样被取出后通过室内试验获取土性参数, 进而对土体的工程性质进行评价以指导工程实践。为方便分析问题, 基于工程实践可按土体状态不同定义。

图 1 为结构性软土扰动模型。图 2 为软土压缩变形分析。基于荷载作用下结构性软土的变形特点及发展趋势, 将原状土看作以较大孔隙及支撑骨架为主的片架结构部分、以较小孔隙及支撑骨架为主的稳定结构部分、以细微孔隙及土颗粒为主的不可压缩部分的组合(图 1a)。在有限外荷载作用下, 土体变形首先从具有较小弹性模量的片架结构部分开始, 土工试验中的原状土样由于在取样过程中受到有限扰动其压缩变形曲线如图 2 所示。通过室内试验曲线模拟原状土的变形曲线, 以原状土上覆土自重应力和结构屈服应力为

收稿日期:2014-05-25; 修订日期:2014-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978235)

作者简介:刘海涛(1977-), 男, 河南扶沟人, 郑州大学博士研究生, 主要从事岩土工程研究工作, E-mail: liuht@ncwu.edu.cn.



转折点其压缩曲线可表示为三段直线<sup>[2-3]</sup>. 基于图 1 中的结构性软土扰动模型, 荷载作用下扰动土样的压缩变形曲线与原状土样相似, 但二者变形相同时原状土样能够承受较大的荷载. 如果考虑片架结构损伤部分无法承受外界荷载<sup>[1]</sup>, 借鉴原状土压缩曲线的特点, 扰动土的变形曲线也可由三段直线表示.

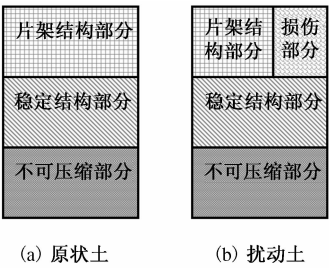


图 1 结构性软土扰动模型

Fig.1 Disturbed model of structural soft clay

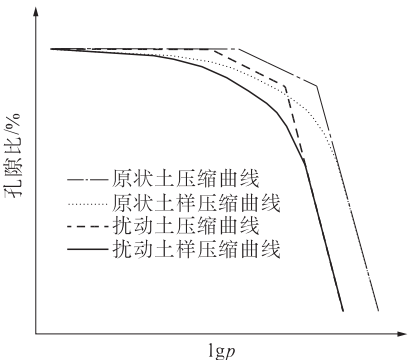


图 2 软土压缩变形分析

Fig.2 Deformation analysis of soft clay

1.2 结构性软土压缩曲线的改进

改进的软土压缩曲线如图 3 所示. 基于前文分析可以采用五段折线(图 3:ABCDEF)模拟原状土的压缩曲线, B、C 点对应于原状土的前期固结压力(上覆土自重应力)和结构屈服应力. AB 段是小于自重应力  $p_0$  的部分, 为过  $e_0$  点的水平线, 等效于施加土体前期固结压力; BC 段是自重应力和结构屈服应力之间的部分, 其斜率等于室内回弹曲线与再压缩曲线的平均斜率, 理想化为土体架空骨架结构的弹性压缩; CD 段应平行于试验室压缩曲线, 但考虑到原状土样取土扰动等影响, 其长度要达到其孔隙比与室内试验曲线上相应段端部孔隙比相同, 此阶段土样孔隙比出现剧烈变化, 表示土体片架结构出现整体性破损; DE 段表示组团结构等土体相对稳定结构破损, 土体进一步压密; EF 段土体压密到一种稳定状态(室内试验较

难达到的应力状态), 外力作用下其孔隙比几乎不发生变化,  $e_m$  表示一种区域性软土可能的最小孔隙比.

对于重塑土变形曲线采用两段折线模拟(图 3:IEF), IE 段体现土体压密过程, EF 段表示土体的稳定状态.

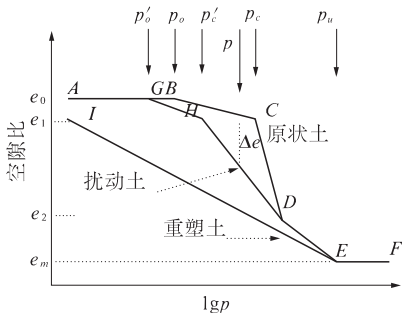


图 3 改进的软土压缩曲线

Fig.3 Revised deformation curve of soft clay

外界扰动打破结构性土体的平衡体系, 损伤片架结构胶结强度. 基于细观损伤概念<sup>[9]</sup>及前文分析如图 1(b)将扰动土分解为原状土和重塑土的组合, 则扰动土压缩曲线必介于二者曲线之间(图 3:AGHDEF); AG 段体现扰动土能够承受的前期固结压力, 为过  $e_0$  点的水平线; GH 段的受力变形表现为扰动土结构性部分的受力变形和损伤部分的受力变形, 其斜率等于扰动土样室内回弹曲线与再压缩曲线的平均斜率, 理想化为扰动土体架空骨架结构的弹性压缩(H 点和 C 点具有相同的孔隙比  $e_1$ ); HD 段土样孔隙比出现剧烈变化, 表示土体片架结构出现整体性破损(建议  $e_2 = 0.42e_0$ <sup>[2]</sup>); 其后的曲线与原状土压缩曲线相同.

2 基于虚拟前期固结压力的土体扰动度评价

原状土受到扰动后部分结构胶结强度损失导致其屈服应力减小, 受扰动土体的受力变形包括结构性部分受力变形和损伤部分受力变形. 土体扰动度 SD 可定义为受扰动软土面积 S 范围内因扰动而导致结构强度失效的片架结构面积之和  $\sum S_i$ (图 1(b) 中损伤部分面积) 与 S 之比, 即:

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S} \times 100\%, \quad (1)$$

对于受到扰动的结构性土, 由于软土前期固结变形主要是大孔隙变化所致, 且扰动土体的受

力变形表现为结构性部分的受力变形和损伤部分(重塑土)的受力变形两部分,在  $GH$  线段上扰动土所能承担的固结压力  $p'$  为原状土体部分和重塑土体部分所承受压力的组合(图 3). 结构性软土一般具有片架结构和大孔隙特征,常规压缩试验中在 1.0 kPa 荷载下进行预压的重塑土样在  $e_0$  处几乎无法保持形状<sup>[1]</sup>,更无法承担外界荷载,结构性软土的上覆土体有效应力全部由土体的结构性强度承担,则可以认为:在  $e_0$  水平线上扰动土体承受的外界荷载全部由结构性完好的土体面积承担,胶结强度失效的片架结构面积  $\sum S_i$  不承受外界荷载(图 1(b)). 如果考虑在  $e_0$  点的水平线上(即软土保持孔隙比不变的情况下),软土受到扰动前后图 1 中片架结构部分能承受的上覆土应力不变,则有

$$p'_0 = \frac{S - \sum_{i=1}^n S_i}{S} \times p_0, \quad (2)$$

式中: $p'_0$  定义为扰动土虚拟前期固结压力,表示受到扰动后的软土在孔隙比保持不变的情况下能够承受的有效应力,扰动土的虚拟前期固结压力可以很容易从土样室内  $e - \lg p$  曲线的修正曲线上获得<sup>[7]</sup>. 由式(1),式(2)可知,结构性软土扰动度可表示为

$$SD = \frac{p_0 - p'_0}{p_0} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $p_0$  为原状土的前期固结压力; $p'_0$  为扰动土的虚拟前期固结压力. 根据分析可以看出式(3)扰动度的变化范围为 0% ~ 100%.

在相同的孔隙比条件下,利用原状土体的前期固结压力和扰动土体的虚拟前期固结压力定义结构性软土的扰动度有效地剔除了土体损伤部分受力变形的影响,使扰动度的定义与  $e - \lg p$  曲线相结合,在实践上更加符合实际,计算参数易于获取并且具有横向可比性,有利于土体扰动强度和变形的计算分析.

### 3 软土扰动变形计算分析

软土地基变形计算精确度的关键是选择合适的计算模型和土性参数,而在试验室内土样压缩曲线的基础上模拟原状土和扰动土的压缩曲线具有极为重要的实践价值. 图 3 显示结构性软土在有效应力  $p$  作用下的变形计算模型. 考虑到实际工程中的荷载范围一般不会超过  $D$  点,则按分层总和法计算土体受到扰动后的压缩变形如下

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (4)$$

其中,对于第  $i$  层土:当  $p'_{0i} \leq p < p'_{ci}$  时,  $\delta_i = \frac{h_i}{1 + e_{0i}}$

$$C'_{si} \lg \frac{p}{p'_{0i}}; \text{ 当 } p'_{ci} \leq p \text{ 时, } \delta_i = \frac{h_i}{1 + e_{0i}} (C'_{si} \lg \frac{p'_{ci}}{p'_{0i}} + C'_{ci} \lg \frac{p}{p'_{ci}}).$$

式中: $\Delta$  为扰动土体地基沉降; $n$  为地基沉降计算分层层数; $p'_{0i}$ 、 $p'_{ci}$  为地基中第  $i$  分层土的虚拟前期固结压力和结构屈服应力; $h_i$  为地基中第  $i$  分层土厚度; $e_{0i}$  为地基中第  $i$  分层土中点的初始孔隙比; $C'_{si}$  为地基中扰动土第  $i$  分层土的回弹指数; $C'_{ci}$  为地基中扰动土第  $i$  分层土的压缩指数; $\delta_i$  为地基中第  $i$  分层土体变形值.

## 4 算例分析

### 4.1 软土扰动附加沉降计算

某结构性软土地基排水板预压<sup>[6]</sup>试验区面积为 130 m × 67 m,排水板梅花形布置,间距 1.4 m,入土深度 20 m,各土层的基本物理力学性质指标如表 1 所示(考虑试验区排水板设置深度范围为扰动土,以下为未扰动土),软土地基排水板施工对土体的扰动度一般在 30% 左右. 由于结构性软土沉降变形影响因素复杂,笔者仅考虑一维压缩对试验区堆载预压中心点进行扰动附加沉降计算,分析扰动导致结构性软土地基的沉降变形的影响.

由于是借用已有算例来检验本模型的计算模式,其参数调整过程如下:对于基本土样,由图 3 和表 1 中的数据可以计算出  $e_1$  的值,如果考虑到  $e_2 = 0.42e_0$ ,则可得出  $D$  点对应的荷载值;由于扰动土的扰动度可表示为原状土体结构屈服应力的损失值和结构屈服应力的比值,且扰动土体的受力变形可由结构性部分受力变形和损伤部分受力变形的线性组合表示,则利用表 1 中的数据结合图 3 的计算模型可以计算结构性软土的扰动附加沉降.

计算显示:当加荷为 30 kPa 时,扰动引起的附加沉降量约为 0.03 m;当加荷为 90 kPa 时,扰动引起的附加沉降量约为 0.18 m. 由于计算模型及基本假设不同,当荷载较低时本文计算结果比文献[6]中的沉降偏小;当荷载较高时本计算结果比文献[6]中的沉降偏大.

表 1 地基土基本指标

Tab. 1 Basic parameters of ground soil

编号	土层	厚度/ m	天然含 水率 $w/\%$	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙 比 $e_o$	$P_c/p_0$	原状土回 弹指数 $C_s$	原状土压 缩指数 $C_c$	重塑土压 缩指数 $C_r$
①	黏土	1.0	49.5	17.5	1.35	4.0	0.022	0.165	0.105
②	淤泥	5.8	78.5	15.4	2.18	2.1	0.055	0.525	0.320
③	淤泥	6.3	70.5	15.8	1.95	1.9	0.058	0.580	0.340
④	淤泥	15.5	59.3	16.2	1.68	1.69	0.065	0.609	0.230
⑤	黏土	6.0	37.3	17.6	1.02	1.09	0.047	0.352	—

4.2 软土扰动最终沉降算例分析

结合某结构性软土地基排水板预压试验分析软土扰动最终沉降<sup>[10]</sup>. 本工程中塑料排水板梅花形布置,间距 1.2 m,深度 20 m,各土层分布以及相应的物理力学性质指标见表 2,黏土土样的试验数据显示其结构屈服应力和上覆应力的关系式可以表示为<sup>[10]</sup>

$$p_c = 1.509 \times p_0 + 26.56. \quad (5)$$

软土地基在荷载(36 kPa)作用下固结约 240 d,根据沉降实测值采用指数曲线法预测排水板处理区的最终压缩量约为 48 cm<sup>[10]</sup>. 根据现场十字

板强度的试验值及扰动度的定义,排水板施工对软土造成的扰动度约在 46% 左右<sup>[7]</sup>.

沉降计算中不考虑第 1 层土的结构性,主要考虑第 2、3 层土体的结构性以及施工扰动后的沉降变形. 由于是借用已有算例来检验本模型的计算模式,其参数需经优化和调整后才能使用. 考虑重塑土在孔隙比  $e_0$  到  $e_1$  的范围内没有荷载承受能力,借鉴式(2)则有

$$p'_c = 1.509 \times p'_0 + 26.56 \times (1 - \frac{p_0 - p'_0}{p_0}). \quad (6)$$

表 2 土体力学指标

Tab. 2 Mechanics parameters of soil

编号	土层	厚度/ m	天然含 水率 $w/\%$	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙 比 $e_o$	原状土回 弹指数 $C_s$	原状土压 缩指数 $C_c$	重塑土压 缩指数 $C_r$
①	硬壳层	2	37.5	17.54	1.039	—	0.165	—
②	淤泥	14	65.5	16.86	1.824	0.12	1.30	0.69
③	淤泥	10	59.3	16.17	1.612	0.12	1.30	0.69
④	淤泥质黏土	9	40.7	17.35	1.131	—	—	—

表 3 地基土体扰动度与最终沉降值

Tab. 3 Disturbed degree and ultimate settlement of ground soil

文献[7]	扰动度/%	0	30	<u>46</u>	60	最终 沉降 48 cm
计算模式	沉降值/cm	22.0	32.5	<u>40.2</u>	48.3	
笔者	扰动度/%	0	13.5	<u>21</u>	27.1	
计算模式	沉降值/cm	22.2	38.6	<u>47.1</u>	58.6	

根据式(6)及文献[7]对软土扰动度的定义取不同深度  $H=3,5,7,9,11,13,15,17,19$  m 计算扰动度的平均值,并计算几种不同的扰动度与文献[7]进行对比(表 3). 基于不同的软土结构性假设、采用不同的扰动度计算模式,对于同一工况其扰动度值差别较大:笔者考虑了软土的欠固结状态及重塑土无法成型的工程特点,计算的扰动度数值较为合理.

基于本计算模型得到处理区的最终压缩量列于表 3,从表中可以看出沉降值比文献[7]的结果

偏大,除原状土体沉降变形计算值因误差原因引起数据不同外,其他沉降偏差值则主要因考虑扰动土的虚拟前期固结压力小于原状土的前期固结压力而使计算结果更接近工程实际.

5 结论

(1)在沉积形成的过程中软土处于一种欠压密状态,但软土的结构性使其在宏观上表现出超固结土的部分特性.

(2)通过土体结构性分析,认为原状土是以

较大孔隙及支撑骨架为主的片架结构部分、以较小孔隙及支撑骨架为主的稳定结构部分、以细微孔隙及土颗粒为主的不可压缩部分的组合. 在有限外荷载作用下, 相对具有较小弹性模量的片架结构部分决定了原状土的变形趋势和工程特点.

(3) 建议结构性原状土体的压缩曲线可通过包括水平段、弹性压缩段、片架结构破损段、稳定结构破损段、土体稳定段的五段折线形式表现出来; 重塑土体的压缩曲线通过压缩段和土体稳定段的两段折线表示; 扰动土体的压缩曲线介于二者之间.

(4) 对于扰动土体提出虚拟前期固结压力的概念, 其数值可以从土样的室内  $e - \lg p$  曲线的修正曲线上获得. 在孔隙比相同的条件下采用虚拟前期固结压力定义软土的扰动度, 使扰动度的定义与  $e - \lg p$  曲线相结合进而利于土体扰动强度和变形的计算分析.

(5) 工程算例显示同一工况下笔者的扰动度计算数值相对较为合理, 建议扰动度定义和计算合理考虑土体形成过程中的欠固结状态.

## 参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 26 - 28.
- [2] SCHMERTMANN J H. The undisturbed consolidation behavior of clay [J]. Transport, ASCE, 1955 (120): 1201 - 1227.
- [3] 张诚厚. 两种结构性粘土的土工特性[J]. 水利水电科学研究. 1983(4): 65 - 71.
- [4] 李涛, 钱寿易. 土样扰动影响的评价及其先期固结压力的确定[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(5): 21 - 29.
- [5] NAGARAJ T S, MIURA N, CHUNG S G, et al. Analysis and assessment of sampling disturbance of soft sensitive clays[J]. Geotechnique, 2003, 53(7): 679 - 683.
- [6] 王军, 高玉峰, 高红珍. 结构性软土地基施工扰动定量分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 789 - 795.
- [7] 王立忠, 李玲玲. 结构性土体的施工扰动及其对沉降的影响[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 697 - 704.
- [8] 刘维正, 石名磊, 缪林昌. 太湖湖沼相天然沉积土结构性评价[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1616 - 1620.
- [9] LEMAITRE J. How to use damage mechanics [J]. Nuclear Engineering and Design, 1984 (80): 233 - 245.
- [10] 陈云敏. 温州电厂 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup> 煤场工程试验研究报告[R]. 杭州: 浙江大学岩土工程研究所, 2000: 16 - 42.

## Evaluation of Structure and Disturbance of Soft Ground

LIU Hai-tao<sup>1,2</sup>, GUO Yuan-cheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Civil Engineering Department, North China Institute of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

**Abstract:** There is an obvious yield stress for structural soft soil, and external disturbances result yield stress decrease and compression increase. Five-section line was used to simulate the compression curve of disturbed soil, and virtual pre-consolidation pressure was put up after the varied characteristics of pore ratio and stress were analyzed in the process of deformation. Disturbed degree of soft soil that defined of logarithmic form was closely connected with  $e - \lg p$  curve, and thus conducive to strength calculation and deformation analysis of disturbed soil. Engineering practice showed that inadequate consolidation of soft soil should be considered when disturbance degree was calculated, and this method in the assay could reasonably predict the ultimate settlement of disturbed soil.

**Key words:** structure; disturbed soil; virtual pre-consolidation pressure; settlement calculation

文章编号:1671-6833(2014)05-0059-05

# 基于多目标等效风荷载的变截面门式刚架抗风优化

王艳萍, 黄友钦, 吴玖荣, 唐雁腾

(广州大学 广东省结构安全与健康监测工程技术研究开发中心, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 轻钢门式刚架结构是单层工业厂房中一种常见的结构形式, 风荷载是其结构设计的重要荷载之一. 已有抗风优化研究中一般仅考虑单目标的等效静力风荷载, 在多个约束条件时不能保证优化结果的准确性. 笔者基于风洞试验数据库构造多目标等效静力风荷载, 基于最优准则法对单榀变截面门式刚架进行抗风优化设计. 分别以工字钢的腹板高度和材料总重为设计变量和优化目标, 以柱顶水平位移和跨中挠度为约束条件, 基于 MATLAB 数值平台, 编制了抗风优化计算程序. 研究表明, 多目标等效静力风荷载能够保证约束位移的数值与随机峰值基本一致, 在满足约束条件的前提下, 优化设计使结构总重降低了 23.2%, 经济效益明显, 且优化后的截面尺寸符合变截面门式刚架的力学特点.

**关键词:** 变截面门式刚架; 抗风优化; 多目标等效静力风荷载; 最优准则法

**中图分类号:** TU318 + 1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.014

## 0 引言

轻钢结构是目前国内外应用和发展速度最快的低矮结构型式, 广泛用于各类工业和民用建筑中<sup>[1]</sup>. 对于门式刚架等大跨屋盖结构, 风荷载往往是主要控制荷载之一, 对此类结构进行抗风优化设计可减少结构的材料用量, 并且改善结构的受力性<sup>[2-4]</sup>.

目前, 关于轻型门式刚架的风效应和优化设计的研究成果较多. S. Jang 等<sup>[5]</sup>通过非线性有限元分析研究了轻钢结构厂房在风荷载作用下的极限承载力. D. T. Phan 等<sup>[6]</sup>运用遗传算法搜索门式刚架最优设计方案, 研究了澳大利亚典型风区对门式刚架最优参数的影响. 吴剑国等<sup>[7]</sup>采用平均值舍入法获取离散点, 改进了复合形迭代过程和停机准则, 对门式刚架结构进行优化设计. 赵彦革等<sup>[8]</sup>根据微积分原理, 在满足强度要求的前提下对变截面门式刚架斜梁进行优化设计, 确定了截面突变处的最优高度. 基于量子粒子群算法, 傅继阳等<sup>[9]</sup>采用等效静力风荷载对门式刚架结构进行了抗风优化. 吴玖荣等<sup>[10]</sup>采用 SAP2000 有限元分析结果, 运用最优准则法(The Optimum Criterion method, OC 法)研究了变截面门式刚架的抗

风优化设计方法. 然而, 已有研究中均采用以单个响应为目标的等效静力风荷载作为优化设计的荷载输入. 而结构优化设计中通常存在多个响应约束, 单目标等效静力风荷载仅能保证在单个目标处的响应值与实际随机风场中的峰值一致, 而难以保证在其他约束处的响应计算值的准确性<sup>[11]</sup>, 因此可能影响优化结论的可靠性.

笔者以单榀变截面门式刚架为研究对象, 基于风洞试验数据库构造多目标等效静力风荷载, 以腹板高度为设计变量, 以材料总重最小化为优化目标, 将柱顶水平位移和跨中挠度为约束条件, 建立抗风优化数学模型, 进一步采用 OC 法进行抗风优化设计.

## 1 结构简介及风荷载来源

笔者研究某一工业厂房中的门式刚架结构. 门式刚架的宽度  $B$  和高度  $H$  分别为 16 m 和 4 m, 横梁倾角为  $\beta = 9.4^\circ$ , 在柱脚处铰接, 如图 1 所示. 柱采用沿单侧线性变化的工字钢楔形柱, 取两端截面为控制截面, 梁采用三段式变截面, 截面变化处为控制截面, 5 个控制截面的位置见图 1. 各控制截面处的初步设计尺寸如表 1 所示, 其中,  $h$  为工字钢截面高度,  $b$  为翼缘宽度,  $t_f$  为腹板厚度,

收稿日期:2014-05-10; 修订日期:2014-07-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51222801, 51208126); 广东省自然科学基金重点项目(S2011030002800); 2012 年广东省高等学校人才引进专项资金项目

通信作者:黄友钦(1982-), 男, 福建宁德人, 广州大学助理研究员, 博士, 主要从事结构风工程研究, E-mail: yqhuang@gzhu.edu.cn.

$t_w$ 为翼缘厚度.

刚架上的风荷载数据来自日本东京工业大学 (Tokyo Polytechnic University) 的空气动力数据库. 将测点风压系数乘以参考风压, 则得到测点的实际风压. 根据就近原则和线性插值, 由测点风压来计算节点风压. 进一步将节点风压乘以相应的节点附属面积, 可得到每个节点 3 个自由度上的风力时程.

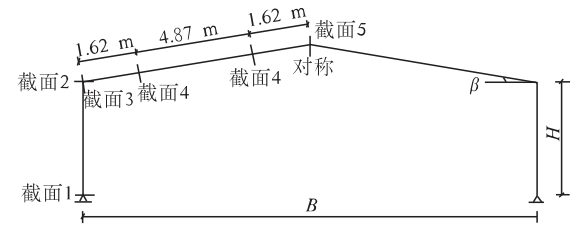


图 1 门式刚架示意图  
Fig.1 The studied portal frame

表 1 各截面的初步设计尺寸  
Tab.1 Initial dimension of sections m

截面号	$h$	$b$	$t_f$	$t_w$
1	0.40	0.24	0.01	0.008
2	0.85	0.24	0.01	0.008
3	0.82	0.22	0.01	0.006
4	0.55	0.22	0.01	0.006
5	0.80	0.22	0.01	0.006

2 多目标等效静风荷载计算

风荷载是一种随机过程, 因此结构设计中一般将其等效为静力荷载考虑. 为了更加准确地考虑各个目标响应处的等效荷载, 笔者计算以所有结构响应为目标的等效静力风荷载进行优化设计. 将风场本征模态和结构振型作为基本向量, 确定针对多个等效目标的基本向量最优组合系数, 从而得到多目标的等效静风荷载<sup>[12]</sup>.

脉动风荷载对应的等效静力荷载可表示为

$$F_e = F_0 c. \tag{1}$$

式中:  $F_0$  为等效荷载的基本向量矩阵, 取为本征模态向量, 通过对脉动风荷载协方差矩阵进行本征正交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD) 得到.  $c$  为组合系数向量.

上式左、右两边同时乘以  $\beta^T$ , 得到

$$\beta^T F_e = \beta^T F_0 c. \tag{2}$$

式中:  $\beta^T$  表示等效目标的影响线函数.

由  $\beta^T$  的定义可知:

$$\beta^T F_e = \hat{y}, \tag{3}$$

式中:  $\hat{y}$  表示等效目标处的风振响应极值

$$\hat{y} = g \times \sigma_r \times \text{sign } \bar{y}. \tag{4}$$

式中:  $g$  为峰值因子;  $\sigma_r$  为脉动响应均方根;  $\bar{y}$  表示平均响应;  $\text{sign}$  为符号函数, 表示  $\hat{y}$  的符号与平均响应  $\bar{y}$  一致.

因此, 组合系数向量应满足以下方程

$$\beta^T F_0 c = \hat{y}. \tag{5}$$

从而, 对于  $m$  个等效目标的情况, 组合系数向量应满足

$$\begin{cases} \beta_1^T F_0 c = \hat{y}_1; \\ \beta_2^T F_0 c = \hat{y}_2; \\ \dots\dots \\ \beta_m^T F_0 c = \hat{y}_m. \end{cases} \tag{6}$$

由上式方程组可解得  $c$ , 代入式 (1) 则得到脉动风荷载的多目标等效分量, 进一步可得到总等效静力风荷载

$$F = \bar{F} + F_e = \bar{F} + F_0 c, \tag{7}$$

式中:  $F$  为总的等效静力风荷载;  $\bar{F}$  为平均风荷载.

由计算求得 1 至 4 阶的贡献率分别为 55.7%、23.2%、10.4%、7.1%, 因此前 4 阶本征模态的贡献率已达 95%, 取其前 4 阶本征模态来重建风场. 将得到的多目标等效静力风荷载作为静力荷载作用于结构, 得到的结构各自由度上的位移如图 2 所示, 并与频域计算得到的随机风振响应峰值进行比较. 可以看出, 多目标等效静力风荷载下所有位移都与随机风振响应分析得到的极值十分接近, 验证了多目标等效静力风荷载计算理论的有效性.

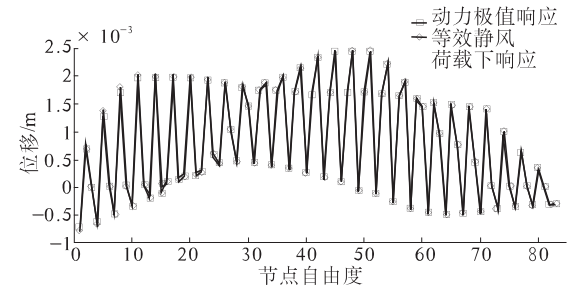


图 2 多目标等效风荷载下位移与动力极值响应的比较  
Fig.2 Comparison of the static displacements under the equivalent loads and the random peak displacements

3 抗风优化数学模型及 OC 法原理

3.1 抗风优化数学模型

(1) 设计变量  
以 5 个控制截面处的腹板高度  $h_w$  为优化设计



变量,也即工字钢截面尺寸中的  $b$ 、 $t_f$ 、 $t_w$  保持不变,而截面总高度  $h$  的值将随  $h_w$  的变化而改变. 设计变量的初值和限值如表 2 所示.

表 2 腹板高度的初值及其上、下限值  
Tab.2 Initial web height and its limits m

	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	截面 5
初始值	0.38	0.83	0.80	0.53	0.78
下限值	0.10	0.30	0.30	0.20	0.32
上限值	0.80	1.50	1.50	1.10	1.40

(2) 约束函数

门式刚架结构的位移函数通常比强度、稳定约束更难满足,所以笔者只考虑位移约束的情况. 对于变截面门式钢架,柱顶的水平位移和横梁的跨中挠度( $B/2$  处)必须满足设计要求. 对于位移约束有多种方法求,包括拟荷载法<sup>[13]</sup>、虚荷载法及虚功法等. 笔者运用虚功法来构造位移函数

$$g = \sum_i^N \int_0^{l_i} \left( \frac{F_x f_{xj}}{EA} + \frac{F_y f_{yj}}{GA} + \frac{M_z f_{zj}}{EI} \right) dx, \quad (8)$$

式中: $g$  表示位移约束函数; $N$  和  $l_i$  分别是第  $i$  个单元的长度和单元总数; $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M_z$  分别表示外荷载产生的轴力、剪力、弯矩值; $f_{xj}$ 、 $f_{yj}$ 、 $f_{zj}$  分别表示在约束位移处作用单位力时产生的轴力、剪力、弯矩值; $E$  和  $G$  分别为材料的弹性模量和剪切模量,取  $E=2.0e8$  Pa,  $G=7.9e7$  Pa; $A$ 、 $I$  分别表示截面的面积、惯性矩.

(3) 优化目标函数

结构总重量通常是评价设计优劣的标准,因此这里以材料总重最轻作为优化目标. 目标函数与设计变量的关系可表达为

$$W = \rho \sum_{i=1}^N l_i \left( 2 b_i t_{fi} + \frac{t_{wi}}{2} \sum_{j=1}^2 h_{wij} \right), \quad (9)$$

式中: $\rho$  为钢材密度,取为  $7.85 \text{ t/m}^3$ ;  $h_{wi1}$  和  $h_{wi2}$  为第  $i$  个单元两端的腹板高度.

因此,笔者抗风优化设计的数学模型为 search:

$$X = [h_{w1} \ h_{w2} \ h_{w3} \ h_{w4} \ h_{w5}], \quad (10)$$

minimize:

$$W(X_i) = \rho \sum_{j=1}^N l_j \left( 2 b_j t_{fj} + \frac{t_{wj}}{2} \sum_{i=1}^5 X_i \right), \quad (11)$$

subjected to:

$$g_1 \leq g_1^U, g_2 \leq g_2^U, \quad (12)$$

式中: $g_1$  和  $g_1^U$  分别表示柱顶水平位移及其容许值; $g_2$  和  $g_2^U$  分别为跨中挠度及其容许值. 取  $g_1^U=0.01$  m,  $g_2^U=0.02$  m.

3.2 OC 法

OC 法把数学中最优解应满足的库恩 - 塔克 (Kuhn-Tucker, K-T) 条件作为最优结构应满足的准则,然后再构造关于设计变量的迭代公式进行优化求解<sup>[3]</sup>.

首先按照 K-T 条件构造拉格朗日方程,将目标函数的求解转化成拉格朗日方程求最小值问题:

$$L(X_i, \lambda_k) = W(X_i) + \sum_{k=1}^m \lambda_k (g_k - g_k^U), \quad (13)$$

式中: $L$  表示拉格朗日函数; $\lambda_k$  为第  $k$  个约束对应的拉格朗日乘子; $m$  表示约束总数,  $m=2$ .

在极小值点,拉格朗日函数  $L$  对  $\lambda_k$  和设计变量  $X_i$  的梯度等于 0. 利用 K-T 条件令  $L$  对  $X_i$  微分得到

$$\frac{\partial W}{\partial X_i} + \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial X_i} = 0, \quad (14)$$

进一步可改写为:

$$- \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial W} = 1. \quad (15)$$

对上式两边同乘  $X_i$  并取  $\eta$  次根,然后用二项式定理展开,取线性项后得到的 OC 法迭代公式

$$X_i^{v+1} = X_i^v \left[ 1 + \frac{1}{\eta} \left( - \sum_{k=1}^m \lambda_k \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial W} - 1 \right) \right]_v, \quad (16)$$

式中: $v+1$  和  $v$  表示 2 个相邻的迭代步; $\eta$  为步长因子,用于控制递归的收敛性,取  $\eta=3.0$ .

计算中,如果拉格朗日乘子等于 0,表示该约束为被动约束,对拉格朗日乘子方程的求解不起作用;如果拉格朗日乘子大于 0,则表示该约束为主动约束,拉格朗日方程求解时需要考虑该乘子.

在迭代的过程中,会不断出现新的设计变量值. 考虑到设计变量的变化  $X_i^{v+1} - X_i^v$  会引起约束函数  $g_k^U - g_k^v$  的变化,整合拉格朗日乘子值可得到线性方程组

$$\sum_{s=1}^m \lambda_s^v \left( \sum_{i=1}^N \lambda_k X_i^v \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \frac{\partial g_s}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial W} \right)_v = - \sum_{i=1}^N X_i^v \left( \frac{\partial g_k}{\partial X_i} \right)_v - \eta (g_k^U - g_k^v). \quad (17)$$

式(16)和式(17)一起形成了 OC 法解决连续优化问题的理论基础.

4 优化结果与讨论

图 3 和图 4 分别为目标函数和设计变量随优

化迭代次数的变化,相应数值如表 3 所示. 由图表可见,该结构抗风优化计算的收敛速度较快,迭代 5 次时达到收敛状态. 这里截取了前 6 次迭代结果,计算总时长约 200 s. 将优化收敛后的材料总重和设计变量与表 2 给出的初值对比可以发现,通过优化使材料总重减少了 23. 2%,设计变量的降低幅度为 44. 5% ~ 73. 7%. 因此,通过优化设计使结构在保证抗风安全性的同时达到一定的经济效益.

同时,由表 3 可以看出,优化后截面 1 和截面 5 的腹板高度为尺寸下限值,而截面 2 到截面 4 的腹板高度介于上、下限值之间;截面 2 和截面 3 的设计变量值较其它截面更大.

图 5 给出了优化后的门式刚架示意图. 可以看出,刚架柱的尺寸自柱脚往柱顶逐渐增加,而刚架梁的尺寸在梁端最大而跨中较小,与变截面门式刚架的力学特性和设计要点较为符合<sup>[14]</sup>.

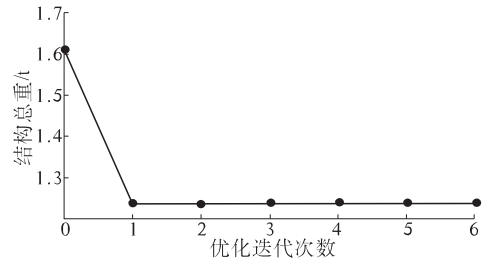


图 3 结构总重随迭代次数的变化  
Fig. 3 Variation of total weight with iteration

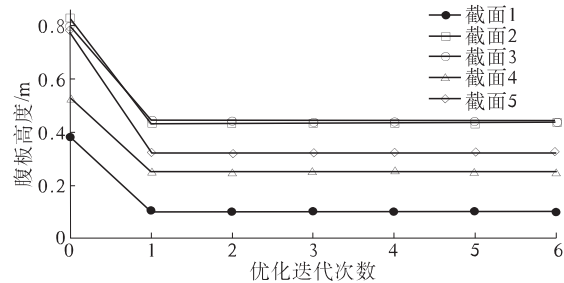


图 4 设计变量随迭代次数的变化  
Fig. 4 Variation of design variables with iteration

表 3 不同迭代次下的结构总重和设计变量

Tab. 3 Total weights and design variables in iterations

迭代次数	截面 1/m	截面 2/m	截面 3/m	截面 4/m	截面 5/m	总重/t
0(初值)	0.380 0	0.830 0	0.800 0	0.530 0	0.780 0	1.612 5
1	0.100 0	0.435 8	0.441 9	0.247 6	0.320 0	1.238 7
2	0.100 0	0.416 6	0.456 6	0.252 2	0.320 0	1.238 4
3	0.100 0	0.425 3	0.448 8	0.248 2	0.320 0	1.237 2
4	0.100 0	0.427 8	0.450 5	0.248 0	0.320 0	1.237 9
5	0.100 0	0.428 3	0.450 8	0.248 0	0.320 0	1.238 0
6	0.100 0	0.428 4	0.450 9	0.248 0	0.320 0	1.238 0

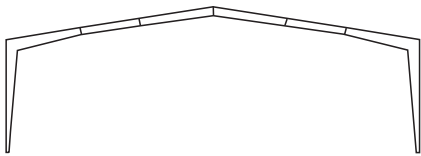


图 5 优化后的门式刚架示意图  
Fig. 5 The portal frame after optimization

5 结论

- (1) 将多目标等效静力风荷载用于优化设计,可以保证每个响应均得到与随机响应峰值基本一致的等效值,避免了单目标等效静力风荷载对优化精度的影响.
- (2) 采用 OC 法进行变截面门式刚架的抗风优化,具有收敛速度快、优化效果好等优点,基本上前 5 次迭代后达到收敛,材料总重降低了约 23. 2%,在保证结构抗风安全性的同时节约了钢材,产生了经济效益.

- (3) 设计变量的取值随着优化迭代而发生改变,其中 2 个设计变量取值为下限值,优化收敛后刚架柱的腹板高度自柱脚往上不断增加,而刚架梁的两端腹板高度较大,符合变截面门式刚架的设计特点.

参考文献:

[1] 王元清,石永久,陈宏,等. 现代轻钢结构建筑及其在我国的应用[J]. 建筑结构学报, 2002, 23 (1): 26-31.

[2] 中国建筑金属结构协会建筑钢结构委员会. CECS102: 2002, 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2003.

[3] CHAN C M. An optimality criteria algorithm for tall steel building design using commercial standard sections[J]. Structural Optimization, 1992, 5(1/2): 26-29.

[4] 黄友钦,王艳萍,傅继阳,等. 基于齿形法的空间

桁架结构抗风优化[J]. 郑州大学学报:工学版, 2013, 34(5): 22-25,37.

[5] JANG S, LU L W, SADEK F. Database-assisted wind load capacity estimates for low-rise steel frames [J]. Journal of Structure Engineering, 2002, 128 ( 12 ): 1594 - 1603.

[6] PHAN D T, LIM J B P, MING C S Y, et al. Optimization of cold-formed steel portal frame topography using real-coded genetic algorithm [J]. Procedia Engineering, 2011( 14 ): 724 - 733.

[7] 吴剑国,曹曦,龚铭,等. 改进的离散复合形法与门式刚架结构优化设计[J]. 同济大学学报, 2002, 30(2): 164 - 168.

[8] 赵彦革,何广乾. 变截面门式刚架斜梁的优化设计[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(6): 70 - 74.

[9] 傅继阳,钟亮,黄友钦,等. 基于量子粒子群算法的门式刚架结构抗风优化[J]. 西安交通大学学报, 2013, 48(5): 845 - 850.

[10] 吴玖荣,董超超,徐安,等. 大跨度变截面门式刚架抗风优化设计研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2): 69 - 74.

[11] 陈波,杨庆山,武岳. 大跨空间结构的多目标等效静风荷载分析方法[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 62 - 67.

[12] 陈波,李明,杨庆山. 基于风振特性的多目标等效静风荷载分析方法[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 152 - 157,164.

[13] WANG F W, CHAN S L. Optimization and sensitivity analysis of space frames allowing for large deflection [J]. Engineering Structures, 2006, 28 ( 10 ): 1395 - 1406.

[14] 张其林. 钢结构设计系列丛书轻型门式刚架[M]. 山东: 山东科学技术出版社, 2006.

Wind Effect Optimization of Portal Frames with Varying Sections  
Based on ESWLs for Multi-targets

WANG Yan-ping, HUANG You-qin, WU Jiu-rong, TANG Yan-teng

( Engineering Technology Research and Development Center for Structural Safety and Health Monitoring in Guangdong Province, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China )

**Abstract:** The light-weight portal frames are commonly used in single floor industrial buildings, and wind load is one of the most important design loads. However, previous studies on structural wind effect optimization only considered the equivalent static wind loads (ESWLs) for a single-target, which might cause inaccurate results under multiple constraints. In this paper, the ESWLs for multi-targets are constructed based on the database of wind tunnel tests, and the Optimum Criterion (OC) method is adopted to optimize the wind effect of a portal frame with varying sections. The height of web plates of the joist steel are selected as the design variables, the minimum weight of steel is the objective under the constraints of horizontal displacement at the column top and the vertical deflection in the mid-span. The code is written on the platform of MATLAB. Studies show that constrained displacements under ESWLs for multi-targets are consistent with the peak random displacements. The optimization makes the total weight decrease by 23.2% , generating obvious economic benefits. Moreover, the optimized sectional dimensions conform to the mechanical characteristics of portal frames.

**Key words:** portal frames with varying sections; wind effect optimization; ESWLs for multi-targets; OC

文章编号:1671-6833(2014)05-0069-05

# 层状岩体单轴压缩破损特征与数值模拟研究

贾善坡<sup>1,2</sup>, 罗金泽<sup>1</sup>, 吴 渤<sup>3</sup>, 席增强<sup>2</sup>

(1. 长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023; 2. 华北油田勘探开发研究院, 河北 任丘 062552; 3. 中国核工业中原建设有限公司, 北京 100037)

**摘 要:** 针对层状岩体的破损特征开展了一系列的室内模型试验, 分析层状岩体单轴压缩情况下的变形破坏特征, 探讨倾角及夹层变化对岩体强度和破损的影响规律. 室内试验结果表明: 当岩层倾角较小时 ( $\theta < 45^\circ$ ), 岩体破坏主要为岩石先破坏, 后层间错动破坏; 当岩层倾角增大时 ( $45^\circ \leq \theta < 75^\circ$ ), 岩体的破坏以层间的剪切破坏为主, 并伴有劈裂破坏; 当岩层倾角增大到  $90^\circ$  时, 岩体的破坏为沿层间直接破坏, 伴有局部的失稳劈裂. 采用 ABAQUS 软件对上述模型试验进行数值模拟, 数值模拟及理论分析表明: 岩体的压缩强度呈先减小后增大的“U”形分布, 计算结果与室内实验结果具有较好的一致性.

**关键词:** 层状岩体; 室内实验; 破损特征; 倾角; 数值模拟

**中图分类号:** TP3, TU458 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.016

## 0 引言

层状岩体, 由于在形成过程中经历各种地质构造作用, 层状岩体结构与其他岩体有显著的差别, 含有层面、节理等缺陷介质, 不仅力学特性如变形和强度具有各向异性特征, 在破坏机制上也存在着较大的差异, 会给实际工程设计和评价层状岩体是否稳定带来巨大困难<sup>[1]</sup>.

许多学者在层状岩体的损伤特征、剪切破坏特征和相似材料模拟试验等方面开展了详细的理论分析和试验研究<sup>[2-9]</sup>, 取得了很多有效的进展. 其中: 邓荣贵等<sup>[4]</sup>利用模拟试验对层状岩体的变形特性和强度特性进行了研究, 得到了模拟试样的变形模量和强度随试样所含节理数、轴向应力与节理面间的夹角和围压之间的变化关系; 胡波等<sup>[5]</sup>采用模型试验研究节理对岩体强度变形特性的影响, 分别对完整岩块、贯通节理岩体和断续节理岩体进行中型剪切试验; 张桂民等<sup>[7]</sup>探讨倾角、夹层和界面对软硬互层盐岩变形破损的影响规律. 室内试验能够很好地反映采集的岩体样本的力学性质, 但不能完整地反映宏观岩体的性质, 而模型试验用相似材料来模拟自然界中的岩体,

能较好的反映层状岩体的破损特征.

近年来, 由于计算机技术的飞速发展, 数值计算的方法在研究岩体力学领域得到广泛应用<sup>[10-13]</sup>. 黄书岭等<sup>[10]</sup>通过编程语言将建立的本构模型嵌入到 FLAC<sup>3D</sup> 软件中, 实现了一组节理的层状岩体复合材料的非线性数值计算; 何忠明等<sup>[11]</sup>对岩体压缩变形特征进行了数值分析, 并与物理试验进行对比, 两者结果能够很好的吻合. 笔者通过试验研究和理论推导并利用大型有限元软件 ABAQUS 对层状岩体进行了力学和变形特性数值分析, 研究了不同岩层倾角下层状岩体的破坏形态以及强度特征.

## 1 试验条件

笔者进行的层状岩体相似材料研究, 材料及其配比见表 1.

将试验材料制作成  $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 50\text{ mm}$  的试样, 在震捣密实后按  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  7 个不同角度插入薄铁片用作分层, 后抽出铁片, 静置试样一个月. 实验材料质量配合比见表 1, 其中工况 2 是某层状岩体模拟试验的配比<sup>[14]</sup>.

收稿日期: 2014-02-10; 修订日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41102182); 湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB008); 中国石油科技创新基金(2011D-5006-0603); 湖北省建设科技计划项目(2011-119)

作者简介: 贾善坡(1980-), 男, 长江大学副教授, 博士后, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作, E-mail: jiashanporsm@163.com.

表 1 相似材料配合比方案表  
Tab.1 Proportion of similitude material

材料	工况 1	工况 2	工况 3
重晶石粉	100	100	100
石英砂	36.9	27	29
石膏	11.6	10.7	11.6
膨润土	7.8	7.3	15.6

2 试验结果

2.1 试样破损特征分析

对试样进行单轴压缩试验,试样原始状态和破坏后状态对比见图 1,其中红色线标记区域为破坏面走向.

由图 1 可以看出,不同倾角下,层状岩体受压破坏模式不同:倾角为 0°时,岩体发生整体性劈

裂破坏,分层处形成薄弱面,会有裂隙产生,层间交汇处也出现破坏;倾角为 15°时岩体先出现细小裂隙,后扩散至整个试样,层间开始产生错动,分层处开始出现裂隙破坏现象;倾角为 30°时试样层间错动,同时也有贯穿边界处的劈裂破坏;倾角为 45°时试样破坏主要是层间滑移破坏,试样中部分层处首先出现裂隙,试件上下部分产生滑移,继续加载,试样非分层处出现裂隙为劈裂破坏;倾角为 60°时试样边缘处分层剥落,后分层处产生滑移,破坏过程中几乎没有出现劈裂破坏;倾角为 75°时,试样在分层处出现裂隙,继而产生整层滑移破坏;倾角为 90°时,试样边缘分层处出现剥落,试件上部由于侧向失稳而产生横向断裂裂缝.3 组不同工况的试样单轴抗压极限强度与倾角关系见图 2.

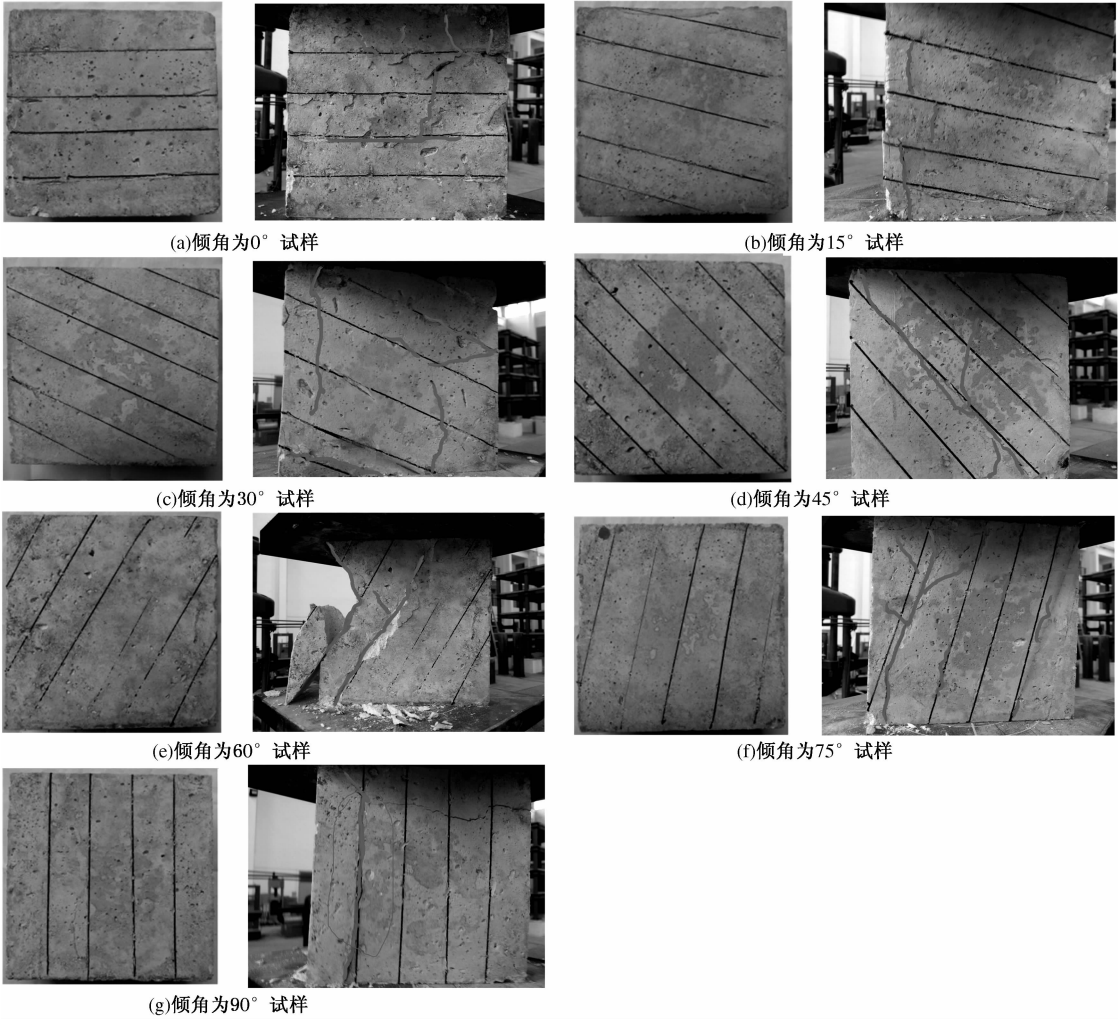


图 1 不同角度试样破坏前后对比

Fig.1 Destruction of the sample before and after comparison of different angles

由图 2 可知,随着层间角度的增大,试样的承载力出现“U”形波动;对于三组不同工况的试样,

第三组配比方案比其他两组配比方案得到的试样强度要高,主要原因是在第三组配比中,石英砂用

量减少,膨润土用量增多,而石英砂在此配比中属于粗骨料,用量减少会提高试样的抗压强度.

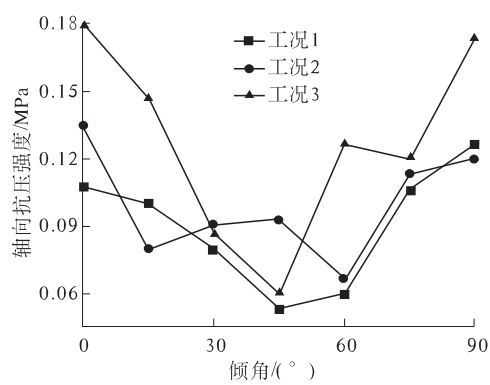


图 2 不同对比组试样单轴抗压强度随倾角变化关系图  
Fig.2 Uniaxial compressive strength with angle changes for different samples

2.2 层状岩体破坏理论分析

对于层状岩体,Jaeger 曾提出关于各向同性岩体抗剪强度参数的经验公式<sup>[15]</sup>

$$s = s_1 - s_2 \cos[2(\alpha - \beta)] (\beta \in [0, \frac{\pi}{2}]), \quad (1)$$

式中: $s$  代表  $\sigma, c, \varphi$  等强度参数; $s_1, s_2$  均为常数, $\alpha, \beta$  分别为最大主应力  $\sigma_1$  和破坏面与层面的夹角.

Jaeger 准则适合于各向同性层状体. 但本试验岩体存在弱界面, 因此假设剪切破坏发生在界面处, 若  $c_\theta, \varphi_\theta$  分别为弱界面的黏聚力和内摩擦角, 则根据摩尔—库仑准则

$$\begin{cases} \tau = c_\theta + \sigma \tan \varphi_\theta; \\ \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\theta); \\ \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\theta). \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{倾角 } \theta = \frac{\pi}{2} - \beta, \left( \theta \in \left[ \varphi_\theta, \frac{\pi}{2} \right] \right). \quad (3)$$

化简式(1), 得

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_\theta - \sigma_3 \tan \varphi_\theta)}{(1 - \tan \varphi_\theta \cot \varphi_\theta) \sin(2\theta)}. \quad (4)$$

当  $c_\theta, \varphi_\theta$  为定值时, 对式(4)求极值可得, 当  $\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi_\theta}{2}$  时得到极小值

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\min} = \frac{2(c_\theta - \sigma_3 \tan \varphi_\theta)}{\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_\theta} - \tan \varphi_\theta}. \quad (5)$$

当界面弱交接即黏聚力  $c_j$  很小, 层状岩体将沿界面剪断破坏, 试件受损, 则有

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2(c_j - \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 - \tan \varphi_j \cot \varphi_\theta) \sin(2\theta)}, \left( \theta \in \left[ \varphi_j, \frac{\pi}{2} \right] \right).$$

(6)  
式中: $c_j, \varphi_j$  分别为薄弱界面的黏聚力和内摩擦角.

绘制公式图形, 得到 Jaeger 准则以及沿弱界面破坏的强度曲线图.

取两条曲线的下包络线即可得到层状岩体的强度曲线, 见图 3 中实线部分. 图 3 中的理论曲线与上述实验强度分析中的规律基本一致, 承两边高, 中间低的“U”形分布, 理论较好地解释了实验现象, 也可以证明层状岩体的破坏与强度曲线具有一定的联系, 即破坏主控因素的不同决定了岩体破坏强度不同.

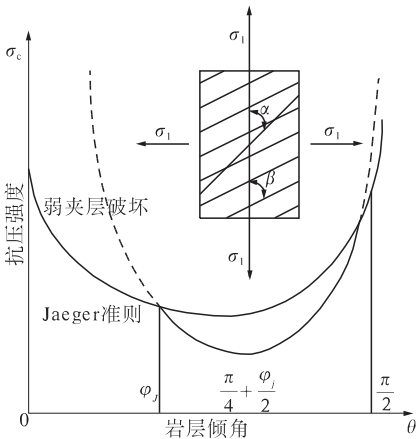


图 3 层状岩体强度曲线  
Fig.3 Strength curves of interbedded rocks

3 有限元模型分析

根据上述试验, 笔者建立含软弱层的层状岩体有限元模型, 模型尺寸为 150 mm × 150 mm, 软弱层厚度 0.2 mm. 采用摩尔—库仑模型来模拟层状岩体力学行为, 材料参数见表 2. 模型底部边界条件为限制水平和竖直方向的位移, 在模型顶部施加位移荷载, 直至运算结束.

表 2 模型材料参数  
Tab.2 Model material parameters

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	内摩擦角/ (°)
岩石	0.2	0.23	0.1	25
薄弱层	0.05	0.25	0.01	25

通过有限元数值分析得到 0°到 90°不同角度的竖向应力分布图和剪应力分布图, 见图 4.

(1) 当倾角为 0°时, 数值模型底脚处竖向应力增长较快, 分层间隙处出现应力分布不均匀, 同时剪应力在底脚处较大, 这与实验过程中底脚处先出现裂纹, 然后分层处出现剥落破坏等现象较吻合.



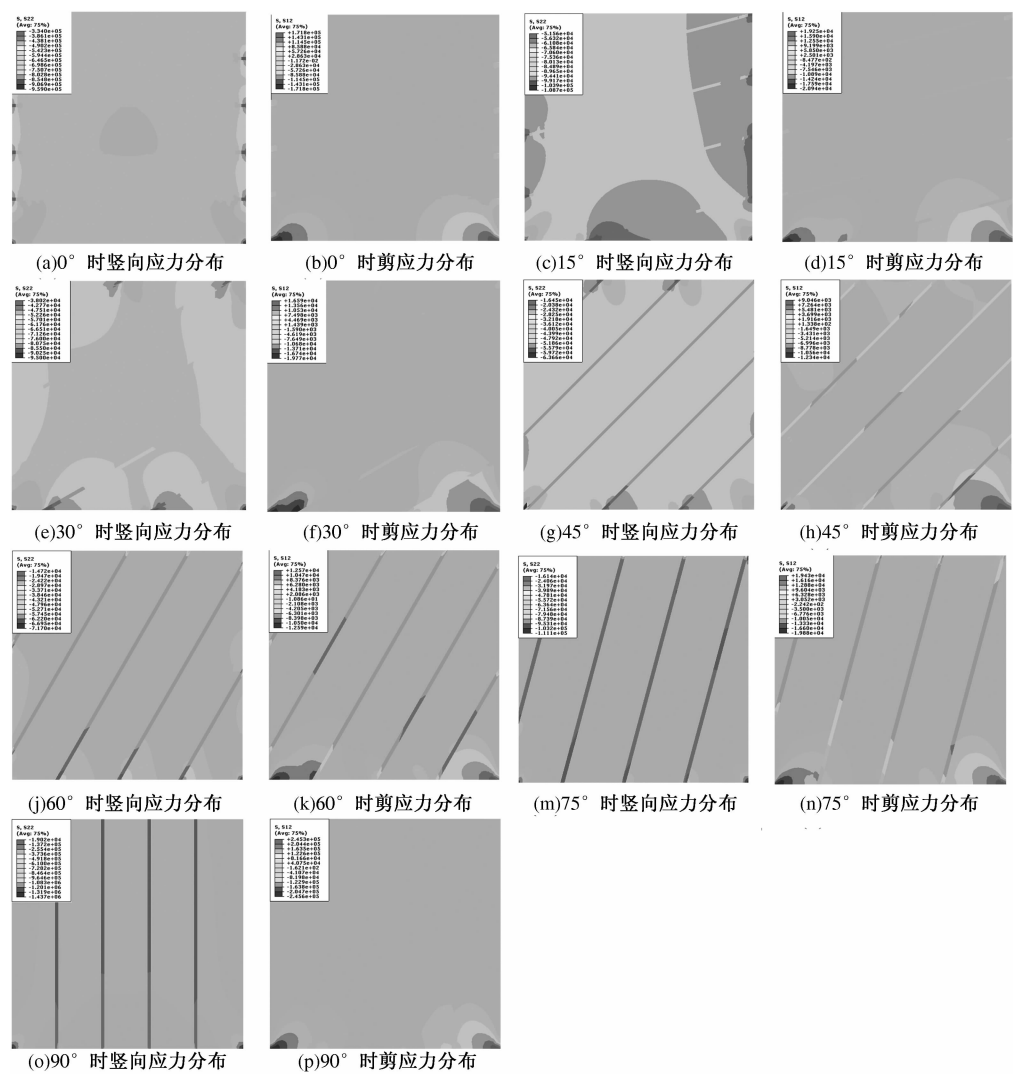


图 4 不同倾角下单轴压缩时竖向应力分布和剪应力分布(单位:Pa)

Fig.4 Vertical stress distribution and shear stress distribution of Uniaxial compression for different angles (Unit:Pa)

(2) 当倾角为 15°时,数值模型底脚处和底部分层边界处应力增长较快,出现应力分布不均匀,剪应力在底脚处较大. 试验过程中 15°试样底脚处先出现裂纹,接着出现竖向劈裂裂纹,试验现象与数值分析较吻合.

(3) 当倾角为 30°时,数值模型应力变化与倾角 15°模型相似. 试验过程中 30°试样层间错动较明显,试验现象与数值分析结果有一定的出入.

(4) 当倾角为 45°时,数值模型底脚出现应力增长较快,顶部和底部分层位置出现明显的应力分布不均匀,剪应力除了在底脚处较大外,在层间软弱层也较大,表明模型会在底脚处和分层处出现破坏. 试验过程中 45°试样底脚还未开始破坏时层间就已经出现较明显错动,记录的压力值也较小,这一实验现象与数值分析结果较吻合.

(5) 当倾角为 60°和 75°时,数值模型应力分布情况与 45°模型相似. 试验过程中 60°和 75°试样出现底脚先破坏,然后分层处滑落剥落,试验现象与数值分析结果较吻合.

(6) 当倾角为 90°时,数值模型应力分布与 0°模型相似,不同的是 90°模型层间应力分布不均匀,容易产生层间拉裂破坏. 试验过程中 90°试样底脚还未开始破坏时层间已经裂开,实验现象与数值分析结果较吻合.

综合试验结果、数值分析结果以及理论结果可得到图 5 所示曲线,三者在一定程度上有着相同的关系,强度曲线随倾角的增大呈“U”形分布,结果表明,不同倾角下的层状岩体破坏主控因素的不同,是导致破坏模式不同以及强度曲线“U”形变化的根本原因.

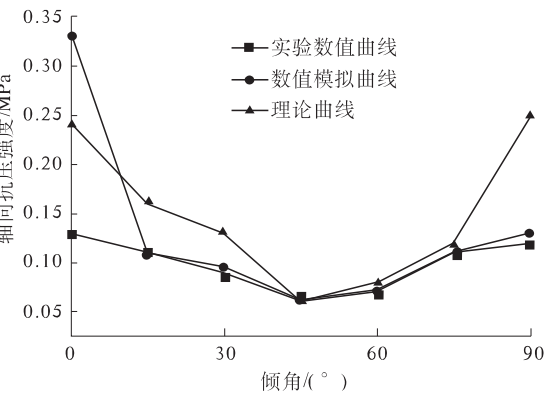


图 5 试验结果、理论分析及数值分析对比

Fig.5 Comparison of experimental results, theoretical analysis and numerical analysis

4 结论

(1)层状岩体的破损模式与岩层倾角有很大关系,当岩层倾角较小时,岩体破坏主要为岩石先破坏,后层间错动破坏,破坏模式与单一岩体破坏相似。

(2)当倾角增大时,以层间的剪切破坏为主,并伴有一般的劈裂破坏;当角度继续增大到 90° 时,岩体的破坏会比较直接,沿层间直接破坏,并伴有伴有局部的失稳劈裂。

(3)数值模拟结果与室内实验具有较好的一致性,软件模拟的破坏位置与破坏状态与室内实验的实际情况能较好的对应,说明本文用参数缩小数倍的薄弱夹层来模拟层间的接触部位是可行的。

参考文献:

[1] 苏志敏,江春雷, Ghafoori M. 页岩强度准则的一种模式[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 311 - 314.  
[2] TIEN Y M, KUO M C. A failure criterion for transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2001, 38(3): 399 - 412.  
[3] 杨圣奇,徐卫亚,苏承东. 大理岩三轴压缩变形破

坏与能量特征研究[J]. 工程力学, 2007, 24(1): 136 - 142.  
[4] 邓荣贵,付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6): 721 - 729.  
[5] 胡波,张楠,刘顺桂,等. 节理对岩体强度变形特性影响的模型实验[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2009, 40(4): 1133 - 1138.  
[6] TIEN Y M, TSAO P F. Preparation and mechanical properties of artificial transversely isotropic rock[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(6): 1001 - 1012.  
[7] 张桂民,李银平,杨长来,等. 软硬互层盐岩变形破坏物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1813 - 1820.  
[8] TIEN Y M, KUO M C, JUANG C H. An experimental investigation of the failure mechanism of simulated transversely isotropic rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 2006, 43(8): 1163 - 1181.  
[9] 陈新,廖志红,李德建. 节理倾角及连通率对岩体强度、变形影响的单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 781 - 789.  
[10] 黄书岭,丁爱丽,邹爱清,等. 层状岩体多节理本构模型与试验验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1628 - 1635.  
[11] 何忠明,彭振威,曹平,等. 层状岩体单轴压缩室内试验分析与数值模拟[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(5): 1906 - 1912.  
[12] 陈沙,岳中琦,谭国焕. 基于真实细观结构的岩土工程材料三维数值分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 1951 - 1958.  
[13] 周文,朱自强,柳群义,等. 复杂节理面剪切强度和变形特征的数值分析[J]. 中南大学学报, 2009, 40(6): 1700 - 1704.  
[14] 戴永浩,陈卫忠. 一种软岩相似材料及制备方法[P]: 中国. CN101614629. 2009 - 12 - 30.  
[15] JAEGER J C. Shear failure of anisotropic rock[J]. Geological Magazine, 1960, 97(1): 65 - 72.

(下转第 91 页)

文章编号:1671-6833(2014)05-0074-05

某既有剪力墙开洞粘钢加固方法研究

赵更歧, 李 庆, 全江伟

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对实际在役建筑物中出现的剪力墙开洞问题, 采用 PKPM 建立了剪力墙开洞前后的模型, 通过开洞前后剪力墙配筋率的差值, 运用等强代换的方法对开洞剪力墙进行粘钢加固, 从加固前后结构的周期比、层间位移角、位移比、剪重比、刚重比、抗剪承载力等指标来验证加固效果. 研究结果表明: 该实际工程中剪力墙开洞后墙体的配筋率减低较多, 需要补强; 采用粘钢加固, 加固前后结构的周期比、层间位移角、位移比、剪重比、刚重比变化较小, 抗剪承载力满足要求; 采用该加固方法弥补了 06SG 311—1 图集中关于剪力墙开洞加固区域的不足, 可以运用到实际工程中.

关键词: 剪力墙开洞; 加固; 粘钢; PKPM

中图分类号: TU375.4 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.017

0 引言

在实际建筑结构中, 剪力墙会因为采光及建筑功能需要而开设门洞、窗洞, 这些洞口在建筑设计中都会提前考虑, 结构设计师往往会在洞口薄弱部位采取暗柱或暗梁等加固措施来确保剪力墙的抗力<sup>[1]</sup>. 然而, 在对既有建筑物的改造工程中, 剪力墙的配筋及尺寸已经固定, 倘若因为业主的功能要求, 需对剪力墙开洞, 将很大程度上降低原剪力墙的承载能力. 目前, 在实际工程中出现的剪力墙开洞问题越来越多, 关于剪力墙开洞后的加固方法较少<sup>[2]</sup>, 加固方案的制定带有一定的盲目性. 所以对既有剪力墙开洞的加固方法进行研究, 已很有必要.

某 7 度区内的 19 层住宅剪力墙结构, 由于功能的扩展, 需要对现役剪力墙进行开设门洞, 基于

这种工程背景, 笔者采用 PKPM 建立该建筑物剪力墙开洞前后的有限元模型, 研究剪力墙开洞的加固方法.

1 工程概况

本工程为某小区的住宅楼, 结构型式为钢筋混凝土剪力墙结构, 地上 18 层, 地下 1 层, 工程抗震设防烈度为 7 度, 设计基本地震加速度为 0.1g, 设计地震分组为第 2 组, 场地类别为 III 类, 剪力墙的抗震等级为 3 级. 地下 1 层到地上第 2 层混凝土采用 C35, 钢筋采用 HRB400, 第 3 层到第 18 层混凝土采用 C30, 钢筋采用 HRB400, 该建筑的标准层结构平面布置图如图 1 所示. 由于业主对建筑功能的要求, 需要在 ①/4~5 轴间的剪力墙进行开设门洞, 具体参数如下表 1 所示, 剖面图如图 2 所示.

表 1 开洞前后墙体的参数

Tab.1 Parameters before and after the shear wall with openings

类别	墙体位置	墙体尺寸	洞口尺寸	层数	备注
		宽/mm × 高/mm × 厚/mm	宽/mm × 高/mm × 厚/mm		
原结构 SL-ND	①/4~5 轴	3 300 × 2 900 × 200	0 × 0 × 0	-1~18	无
新增门洞 SL-KD	①/4~5 轴	3 300 × 2 900 × 200	1 000 × 2 100 × 200	-1~18	居中开洞

收稿日期: 2014-03-01; 修订日期: 2014-06-09

基金项目: 河南省重点科技攻关项目 (132102310277)

作者简介: 赵更歧 (1970-), 男, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事结构加固技术等方面的研究, E-mail: zhaogengqi@zzu.edu.cn.

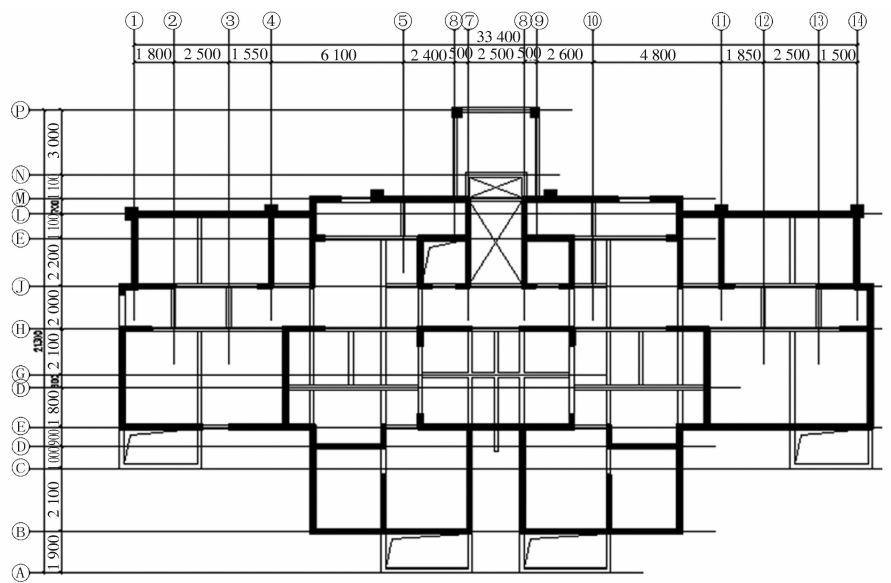


图 1 标准层平面图

Fig.1 Standard floor plane

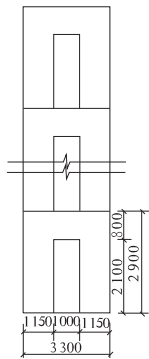


图 2 开洞剪力墙剖面图

Fig.2 The shear wall with openings in section

2 采用 PKPM 进行剪力墙开洞前后对比分析

本工程设计计算程序采用中国建筑科学研究院 PKPMCAD 工程部开发的 PKPM 系列设计软件 2010 版中的《多层及高层建筑结构空间有限元分析与设计软件 SATWE》进行该结构的整体计算<sup>[3]</sup>,分别建立剪力墙开洞前后模型,进行分析.对比结果见表 2 及图 3,4 所示.

通过对比图 3,4 及表 2,可以看出,开洞后,剪力墙洞口暗柱部位的竖向配筋率与水平配筋率

表 2 加固前后墙体的配筋率参数

Tab.2 The reinforcement ratio parameter before and after the openings of shear wall strengthened by bonded steel

类别	墙身		边缘暗柱		洞口暗柱		连梁	
	水平配筋	竖向配筋	水平配筋	竖向配筋	水平配筋	竖向配筋	水平配筋	竖向配筋
未开洞墙体	0.25	0.25	0.40	2.01	无	无	无	无
开洞墙体	0.25	0.25	0.77	2.01	0.63	1.15	0.80	0.50

%

较开洞前对应部位的配筋率大很多,说明此部位需要加固;开洞后剪力墙的连接梁部位配筋率较开洞前相应部位的配筋率大,需要加固;开洞后剪力墙的边缘暗柱的水平配筋率较开洞前相应部位的配筋率多一倍,需要加固.

3 剪力墙开洞的粘钢加固

对既有剪力墙开洞后,无法将需要增加的配筋添加到结构中,为了满足现行设计规范<sup>[4]</sup>及结构的安全、适用、耐久,必须对其进行加固.针对本

工程采用粘钢加固方法<sup>[5]</sup>,通过未开洞墙体与开洞墙体配筋面积的差值,采用等强代换的方法来设计粘贴钢板的尺寸及粘贴型式,具体加固做法见表 3 及图 5 所示.06SG 311—1<sup>[6]</sup>中关于剪力墙开洞加固方法见图 6 所示,若采用此种加固方法,连梁的上部没有采取加固措施,左、右端墙肢边框也没有采取加固措施,洞口两边的粘钢区域也不足.因此,在实际工程的改造加固时,不能生搬硬套现有图集,应该经过特定地分析,来解决实际问题.

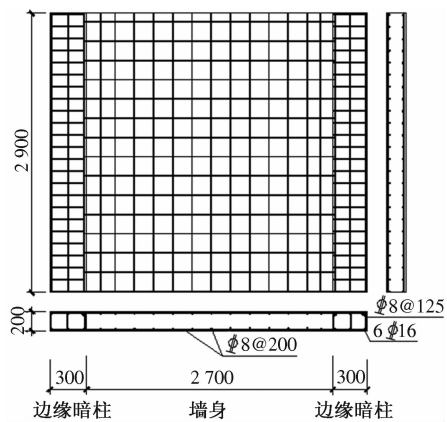


图 3 开洞前剪力墙配筋图

Fig. 3 Reinforcement drawing before the opening of shear wall

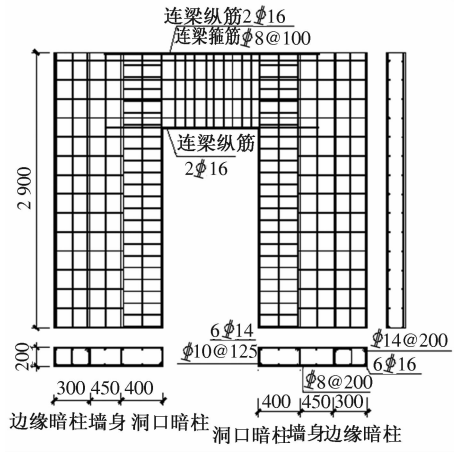


图 4 开洞后剪力墙所需配筋图

Fig. 4 Reinforcement required drawing after the opening of shear wall

表 3 粘钢加固开洞剪力墙的钢板参数

Tab. 3 Steel parameters of the shear wall with openings strengthened by bonded steel

类别	墙身	边缘暗柱	洞口暗柱	U 型箍	压条/	钢板
		柱/mm	柱/mm	板/mm	mm	类别
粘钢	无	-5×300	-5×300	-5×50	-5×150	Q235-B

4 加固前后结构整体性能的对比分析

(1)周期比. 表 4 为加固前后自振周期对比.

通过对表 4 加固前后自振周期对比分析,开洞前结构的第一平动周期为 1.911 5 s,第一转动周期为 1.346 6 s,加固后结构的第一平动周期为 1.905 2 s,第一转动周期为 1.346 5 s,按照 JG 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》中的 3.4.5 条规定<sup>[7]</sup>,加固前  $T_i/T_1=0.70$ ,加固后  $T_i/T_1=0.71$ ,两者几乎相等,因此,在该位置开此大小的门洞对原结构的自振周期影响甚微.

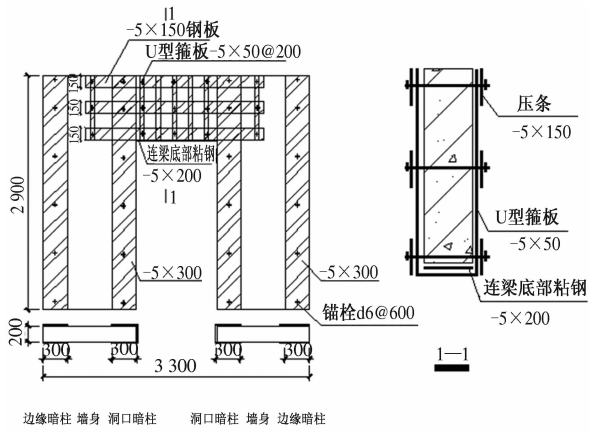


图 5 粘钢加固开洞剪力墙做法图

Fig. 5 Practice chart of the shear wall with openings strengthened by bonded steel

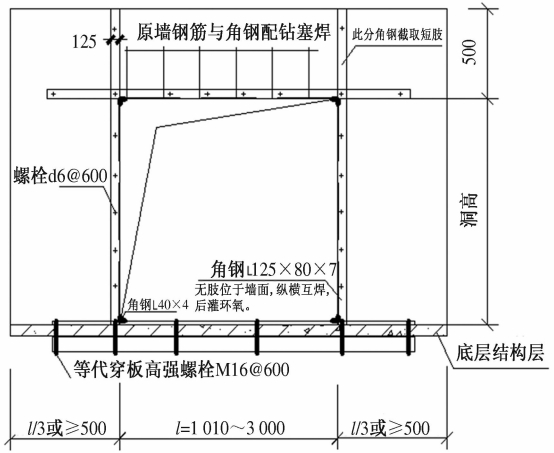


图 6 06SG311—1 中剪力墙开洞的加固

Fig. 6 The strengthening method of the shear wall with openings in 06SG311—1 atlas

表 4 加固前后自振周期对比

Tab. 4 Comparison of free vibration periods before and after the strengthening method of the shear wall with openings

振型 号	周期 T/s		平动系数		扭转系数	
	原结	加固	原结	加固	原结	加固
	构	后	构	后	构	后
1	1.911 5	1.905 2	0.92	0.92	0.08	0.08
2	1.683 0	1.683 6	1.00	1.00	0.00	0.00
3	1.346 6	1.346 5	0.08	0.08	0.92	0.92
4	0.539 2	0.534 0	0.98	0.98	0.02	0.02
5	0.418 2	0.418 2	1.00	1.00	0.00	0.00
6	0.356 7	0.356 7	0.03	0.03	0.97	0.97
7	0.261 1	0.256 0	0.99	0.99	0.01	0.01
8	0.186 9	0.186 9	1.00	1.00	0.00	0.00
9	0.165 2	0.165 0	0.06	0.03	0.94	0.97

(2)层间位移角对比. 在地震作用下,开洞前,X 方向地震作用规定水平力下的楼层最大层

间位移角为 1/1 075,  $Y$  方向地震作用规定水平力下的楼层最大层间位移角为 1/1 392; 加固后,  $X$  方向地震作用规定水平力下的楼层最大层间位移角为 1/1 072,  $Y$  方向地震作用规定水平力下的楼层最大层间位移角为 1/1 398. 按照 JGJ3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》中的 3.7.3 条规定<sup>[7]</sup>, 当剪力墙结构时, 按弹性计算的风荷载或多遇地震标准值作用下的楼层层间最大水平位移与层高之比的限制为 1/1 000, 开洞前与加固后楼层最大位移相差较小, 且都满足规范的要求.

(3) 位移比. 在考虑偶然偏心影响的规定水平地震力作用下, 开洞前  $X$  方向最大位移与层平均位移的比值为 1.11,  $X$  方向最大层间位移与平均层间位移的比值为 1.17,  $Y$  方向最大位移与层平均位移的比值为 1.17,  $Y$  方向最大层间位移与平均层间位移的比值为 1.22; 加固后  $X$  方向最大位移与层平均位移的比值为 1.11,  $X$  方向最大层间位移与平均层间位移的比值为 1.17,  $Y$  方向最大位移与层平均位移的比值为 1.17,  $Y$  方向最大层间位移与平均层间位移的比值为 1.22. 按照 JGJ3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》中的 3.4.5 条的规定<sup>[7]</sup>, 加固后该剪力墙结构  $X$ 、 $Y$  方向最大位移与层平均位移的比值或最大层间位移与平均层间位移的比值均满足要求.

(4) 剪重比. 加固前后, 按照 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》第 5.2.5 条规定<sup>[8]</sup>,  $X$ 、 $Y$  向各楼层最小剪重比均大于 1.60%;  $X$  方向的有效质量系数为 99.50%,  $Y$  方向的有效质量系数为 99.50%.

(5) 刚重比. 开洞前,  $X$  向刚重比为 4.91,  $Y$  向刚重比为 5.87, 该结构刚重比为大于 1.4, 能够通过文献<sup>[7]</sup>第 5.4.4 条的整体稳定验算; 该结构刚重比大于 2.7, 按照文献<sup>[7]</sup>第 5.4.1 条可以不考虑重力二阶效应. 加固后,  $X$  向刚重比为 4.88,  $Y$  向刚重比为 5.87, 该结构刚重比大于 1.4, 能够通过文献<sup>[7]</sup>第 5.4.4 条的整体稳定验算; 该结构刚重比大于 2.7, 按照文献<sup>[7]</sup>第 5.4.1 条可以不考虑重力二阶效应.

(6) 受剪承载力对比. 开洞前, 原结构开洞处墙体的轴压比为 0.36, 剪力设计值  $V=415\text{ kN}$ , 抗剪承载力  $V_u=854.4\text{ kN}$ ; 加固后, 开洞墙体左墙肢的轴压比为 0.41, 剪力设计值  $V=174\text{ kN}$ , 抗剪承载力  $V=285\text{ kN}$ , 右墙肢的轴压比为 0.41, 剪力设计值  $V=174\text{ kN}$ , 抗剪承载力  $V=285\text{ kN}$ . 抗剪承载力均大于剪力设计值, 加固后满足原结构抗

剪承载力的要求. 通过对比开洞前后墙体的剪力设计值, 发现开洞后开洞墙体承担的剪力值变小了, 对比第 4 层每片剪力墙的剪力设计值与抗剪承载力 (见图 7), 发现开洞后剪力按墙体的抗侧刚度大小进行了重分配, 虽然本工程中抗剪承载力能够满足, 但剪力墙开洞对本层其他抗剪构件均有影响, 在结构计算和加固中应加以重视.

通过对以上指标的分析, 可知, 本实际工程中剪力墙开洞对整体结构影响较小, 粘钢加固后可满足原结构的要求.

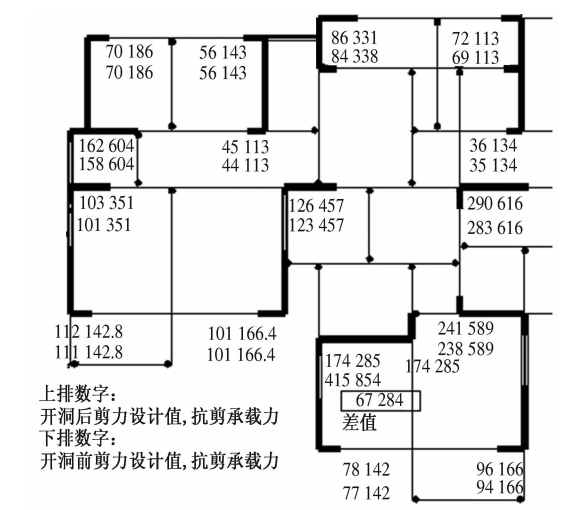


图 7 剪力墙开洞前后剪力变化对比  
Fig. 7 Comparison between shear changes before and after shear walls with openings

5 结论

- (1) 剪力墙开洞后, 洞口边缘与连梁部位配筋不足, 需要对墙体的承载力进行补强.
- (2) 该实际工程中剪力墙开洞采用粘钢加固, 加固前后结构的自振周期、位移、刚重比变化较小, 抗剪承载力能够满足原结构的要求.
- (3) 采用此种粘钢加固方法弥补了 06SG 311—1 图集中关于剪力墙开洞加固区域的不足.
- (4) 通过 PKPM 计算剪力墙开洞前后配筋率的变化, 采用粘钢加固法对开洞剪力墙加固, 该方法可以应用在实际工程中.
- (5) 剪力墙开洞后剪力按墙体的抗侧刚度大小进行了重分配, 开洞对本层其他抗剪构件均有影响, 在结构计算和加固中应加以重视.

参考文献:

[1] 孙继红. 浅析剪力墙新开洞口外包钢板压力注胶加固质量控制措施[J]. 黑龙江科技信息, 2010(2): 279-279.



- [2] 甘尚琼. 剪力墙及楼板后开洞粘钢加固法[J]. 建筑安全, 1998, 13(9): 24-25.
- [3] PKPM CAD 工程部. 多层及高层建筑结构空间有限元分析与设计软件(墙元模型) SATWE 用户手册及技术条件[M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011: 11-39.
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB 50367—2006, 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [5] 余刚. 框架梁负弯矩区粘钢加固锚固方法试验研究[D]. 郑州: 郑州大学土木工程学院, 2012: 6-8.
- [6] 国家建筑标准设计图集. 06SG311—1, 混凝土结构加固构造总则及构架加固[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [7] 中华人民共和国行业标准. JGJ3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 中华人民共和国国家标准. GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

## Study on Strengthening Methods of RC Shear Wall with Openings in Service by Bonding Steel Plate

ZHAO Geng-qi, LI Qing, QUAN Jiang-wei

(school of civil engineering, Zhengzhou university, Zheng zhou 450001, China)

**Abstract:** With problems of shear wall with openings appearing in existing buildings, I analyze its impact on the overall structure by PKPM after the openings of shear wall, and focus on bonding steel to reinforce shear wall with openings by the method of iso-strength exchangable. From the natural period, and displacement of the structure, and the ratio of rigidity-to-gravity, and the shear bearing capacity to verify the reinforcement effect. The results show that reinforcement ratio of the shear wall with openings reduced more, need reinforcement. The shear wall with openings bonded steel reinforcement has less effect on the overall structure in the actual engineering, which is even able to reach the level before its opening. Using this kind of bonding steel strengthening method makes up for short of atlas of 06SG311—1. Therefore, this method can be applied to the actual project.

**Key words:** shear wall with openings; reinforcement; bond steel plate; PKPM

文章编号:1671-6833(2014)05-0079-05

# 用无机胶粘贴 CFRP 布加固损伤组合梁受弯性能

陈伟宏<sup>1</sup>, 马景明<sup>2</sup>, 崔双双<sup>3</sup>

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 国核电力规划设计研究院 电网事业部, 北京 100095; 3. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 目前多采用环氧类有机胶粘贴 CFRP 布加固混凝土结构构件, 该胶软化点约为 60 ℃, 难以满足耐高温要求。为此, 制备了一种可以耐 600 ℃ 高温的无机胶。用该无机胶粘贴碳纤维布对 4 根已经历受弯承载能力极限状态的有粘结预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁进行加固, 并对加固组合梁进行了受弯性能试验, 获得了加固组合梁的正截面受弯承载力和荷载—挠度变形曲线。基于试验数据, 提出了考虑原组合梁损伤影响的此类加固组合梁的受弯承载力计算方法, 建立了与试验结果吻合良好的刚度计算公式。

**关键词:** 无机胶; 碳纤维布; 加固; 组合梁; 受弯性能

**中图分类号:** TU375.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.018

## 0 引言

粘贴 CFRP 布加固混凝土结构技术可以有效提高钢筋混凝土构件的承载力。加固胶粘剂是该技术的关键因素, 因为胶粘剂良好的性能是保证 CFRP 布与混凝土构件共同工作的基础。目前加固所用胶粘剂多为环氧类有机胶, 其软化点介于 60~80 ℃, 导致加固后结构构件的耐高温性能较差。可以采取在 CFRP 布表面涂防火涂料和用耐高温胶取代有机胶来解决该问题<sup>[1-3]</sup>。火灾发生后, 即使在 CFRP 布表面涂防火涂料, CFRP 布与混凝土之间也难免会产生滑移甚至失去粘结, 其耐高温性能提高有限。无机胶具有无毒、成本低、耐高温性能好等优点, 笔者制备了一种可以耐 600 ℃ 高温的无机胶<sup>[4]</sup>。用该胶在混凝土表面粘贴 CFRP 布的面内剪切强度与有机胶相当<sup>[5]</sup>。

通过用无机胶粘贴一层 CFRP 布加固 4 根经历受弯承载能力极限状态的预应力混凝土组合梁, 并进行正截面受弯性能试验, 来研究加固后构件的破坏模式、承载力等。

## 1 试验简介

### 1.1 组合梁设计情况<sup>[6]</sup>

4 根组合梁截面  $b \times h = 300 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ , 计

算跨度为 3 800 mm。1 梁混凝土强度等级为 C40, 保护层厚度 25 mm。预应力筋为  $\phi_p 5$  低松弛高强钢丝, 其抗拉强度标准值为  $f_{ptk} = 1\,670 \text{ N/mm}^2$ , 弹性模量为  $E_p = 2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$ 。张拉控制应力  $\sigma_{con} = 0.75f_{ptk}$ 。分别将 4 根组合梁编号为 B-1、B-2、B-3、B-4, 其主要试验参数如表 1 所示, 钢管力学性能指标如表 2 所示, 组合梁细部构造如图 1 所示。

### 1.2 试验方案

由于组合梁在进行受弯试验时, 跨中受压区混凝土部分被压碎。卸载后, 部分主裂缝未闭合。在对组合梁进行加固前, 先将压碎混凝土用 C45 细石混凝土进行置换, 而对未闭合裂缝采用注入无机胶进行修复。

在梁底粘贴一层厚 0.111 mm 宽 300 mm 的 CFRP 布对组合梁进行加固, 加固方案如图 2 所示。CFRP 布的抗拉强度为  $4\,578 \text{ N/mm}^2$ , 伸长率为 1.77%, 弹性模量为  $2.50 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

采用两点对称加载进行受弯性能试验。跨中梁侧混凝土、梁顶混凝土和梁底 CFRP 布应变通过应变片测量, 梁端和跨中位移由位移引伸仪测量。

收稿日期:2014-04-18; 修订日期:2014-06-29

基金项目:国家自然科学基金项目资助(50678050)

作者简介:陈伟宏(1980-), 男, 福州大学助研, 博士, E-mail: chenweihong1980@163.com.

表 1 组合梁基本参数一览表  
Tab.1 Information of composite beams

编号	上弦钢管 $d_0 \times t_0/\text{cm}$	下弦钢管 $d'_0 \times t'_0$	竖腹杆 $d_1 \times t_1$	预应力筋	$\sigma_{pe}$	$\sigma_{con}$	$\beta_s$	$\beta_p$	$\beta_0$	$\xi$	$\lambda_p$
B-1	45×3.5	70×3.5	38×4	10 $\varphi^{p5}$	1 252	0.21	0.49	45×3.5	70×3.5	38×4	42×6
B-2	45×3.5	60×3.5	38×4	12 $\varphi^{p5}$	1 252	0.21	0.59	45×3.5	60×3.5	38×4	42×6
B-3	45×3.5	63.5×5.0	38×4	12 $\varphi^{p5}$	1 252	0.27	0.49	45×3.5	63.5×5.0	38×4	42×6
B-4	45×3.5	70×3.5	38×4	14 $\varphi^{p5}$	1 252	0.26	0.59	45×3.5	70×3.5	38×4	42×6

注: $\beta_p$  为预应力配筋指标, $\beta_p = \frac{\sigma_{pe} A_p}{f_c b h_p}$ ;  $\beta_s$  为受拉弦杆类比为受拉钢筋的非预应力配筋指标, $\beta_s = \frac{f_y A_{ss}}{f_c b h_s}$ ;  $\beta_0$  为综合配筋指标, $\beta_0 = \beta_p + \beta_s = \frac{\sigma_{pe} A_p + f_y A_{ss}}{f_c b h_0}$ ;  $\xi$  为混凝土相对受压区高度; $\lambda_p$  为预应力度( $\lambda_p = \frac{\sigma_{pe} A_p}{\sigma_{pe} A_p + f_y A_{ss}}$ ).

表 2 钢管力学性能指标  
Tab.2 Mechanical properties of steel tube

钢管	$f_y/$ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	$f_u/$ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )	$E_s/$ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ )
45×3.5	315	360	$1.98 \times 10^5$
60×3.5	310	381	$1.98 \times 10^5$
70×3.5	328	442	1.98
63.5×5.0	330	360	1.98

注: $f_y$  表示钢管实测屈服强度; $f_u$  表示钢管实测极限抗拉强度; $E_s$  表示钢管弹性模量; $\nu$  表示钢管泊松比.

2 试验结果

4 根试验梁均出现继 CFRP 布达到极限拉应变而拉断后,继续加载,受压区边缘混凝土被压碎的破坏模式,如图 3 所示.4 根试验梁荷载—跨中挠度曲线均呈现开裂弹性和塑性发展二个阶段,

如图 4 所示.

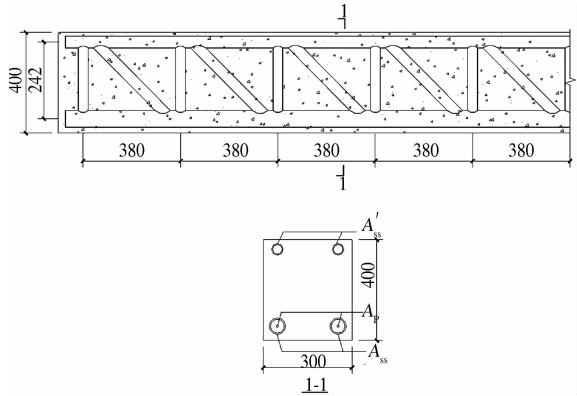


图 1 组合梁钢桁架细部构造

Fig.1 Construction detail of steel truss

通过对试验梁跨中截面从加载到破坏各级荷载作用下的混凝土应变实测值分析,发现试验梁纯弯段基本符合平截面假定,如图 5 所示.

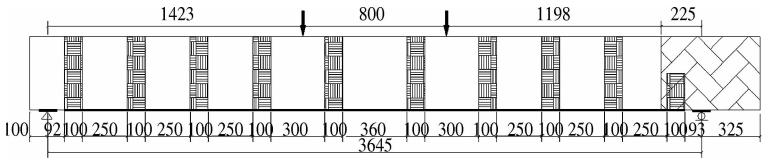


图 2 碳纤维加固图

Fig.2 CFRP layout

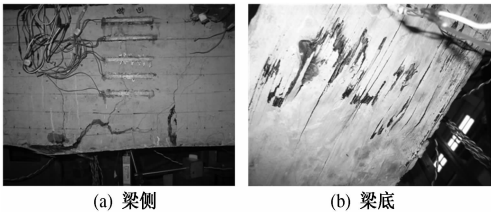


图 3 试验梁破坏特征

Fig.3 Failure characteristic of test beams

3 加固组合梁正截面受弯承载力分析

3.1 受弯承载力的计算方法

组合梁在完成正截面受弯试验后,非预应力筋的最大拉应变仍位于钢筋本构的屈服平台上.对加固后组合梁进行受弯承载力分析时,非预应力钢筋本构关系仍取 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐本构.

原组合梁在完成正截面受弯试验后,若受压区混凝土压应变小于  $f_c$  对应的应变  $\epsilon_c$ ,则分析加固后梁受弯承载力时,混凝土应力—应变关系仍

采用 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐的本构关系;若混凝土的压应变大于  $\varepsilon_c$ , 小于极限压应变  $\varepsilon_{cu}$ , 则混凝土应力—应变关系采用图

6 所示的曲线<sup>[7]</sup>;若受压区混凝土局部被压碎, 则采用 C45 细石混凝土置换压碎混凝土, 使置换处的破坏迟于其他部位.

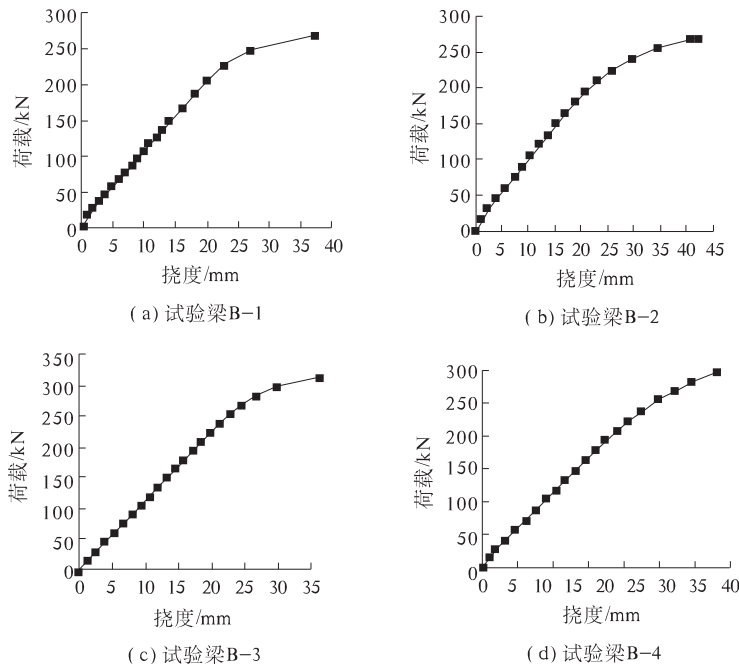


图 4 试验梁弯矩—跨中挠度曲线  
Fig.4 Curve of load deflection of test beams

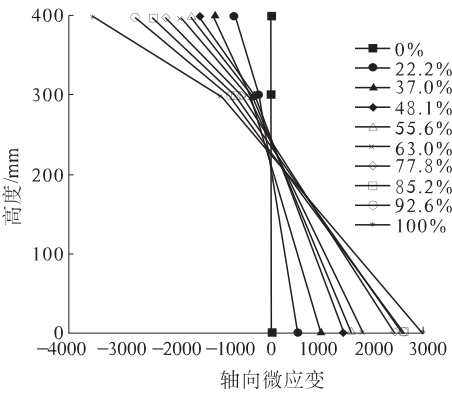


图 5 B-1 控制截面应变分布  
Fig.5 Distribution of strain along the critical section of B-1

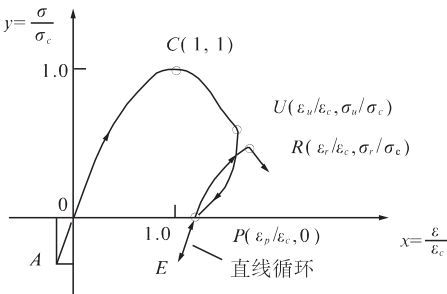


图 6 混凝土二次受荷应力—应变曲线  
Fig.6 Relation of stress strain of concrete secondary load

将加固梁在纯弯段沿高度方向分为  $n$  个条带, 根据平截面假定, 得到钢管和钢筋的应变、受压区边缘和第  $i$  条混凝土的压应变与 CFRP 布的应变相关关系. 采用相应的钢筋、混凝土本构关系, 由力平衡条件求出混凝土实际受压区高度, 进而可求得试验梁的正截面受弯承载力.

3.2 抗弯承载力计算值与试验值比较

对用无机胶粘贴 CFRP 布加固后的损伤有粘结预应力混凝土组合梁的受弯弯承载力进行计算, 结果如表 3 所示, 其中  $M_t^u$  为试验梁的极限承载力实测值,  $M_c^u$  为试验梁的极限承载力计算值.

表 3 极限承载力计算值与试验值比较

Tab.3 Test between the calculated and test values of ultimate bearing capacity					kN · m			
试验梁	B-1	B-2	B-3	B-4				
$M_t^u$	397.0	394.2	475.3	444.0				
$M_c^u$	395.3	414.9	441.5	425.6				
$M_c^u/M_t^u$	1.00	1.05	0.93	0.96				

由表 3 可以得出, 加固梁正截面抗弯承载力计算值与试验值的比值  $X$  的平均值为  $\bar{X} = 0.99$ , 标准差为  $\sigma = 0.05$ , 变异系数  $\delta = 0.05$ , 计算值与试验值吻合较好.

4 加固组合梁刚度分析

一般受弯构件承载力的 45% 与荷载效应标准组合值在数值上基本相等,承载力的 70% 与荷载效应基本组合值大致相当<sup>[8]</sup>.

表 4 试验梁受弯刚度平均值比较

Tab.4 Measured bending rigidity of strengthened beams

梁号	挠度/mm		弯矩/(kN·m)		刚度×10 <sup>13</sup> / (N·mm <sup>2</sup> )		$\frac{B_{0.45}}{B_{0.70}}$
	$f_{0.45}$	$f_{0.70}$	$M_{0.45}$	$M_{0.70}$	$B_{0.45}$	$B_{0.70}$	
B-1	11.77	18.31	178.66	277.54	2.01	2.01	1.00
B-2	12.69	19.61	177.38	275.55	1.85	1.86	1.01
B-3	13.29	18.97	213.88	332.34	2.30	2.32	1.01
B-4	12.34	17.69	199.79	310.40	2.14	2.04	0.95

由表 4 可知,加固梁的刚度值  $B_{0.45}$  和  $B_{0.70}$  相差不大,可认为荷载小于极限荷载的 70% 时,该类加固梁的受弯刚度为定值.且考虑极限荷载的 45% 与荷载效应标准组合值大致相当,笔者认为  $f_{0.45}$  和  $B_{0.45}$  分别与荷载效应标准组合作用下的挠曲变形  $f_k$  和短期刚度  $B_s$  在数值上近似相等.

参考文献[9]构建该类加固组合梁在荷载效应标准组合作用下的短期刚度表达式(1).  $E_c$  为混凝土弹性模量;  $I_0$  为梁换算截面惯性矩;  $\alpha_E$  为钢管弹性模量与混凝土弹性模量的比值;  $a$ 、 $b$  为实常数;  $\rho$  为纵向受拉钢筋综合配筋率,

$$B_s = \frac{0.85E_cI_0}{a + \frac{b}{\alpha_E\rho}} \tag{1}$$

在荷载效应标准组合作用下此类加固梁的跨中挠度  $f_k \approx f_{0.45}$ , 由图乘法得到第  $i$  根试验梁在荷载效应标准组合作用下的跨中挠度计算值  $f_{k,i}$  和实测挠度值  $f_{0.45,i}$ , 令  $\prod = \sum_{i=1}^4 (f_{k,i} - f_{0.45,i})^2$ , 建立变分方程组  $\frac{\partial \prod}{\partial a} = 0$  和  $\frac{\partial \prod}{\partial b} = 0$ , 得到  $a = 0.53$ ,  $b = 0.34$ . 考虑受弯破坏及粘贴 CFRP 布对加固梁刚度的影响后, 此类加固梁在荷载效应标准组合作用下的短期刚度公式可表示为

$$B_s = \frac{0.85E_cI_0}{0.53 + \frac{0.34}{\alpha_E\rho}} \tag{2}$$

由于受弯构件承载力的 45% 与荷载效应标准组合值基本相等,故在荷载效应标准组合作用下加固组合梁实测刚度取为极限承载力的 45% 时的刚度值. 将相关物理量代入式(2),即得到加固组合梁的刚度计算值,则刚度计算值  $B_s^c$  与实测

对 4 根加固梁的弯矩与挠度实测值进行整理,由挠度公式  $f = s \frac{Ml_0^2}{B}$ , 得到其刚度值  $B_{0.45}$  和  $B_{0.70}$ , 如表 4 所示.

值  $B_s^t$  如表 5 所示.

表 5 刚度计算值与实测值比较

Tab.5 Comparison between the calculated and test values of bending rigidity

梁号	$B_s^t /$ ( $10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ )	$B_s^c /$ ( $10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ )	$B_s^c / B_s^t$
B-1	2.01	1.89	0.94
B-2	1.85	1.75	0.95
B-3	2.30	2.41	1.05
B-4	2.14	2.16	1.01

由表 5 可知,由公式(2)计算得到的加固组合梁刚度值与实测值吻合较好.

5 结论

- (1)用无机胶粘贴 CFRP 布加固损伤组合梁进行受弯试验时,发生了继 CFRP 布被拉断后混凝土被压碎的破坏模式.
- (2)试验结果表明,用无机胶粘贴 CFRP 布加固经历承载能力极限状态的组合梁是可行的.
- (3)基于试验结果,建立了考虑原梁受荷历程影响的用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土梁的正截面受弯承载力计算方法,提出了与试验结果吻合良好的刚度计算公式.

参考文献:

[1] KODUR V K R, BISBY L A, GREEN M F. Experimental evaluation of the fire behaviour of insulated fibre-reinforced-polymer-strengthened reinforced concrete columns[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41 (7): 547 - 557.

[2] WILLIAMS B, BISBY L A, KODUR V K R , et al.

Fire insulation schemes for FRP-strengthened concrete slabs[J]. Composites: Part A , 2006, 37(8):1151 – 1160.

[3] LEES J M, WINISTORFER A U, MEIER U. External prestressed carbon fiber-reinforced polymer straps for shear enhancement of concrete[J]. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(4):249 – 256.

[4] CHEN Wei-hong, QIU Hong-xing, CUI Shuang-shuang. High-temperature resistance performance of an inorganic adhesive for concrete structures strengthened with CFRP sheets[J]. Journal of WUHAN University of Technology materials Science, , 2013, 28(5):950 – 954.

[5] 郑文忠,陈伟宏,徐威,等. 用碱激发矿渣耐高温无机胶在混凝土表面粘贴碳纤维布试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4):138 – 145.

[6] 张博一,郑文忠,苑忠国. 预应力内置圆钢管桁架混凝土组合梁的受力性能[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(3):636 – 641.

[7] 郑文忠,谭军,曾凡峰. CFRP 布加固无粘结预应力连续梁受力性能试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2008, 35(6):11 – 17.

[8] 谭军. 碳纤维布加固预应力混凝土梁抗弯性能试验与分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学土木工程学院, 2008:77 – 94.

[9] 陶学康,王逸,杜拱辰. 无粘结部分预应力混凝土的变形计算[J]. 建筑结构学报, 1989(1):20 – 27.

Flexural Behavior of Damaged Composite Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with Inorganic Adhesive

CHEN Wei-hong<sup>1</sup>, MA Jing-ming<sup>2</sup>, CUI Shuang-shuang<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Power Grid Department, State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute, Beijing 100095, China; 3. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Organic epoxy adhesives are usually used in strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets. However, due to the low softening points of organic adhesives which are about 60 ℃, concrete structures strengthened with CFRP sheets bonded with organic epoxy adhesives can not meet the heat resisting requirements. In this paper, an inorganic adhesive, which can resist at least 600 ℃ high temperature, was prepared to paste CFRP sheets to strengthen four simply supported bonded prestressed composite beams encased circular steel tube truss after ultimate limit state, and test on flexural behavior of these four beams was also performed. Moreover, normal section load-bearing capacity of these beams and the curve load-deflection at mid-span were obtained. Experimental results show that it is feasible to strengthen concrete members with CFRP sheets bonded with inorganic adhesive. Based on the experimental results and theoretical study, computational method of stiffness is proposed for calculating bending rigidity and normal section load-bearing capacity of concrete simply supported beams strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic adhesive. The formula of bending rigidity calculation was also set up, whose results are in good agreement with testing data.

**Key words:** inorganic adhesive; CFRP sheets; strengthen; composite beam; flexural behavior



文章编号:1671-6833(2014)05-0087-05

# 掺废混凝土块的钢管再生混合轴压短柱试验研究

张卫东<sup>1</sup>, 王振波<sup>2</sup>, 孙文彬<sup>1</sup>

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘要:**通过钢管再生混合短柱的轴压试验,研究了强度低于普通混凝土的废弃混凝土块体掺入率对构件的宏观变形特征、荷载—竖向变形关系和承载力—掺入率的影响,验证了目前钢管混凝土三种计算理论计算公式的适用性.研究表明:钢管再生混合短柱轴压破坏形态与钢管普通构件相似;极限承载力随着废弃混凝土块体掺入率的增加而降低,最大降幅约为 14%,但均显示出较好的延性.通过对比分析,从不同角度出发推荐了不同的钢管再生混合短柱轴压承载力计算公式.

**关键词:**废弃混凝土块体;钢管混凝土;轴压试验;掺入率

**中图分类号:** TU392.3 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.020

## 0 引言

废弃混凝土的再生利用有利于节省资源、保护环境,具有重大的意义.近年来国内外学者在此方面进行了大量研究,主要集中在两个方面:①将废弃混凝土破碎后形成再生混凝土骨料,从而浇筑钢筋再生混凝土构件或结构,在此方向肖建庄等<sup>[1]</sup>学者做了大量的研究;②考虑到组合结构的受力特点,将再生混凝土骨料用于组合结构,制成钢管再生混凝土或钢筋再生混凝土构件,在此方面 Konno<sup>[2]</sup>及杨有福等<sup>[3-4]</sup>学者得出了大量的结论.

目前钢管再生混凝土构件中废弃混凝土粒径一般为 5~20 mm,因此必须对废弃混凝土进行破碎、筛分,整个过程工序繁琐,而且破碎过程中会对废弃混凝土内部造成一定的损伤.为了降低废弃混凝土的损伤及更方便地利用废弃混凝土,可将废弃混凝土块体直接掺入到钢管普通混凝土试件中,制成钢管再生混合构件.在此方面吴波<sup>[5]</sup>开展了废弃混凝土与现浇混凝土抗压强度大致相当的钢管再生混合构件的试验研究,其利用废弃混凝土的形式为节段和块体两种,其研究表明:采用了 32%~35% 的废弃混凝土的钢管再生混合短柱轴向受力性能与全现浇钢管混凝土短柱

相当.

钢管混凝土构件中混凝土的强度等级一般在 C40 以上,而废弃混凝土的抗压强度一般均低于 C40,因此有必要研究抗压强度低于现浇混凝土的废弃混凝土块体掺入到钢管混凝土短柱对钢管再生混合构件力学性能的影响.鉴于此,笔者进行了钢管再生混合结构的轴压试验,研究了其承载能力、变形特征、荷载—竖向变形曲线等性能指标,分析了中美日规范中计算公式的适用性,进一步推动废弃混凝土在钢管混凝土结构中的应用.

## 1 试验研究

### 1.1 材料性能及试件设计

本次试验共 9 根试件,按废弃混凝土块体掺入率分为 3 组,为了保证废弃混凝土块体能被普通混凝土包裹,掺入率取为 0、20%、30%,编号分别为 K-0、K-20、K-30 每组 3 根.

废弃混凝土块体原抗压强度等级约为 C25,为市河东自来水管厂的混凝土经简单破碎后形成,粒径大致为 40~100 mm;水泥为淮河牌 42.5 级普通硅酸盐水泥;天然粗骨料为连续级配的碎石,最大粒径为 20 mm;砂子为普通河砂,细度模数 2.4.

因废弃混凝土块体粒径较大,故立方体试块

收稿日期:2013-12-24;修订日期:2014-01-14

基金项目:住房和城乡建设部科学技术项目(2008-k1-11);省教育厅自然科学基金项目(11KJD560003);宿迁市科技局项目(B2010021);江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象资助.

作者简介:张卫东(1981-),男,汉族,江苏南通人,淮阴工学院讲师,硕士,主要从事钢管再生混凝土结构研究. E-mail:jsntzwd@163.com.

尺寸选为 200 mm × 200 mm × 200 mm, 每一个废弃混凝土块体质量掺入率的立方体试件均为 3 个, 制作立方体试块时直接将废弃混凝土掺入普通混凝土中, 普通混凝土采用强制式搅拌机拌和, 普通混凝土的质量配合比 C: S: G: W = 430: 574: 1 237: 185. 标准养护 28 d 后, 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T 50081—2002<sup>[6]</sup>测得混凝土的抗压强度, 利用尺寸换算系数求出  $f_{cu}$ , 具体见表 1.

本次试验所有试件的截面尺寸都一样, 其中钢管直径  $D \times$  壁厚  $t \times$  长度  $l$  为 219 mm × 6 mm × 657 mm, 钢管采用直缝焊接圆钢管, 依据《金属拉伸试验方法》GB/T 228—2002<sup>[7]</sup>测得钢材屈服抗拉强度、弹性模量和屈服应变等性能(表 1).

表 1 混凝土及钢材力学性能  
Tab. 1 The mechanical properties of concrete and steel

$f_{cu}/\text{MPa}$			$f_s/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$E_s/\text{Pa}$	$\varepsilon/\mu\varepsilon$
NC	NRC20	NRC30				
38.6	27.6	23.2	392.6	445	205 689	1 852
(40.53)	(28.98)	(24.36)				

注: NC 表示普通混凝土; NRCr 中 NRC 表示掺入再生混凝土块体的混凝土, r 表示废弃块体质量掺入率; 括号内为 150 mm 立方体抗压强度.

浇筑之前, 每根钢管一端用厚度为 10 mm、长度为 200 mm 的方形钢板焊接封固作底板, 并保证钢板与钢管几何对中. 浇筑时, 首先从顶部灌入深度约为一个钢管直径普通混凝土, 并插入振捣棒进行振捣, 随之投入废弃混凝土块体, 并让废弃混凝土块体被普通混凝土包裹, 再浇筑普通混凝土并振捣, 类似交替进行, 直到钢管填满. 试件养护方法为自然养护, 一周后凿去表面浮浆, 用高强环氧砂浆将敞口处抹平, 硬化后将试件表面打磨平整并焊好钢板, 保证加载初期钢管与核心混凝土能共同受力. 废弃混凝土块体及试件浇筑过程中的图片见图 1 及图 2 所示.



图 1 废弃混凝土块体  
Fig. 1 Waste concrete block



图 2 试件制作  
Fig. 2 Making of specimens

1.2 试验结果与分析

1.2.1 试验结果

试验装置及测点布置如图 3 所示. 试验过程中发现三类短柱具有相似的破坏过程, 均经历了弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段. 在各自极限承载力的 65% 左右, 钢管中部表面油漆开始开裂, 达到极限承载力 80% 时开始出现剪切滑移线; 在各自极限承载力的 90% 左右, 肉眼可见钢管壁部位微微鼓起; 在试件达到极限荷载后, 随着试件所能承受的荷载的逐渐下降, 试件中部发生明显的鼓曲; 试件破坏时中部伴有局部鼓曲发生, 但其后期承载力及变形显示其具有较好的后期承载力和延性. 卸载过程中, 试件具有回弹的现象. 试验后切开钢管发现混凝土已经压碎, 表明混凝土均处于三向受力状态. 试件的典型破坏形态见图 4.

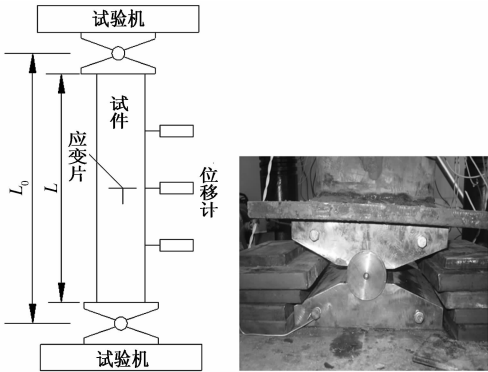


图 3 试验装置及测点布置  
Fig. 3 Test device and measuring point arrangement

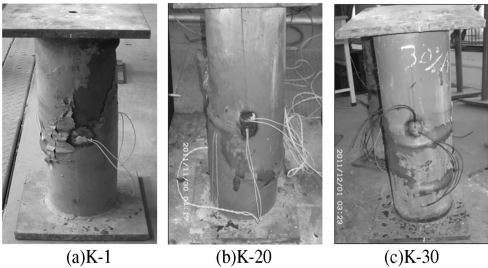


图 4 轴压试件破坏形态  
Fig. 4 The failure mode of specimens under axial compression

表 2 试件一览表

Tab.2 Schedule of specimens

序号	编号	$f_{cu}/\text{MPa}$	废弃混凝土块体掺入率	极限承载力/kN	
				实测值 $N_u$	平均值 $\bar{N}_u$
1	K-0-1	40.53	0	2 861.8	2 836
2	K-0-2			2 848.7	
3	K-0-3			2 790.5	
4	K-20-1	28.98	20%	2 617.5	2 545.6
5	K-20-2			2 478.8	
6	K-20-3			2 540.6	
7	K-30-1	24.36	30%	2 320.2	2 430.3
8	K-30-2			2 485.4	
9	K-30-3			2 275.3	

注:K-X-Y 中 X 表示废弃混凝土块体的质量掺入率,Y 表示试件标号。

1.2.2 破坏形态及分析

由图 5 分析可知:①三类短柱在弹性阶段的荷载—竖向变形曲线相似,接近重合,表明所有试件具有几乎相同的初始刚度,掺入率对试件的刚度影响较小;②当轴压荷载超过比例极限后,三者的荷载—竖向变形曲线不再保持线性关系,位移增长速度均高于荷载增长速度,表明试件均进入弹塑性变形阶段,但同时也显示出掺入率越高试件进入弹塑性阶段时轴压荷载越小的趋势;③三类轴压短柱的后期荷载—竖向变形曲线接近平行,均显示出了相似的、较好的延性特征。

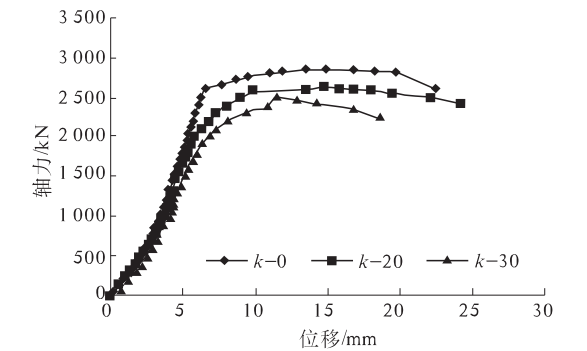


图 5 荷载—竖向变形关系曲线

Fig.5 The relationship curve of load-vertical deformation

1.2.3 掺入率对试件承载力的影响分析

图 6 中为本次试验中轴压试件承载力与掺入率的关系曲线。由图可知,随着废弃混凝土块体掺入率增大,试件轴压承载力呈现逐渐下降的趋势。掺入率为 20% 和 30% 时,轴压极限承载力分别约为普通钢管混凝土短柱的 89.8% 和 85.3%。

究其原因主要由以下两点。①废弃混凝土块体具有亲水性,掺入到普通混凝土中后会在其表

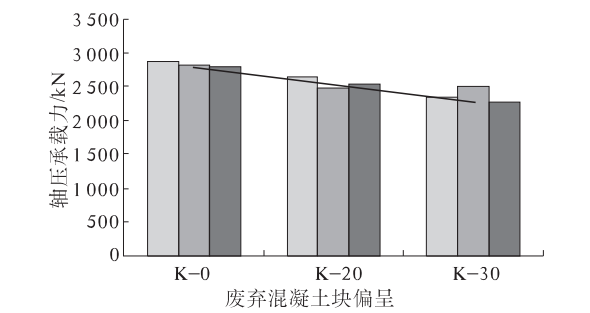


图 6 轴压承载力—掺入率关系

Fig.6 The relationship of bearing capacity-incorporation rate

面形成一层水膜,且普通混凝土中气泡易积聚在废弃混凝土表面,进而降低两者之间的粘结强度,导致掺有废弃混凝土的混凝土强度等低于普通混凝土,且随着废弃混凝土掺入率的增大而降低,进而导致钢管承受更大的荷载,较快达到屈服强度。②由于废弃混凝土块体表面的孔隙特征和吸水特性等性质与天然骨料存在很大差异,导致掺入废弃混凝土块体的混凝土的收缩量加大,且随着掺入率的增大而增大,进而核心混凝土与钢管之间缝隙越来越大,对钢管壁的支撑作用降低,降低了钢管壁的几何稳定性,导致钢管提前发生局部屈曲。

在这两者共同影响下,导致钢管再生混合构件承载力随着掺入率的增加而降低。

2 计算比较

通过对国内外 10 余种关于钢管混凝土的规程的分析,可知钢管混凝土短柱承载力的计算公式的理论主要为套箍理论、统一理论和叠加理论三种。鉴于此,笔者选择体现上述理论的 5 种规程,分别为 CECS230:2008《高层建筑钢—混凝土混合结构设计规程》<sup>[10]</sup>、电力行业标准 DL/T 5085—1999《钢—混凝土组合结构设计规程》<sup>[11]</sup>、美国钢结构协会 AISC—LRFD (1999)<sup>[12]</sup>、英国标准协会 BS5400 (1979)<sup>[13]</sup> 和日本建筑学会 AIJ—CFT (1997)<sup>[14]</sup>,每种规程具体体现的计算理论如表 3 所示。为了验证以上规程计算钢管再生混合短柱轴压承载力的适用性,通过计算并与试验结果进行对比,具体见表 3。各规程计算的试件抗压承载力的统计精度见表 4。

(1) 基于叠加理论考虑核心混凝土强度提高的英国标准协会 BS5400 (1979) 规程计算的轴压

表 3 试验值与代表性规程承载力计算值比较

Tab.3 The comparison between the experimental values and the calculation results

计算理论	编号	$f_{cu}/\text{MPa}$	$N_u/\text{kN}$	$\bar{N}_u/\text{kN}$	$\bar{N}_u/N_u$
基于套箍理论考虑	K-0	40.53	2 538	2 836	1.117
核心混凝土提高	K-20	28.98	2 245	2 545.6	1.134
CECS	K-30	24.36	2 116	2 430.3	1.148
基于统一理论考虑	K-0	40.53	2 544	2 836	1.115
核心混凝土	K-20	28.98	2 336	2 545.6	1.090
提高 DL/T	K-30	24.36	2 265	2 430.3	1.073
基于叠加理论不考	K-0	40.53	2 423	2 836	1.170
虑承载力提高	K-20	28.98	2 186	2 545.6	1.165
AISC-LRFT	K-30	24.36	2 091	2 430.3	1.162
基于叠加理论考虑	K-0	40.53	2 894	2 836	0.979
核心混凝土提高	K-20	28.98	2 718	2 545.6	0.936
BS5400	K-30	24.36	2 648	2 430.3	0.917
基于叠加理论考虑	K-0	40.53	2 619	2 836	1.082
钢管承载力提高	K-20	28.98	2 396	2 545.6	1.062
AIJ-CFT	K-30	24.36	2 306	2 430.3	1.054

表 4 计算结果的统计特性

Tab.4 The statistical characteristics of calculation results

统计特 征值	实测均值承载力/理论计算承载力				
	CECS	DL/T	AISC-LRFT	BS5400	AIJ-CFT
均值	1.133 2	1.092 6	1.165 8	0.944 0	1.599 0
标准差	0.015 5	0.021 1	0.004 0	0.031 7	0.014 4
变异系数	0.013 7	0.019 3	0.003 5	0.033 6	0.009 0

承载力偏大,超过实测均值承载力,笔者认为其不适用于钢管再生混合构件。

(2)除 BS5400 外,废弃混凝土块体掺入率在 30% 以内其余规程计算值均未超过实测值,均可作为钢管再生混合构件的计算公式。

(3)从实测值与计算值的比值可知,采用 AISC-LRFD (1999) 计算其承载力富余度最大,且从均值、标准差及变异系数可知其计算精度也最高,可作为钢管再生混合构件的承载力计算公式;若考虑我国设计人员的习惯,CECS230:2008 规程中轴压承载力计算公式也可作为钢管再生混合构件抗压承载力的计算公式。

3 结论

(1)钢管再生混合短柱轴压破坏形态与钢管普通构件相似,经历了弹性、弹塑性和破坏 3 个阶段,都具有较好的延性和后期承载力。

(2)废弃混凝土块体的掺入率对构件的轴压承载力有较大的影响,显示出随掺入率的增加而

承载力降低的趋势,最大降幅约为 14%。

(3)从计算精度及承载力富余度出发,笔者推荐采用 AISC-LRFD (1999) 中计算公式,若综合考虑我国设计人员习惯采用立方体抗压强度,笔者建议可选用 CECS230:2008 中承载力计算公式。

参考文献:

[1] 王长青,肖建庄. 再生混凝土框架结构模型振动台试验[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(12):1766-1772.

[2] KONNO K, SATO Y, UEDO T, et al. Mechanical property of recycled concrete under lateral confinement[J]. Transaction of the Japan Concrete Institute, 1988,20(3):287-292.

[3] 杨有福,韩林海. 钢管再生混凝土结构工作机理的若干关键问题研究[C]//全国首届再生混凝土研究和应用学术交流会,2008.

[4] YANG You-fu, HAN Lin-hai. Experimental behavior of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(12): 1310-1324.

[5] 吴波,刘伟,刘琼祥,等. 钢管再生混合短柱的轴压性能试验[J]. 土木工程学报,2010,43(2):32-38.

[6] GB/T 50081—2002,普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[7] GB/T 228—2002,金属材料室温拉伸试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[8] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

[9] 钟善桐. 钢管混凝土统一理论——研究与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[10] CECS230:2008 高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

[11] DL/T 5085—1999 钢-混合体组合结构设计规程[S]. 北京:中国电力出版社,1999.

[12] AISC /LRFD(1999) Load and resistance factor design specification for structural steel buildings[S]. American Institute of Steel Construction, INC, 1999.

[13] BS 5400(1979) Steel concrete and composite bridges[S]. British Standards Institution, 1979.

[14] AIJ-CFT(1997) Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures[S]. Architectural Institute of Japan (AIJ),1997.

## Experimental Study on the Behavior of Concrete Filled Steel Tubes with Waste Concrete Block Subjected to Axial Load

ZHANG Wei-dong<sup>1</sup>, WANG Zhen-bo<sup>2</sup>, SUN Wen-bin<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Based on axially compressive tests of concrete filled steel tubes short columns with waste concrete block, the influence of incorporation rate of lower compressive strength to macroscopic characters of deformation, load – vertical deformation curves and bearing capacity-incorporation rate were studied, and applicability of three theoretical calculation formulas of concrete filled steel tubes were analyzed. The test results demonstrate that failure mode, ductility and later bearing capacity of concrete filled steel tubes short columns with waste concrete block is similar to concrete filled steel tubes, but the bearing capacity will decrease when incorporation rate of waste concrete block increases, and the maximum amplitude is 14%. Based on the comparison between the results of three calculation theories and test results, different calculation formulas are recommended from different aspects.

**Key words:** waste concrete block; concrete filled steel tube; axial compression test; incorporation rate

(上接第 73 页)

## Numerical Analysis and Failure Characteristics of Uniaxial Compression for Interlayered Rock Mass

JIA Shan-po<sup>1,2</sup>, LUO Jin-ze<sup>1</sup>, WU Bo<sup>3</sup>, XI Zeng-qiang<sup>2</sup>

(1. School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield, Renqiu 062552, China; 3. China Nuclear Industry Zhongyuan Construction Company Limited, Beijing 100037, China)

**Abstract:** In view of the failure characteristics of layered rock mass, a series of physical experiments were carried out in this paper. The disruption and strength features of the layered rock in the case of uniaxial compressive are discussed to explore the discipline of the dip angle and interlayer changes effect on strength and breakage of rock mass. The test results show that the rock mass destruction modes are mainly rock destruction for small dip angle ( $\theta < 45^\circ$ ), interlaminar shear failure with the dip angle increases ( $45^\circ \leq \theta < 75^\circ$ ) and layer directly damage with local splitting failure for the dip angle of  $90^\circ$ . Abaqus software was used for the numerical simulation on the above model tests. The theoretical analysis and numerical simulation show that the compressive strength of rock is first decreased and then increased with the “U”-shaped distribution. The calculation results are consistent with the results of laboratory test.

**Key words:** layered rock mass; laboratory test; failure characteristic; inclination angle; numerical simulation

文章编号:1671-6833(2014)05-0084-03

聚乙二醇改性沥青性能研究

甘新立<sup>1</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 刘羽<sup>2</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 为研究聚乙二醇改性沥青的技术性能, 测定了不同聚乙二醇掺配率下沥青的布氏黏度、针入度、软化点和延度指标, 对聚乙二醇改性沥青的性能进行了分析; 通过对残留针入度比和残留延度的测定, 分析了聚乙二醇改性沥青的老化性能; 通过黏度-剪切速率曲线, 分析了聚乙二醇改性沥青的流变特性; 通过黏温曲线获得聚乙二醇改性沥青路面的施工温度, 并进行了分析. 研究表明, 随着聚乙二醇掺配率的增加, 沥青的黏度增加、针入度减小、软化点升高、延度降低; 聚乙二醇改性沥青的耐老化性能优于原基质沥青; 聚乙二醇改性沥青在 163 ℃ 的条件下呈现一定的非牛顿特性; 通过黏温曲线获得的聚乙二醇改性沥青混合料的施工温度略高于普通沥青混合料.

关键词: 道路工程; 聚乙二醇; 相变材料; 沥青性能

中图分类号: U414 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.019

0 引言

在高温季节, 沥青路面表层温度可能达到 60 ℃ 以上, 易使沥青路面出现车辙等高温病害. 相变材料能够在一定温度范围内发生物相转化, 吸收或放出大量热量, 但自身温度不发生变化, 将相变材料加入到沥青混合料中, 能够起到储存热量, 调节路面温度的作用<sup>[1-2]</sup>. 聚乙二醇是一种具有水溶性的高分子化合物, 在一定温度下发生熔融, 吸收、储存热量并保持温度恒定, 是一种常用的相变材料<sup>[3-4]</sup>. 国内外对于相变材料的性能做了大量研究<sup>[5-7]</sup>, 但对于聚乙二醇在道路工程上的应用则很少涉及. 张一博等通过综合热分析和红外光谱, 分析了多种相变材料的高温性能, 并选择了适于沥青路面使用的相变材料<sup>[8]</sup>. 胡曙光等从针入

度、软化点、延度和动稳定度等方面分析了聚乙二醇对沥青剂及其混合料的影响<sup>[9]</sup>.

笔者通过测定不同聚乙二醇添加率下沥青的布氏黏度、25 ℃ 针入度、软化点和 15 ℃ 延度, 分析了不同聚乙二醇添加率条件下沥青的性能; 通过改变布氏黏度仪转子型号, 在不同剪切速率下测定聚乙二醇改性沥青的黏度, 获得聚乙二醇改性沥青的黏度-剪切速率曲线, 分析了沥青的流变特性; 在不同温度下测定聚乙二醇改性沥青的布氏黏度, 对聚乙二醇改性沥青混合料的拌合温度进行分析.

1 原材料技术性质

实验采用沥青为中海 70# 基质沥青, 相关技术性能如表 1. 聚乙二醇采用国产某聚乙二醇 2000, 其相关技术性质如表 2.

表 1 沥青技术指标

Tab. 1 Technical indexes of asphalt

沥青种类	60 ℃ 动力黏度 /(Pa · s)	25 ℃ 针入度 (0.1mm)	软化点/℃	10 ℃ 延度/cm	相对密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )
70# 基质沥青	275.4	72.4	53.8	26.8	1.034

表 2 聚乙二醇技术指标

Tab. 2 Technical indexes of PEG

规格	外观 (25 ℃)	色泽 (Pt-Co)	羟值/ (mgKOH · g <sup>-1</sup> )	分子量	水份/ %	pH 值 (1% 水溶液)
PEG-2000	乳白色固状物	≤50	51 ~ 63	1 800 ~ 2 200	≤1.0	5.0 ~ 7.0

收稿日期:2013-05-30; 修订日期:2013-06-19

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2013M532004), 甘肃省科技支撑计划(1011GKCA020), 中央高校基本科研业务费专项资助(CHD2011JC164)

作者简介: 甘新立(1988-), 男, 陕西汉中, 长安大学博士生, 主要从事路面材料研究, E-mail: ganxinli2007@126.com.

## 2 聚乙二醇改性沥青技术指标及老化性能

### 2.1 技术指标

实验采用聚乙二醇掺配率为 0%、5%、10%、20% 和 30%,加入到熔融的沥青中并充分搅拌获得聚乙二醇改性沥青.测定不同掺配率下沥青的布氏黏度、25℃针入度、软化点和 15℃延度,各项性能指标如表 3.

表 3 聚乙二醇改性沥青技术性能

Tab.3 Technical indexes of PEG modified asphalt

掺配率 /%	布氏黏度 /(mPa·s)	针入度/ (0.1mm)	软化点 /℃	延度 /cm
0	503.4	72.4	53.8	>100
5	569.3	61.2	64.5	29.3
10	620.4	57.3	68.3	26.5
20	674.1	51.7	71.7	21.3
30	806.7	47.2	76.2	17.6

可以看出,随着聚乙二醇掺配率的升高,沥青的布氏黏度升高,针入度降低,软化点升高,延度降低.当聚乙二醇的掺配率从 0% 提升到 5% 时,各项指标均出现较大变化,尤其是延度指标从原沥青的大于 100 变为 29.3,说明聚乙二醇对沥青性能的影响显著,少量的掺配率即能对沥青性能产生较大影响.当掺配率大于 10% 时,沥青的针入度和延度已经不满足原基质沥青的技术性能.

从以上对聚乙二醇改性沥青指标的分析可以认为,聚乙二醇的添加提升了沥青的高温性能,降低了沥青的延展性能.同时,当采用聚乙二醇作为改性剂获得聚乙二醇改性沥青时,采用原沥青的技术指标来评价聚乙二醇改性沥青已经不合适了,可采用降低标准采用.

### 2.2 老化性能

实验采用聚乙二醇掺配率为 10% 获得聚乙二醇改性沥青,分别对原 70#基质沥青和聚乙二醇改性沥青进行旋转薄膜烘箱老化实验,实验温度为 163℃,老化时间为 85 min,测定老化后两种沥青的残留针入度比和残留延度如表 4 所示.

可以看出,聚乙二醇改性沥青的残留针入度比和残留延度均大于原基质沥青,表明聚乙二醇改性沥青的耐老化性能优于基质沥青,即聚乙二

醇的添加提高了沥青的耐老化性能.这可能是由于在沥青升温过程中,聚乙二醇吸收热量,并将热量以潜热的形式储存,从而能够在一定程度上减缓沥青的升温.

表 4 沥青老化后技术性能

Tab.4 Technical indexes of aged asphalt

沥青种类	残留针入度比 /%	10℃ 残留 延度/cm
70#基质沥青	56.6	8.4
聚乙二醇改性沥青	73.7	12.6

## 3 聚乙二醇改性沥青混合料施工温度

普通沥青在高温条件下具有牛顿特性,其黏度不随剪切速率的改变而变化.因此,我国普通热拌沥青混合料的施工温度采用沥青黏温曲线获得,并以沥青在黏温曲线上 $(0.17 \pm 0.02)$  Pa·s 时的温度为混合料最佳拌合温度, $(0.28 \pm 0.03)$  Pa·s 时的温度为最佳压实温度.

布氏黏度仪的转速与剪切速率满足

$$S = nk,$$

(1)

式中: $n$  为转速,r/min; $k$  转子剪变率常数.

实验采用聚乙二醇掺配率为 10% 获得聚乙二醇改性沥青,并通过在 163℃ 条件下改变布氏黏度仪的转子型号,在不同转速下测定聚乙二醇改性沥青的黏度,获得聚乙二醇改性沥青黏度与剪切速率的关系,如表 5.可以看出,在 163℃ 条件下,随着剪切速率的增加,聚乙二醇改性沥青的黏度逐渐降低,但降低的幅度不大,即表明聚乙二醇改性沥青具有一定的非牛顿特性,但并不明显.

在确定沥青混合料施工温度时,SHRP 推荐采用 27#转子在 20 r/min 的条件下测定沥青的布氏黏度.分别测定原 70#基质沥青和聚乙二醇改性沥青在 135℃ 和 175℃ 下的布氏黏度,得到原 70#基质沥青和聚乙二醇改性沥青的黏温曲线如图 1.

通过黏温曲线,可以获得 70#基质沥青的最佳拌合温度为 161~165℃,最佳压实温度为 151~155℃,聚乙二醇改性沥青的最佳拌合温度为 163~169℃,最佳压实温度为 152~157℃.可以

表 5 不同剪切速率下的聚乙二醇改性沥青黏度

Tab.5 Viscosity of PEG modified asphalt under different shear rate

剪切速率/ $s^{-1}$	5.6	14	18.6	28	42	46.5	56	93
黏度/(Pa·s)	193.5	187.3	183.1	177.3	173.6	171.7	171	167.5



看出,通过黏温曲线得到的聚乙二醇改性沥青的拌合温度和压实温度均略高于基质沥青。

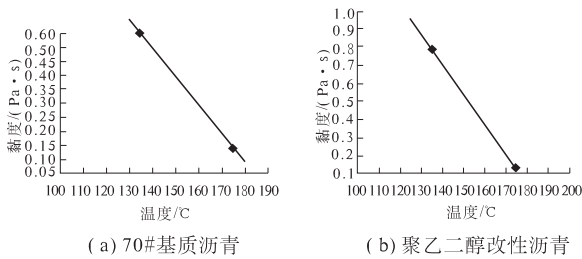


图1 沥青黏温曲线

Fig.1 Viscosity-temperature curve of asphalt

## 4 结论

(1)随着聚乙二醇掺量的增加,沥青的黏度增加,针入度降低,软化点升高,延度降低,且当聚乙二醇掺量大于10%时,聚乙二醇改性沥青的技术性能已经不能满足原沥青的技术指标。

(2)聚乙二醇的耐老化性能优于原沥青的耐老化性能,这可能是因为聚乙二醇可以在一定范围内吸收热量而使沥青温度不升高,从而减缓沥青老化。

(3)聚乙二醇改性沥青具有一定的非牛顿特性,但并不显著。

(4)通过黏温曲线确定的聚乙二醇的施工温度略高于原基质沥青的施工温度。

## 参考文献:

- [1] 马磊,王晓曼,李超,等.相变材料在沥青混凝土路面中的应用前景分析[J].公路,2009(12):115-118.
- [2] 张东,康韩,李凯莉.复合相变材料研究进展[J].功能材料,2007,38(12):1936-1940.
- [3] 方玉堂,康慧英,张正国,等.聚乙二醇相变储能材料研究进展[J].化工进展,2007,26(8):1063-1067.
- [4] 曹长斌,罗阳明,李文虎,等.聚乙二醇对沥青及其混合料储热性能的影响[J].化工新型材料,2013,41(4):137-139.
- [5] 张正国,王学泽,方晓明.石蜡/膨胀石墨复合相变材料的结构与热性能[J].华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(3):1-5.
- [6] 马晓光,张晓林,李俊升,等.相变材料的复合及其热性能研究[J].材料科学与工艺,2008,16(5):720-723.
- [7] 王维龙,杨晓西,方玉堂,等.聚乙二醇/二氧化硅定形相变材料的制备[J].化工学报,2007(10):2664-2668.
- [8] 张一博,朱洪洲,李菁若,等.储热降温沥青路面用相变材料的选择[J].郑州大学学报:工学版,2012,33(3):10-14+18.
- [9] 胡曙光,李潜,黄绍龙,等.相变材料聚乙二醇应用于沥青混合料可行性的研究[J].公路,2009(7):291-295.

## Research on Performance of PEG Modified Asphalt

GAN Xin-li<sup>1</sup>, ZHANG Nan<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Materials and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** For the research of the technology performance of PEG modified asphalt, the brookfield viscosity, penetration, softening point and ductility was determined, and the performance of the PEG modified asphalt was analyzed. Through the determination of residual penetration ratio and residual ductility, the aging performance of PEG modified asphalt was analyzed; through the viscosity-shear rate curve, the rheological property of asphalt was analyzed; the construction temperature of PEG modified asphalt mixture was obtained through the viscosity-temperature curve and it was analyzed. The results show that with the increase of the blending rate of PEG, viscosity and softening point increases and penetration and ductility decrease; the ageing performance of PEG modified asphalt is better than the matrix asphalt; the PEG modified asphalt under 163°C presents the non-newtonian feature; the construction temperature of PEG modified asphalt mixture obtained through the viscosity-temperature curve slightly higher than the common asphalt mixture.

**Key words:** road engineering; polyethylene glycol (peg); phase change material, asphalt performance

文章编号:1671-6833(2014)05-0092-04

# 基于 ANSYS Workbench 磨粉机减速器箱体动态特性分析

李大磊, 代朝磊, 牛鹏辉

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

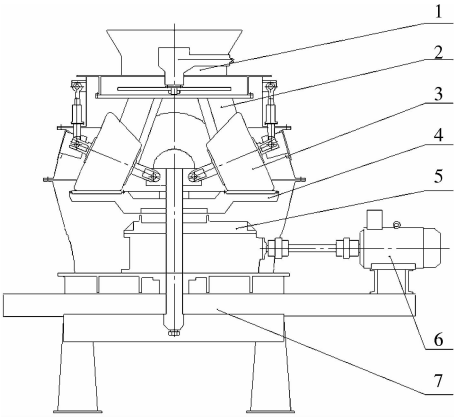
**摘 要:**以新型立式磨粉机减速器箱体为研究对象,运用 SolidWorks 创建减速器箱体三维模型,对该模型作简化处理.利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件建立减速器箱体的有限元模型,对该有限元模型进行模态分析和谐响应分析,得到减速器箱体的前 6 阶固有频率、主振型以及谐响应曲线图,据此对其固有频率和主振型进行分析,并通过实验验证了仿真结果的正确性,提出避免发生共振的相应措施.

**关键词:**减速器箱体;ANSYS Workbench;模态分析;谐响应分析;动态特性

**中图分类号:** TH16      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.021

## 0 引言

新型立式磨粉机是一种以碾压为主,兼有挤压机理,并以液压缸作为加载方式的大型粉磨设备.广泛应用于矿山、建筑、公路等行业,适用于莫氏硬度 6 以下的物料,生产效率高<sup>[1]</sup>.如图 1 所示,该新型立式磨粉机主要由分料器、下料器、减速器箱体、辊子、动力盘等部件组成.由于该减速器箱体在工作过程中运行环境恶劣,对整机的使用性能、成本及寿命有重要影响.因此设计时除满足其刚度和强度要求之外,还需对其动态特性进行分析,以避免在其工作过程中发生共振.



1—分料器; 2—下料器; 3—辊子部件; 4—动力盘;  
5—减速器箱体; 6—动力部件; 7—底部支架

图 1 新型立式磨粉机的结构

Fig.1 The structure of new-type vertical milling machine

运用 SolidWorks 创建减速器箱体 3D 模型并对该模型作简化处理.利用 ANSYS Workbench 有限元分析软件对减速器箱体进行模态分析和谐响应分析,得到其固有频率、主振型和谐响应曲线图,通过实验验证了仿真结果的正确性,同时提出减速器箱体在工作过程中避开其固有频率相应措施,为其动态特性的设计提供理论依据.

## 1 减速器箱体的结构尺寸图

新型立式磨粉机的减速器箱体的结构如图 2 所示,选用材料为 QT400,减速器箱体长度为 2 230 mm,宽度 1 470 mm,高为 880 mm,减速器箱体壁厚为 60 mm,质量约 5.44 t,属于大尺寸结构件.减速器箱体输入轴额定转速 1 450 r/min,由于其工况极为恶劣,在满足箱体强度和刚度要求的前提下,为保证粉磨过程的平稳性,需对其进行模态分析.

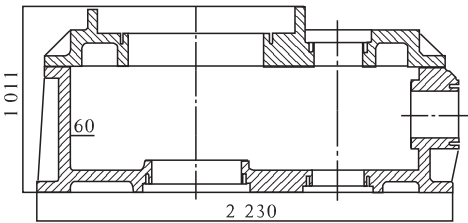


图 2 减速器箱体结构尺寸

Fig.2 Structure size of the gearbox

收稿日期:2014-06-16;修订日期:2014-07-19

基金项目:河南省自然科学基金资助项目(2010A520039);首钢集团工业固体废物粉煤灰再利用项目

作者简介:李大磊(1963-),男,河南郑州人,郑州大学教授,主要研究方向先进制造技术,E-mail:lidalei@zzu.edu.cn.

2 模态分析理论基础

根据机械系统动力学所遵循的平衡方程可知<sup>[2]</sup>

$$[M]\{x''\}+[C]\{x'\}+[K]\{x\}=\{F(t)\},$$

(1)

式中:[*M*]、[*C*]、[*K*]分别表示质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\{x\}$ 、 $\{F(t)\}$ 、 $\{x'\}$ 、 $\{x''\}$ 分别表示位移列阵、激振力列阵、速度列阵和加速度列阵.

若系统不受外部激振力作用时,即 $\{F(t)\}=\{0\}$ ,则此时系统处于自由振动状态.在求解结构的固有频率和主振型时,由于阻尼对系统影响不大,因此不考虑阻尼因素,此时动力学运动方程为

$$[M]\{x''\}+[K]\{x\}=\{0\}.$$

(2)

其结构的动力学振动问题转化为简谐振动时,振动位移为正弦函数

$$x=x\sin( \omega t).$$

(3)

由方程式(2)和(3)化简可得

$$([K]-\omega^2[M])\{x\}=\{0\}.$$

(4)

求解方程(4)可得其特征值和特征向量,即为结构所对应的固有频率和主振型.

3 减速器箱体有限元模型建立

3.1 减速器箱体模型的简化

利用 SolidWorks 创建减速器箱体的三维模型,并将其导入到 ANSYS Workbench 有限元分析软件中.由于所创建有限元模型质量直接影响分析结果的准确性,因此在进行模态分析之前要对减速器箱体模型进行简化处理<sup>[3]</sup>,由于减速器箱体上下端盖以及箱体底座的固定设计有大量的螺纹孔和退刀槽等工艺结构,对网格划分存在很大的不利因素.首先忽略掉减速器箱体结构中的螺纹孔、退刀槽和倒角等结构,其简化后的模型如图 3 所示.

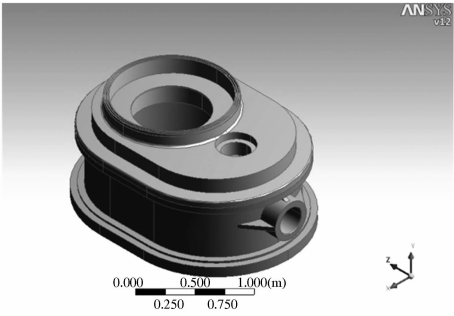


图 3 减速器箱体的简化模型

Fig.3 The simplified model of the gearbox

3.2 设置材料属性

对模型进行材料属性设置如下,减速箱体材

料是球墨铸铁 QT400,弹性模量  $E=150\text{ GPa}$ ,泊松比  $\mu=0.25$ ,密度为  $\rho=7\,200\text{ kg/m}^3$ .

3.3 网格划分

采用默认 10 节点 SOLID186 四面体单元进行网格的划分,并利用 Sizing 控制网格单元尺寸大小为 0.05 m,对模型采用自动网格划分,其节点数和单元数分别为 163 135 和 94 895 个.

3.4 添加边界条件

利用 ANSYS Workbench 有限元分析方法进行动态特性分析时,减速器箱体边界条件的设定和所受载荷对分析结果正确与否至关重要.根据减速器箱体之间的连接关系可知,其箱体与地基固定连接,箱体与上端盖结合面主要通过螺栓连接.目前,对于结合面通常采用等效建模方法进行处理<sup>[4]</sup>,将结合面等效为弹簧阻尼器的连接方式,此种方法较为准确的模拟实际结合特性,并在其结合面之间通过添加弹簧连接,模拟两结合面间的阻尼和刚度<sup>[5]</sup>.完成网格划分和边界条件设置后的有限元模型如图 4 所示.

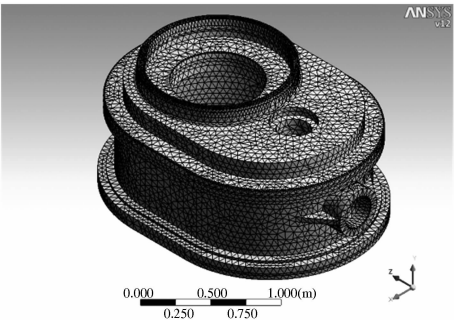


图 4 减速器箱体有限元模型

Fig.4 FEM of the gearbox

4 减速器箱体模态分析

在 ANSYS Workbench 中对所创建的减速器箱体的有限元模型进行模态分析,据此得到其前 6 阶固有频率,如表 1 所示.

表 1 前 6 阶固有频率

Tab.1 Natural frequency of preceding six orders

阶数	1	2	3	4	5	6
固有频率/Hz	271	278	308	371	480	490

根据减速器箱体的额定转速为 1 450 r/min,由于齿轮与轴的转动频率<sup>[6]</sup>为  $f_r=N/60$ ,齿轮的啮合频率为  $f_m=ZN/60$ ,式中  $Z=15$ ,可知工作时的频率为  $f_m=Zf_r=370\text{ Hz}$ .由表 1 可以看出其工作频率 370 Hz 在减速器箱体的前 6 阶频率范围内,故需对其固有频率的主振型进行研究.

减速箱体第 1~6 阶主振型如图 5 所示.

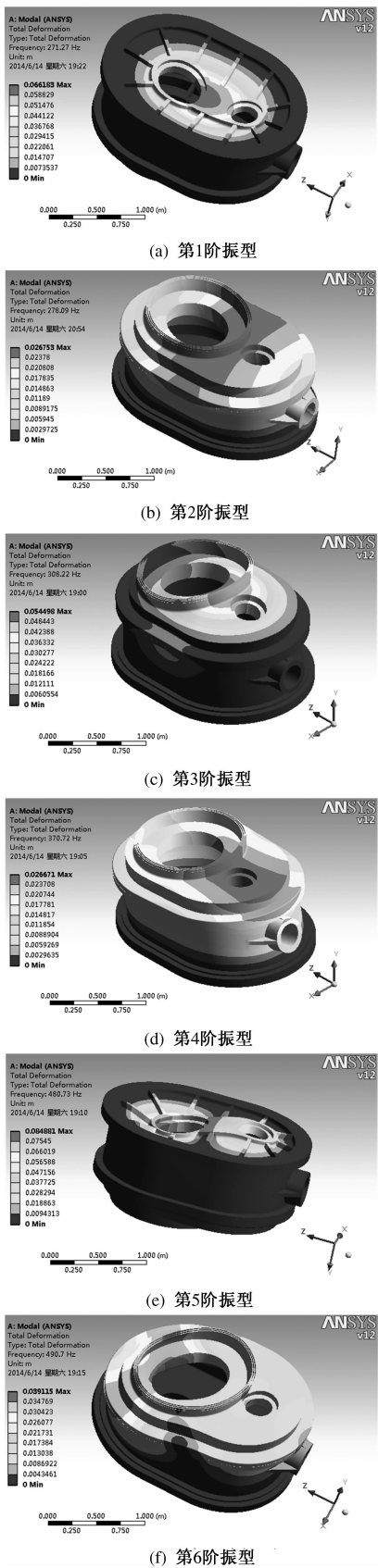


图 5 减速器箱体前 6 阶主振型  
Fig. 5 The preceding six orders modal shape of the gearbox

减速器箱体第 1 阶固有频率 271.27 Hz,其主振型如图 5(a) 所示. 由图可知,减速箱体的底座向  $y$  轴正方向振动,在箱体底部中心位置振动达到最大位移. 第 2 阶固有频率 278.09 Hz,其主振动如图 5(b) 所示. 可知其箱体端盖整体向  $x$  轴正方向发生振动,且在端盖中间位置达到最大位移. 第 3 阶固有频率 308.22 Hz,其主振型如图 5(c) 所示,可知箱体端盖整体向  $y$  轴正方向振动,在中间位置其振动达到最大位移. 第 4 阶固有频率 370.72 Hz,其主振型如图 5(d) 所示,可知箱体端盖向  $z$  轴正方向振动,在箱体端盖右部其振动达到最大位移. 第 5 阶固有频率 480.73 Hz,其主振型如图 5(e) 所示,可知箱体底部左侧向  $y$  轴正方向振动、右侧向  $y$  轴负方向振动,在箱体底部左部其振动达到最大位移. 第 6 阶固有频率 490.7 Hz,其主振型如图 5(f) 所示,可知箱体整体发生顺时针扭曲振动,且在箱体端盖左部振动达到最大位移.

5 谐响应分析

在减速器箱体模态分析的基础上,对其进行时域分析,即谐响应分析. 由于其箱体工作频率 370 Hz,设定谐响应计算范围为 0~500 Hz,同时在减速器箱体端盖施加一个激振力,作用于  $y$  轴负方向大小为 1 000 N,其谐响应分析的位移曲线如图 6 所示,可知其在 370 Hz 附近出的位移响应达到最大值. 并与前 6 阶固有频率比较可知,与第 3 阶固有频率对应. 位移响应过大的原因是此处发生共振所引起<sup>[7]</sup>.

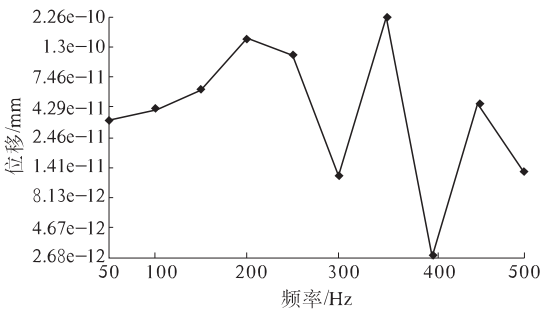


图 6 谐响应曲线图  
Fig. 6 Harmonic response curve

6 实验验证

根据基于影响系数法的动平衡实验,通过速度传感器采集数据,利用 PDES-E(设备状态监测与安全评价仪)进行振动数据分析,实验过程中其测量点分别分布于电机驱动端为测点 1、减速

器箱体输入端弧齿锥齿轮轴轴承处为测点 2、减速器箱体输出端低速轴轴承处为测点 3. 通过对立式磨粉机减速器箱体测点的分析完成现场的实验测试. 对 3 个测点进行振动信号采集,得到其测点处振动情况基本相似,通过综合分析以测点 2 处所采集信号绘制频谱图如图 7 所示.

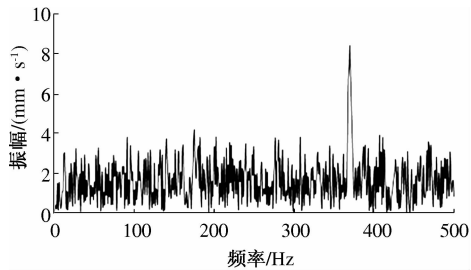


图 7 减速器箱体测点 2 频谱图

Fig.7 The second test point spectrum of gearbox

由测点 2 处频谱图分析可知:立式磨粉机减速器箱体在输入端弧齿锥齿轮轴轴承处 370 Hz 左右时振动幅值最大,即在此频率段存在共振区. 通过实验进一步验证仿真结果的正确性,为动态特性分析提供实验依据.

7 结论

通过 ANSYS Workbench 有限元分析软件对减速器箱体模态分析、谐响应分析和实验验证得到以下结论:(1)由模态分析可得减速器箱体的前 6 阶固有频率和主振型,且前 3 阶频率在工作频率范围之内,容易发生共振,影响磨粉机的正常

的粉磨精度,因此在其平稳工作时应避免相应转速;(2)由谐响应分析所得到的曲线图可知,第 3 阶固有频率所处位置振幅最大,这是由于发生共振所引起的;(3)通过动平衡试验,利用 PDES-E 进行振动数据分析所绘制频谱图验证了仿真所得结果 370 Hz 附近发生共振的正确性;(4)通过增加减速器箱体壁厚,使其刚度增加,抗振型增强,固有频率可得到了很好的提高,为进一步提高减速器箱体动态特性的设计提供理论基础.

参考文献:

[1] 李大磊,张伟旺. 基于 Simulation 的新型破碎机专用减速器箱体模态分析[J]. 矿山机械,2011,39(8): 125 - 127.

[2] 邵忍平. 机械系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.

[3] 雷少敏,唐华平,朱维南. 3ZX 平面铣床横梁有限元分析及优化研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2011, 32(3):60 - 61.

[4] 翁德凯,程寓,夏玲玲,等. 基于结合面的立式加工中心进给系统的动态特性分析[J]. 机械设计及制造,2012(3):130 - 132.

[5] 谢志坤. 数控机床直线滚动导轨结合面动态特性研究[D]. 沈阳:东北大学机械工程学院,2007.

[6] 易良桀. 简易振动诊断现场实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[7] 姚晓坡,刘德平,高建设,等. 基于 ANSYS Workbench 的加工中心动态特性分析[J]. 机床与液压: 2013,41(8):164 - 167.

Dynamic Analysis for the Gearbox of Milling Machine Based on ANSYS Workbench

LI Da-lei, DAI Chao-lei, NIU Peng-hui

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The new-type vertical milling machine was taken as the research object, and the 3D model of gearbox was created by SolidWorks and the model was simplified. By using the finite element analysis software ANSYS Workbench, we established the finite element model of gearbox. After the modal analysis and harmonic response analysis for the finite element model of gearbox, we could obtain natural frequency of preceding six orders, vibration mode and harmonic response curve. According to the natural frequency and main vibration mode analysis, meanwhile the analysis of experiments verified the correctness of the simulation results and the corresponding measures were put forward to avoid the resonance.

**Key words:** gearbox; ANSYS Workbench; modal analysis; harmonic analysis; dynamic characteristics

文章编号:1671-6833(2014)05-0096-04

汽车人机工程综合评价指标体系研究

李银霞, 刘曼曼, 高俊杰

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 通过对国内外有关汽车人机工程方面的资料进行较详细的分析和研究, 初步建立了含有 105 个指标的 5 层树状汽车人机工程评价指标体系. 利用德尔菲法对 15 名有多年驾驶经验的驾驶员进行两轮咨询, 通过对咨询结果进行统计和分析, 筛选出 86 个指标. 该指标体系的研究和建立, 为汽车人机工程综合评价奠定了基础, 也可汽车的设计和评价提供一定的指导.

关键词: 汽车; 人机工程; 评价

中图分类号: TB18 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.022

0 引言

目前, 国内外许多学者对汽车人机工程进行了研究, 依据研究范围可分为对汽车人机工程的部分研究和整体研究. 部分研究主要集中在座椅、操纵装置、驾驶姿势、操作环境和安全性等方面, 例如, 文献[1~2]把汽车座椅舒适性分为静态、动态和震动舒适性. 文献[3]建立了仿真系统, 可分析坐姿的舒适度、可及范围、姿势预测及静态受力等. 文献[4]把汽车安全性分为驾驶装置安全性、碰撞安全性、驾驶习惯安全性和驾驶信息系统对驾车的影响 4 个方面. 文献[5~8]在汽车人机工程总体评价方面做了不少研究. 相关研究中, 评价指标多为树状结构, 评价数学模型为综合模糊评价法或神经网络数学模型, 但其综合评价指标体系不全面, 很难对汽车人机工程设计做出完善的评价.

笔者针对如何建立一套全面的汽车人机工程学评价指标体系进行研究, 并建立其综合评价指标体系. 该指标体系的研究和建立可为汽车人机工程综合评价奠定基础, 也可汽车的设计和评价提供一定的指导.

1 初步建立的指标体系

本研究对国内外相关研究进行分析和研究, 并咨询有 10 年以上驾龄的相关驾驶员, 初步提出

了较全面的含有 105 个指标的 5 层次汽车人机工程综合评价指标体系, 如表 1 所示. 表 1 中,  $O$  为总目标,  $O_i (i = 1, 2, \cdots, 7)$  为子目标,  $O_{ij} (i = 1, 2, \cdots, 7; j = 1, 2, \cdots, 9)$  为子子目标,  $U_k$  为指标层.

表 1 汽车人机工程综合评价指标模型  
Tab.1 The index model of vehicle ergonomics comprehensive evaluation

总目标层	子目标层	子子目标层	三子目标层	指标层
汽车人机工程综合评价指标	$O_1$ : 座椅	$O_{11}$ : 驾驶员座椅	$O_{111}$	$U_1$
			$O_{112}$	$U_2$
			$O_{113}$	$U_3$
		$O_{12}$ : 乘客座椅	$O_{114}$	$U_4$
			$O_{121}$	$U_5$
			$O_{122}$	$U_6$
			$O_{123}$	$U_7$
	$O_2$ : 操纵装置	$O_{21}$ : 方向盘	$O_{211}$	$U_8$
			$O_{212}$	$U_9$
			$O_{213}$	$U_{10}$
		$O_{22}$ : 变速杆 $O_{23}$ : 手刹杆 $O_{24}$ : 踏板 $O_{25}$ : 按键	$U_{11}$	—
			$U_{12}$	—
			$U_{13}$	—
			$U_{14}$	—
	$O_3$ : 显示装置	$O_{31}$ : 指针式仪表 $O_{32}$ : 指示灯	$U_{15}$	—
			$U_{16}$	—
		$O_{41}$ : 驾驶员视野 $O_{42}$ : 前排乘客视野 $O_{43}$ : 后排乘客视野	$U_{17}$	—
			$U_{18}$	—
			$U_{19}$	—
		$O_{51}$ : 驾驶员姿势 $O_{52}$ : 乘客姿势 $O_{53}$ : 驾驶员手伸及界面	$U_{20}$	—
			$U_{21}$	—
	$O_6$ : 操作环境 $O_7$ : 安全性	$U_{23}$	—	—
			—	—

收稿日期: 2014-05-06; 修订日期: 2014-07-22  
基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目(142102210493)  
作者简介: 李银霞(1974-), 女, 河南扶沟人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事人机系统设计与评价技术、人机系统数字化仿真与评价技术方面的研究, E-mail: liyxmail@126.com.



在实际的综合评价活动中,建立评价指标的一般原则是:以尽量少的“主要”评价指标用于实际评价.这就需要针对初步建立的评价指标,按某种方法进行筛选,分清主次,合理组成评价指标集.常用的指标体系筛选的方法主要有:专家评价法、比较判定法和数据统计分析法.笔者采用基于专家判断和比较判定法为一体的方法——德尔菲法筛选评价指标,可以保证整个指标体系的全面性、有序性和科学性.

## 2 德尔菲法的实施

该方法的基本原理是:针对一定问题,函请相关领域的专家提出意见或看法,然后将专家的意见或新设想加以科学地整理、归纳,以匿名的方式将所归纳的结果反馈给各专家再次征询意见.经过多轮反复(经典德尔菲法为4轮,改进德尔菲法为2~3轮),直到意见趋于较集中,得到比较一致的、可靠性较高的意见.德尔菲法有几个主要特点:匿名性、重复、反馈和统计分析.德尔菲法是征求和提炼专家群体意见的一种相当有效方法<sup>[9]</sup>.

### 2.1 德尔菲法的实施过程

(1)编制调查表.第一轮调查问卷包括测试者基本信息和正式问卷两部分.问卷中首先介绍了研究目的和相关背景,要求各位驾驶员判断各个指标对汽车人机工程的影响程度.影响程度划分为5个等级,1~5分别表示影响程度等级为“不大”、“一般”、“大”、“很大”和“极大”.第二轮调查问卷比第一轮多了专家自信度一项.

(2)确定咨询专家.确定专家在德尔菲法中至关重要,应该选择具有一定专业知识和丰富实践经验而又愿意参加的专家.专家人数以10~30人为宜<sup>[10]</sup>.据查现在驾驶员男女比例约为3:1,本研究根据情况邀请15名有一定驾龄的驾驶员作为专家,其中男士11名,女士4名,接近3:1的比例;年龄25~45岁;身高范围156~180 cm;驾龄3~15年.

(3)进行咨询.根据确定出的评价指标集 $U_k$ 中包括的指标,拟定出第1轮专家咨询表.要求专家根据自身知识和经验给出各评价指标对汽车人机工程的影响等级.对回收的第1轮专家咨询表进行统计处理和分析,把咨询结果反馈给每位专家,进行第二轮咨询.

为了保证回收问卷的有效性和收集数据的精

确性,在咨询对象填写问卷之前对他们进行简短指导,并及时收回问卷.单次咨询发放问卷15份,回收15份,有效问卷14份,有效率达到了93.3%.问卷有效性主要遵循两个原则:①问卷中不得出现有规律的答案,如同一作答(全部选一个选项)或波形作答(如依次写12345);②整份问卷的漏答项目不大于3<sup>[11]</sup>.样本资料中本科7人,大专8人,学历水平较高,咨询有效性较高.

### (4)筛选出评价指标体系

笔者把专家的一致意见定义为:不少于2/3的专家判断等级为“大”以上的判断结果.一般通过两轮咨询,专家的意见已基本趋于一致<sup>[12]</sup>.因此,可以研究依据第2轮咨询结果选出评价指标体系.

### 2.2 咨询结果统计分析方法

根据咨询结果,笔者从以下几个参数进行分析:

(1)离散程度,即标准差 $\sigma_i$ ,其公式为

$$\sigma_i = \left[ \sum_{j=1}^5 m_{ij} (E_j - \bar{E}_i)^2 / (L - 1) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

该参数反映了影响汽车人机工程评价的分散程度大小,该值越大,表明专家评价结果的分散程度越大,反之亦然.

(2)集中程度,即均值 $\bar{E}_i$ ,其公式为

$$\bar{E}_i = \sum_{j=1}^5 E_j m_{ij} / L \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中: $E_j$ 为指标影响汽车人机工程程度的量值; $m_{ij}$ 为第*i*个评价指标评价等级为*j*的专家个数; $n$ 为指标数目; $L$ 为专家数.均值 $\bar{E}_i$ 即为*L*个专家的评价期望值,该值越小,表示该指标对汽车人机工程的影响程度越小,反之亦然.

(3)协调程度,变异系数

$$V_i = \sigma_i / \bar{E}_i, \quad (3)$$

$V_i$ 值越小越协调,其反映了第*i*个评价指标的协调程度.

## 3 结果及分析

### 3.1 专家咨询结果

对两轮咨询结果进行统计分析,得出各个指标的统计参数,限于篇幅,表2仅给出了一部分评价指标的参数统计.表中还给出了众数“Mode”,目的是为了更全面地对咨询结果进行比对.而P33则表示专家一致意见.GCR则表示专家在咨询给出评论时的自信程度.



表 2 咨询结果统计  
Tab.2 The statistics of survey results

	指标集	指标代号	均值	标准差	变异系数	众数	专家自信度	
第 1 轮	$U_1$	$u_{11}$	4.36	0.63	0.15	4.00	4.00	
		$u_{12}$	3.57	1.02	0.28	3.00	3.00	
		$u_{13}$	4.00	1.30	0.33	5.00	4.00	
	$U_2$	$u_{21}$	4.14	0.95	0.23	5.00	4.00	
		$u_{22}$	4.29	0.83	0.19	5.00	4.00	
		$u_{23}$	3.93	1.14	0.29	5.00	3.00	
		$u_{24}$	3.57	1.28	0.36	5.00	3.00	
		$u_{25}$	3.21	1.25	0.39	3.00	3.00	
		$u_{26}$	3.29	1.07	0.33	4.00	3.00	
	指标集	指标代号	均值	标准差	变异系数	众数	专家一致性意见	专家自信度
第 2 轮	$U_1$	$u_{11}$	4.13	0.33	0.08	4.00	4.00	4.29
		$u_{12}$	2.88	0.60	0.21	3.00	3.00	4.29
		$u_{13}$	4.00	0.87	0.22	4.00	4.00	4.14
	$U_2$	$u_{21}$	3.50	1.00	0.29	4.00	3.00	4.43
		$u_{22}$	3.75	0.83	0.22	4.00	4.00	4.29
		$u_{23}$	3.63	0.70	0.19	3.00	3.00	4.43
		$u_{24}$	3.13	0.93	0.30	3.00	3.00	4.29
		$u_{25}$	2.75	0.66	0.24	3.00	2.00	4.14
		$u_{26}$	2.75	0.43	0.16	3.00	3.00	4.00

从两轮咨询结果可以看出,第 2 轮指标咨询结果中的标准差  $\sigma$  和变异系数  $V$  大部分比第 1 轮咨询结果中的值要小,仅有 11 个指标(约占 10.4%)的标准差和 9 个指标(约占 8.6%)的变异系数比第一轮略大.表明第 2 轮咨询中,专家判断的协调程度低和分散程度较小.两轮咨询结果中的众数 (Mode) 有 23 个(约占 20.9%)略有不同,表明专家判断结果基本是一致的.而且参数 GCR 全部不小于 3,说明专家判断结果的可信度较高.

从咨询结果中,很容易得到在对汽车人机工程各个影响等级下指标的数目,按照影响等级为“不大”,“一般”,“大”,“很大”,“极大”排列,其数目分别为 0,21,71,36,7.分别占总体指标的 0%,20%,67.6%,34.3%和 6.7%.它们的分布情况如图 1,此 2 轮咨询可为汽车设计时关于人机工程方面提供重要的依据.

3.2 筛选出综合评价指标

笔者根据咨询结果中的均值  $\bar{E}_i$  和专家一致意见 P33 进行筛选指标.如果评价指标的均值  $\bar{E}_i$  和专家一致意见 P33 值都小于 3,则被筛选.咨询指标中共有 21 个指标的均值  $\bar{E}_i$  小于 3,但其中又有 2 个指标的专家一致意见 P33 值大于 3,故共筛选 19 个指标.105 个指标中,最终留下 86 个评价指标,指标减少了 12.7%.经过重新分析和整合,指标体系结构由原来的 5 层变为 4 层.其中驾

驶员座椅、乘客座椅和方向盘不再另设子目标,原子目标的评价指标整合后作为其评价指标.一级子目标数目还是 7 个,三子目标  $U_i(i=1,2,\cdots,17)$  剩下 17 个,比原来的 24 个三子目标层减少了 7 个,减少了 29.2%,大大简化了原来繁冗的评价指标体系.筛选过后的评价指标体系结构模型见表 3.

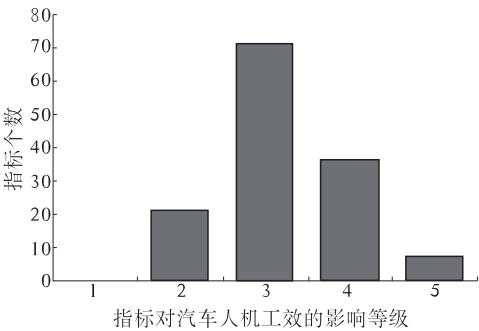


图 1 不同影响程度等级指标个数的分布情况  
Fig.1 The distribution of index numbers at different influence levels

4 结论

运用德尔菲法进行了两轮咨询分析,调查表的制作、发布和回收、调查的信度和效度等都做了控制,然后对咨询结果进行统计和分析,筛选出了含有 86 个评价指标的 4 层汽车人机工程综合评价指标体系模型.与以往研究相比,该研究能够比

表 3 筛选后的汽车综合评价指标体系结构模型

Tab.3 the structure model of vehicle ergonomics comprehensive evaluation after the screening

总目标层	子目标层	子子目标层	指标层
汽车 人 机 工 程 综 合 评 价 指 标	$O_1$ :座椅	$O_{11}$ 驾驶员座椅	$U_1$
		$O_{12}$ 乘客座椅	$U_2$
	$O_2$ :操纵装置	$O_{21}$ 方向盘	$U_3$
		$O_{22}$ 变速杆	$U_4$
		$O_{23}$ 手刹杆	$U_5$
		$O_{24}$ 踏板	$U_6$
		$O_{25}$ 按键	$U_7$
	$O_3$ :显示装置	$O_{31}$ 指针式仪表	$U_8$
		$O_{32}$ 指示灯	$U_9$
	$O_4$ :视野	$O_{41}$ 驾驶员视野	$U_{10}$
		$O_{42}$ 前排乘客视野	$U_{11}$
		$O_{43}$ 后排乘客视野	$U_{12}$
	$O_5$ :乘车姿势	$O_{51}$ 驾驶员姿势	$U_{13}$
		$O_{52}$ 乘客姿势	$U_{14}$
		$O_{53}$ 驾驶员手伸及界面	$U_{15}$
	$O_6$ :操作环境		$U_{16}$
	$O_7$ :安全性		$U_{17}$

较客观、全面、科学的对汽车人机工程进行定量的综合评价,为比较类似设计方案的优劣提供了理论基础和方法,并且在实际应用中具有足够的灵活性,评价者可以根据汽车设计的不同阶段动态的生成相应子评价体系,从而有利于对汽车(尤其是轿车)工程学进行评价和设计。

参考文献:

[1] 周全. 基于人机工程和虚拟样机的轿车舒适性研究 [D]. 武汉:武汉理工大学车辆工程学院:2011.

[2] 叶彪. 客车乘客座椅的乘坐舒适性[J]. 客车技术与研究,2003,25(4):21~23.

[3] 杨钟亮,孙守迁. 面向坐姿舒适性测试的人机工程仿真系统[J]. 计算机辅助设计与图形学报,2010,22(12):2192~2196.

[4] JORN-HENRIK ,CHRISTIAN B L, MAX B. Feel free to feel comfortable-an empirical analysis of ergonomics in the German automotive industry [J]. Int. J. Production Economics, 2011,133 (02):551~561.

[5] 刘陇. 汽车驾驶舒适性的模糊评价[J]. 陕西理工学院学报,2009,25(1):85~89.

[6] 丛晓研. 挖掘机驾驶室舒适度评价[D]. 山东:山东大学设计艺术学院,2011.

[7] 杨德一,郭钢,彭新宇,等. 汽车设计人机工程综合评价的研究[J]. 机械设计与制造,2003(5):119~120.

[8] 冯菲. 基于人机工程学汽车驾驶室评价系统的研究 [D]. 沈阳:东北大学机械电子工程学院,2008.

[9] 李银霞,袁修干. 改进德尔菲法在驾驶舱显示系统工效学评价指标筛选中的应用研究[J]. 航天医学与医学工程,2006,19(05):368~372.

[10] WILLIAM W, COOPER, ARMANDO G, et al. A Delphi study of goals and evaluation criteria of state and privately owned latin american airlines [J]. Socio-Econ. Plann. Sci,1995,29(4):273~285.

[11] 高焕喜. 工作特征对员工沉默行为的实证研究 [D]. 郑州:郑州大学企业管理学院,2012.

[12] 李银霞,袁修干,杨春信,等. 歼击机座舱工效学综合评价指标的建立[J]. 航空学报,2005,26(2):148~152.

Research on the Comprehensive Evaluation Indexes System of Vehicle Ergonomics

LI Yin-xia, LIU Man-man, GAO Jun-jie

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** According to the in-depth analysis and study the correlated information such as standards and norms of vehicle human-machine both in domestic and abroad, a five stratification tree evaluation indexes system of vehicle ergonomics which contains 105 indexes is built, then 15 expert drivers are referred twice as the specialized consultants upon preliminary index system with the modified Delphi method. Based on statistic treatment of consulting results, 86 indexes are chosen. The research and building of the indexes system provides basis to the comprehensive evaluation of vehicle ergonomics, and provides some guidance to the vehicle design and evaluation.

**Key words:** vehicle; ergonomics; evaluation

文章编号:1671-6833(2014)05-0100-05

# 基于局部均值分解的机械振动信号趋势项消除方法

赵志科<sup>1,2</sup>, 张晓光<sup>1</sup>, 王 新<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘 要:** 为了消除机械振动信号中趋势项, 提出一种基于局部均值分解(LMD)的趋势项提取新方法. 考虑到机械振动信号中夹杂的趋势项特点, 其残余量并不会对趋势项产生过大的影响, 所以可将 LMD 的最后一个频率分量作为待提取的趋势项. 为了验证该方法的可靠性, 通过数值模拟的方法将线性、多项式和指数趋势项加载到待消除的仿真信号和实测滚动轴承振动信号中, 并将笔者所提的 LMD 方法与常规的最小二乘拟合法、小波分析和 EMD 方法分别用于趋势项的提取. 数值模拟试验和实测数据分析表明, 该方法能够较准确地提取机械振动信号的趋势项, 与其他方法相比具有一定的优势.

**关键词:** 机械振动信号; 局部均值分解; 趋势项; 包络信号; 纯调频信号

**中图分类号:** TH 113.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.023

## 0 引言

由于机械振动信号具有非平稳、非线性的特点, 而在采集振动信号的过程中, 又不可避免地存在偏差, 特别是测量系统受外界环境影响产生的趋势项往往会影响到后续信号处理的可靠性<sup>[1]</sup>, 因此, 对于消除振动信号中的趋势项方法深入分析和研究具有重要的意义.

目前, 趋势项消除方法主要有最小二乘拟合法、小波变换、EMD 方法等. 除了最小二乘拟合法, 其余都是根据趋势项信号自身频率很低的特点提出的. 小波变换法是通过小波的分解实现对含趋势项低频段的分离或提取, 但是对于未知频率范围的信号无法准确地获取恰当的小波分解层数, 而小波基函数的选择对趋势项的提取影响很大. EMD 方法虽然无需选择额外参数就能够实现信号的自适应分解, 但也存在模态混叠和端点效应的影响, 制约趋势项的提取精度<sup>[2]</sup>.

LMD 方法的出现与应用, 给机械振动中趋势项的提取带来了新的途径<sup>[3-4]</sup>. 由于机械振动信号大多具有多分量的调幅调频信号的特点, 笔者通过数学建模的方法构造了含调幅调频信号的振动仿真信号, 采用 LMD 分解的方法提取信号中包含

的线性、多项式和指数趋势项. 为了验证对实测信号提取趋势项的有效性, 笔者以滚动轴承内圈故障的振动数据为基础, 加载通过数据模拟方法构造的线性趋势作为待消除趋势项数据, 再利用最小二乘拟合法、小波分析和 EMD 方法对其进行趋势项消除, 经比较发现, LMD 的趋势项消除方法具有更好的效果.

## 1 局部均值分解方法

局部均值分解方法的原理就是从原始信号中分离出包络信号和纯调频信号, 并将包络信号和纯调频信号相乘以便得到一个瞬时频率具有物理意义的 PF 分量, 通过循环迭代处理以至所有的 PF 分量逐个分离出来, 便可以得到该原始信号的时频分布<sup>[5]</sup>.

**步骤 1:** 确定原始信号  $x(t)$  所有的局部极值点  $\lambda_i$ , 并求出所有相邻局部极值点的平均值将所有相邻的平均值点  $m_i$  用直线连接起来, 然后用滑动平均法进行平滑处理, 得到局部均值函数  $m_{11}(t)$ .

**步骤 2:** 利用得到局部极值点  $n_i$  求出包络估计值

$$a_i = \frac{|n_i - n_{i+1}|}{2}. \quad (2)$$

收稿日期:2014-04-29; 修订日期:2014-06-22

基金项目:河南省科技攻关资助项目(142102210048)

作者简介:赵志科(1987-), 男, 河南济源人, 中国矿业大学博士生, 主要从事大型机电设备故障诊断技术的研究, E-mail: zhaozhike168@126.com.

将所有相邻两个包络估计值  $a_i$  用直线连接起来,然后采用滑动平均方法进行平滑处理,得到包络估计函数  $a_{11}(t)$ 。

**步骤3:** 将局部均值函数  $m_{11}(t)$  从原始信号  $x(t)$  中分离出来,得到

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t). \quad (3)$$

**步骤4:** 将  $h_{11}(t)$  除以包络估计函数  $a_{11}(t)$  以实现对  $h_{11}(t)$  进行解调,得到

$$s_{11}(t) = h_{11}(t)/a_{11}(t). \quad (4)$$

对  $s_{11}(t)$  重复上述步骤1~步骤4,便能得到  $s_{11}(t)$  的包络估计函数  $a_{12}(t)$ 。在理想条件下,  $s_{11}(t)$  应该为一个纯调频信号,即  $s_{1n}(t)$  的包络估计函数  $a_{12}(t) = 1$ 。如果  $a_{12}(t) \neq 1$  就说明  $s_{11}(t)$  不是一个纯调频信号,需要重复进行上述的迭代过程,直至  $s_{1n}(t)$  成为一个纯调频信号  $s_{1n}(t)$  为止<sup>[8]</sup>。在  $a_{1(n+1)}(t) = 1$  的条件下,具体的迭代分解过程

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t); \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t); \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t). \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中:} \begin{cases} s_{11}(t) = h_{11}(t)/a_{11}(t); \\ s_{12}(t) = h_{12}(t)/a_{12}(t); \\ \vdots \\ s_{1n}(t) = h_{1n}(t)/a_{1n}(t). \end{cases} \quad (6)$$

迭代终止的条件为

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n}(t) = 1. \quad (7)$$

在实际的信号处理过程中,在不影响分解效果的前提下,可以设定存在一个足够小的正值变动量  $\varepsilon$ ,当  $s_{1n}(t)$  的包络估计函数  $a_{1n}$  达到并处于  $[1 - \varepsilon, 1 + \varepsilon]$  范围时,可终止程序的继续迭代,避免过度计算的浪费,降低运算时间。在实际中可以认定

$$a_{1n}(t) \approx 1, \quad (8)$$

笔者取  $\varepsilon = 0.001$  作为迭代终止的条件。

**步骤5:** 把迭代过程中产生的所有包络估计函数相乘,便可以得到包络信号,即瞬时幅值函数  $a_1(t)$ ,

$$a_1(t) = a_{11}(t)a_{12}(t)\cdots a_{1n}(t) = \prod_{q=1}^n a_{1q}(t), \quad (9)$$

该包络信号即为  $PF$  分量的瞬时幅值函数。

**步骤6:** 将纯调频信号  $s_{1n}(t)$  和包络信号  $a_1(t)$  相乘,便可以得到原始信号的第一个  $PF$  分量

$$PF_1(t) = s_{1n}(t)a_1(t), \quad (10)$$

式中:LMD 分解就是一个逐渐去除高频成分的过程,它的第一个  $PF$  分量包含了原始信号中的最高频率成分<sup>[9]</sup>。 $PF_1(t)$  为一个单分量的调幅—调频信号,其瞬时幅值是指包络信号  $a_1(t)$  的幅值,其瞬时频率  $f_1(t)$  则可通过对纯调频信号  $s_{1n}(t)$  的进一步计算求得,即

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d[\arccos(s_{1n}(t))]}{dt}. \quad (11)$$

**步骤7:** 从原始信号  $x(t)$  中减去第一个  $PF$  分量  $PF_1(t)$ ,得到一个新的分离后的信号  $u_1(t)$ ,并将  $u_1(t)$  作为原始信号重复上述步骤1~步骤6,循环执行  $k$  次直至  $u_k$  成为一个单调函数为止。从原始信号中逐步分离的过程,

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t) \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t) \\ \vdots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t) \end{cases}. \quad (12)$$

**步骤8:** 同理,将从原始信号  $x(t)$  分离出来的所有  $PF$  分量和残余量  $u_k$  相累加,这样就实现了对原始信号的重构,即

$$x(t) = \sum_{p=1}^k PF_p(t) + u_k(t). \quad (13)$$

由上述关于 LMD 分解和重构过程可知,LMD 并没有造成原始信号信息的丢失,而信号的完整的时频分布又体现在所有  $PF$  分量的瞬时幅值和瞬时频率之中<sup>[6-9]</sup>。

## 2 仿真信号分析

定义,含调频调幅信号为  $y(t)$ ,趋势项信号为  $s(t)$ ,含趋势项的原始信号为  $x(t)$ ,其为调频调幅信号与趋势项信号之和,具体表达式为

$$x(t) = y(t) + s(t), t = 1, 2, \dots, N. \quad (14)$$

### 2.1 调频调幅信号仿真

根据对机械振动信号所含成分的分析可知,其主要由调幅调频信号、调幅信号、正弦信号等多重叠加而成<sup>[13]</sup>。笔者构造的仿真数学模型为

$$y(t) = 1.2[1 + 0.5\cos(50\pi t)]\cos[1250\pi t + 2\cos(250\pi t)] + 4\sin(25\pi t)\sin(300\pi t) + \sin(250\pi t/3), \quad (15)$$

式中:采样频率为 1 000 Hz;采样点数为 2 000 个;采样时长为 2 s。

### 2.2 趋势项信号仿真

为了验证采取 LMD 方法对趋势项信号提取的有效性,笔者通过数学模型构造了线性、多项式

和指数这 3 种典型的趋势项仿真时域信号,以便于 LMD 方法与最小二乘拟合法、小波分析和 EMD 方法在趋势项提取比较中的应用.

线性趋势项:  $s_1(t) = c_0 + c_1t$ ; (16)

多项式趋势项:  $s_2(t) = c_0 + c_1t + c_2t^2 + \cdots, c_mt^m$ ; (17)

指数趋势项:  $s_t(t) = ae^{-bt}$ . (18)

式中:所用的趋势项的参数为  $c_0 = 0.4; c_1 = 0.8;$   
 $c_2 = 0.2; c_3 = 0.02; c_4 = 0.002; a = 0.4; b = 1.0$ .

为了便于区分无趋势项与线性、多项式和指数趋势项存在的差异关系,笔者对这 4 种典型的趋势项信号进行了仿真分析,图 1 为实验结果. 如图 1 所示,无趋势项始终维持在 0.4,而线性、多项式和指数趋势项随着时间的增加逐渐偏离正常值 0.4. 同理,趋势项的变化方向也可以朝着逐渐减小的趋势发展,变化方向上的不同并不会对趋势项的消除方法产生影响,笔者仅以仿真呈现逐渐增大作为趋势项的研究对象.

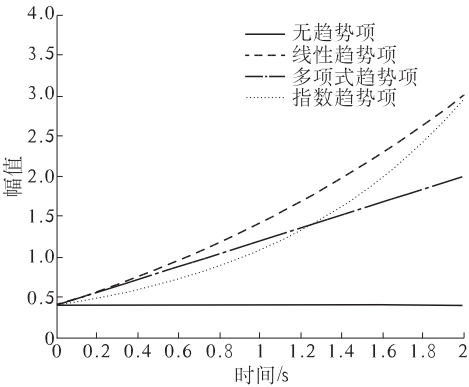


图 1 线性、多项式和指数趋势项比较  
Fig.1 Comparison of linear trend, polynomial trend, and Index trend

2.3 LMD 提取趋势项

利用 LMD 对笔者构造的仿真信号进行分解,结果如图 2 所示. 这里以加载线性趋势项为例,从图 2 可以看出原始信号  $x(t)$  具有明显逐渐线性增加的趋势项,经过 LMD 分解成为 6 个含有不同频率和幅值的  $PF$  分量. 由于 LMD 是一个从高频到低频逐级递减筛分的过程,且因分解产生的残余量幅值和频率均十分微弱. 考虑到机械振动信号中夹杂的趋势项自身具有频率同样很低,分解产生的残余量并不会对趋势项产生过大的影响,因此,LMD 分解的最后一个  $PF$  分量作为待提取的趋势项,并依据这一特性,作为提取机械振动信号中趋势项的依据是可靠的. 根据 LMD 分解后的重构原理,剔除最后一个  $PF$  分量,将前 5 个  $PF$

分量实现累加,以得到消除趋势项后的信号.

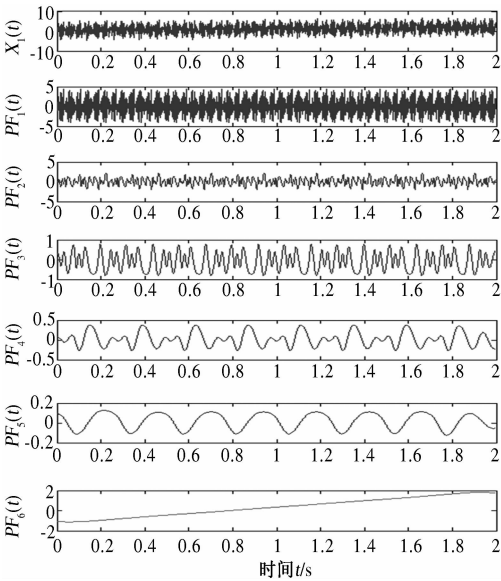


图 2 仿真信号的局域均值分解结果  
Fig.2 The LMD result of simulated signal

为了对比经 LMD 方法消除趋势项前后的不同,对上述仿真信号进行分析,具体如图 3 所示. 图中红线定义了信号的范围,从图 3(a)可以看出由于趋势项的存在,仿真信号超出了信号原本的波动范围. 从图 3(b)可以看出经过 LMD 方法实现了对趋势项的有效剔除.

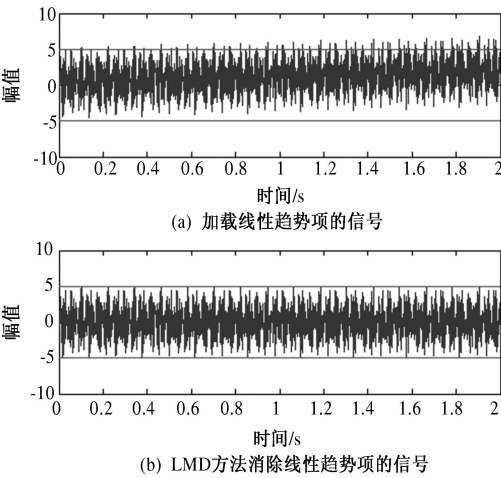


图 3 仿真信号的时域波形:  
Fig.3 The domain waveforms of simulated signal

2.4 仿真信号趋势项提取方法比较

以给定的仿真信号  $y(t)$  为例,分别采用最小二乘拟合法、小波分析、EMD 和 LMD 方法对线性、多项式和指数趋势项进行提取. 由于篇幅限制,且这 3 种趋势项差异不大,笔者仅以线性趋势项的提取为研究. 为了便于区分上述 4 种趋势项提取方法的优劣,笔者以 4 种方法提取的趋势项

与设定趋势项之差为标准,对比分析 4 种方法,如图 4 所示.4 种方法提取的趋势项整体上差异不大,在选择最佳拟合参数条件下,最小二乘拟合法效果最佳,而小波变换则存在初始波动的情况,而 EMD 方法和 LMD 方法则由于端部效应的影响,首尾两端会出现微小的波动.

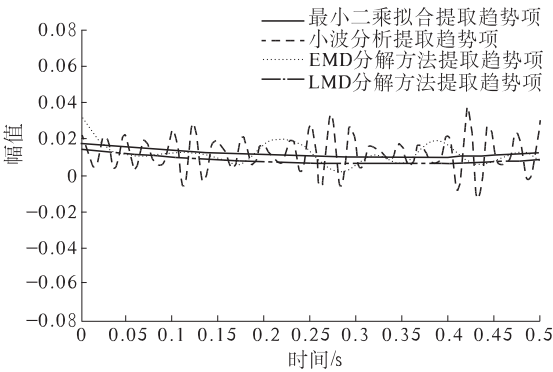


图 4 4 种趋势项提取方法比较

Fig.4 Comparison of four trend extraction method

3 实验分析研究

由于滚动轴承故障振动信号具有多分量调频信号的特点,笔者以美国凯斯西储大学轴承数据中心提供的滚动轴承内圈故障振动信号数据为基础,加载通过数据模拟方法构造的线性趋势作为待消除趋势项数据.趋势项加载前后内圈故障状态的滚动轴承振动信号比较,如图 5 所示.

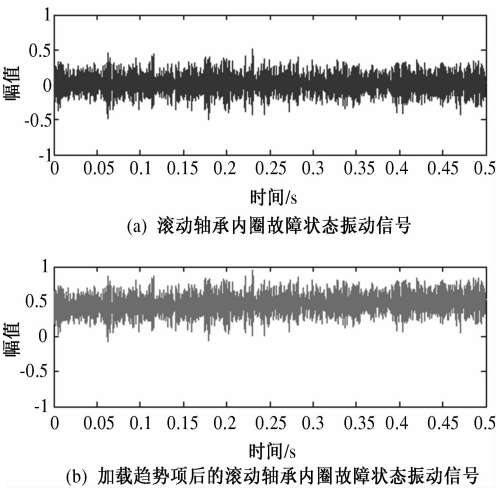


图 5 趋势项加载前后滚动轴承振动信号的比较  
Fig.5 Comparison of loading trend before and after for vibration signal of rolling bearings

为了比较最小二乘拟合法、小波变换、EMD 和 LMD 方法对实际振动信号趋势项的提取效果,采用上述的 4 种方法提取内圈故障振动信号的趋势项,并将提取的趋势项与加载的趋势项求差.四

种趋势项提取方法的对比分析结果,如图 6 所示.

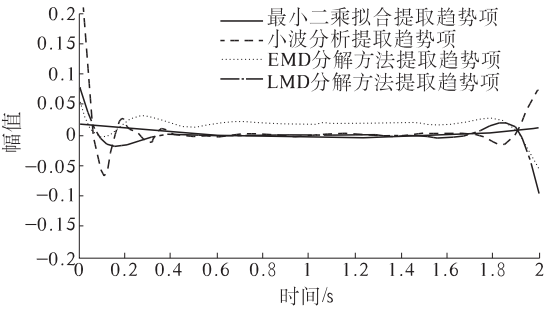


图 6 内圈故障振动的四种线性趋势项提取方法比较  
Fig.6 Comparison of four linear trend extraction method for inner race fault rolling bearings

4 结论

(1)通过对含 3 种趋势项类型的仿真信号和实测信号的分析,验证了采用 LMD 分解方法对振动信号趋势项提取的有效性.通过对 4 种方法对仿真信号趋势项提取的比较,发现处于最佳参数设置的最小二乘拟合法能准确地提取趋势项.如果信号最高频率未知,小波分析方法受制于分解层数和小波的基函数选择.EMD 和 LMD 方法对趋势项的提取容易受到分解产生的端部效应的影响,而 LMD 方法不仅具有 EMD 的自适应提取优势,而且 LMD 的端部效果也优于 EMD,分解层数少不易出现模态混叠的现象.

(2)通过对上述 4 种趋势项提取效果的比较,发现采用最小二乘拟合法提取的趋势项与真实趋势项存在较小的恒差,采用小波变换法在首尾两端会出现较大的波动,采用 EMD 方法则在趋势项中间有一定的脉动,而采用 LMD 方法相比其他 3 种方法最接近真实趋势项,具有更好的趋势项提取效果.

参考文献:

[1] 孙伟,熊邦书,黄建萍,等.小波包降噪与 LMD 相结合的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2012,31(18): 153 – 156.  
[2] 李振兴. 结合经验模态分解的振动信号趋势项提取方法[J]. 飞行器测控学报, 2011,30(1): 56 – 60.  
[3] 张淑清,孙国秀,李亮,等. 基于 LMD 近似熵和 FCM 聚类的机械故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(3): 714 – 720.  
[4] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005,2(5): 443 – 454.  
[5] Wang Yan-xue, He Zheng-jia, Xiang Jia-wei, et al.

- Application of local mean decomposition to the surveillance and diagnostics of low-speed helical gearbox[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 47(1): 62-73.
- [6] CHENG Jun-sheng, ZHANG Kang, YANG Yu. An order tracking technique for the gear fault diagnosis using local mean decomposition method[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012(55): 67-76.
- [7] YANG Yu, CHENG Jun-sheng, ZHANG Kang. An ensemble local means decomposition method and its application to local rub-impact fault diagnosis of the rotor systems[J]. Measurement, 2012, 45(3): 561-570.
- [8] 程军圣, 杨宇, 于德介. 局部均值分解方法及其在齿轮故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2009, 22(1): 76-84.
- [9] CHENG Jun-sheng, YANG Yi, YANG Yu. A rotating machinery fault diagnosis method based on local mean decomposition[J]. Digital Signal Processing, 2011(9): 1-11.

## Trend Elimination Method of Mechanical Vibration Signal Based on Local Mean Decomposition

ZHAO Zhi-ke<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-guang<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Control Engineering of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** A novel method of trend elimination for mechanical vibration signal by local mean decomposition is proposed in this paper. LMD is a decreasing decomposition process from high-frequency component to low-frequency component step by step, and both in amplitude and frequency of the residual component which is very weak. In view of the low frequency for the trend of mechanical vibration signals, and the residual component from LMD has little impact on the trend. Therefore, the last PF component could be the trend for mechanical vibration signals. In order to validate the correctness of proposed method in this paper, by using the method of numerical simulation to build the common linear trends, polynomial and exponential trend for loading on the simulation signal and the measured vibration signals of rolling bearings. The proposed LMD method, the conventional least square fitting method, the wavelet analysis and the EMD method can be used to extract the trends respectively. Numerical simulation test and the measured data processing results show that this method can accurately extract the trend of the mechanical vibration signal, compared with the other methods to extract the trend, and LMD has a certain advantage.

**Key words:** mechanical vibration signal; local mean decomposition; trend; envelope signal; purely frequency



文章编号:1671-6833(2014)05-0105-04

# 单分散尺寸可控的聚苯乙烯微球制备

张翔,魏浩栋,姚纪蕾,张冰

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

**摘要:**以苯乙烯(St)为单体、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)为稳定剂、偶氮二异丁腈(AIBN)为引发剂,无水乙醇为分散介质,采用分散聚合法制备单分散尺寸可控的聚苯乙烯(PSt)微球.系统研究了单体浓度、稳定剂用量、引发剂用量及温度对聚苯乙烯微球粒径及粒径分布的影响,并采用 SEM、光学显微镜、粒度分析仪对微球形貌和尺寸进行表征,用傅里叶红外光谱(FTIR)对其结构进行表征.研究表明,在单体浓度为 22%,PVP 用量为 0.65%,AIBN 用量为 0.32%,反应温度 70 ℃ 条件下,能够制备出粒径为 3.55 μm 单分散表面光滑的聚苯乙烯微球.

**关键词:**聚苯乙烯微球;分散聚合;单分散;粒径分布

**中图分类号:** TQ317 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.024

## 0 引言

单分散微米尺寸的聚合物微球作为一种高分子材料,不仅具有良好的热稳定性、化学稳定性、疏水性,而且还具有大的比表面及表面反应能力等特性,在生物医学<sup>[1]</sup>、标准计量<sup>[2]</sup>、色谱填料<sup>[3]</sup>、催化剂载体<sup>[4]</sup>、蛋白固定<sup>[5]</sup>与分离<sup>[6]</sup>等领域具有广泛的应用.尤其是粒径为 1~10 μm 的聚合物微球应用更为广泛.采用传统的合成方法,制备粒度均匀单分散微米级聚合物微球仍然较为困难.例如乳液聚合方法制备的聚合物微球粒径为 0.06~0.7 μm;悬浮聚合方法制备的微球粒径为 10~1 000 μm,粒径分布较宽<sup>[7]</sup>.为了制备单分散窄分布微米尺寸的聚合物微球,许多研究者尝试了不同的方法,Ugelstad 等<sup>[8]</sup>采用两步溶胀法,Omi 等<sup>[9]</sup>使用膜乳化技术(SPG),Dong 等<sup>[10]</sup>使用微流体法,虽获得了微米尺寸的聚合物微球,但制备过程复杂且需要特殊设备.与之相比,分散聚合法<sup>[11-12]</sup>能一步制备 0.1~15 μm 分散性较好聚合物微球,并适用于不同单体的聚合反应,因此分散聚合法近年来受到广泛关注.

在分散聚合法反应过程中,微球的粒径及分散性能受到单体、稳定剂、引发剂以及反应温度等众多因素的影响,在制备过程中需要精确控制反

应条件.因此,笔者系统研究了各因素对分散聚合制备微球粒径及粒径分布的影响,优化了单分散微球的制备工艺,制备出了单分散微米尺度的聚合物微球.

## 1 实验部分

### 1.1 原料

苯乙烯(St)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、无水乙醇均为分析纯,偶氮二异丁腈(AIBN)用 95% 乙醇二次重结晶,实验用水均为去离子水.

### 1.2 聚苯乙烯微球的制备

将一定量的 PVP、AIBN 和 St 加入到 60 mL 的无水乙醇,超声辅助形成均一溶液,然后转移到三口瓶中,通氮气驱氧 30 min,开启磁力搅拌、循环冷凝水,在 70 ℃ 下反应 12 h,用滤布过滤,以除去大块的沉淀物,然后离心,用无水乙醇洗涤一次,再用去离子水洗涤多次.50 ℃ 下真空干燥 48 h,最终得到白色的聚苯乙烯微球粉末.

### 1.3 聚苯乙烯微球的表征

用扫描电镜(日立 S-450 型)、光学显微镜(BM-21AY 型落射荧光显微镜)和傅里叶变换红外光谱仪(WQF-510 型)对微球形貌、尺寸和结构进行表征,并测定微球的平均粒径.微球的平均粒径按统计方法进行计算.

收稿日期:2014-02-26;修订日期:2014-06-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21271158)

作者简介:张翔(1970-),男,河南夏邑人,郑州大学副教授,博士,主要从事污水处理研究,E-mail:zhangxiang68@zzu.edu.cn.

## 2 结果与讨论

### 2.1 单体浓度对 PSt 微球粒径及粒径分布的影响

图 1 是在稳定剂质量分数 0.65%、引发剂质量分数 0.32%、反应温度 70℃ 下,改变单体浓度合成的 PSt 微球光学显微镜图片.由图 1 可知,单体浓度由 10% 升高到 35%,微球平均粒径从 2.88  $\mu\text{m}$  增大到 4.35  $\mu\text{m}$ ,单体浓度在 20~25% 时制得的微球粒径较为均匀,浓度过高和过低时,粒径都分布较宽.

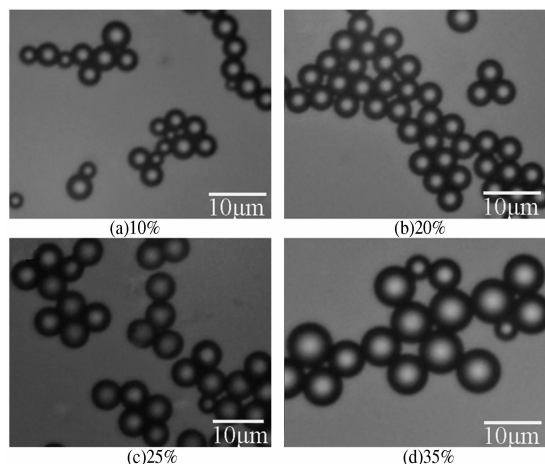


图 1 不同单体浓度下 PSt 微球的光学显微镜图片  
Fig. 1 Optical Microscope images of PSt microspheres at different monomer concentration

单体浓度对微球粒径的影响,关键在于改变了聚合体系的溶解性.单体浓度过低时,聚合物链增长缓慢,成核周期变长,粒子很容易相互碰撞凝结,使得粒径分布变宽.随着单体浓度增加,聚合物链的溶解度增大,沉淀析出时链长增加,成核数目减少,每个核粒子吸收单体的量增多,粒径变大.当单体浓度过高时,微球粒径分布变宽,一方面核粒子从分散介质中吸附 PVP 分子的阻力变大,吸附量减少,而相互凝结,粒径分布变宽;另一方面成核粒子数目减少,使体系中大量的单体低聚物不能及时被完全吸收,相互聚集二次成核,导致粒径分布变宽.

### 2.2 稳定剂用量对 PSt 微球粒径及粒径分布的影响

图 2 是在单体浓度 22%、引发剂质量分数 0.32%、反应温度 70℃ 下,改变稳定剂用量合成的 PSt 微球光学显微镜图片.由图 2 可以看出,PVP 质量分数由 0.49% 增大到 0.82%,微球平均粒径由 2.98  $\mu\text{m}$  增大到 4.09  $\mu\text{m}$ ,再增加用量,粒径反而变小.

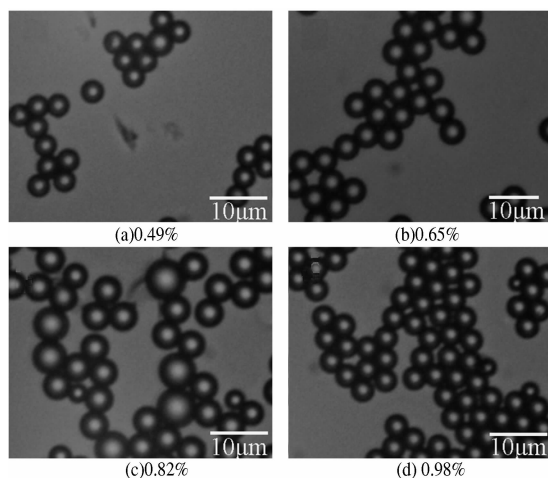


图 2 不同 PVP 用量下 PSt 微球的光学显微镜图片  
Fig. 2 Optical Microscope images of PSt microspheres at different PVP concentration

通常情况下,稳定剂的用量较高时,微球粒径随 PVP 用量的增加而变小<sup>[13-14]</sup>,而本实验中,PVP 在较低浓度时(小于 1%),PSt 粒径随 PVP 的增加而先增大后变小.PVP 对微球的稳定作用,是由于在聚合过程中,稳定剂以物理作用吸附到核粒子表面,阻碍了粒子间的相互碰撞凝结,使其稳定.当 PVP 用量较少时,粒子因不能吸附足够的 PVP,相互团聚,产生大块凝胶,核粒子吸收单体变少,微球粒径较小;随着 PVP 含量的增加,粒子吸附 PVP 的量增多,稳定性变强,核粒子吸收单体的量增多,粒径增大.当 PVP 用量过高时,粒子很容易从分散介质中捕获 PVP 分子,使得粒径变小;另一方面 PVP 含量过高,体系粘度过大,阻碍粒子对单体的吸收,也会导致粒径变小.由此可知 PVP 的用量过低时易发生团聚,较高时粒径分布较宽,而在 0.65% 时制得的微球粒径分布最窄.

### 2.3 引发剂用量对 PSt 微球粒径及粒径分布的影响

图 3 是在单体浓度 22%、稳定剂质量分数 0.65%、反应温度 70℃ 下,改变引发剂质量分数合成 PSt 微球的光学显微镜图片.从图 3 可以看出引发剂质量分数由 0.16% 增加到 0.49%,微球平均粒径从 2.88  $\mu\text{m}$  增加到 5.52  $\mu\text{m}$ ,引发剂质量分数在 0.32%~0.4% 时,微球粒径分布较窄.

引发剂用量的增加,为反应提供更多的活性自由基,形成大量的低聚物,使成核加速,核粒子很容易吸收低聚物而变大.但当引发剂用量过高时,在极短的时间内形成大量的核粒子,不能吸附足够的 PVP,而相互凝结,导致粒径分布变宽.因此引发剂的最佳用量为 0.16%~0.32%.

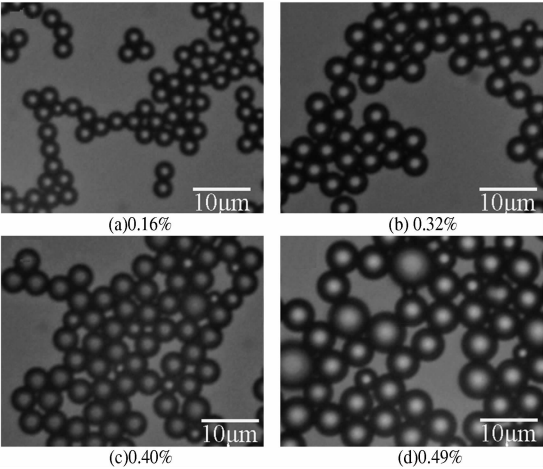


图 3 不同引发剂用量下 PSt 微球光学显微镜图片  
Fig. 3 Optical Microscope images of PSt microspheres under different AIBN concentration

2.4 反应温度对 PSt 微球粒径及粒径分布的影响

图 4 是在单体浓度 22%、稳定剂质量分数 0.65%、引发剂质量分数 0.32% 下,改变反应温度合成 PSt 微球的光学显微镜图片。

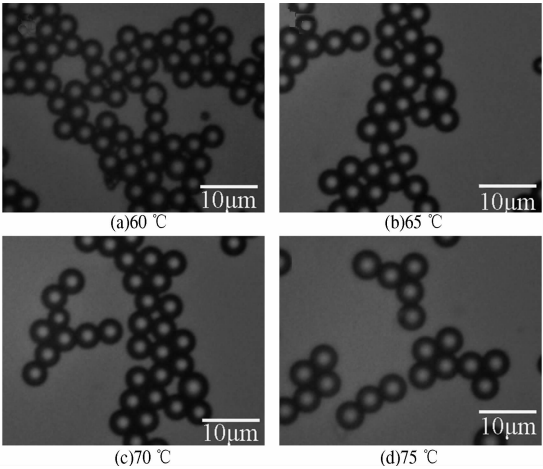


图 4 不同反应温度下 PSt 微球光学显微镜图片  
Fig. 4 Optical Microscope images of PSt microspheres under different reaction temperature

由图 4 可以看出聚合反应在 65 ~ 75 °C 进行时,微球粒径由 3.31 μm 增加到 3.79 μm,粒径分布变化很小. 温度对聚合反应的影响主要表现在两方面,一方面促使引发剂分解,单体聚合反应加快,形成大量的低聚物,成核时间变短,核增长加快,粒径变大. 另一方面,温度的升高使流体黏度变小,粒子对 PVP 的吸收加快,使其快速稳定,避免相互碰撞凝结,因此粒径分布变窄.

2.5 PSt 微球的 SEM 分析

通过对 PSt 微球粒径及粒径分布的影响因素的系统研究,获得最佳的制备条件. 在单体浓度为

22% ,引发剂质量分数为 0.32% ,PVP 质量分数为 0.65% ,反应温度 70 °C 下,合成单分散窄分布 3.55 μm 的 PSt 微球,其 SEM 图片如图 5 所示. 由图 5 可以看出,制得的 PSt 微球粒径分布较窄,表面光滑无缺陷,无变形.

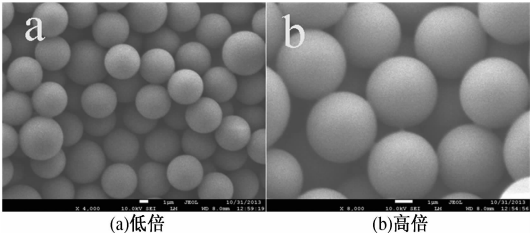


图 5 PSt 微球的 SEM 图片  
Fig. 5 SEM of PSt microspheres

2.6 PSt 微球的红外吸收光谱分析

图 6 是 PSt 微球的红外吸收光谱图. 由图 6 分析可得,在 3 060.35,3 026.38 cm<sup>-1</sup> 处出现吸收峰是由苯环上 C—H 键的伸缩振动引起的,2 921.92,2 850.41 cm<sup>-1</sup> 处的峰对应—CH<sub>2</sub>—的伸缩振动,1 602.37,1 493.08,1 450.86 cm<sup>-1</sup> 出现的峰是苯环的特征吸收峰,在 698.42,755.92 cm<sup>-1</sup> 的峰是由苯环不同平面上 C—H 的变形振动引起的.

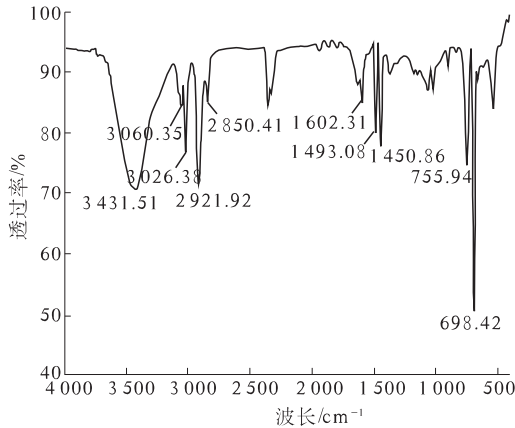


图 6 PSt 微球的红外光谱图  
Fig. 6 FTIR spectra of PSt microspheres

3 结论

采用分散聚合法制备单分散微米尺寸的聚苯乙烯微球. 研究单体浓度,稳定剂用量,引发剂用量和反应温度对微球粒径及粒径分布的影响,获得最佳的制备条件. 在单体浓度为 22% ,引发剂质量分数 0.32% ,稳定剂质量分数 0.65% ,反应温度 70 °C 的条件下,成功制得粒径为 3.55 μm,单分散表面光滑的聚苯乙烯微球.

## 参考文献:

- [1] NGUYEN D N, GREEN J J, CHAN J M, et al. Polymeric materials for gene delivery and DNA vaccination [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(8): 847 – 867.
- [2] SWARTZMAN E E, MIRAGLIA S J, MELLENTIN-MICHELOTTI J, et al. A homogeneous and multiplexed immunoassay for high-throughput screening using fluorometric microvolume assay technology [J]. *Analytical biochemistry*, 1999, 271(2): 143 – 151.
- [3] PERRIER-CORNET R, HEROGUEZ V, THIENPONT A, et al. Functional crosslinked polymer particles synthesized by precipitation polymerization for liquid chromatography [J]. *Journal of chromatography A*, 2008, 1179(1): 2 – 8.
- [4] XU Jiang-xiong, CHEN Guo-jun, YAN Rui, et al. One-Stage synthesis of cage-like porous polymeric microsphere and application as catalyst scaffold of Pd nanoparticles [J]. *Macromolecules*, 2011, 44(10): 3730 – 3738.
- [5] HOU Xiao-hui, LIU Bai-ling, DENG Xiao-bo, et al. Monodisperse polystyrene microspheres by dispersion copolymerization of styrene and other vinyl comonomers; characterization and protein adsorption properties [J]. *Journal of biomedical materials research Part A*, 2007, 83(2): 280 – 289.
- [6] NORDBORG A, LIME F, SHCHUKAREV A, et al. A cation-exchange material for protein separations based on grafting of thiol-terminated sulfopropyl methacrylate telomers onto hydrophilized monodisperse divinylbenzene particles [J]. *Journal of separation science*, 2008, 31(12): 2143 – 2150.
- [7] KAWAGUCHI S, ITO K. Dispersion polymerization [M]. *Advances in Polymer Science*, 2005, 175: 299 – 328.
- [8] UGELSTAD J, MORK P C, KAGGERUD, et al. Swelling of oligomer-polymer particles. New methods of preparation [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 1980, 13(1): 101 – 140.
- [9] OMI S, SENBA T, NAGAI M, et al. Morphology development of 10- $\mu\text{m}$  scale polymer particles prepared by SPG emulsification and suspension polymerization [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2001, 79(12): 2200 – 2220.
- [10] DONG Peng-fei, XU Jian-hong, ZHAO Hong, et al. Preparation of 10 $\mu\text{m}$  scale monodispersed particles by jetting flow in coaxial microfluidic devices [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013(214): 106 – 111.
- [11] 马国辉, 苏志国. 高分子微球材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 51 – 59.
- [12] ARSHADY R. Suspension, emulsion, and dispersion polymerization; A methodological survey [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1992, 270(8): 717 – 732.
- [13] 曹同玉, 戴兵, 戴俊燕, 等. 单分散, 大粒径聚苯乙烯微球的制备 [J]. *高分子学报*, 1997, 1(2): 158 – 165.
- [14] 曹健, 刘彦军. 分散聚合制备大粒径单分散聚苯乙烯微球 [J]. *大连工业大学学报*, 2010, 29(1): 39 – 42.

## Preparation of Monodisperse Size-controlled Polystyrene Microspheres by Dispersion Polymerization

ZHANG Xiang, WEI Hao-dong, YAO Ji-lei, ZHANG Bing

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Monodisperse size-controlled polystyrene microspheres were prepared by dispersion polymerization of styrene in ethanol dispersion medium, using PVP as a stabilizer and AIBN as the initiator. The influence factors, such as monomer concentration, stabilizer concentration, initiator concentration and reaction temperature on the size and size distribution were investigated. The morphology and size of PSt microspheres was characterized by SEM, particle size analyzer and optical microscope. And the Fourier transform infrared (FTIR) spectra of PSt microspheres were also recorded by a FTIR spectrometer. The results showed that monodisperse PSt microspheres in the size of 3.55  $\mu\text{m}$  with smooth surface were prepared when the monomer concentration is 22%, stabilizer PVP is 0.65%, initiator AIBN is 0.32% and reaction temperature is 70  $^{\circ}\text{C}$ .

**Key words:** polystyrene microsphere; dispersion polymerization; monodisperse; size distribution

Al-P 中间合金对过共晶铝硅合金组织及切削性能的影响

赵红亮<sup>1</sup>, 丁紫阳<sup>1</sup>, 李怀武<sup>2</sup>, 任书卿<sup>2</sup>, 张 洋<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省银湖铝业有限责任公司, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 采用 Al-P 中间合金变质过共晶铝硅合金, 在室温下通过刀具耐用度对比实验和表面质量对比实验评价切削加工性. 实验表明: 经过 Al-P 中间合金变质后, 初晶硅变得细小、分散且圆钝化, 变质后刀具耐用度是变质前的 1.75 倍、摩擦力-时间曲线变得平滑、失重量变小, 说明经变质后, 材料中硬质点对刀具的磨损变小, 改善了切削加工性.

**关键词:** 过共晶 Al-Si 合金; 初晶硅; 变质; 显微组织; 切削加工性

**中图分类号:** TG136<sup>+</sup>.1      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.025

0 引言

过共晶 Al-Si 合金具有线膨胀系数小、热稳定性好、良好的耐磨耐蚀性等优点, 是理想的活塞及缸体材料<sup>[1]</sup>. 国外已经利用过共晶 Al-Si 合金生产出高性能的增压内燃机活塞, 并取得了良好的使用效果, 而国内内燃机活塞主要采用亚共晶和共晶合金, 过共晶合金在活塞的应用很少, 原因是过共晶 Al-Si 合金随着 Si 含量的提高, 出现粗大不规则的多角形板状初晶硅, 严重割裂铝基体, 造成刀具磨损严重, 切削加工性能变差, 限制了它的应用<sup>[2]</sup>. 目前关于切削加工性能的研究主要集中在切削参数、切削条件、切削机理方面, 例如袁

跃峰<sup>[3]</sup>研究了切削要素对过共晶铝硅合金切削加工性的影响, 但很少有文献从改变合金组织角度研究评价切削加工性<sup>[4]</sup>. 笔者结合河南省银湖铝业有限责任公司生产过程中遇到的切削加工困难问题, 以 Al-20% Si 合金为研究对象, 通过添加 Al-P 中间合金变质剂, 研究了变质对合金组织及其切削加工性能的影响.

1 试验方法

1.1 试验材料

试验样品为 Al-20% Si, 其成分见表 1. Al-P 中间合金(P 质量分数为 3.5%).

表 1 Al-20% Si 的化学成分  
Tab. 1 Chemical component of Al-20% Si

合金成分	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Ti	Al
含量/%	20	0.128	0.007	0.038	0.003	0.005	0.03	余量

1.2 试验过程

将合金放在 SG2-7.5-12 型坩埚电阻炉中, 加热到 760 ℃, 静置 10 min 后用氩气除气 3 min, 扒渣, 然后将合金液浇铸到预热 250 ℃ 的铸铁模具中. 采用相同的条件再次加热熔化, 按质量分数 1% 加入 Al-P 中间合金, 变质 1 h 后精炼、浇铸, 以制取变质后的样品. 将变质前、变质后的样品分

别制成金相试样, 用 0.5% 的 HF 溶液腐蚀, 在 Olympus H2-UMA 型显微镜上观察、拍照和测量.

通过刀具耐用度对比实验和表面质量实验评价其切削性能. 刀具耐用度对比实验在车床上进行, 将样品在车床上切削加工, 车床刀具采用硬质合金刀具. 选取切削速度  $V$  为变量, 刀具刀面磨损带的平均宽度  $B=0.5\text{ mm}$  为磨损标准, 在其它

收稿日期:2014-05-03;修订日期:2014-07-13  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174177)  
作者简介:赵红亮(1972-),男,河南项城人,郑州大学教授,博士,主要从事新型铝合金细化剂的研究,E-mail:zhli-wkr@zzu.edu.cn.

相同条件下,对棒料进行切削加工,用读数显微镜测量刀具刀面的磨损,记录达到磨损标准的时间,即为该条件下的刀具耐用度.

表面质量对比实验在 MMU-10G 微机控制高温端面摩擦磨损试验机上进行.摩擦副采用销盘摩擦副,将试样加工成直径为 43 mm、厚度为 3 mm 的圆片,用 800#砂纸打磨后进行实验.圆片实验前后均采用酒精清洗,用精度为 0.000 1 g 的电子天平测量实验前、后的重量.表面形貌用 Olympus H2-UMA 型显微镜观察.

2 实验结果与分析

2.1 Al-P 中间合金变质效果

Al-20% Si 合金经 Al-P 中间合金变质前后的显微组织如图 1 所示.

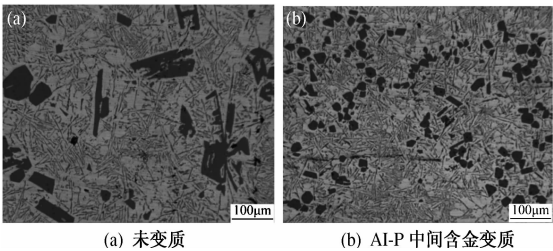


图 1 Al-P 中间合金变质前后的显微组织  
Fig.1 Microstructures with and without Al-P master alloy

由图 1 可以看出,未经变质的 Al-20% Si 合金组织中含有大量粗大的初晶硅,形貌特征多样,有板片状、五瓣星形状、多面体状等,棱角尖锐,平均尺寸在 120 μm 左右.经 Al-P 中间合金变质后,初晶硅形状主要为相对规则的多面体状,数目明显增多,棱角圆滑,尺寸细小,平均尺寸在 30 μm 左右.其变质前后初晶硅的对比见表 2.初晶硅形状变化的原因是加入 Al-P 中间合金后,一方面 P 与铝反应生成 AlP,AlP 与 Si 的晶体结构都是立方晶格,晶格常数相似,AlP 粒子可以起到异质核心的作用,促进了结晶形核,使晶核数目增多,变质细化了初晶硅;另一方面,AlP 粒子改变了初晶硅的结晶驱动力,使其结晶驱动力增大、临界形核功减小,也一定程度上细化初晶硅<sup>[5-8]</sup>.

表 2 变质前后初晶硅对比

Tab.2 Contrasts of primary silicon before and after modification

对比参数	平均尺寸/μm	棱角	形貌
变质前	120	尖锐	多样、不规则
Al-P 变质后	30	圆钝	相对规则

2.2 变质前后切削加工性能对比

刀具耐用度是衡量材料切削加工性能的一项重要指标,刀具耐用度  $T$  越长,则材料的切削加工性能越好<sup>[9-10]</sup>.变质前后刀具耐用度实验数据如表 3 所示.

表 3 变质前后刀具耐用度对比

Tab.3 Contrasts of the tool life before and after modification

测量指标	切削速度 $v/(m \cdot min^{-1})$		
	30	35	40
耐用度 $T/min$	变质前	17.3	13.5
	Al-P 变质后	28.4	23.8
耐用度比值	变质后/变质前	1.64	1.76

变质前后平均耐用度比值为:  $N = \frac{N_1 + N_2 + N_3}{3} = \frac{1.64 + 1.76 + 1.85}{3} = 1.75$ .

从以上数据可以看出,经过 Al-P 中间合金变质后的 Al-20% Si 合金刀具耐用度均比未变质时的耐用度长,且变质后平均耐用度是变质前的 1.75 倍.因为变质前,过共晶铝硅合金组织中含有粗大的多角块状初晶硅,刀具在切削加工时,刀刃与硬的硅相质点和软的铝相基体交替相迁,会造成刀具磨损严重,而经变质处理后,对刀具的磨损变小,刀具耐用度时间变长,切削加工性得到了一定程度的改善.

切削加工时,常用表面质量为指标衡量切削加工性.凡是容易获得好的加工表面质量的材料,其切削加工性越好.表 4 为相同实验条件下变质前后的平均摩擦力对比.表 5 为实验前后样品的失重量.图 2 为变质前后的摩擦力—时间曲线.

表 4 变质前后平均摩擦力对比

Tab.4 Contrasts of the average friction before and after modification

项目	数值	项目	数值
试验力/N	300	主轴转速/( $r \cdot min^{-1}$ )	100
试验时间/S	600	试验转数	997
变质前平均	2.826	变质后平均	2.589
摩擦力/N		摩擦力/N	

表 5 变质前后失质量对比

Tab.5 Contrasts of the weight loss before and after modification

样品种类	实验前/g	试验后/g	失重量/g
变质前	10.575 5	10.573 2	0.002 3
变质后	10.624 8	10.623 3	0.001 5

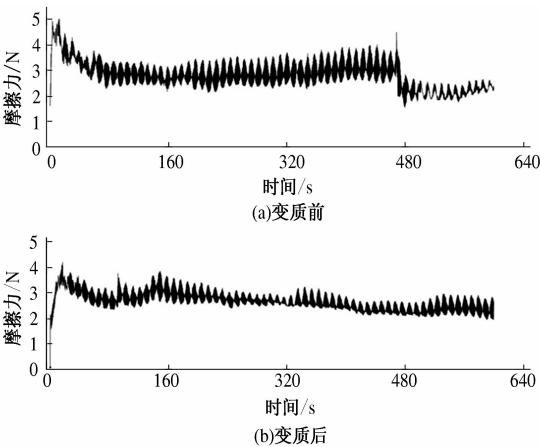


图 2 变质前后摩擦力—时间曲线对比  
Fig. 2 Contrasts of the friction-time curve before and after modification

由图 2 可以看出,变质前摩擦力—时间曲线波动相对较大,而变质后摩擦力—时间曲线相对平滑,这是因为未经变质的 Al-20% Si 合金组织中存在大量粗大的初晶硅,初晶硅具有很高的显微硬度(高达 1 000 ~ 1 300 HV),而铝基体的显微硬度很低,是一种软基体相,摩擦副与软硬质点相互交叉摩擦,造成摩擦力随时间的变化<sup>[11]</sup>. 对比图中变质前、变质后的摩擦力—时间曲线,可说明变质后的组织中软、硬质点相分布较变质前均匀,曲线变的平滑. 结合表 4、表 5,变质后实验中的平均摩擦力比变质前下降了 8.4%,失重量减少,这是因为材料中硬质点越大,形状越尖锐,分布越广,则材料的切削加工性能就越差,经过 Al-P 中间合金变质后,初晶硅硬质点明显细化,对刀具的摩擦力变小,改善了切削加工性<sup>[3,12]</sup>.

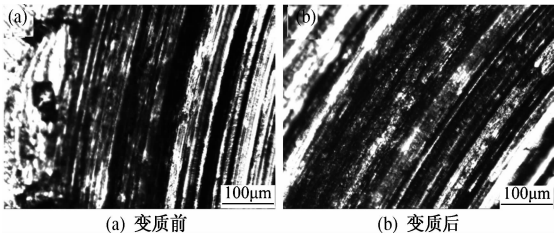


图 3 变质前后摩擦表面形貌  
Fig. 3 Microstructure of friction surface before and after modification

图 3 为变质前后摩擦表面形貌对比. 可以看出,变质前的样品经实验后表面出现轻微的剥落,变质后样品表面相对均匀和平整. 这是因为未变质的 Al-20% Si 含有粗大的初晶硅,不能承受较大的磨损载荷和摩擦力的作用,容易向周围较软的铝基体滑移或者从铝基体上剥落,留下许多面积不一、分布不规则的剥落坑,导致其在切削加工

时,刀具切削刀面受力不平稳,切削加工过程中刀尖、刀刃和后刀面更容易受到初晶硅硅块的强烈摩擦,刀具磨损更严重,切削加工困难,故变质处理能改善过共晶铝硅合金的切削加工性能.

3 结论

- (1)采用 Al-P 中间合金变质 Al-20% Si,可以显著改变合金显微组织,使其初晶硅变的细小、分散、形状圆钝化.
- (2)变质后的 Al-20% Si 合金刀具耐用度是变质前的 1.75 倍,刀具耐用度时间变长,说明变质后改善了切削加工性;表面质量评价实验也表明 Al-P 中间合金变质 Al-20% Si 可以改善其切削加工性能.

参考文献:

[1] 梁国萍,苏勇,刘福东,等. P + RE 变质对过共晶 Al-Si 合金组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2010,30(3):273-275+195.

[2] 孔凡校. P、Sr、RE 变质对过共晶 Al-Si 合金组织形态的影响[J]. 有色金属:冶炼部分,2011(12):46-49.

[3] 袁跃峰. 硅铝合金切削加工性研究[D]. 中北大学机电工程学院,2006.

[4] 郑文虎. 金属切削加工技术问答[M]. 北京市:机械工业出版社. 2013.

[5] 胡慧芳. Al-25% Si 合金 Si 相形态、变质及性能研究[D]. 重庆大学材料科学与工程学院,2010.

[6] 余国勋,李华基,张晓萍. 复合变质对过共晶 Al-24% Si 合金组织的影响[J]. 冶金丛刊,2008(4):8-9,29.

[7] 姚书芳,毛卫民,赵爱民,等. 过共晶铝硅合金细化变质剂的研究[J]. 特种铸造及有色合金,2000,115(5):1-3.

[8] 胥锴,刘徽平,袁帮谊,等. 过共晶铝硅合金变质处理的研究进展[J]. 热加工工艺,2009,38(3):32-35.

[9] 毛玺,李航,杨丙乾. 金属材料切削加工性能的测试[J]. 实验室研究与探索,1997(4):60-62.

[10] 孔宪华,王亮. 切削用量对刀具耐用度影响的探讨[J]. 科技创新与生产力,2013(3):96-97.

[11] 杨子润,庞绍平,孙瑜,等. 变质及合金化对过共晶 Al-20% Si 合金组织及磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2013,23(5):1217-1225.

[12] 许长林. 变质对过共晶铝硅合金中初生硅的影响及其作用机制[D]. 吉林大学材料学院,2007.

(下转第 115 页)



文章编号:1671-6833(2014)05-0112-04

# 哈兹列特连铸连轧 AA5052 铝合金铸嘴挂渣成分及形成机理研究

卢广玺, 王 鹏, 关绍康, 周 崇, 贾志翔, 辛萧洋

(郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:**采用 SEM、EDS、XRD 等方法研究了哈兹列特连铸连轧 AA5052 铝合金过程中铸嘴挂渣的成分和机理, 并利用热力学吉布斯自由能计算了形成铸嘴挂渣结合物的驱动力, 分析了挂渣结合物的反应形成过程. 研究发现, 铸嘴挂渣的主要成分为尖晶石、镁橄榄石、硅酸镁等. 铸嘴中的  $\text{SiO}_2$  或  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 AA5052 合金熔体中的 Al、Mg 和 MgO 等在铸造过程中长时间接触发生反应, 生成尖晶石、镁橄榄石、硅酸镁等, 其中主要是尖晶石成分, 最终导致铸嘴挂渣.

**关键词:**哈兹列特连铸连轧; AA5052; 铸嘴挂渣; 尖晶石

**中图分类号:** TG249.3      **文献标志码:** A      doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.026

## 0 引言

哈兹列特连铸连轧工艺通过哈兹列特连续铸造机及后接多机架热连轧设备直接生产铝合金薄板带坯, 具有短流程, 节能降耗, 生产成本低等工艺优势<sup>[1]</sup>. 哈兹列特连铸连轧工艺经过半个世纪的实际生产和技术革新已成为一种高科技含量的铝板带生产工艺, 同时也是当前世界上唯一的真正商业化的铝板带连铸连轧工艺<sup>[2]</sup>. 目前全球正在运转的哈兹列特铝板带生产线共有 13 条. 哈兹列特工艺产能大(效率约为双辊铸轧的 10 倍), 生产合金范围广.<sup>[3]</sup> 生产 AA5052 时, 由于哈兹列特工艺铝合金熔体在铸嘴处的流量大、镁元素的

存在, 在铸嘴处时有挂渣, 甚至阻塞铸嘴口, 对在线铝熔体温度场的控制、板材的表面质量和哈兹列特工艺的连续生产有直接的影响. 目前关于哈兹列特工艺铸嘴挂渣的研究很少, 笔者通过在哈兹列特工艺生产线现场取样, 现场生产与理论计算相结合, 研究了哈兹列特工艺生产 AA5052 铝合金过程中铸嘴挂渣的成分和形成机理.

## 1 实验

### 1.1 材料

铸嘴(主要原料为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  纤维, 粘结剂为氮化硼<sup>[4]</sup>), AA5052 铝锭(光谱成分见表 1), 铸嘴挂渣结合物.

表 1 AA5052 合金光谱成分  
Tab.1 Spectral composition of AA5052 alloy

成份	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
含量	0.19	0.23	0.005 3	0.010 7	2.226 2	0.182 9	0.009 8	0.008 9	其余

### 1.2 实验方法

哈兹列特生产 AA5052 合金板的铸造设备由 4 台熔炼炉、一套 SNIF 在线除气设备、陶瓷泡沫过滤板和一台哈兹列特铸造机组成. 在混合炉中配置 AA5052 合金, 一次铸造 4 炉合金, 每炉 100 t

熔体, 混合炉中进行 HD2000 精炼, 倾炉后进行 SNIF 在线除气, 加入细化剂后进行陶瓷过滤板过滤, 合金熔体流入前箱, 从前箱处通过铸嘴流入哈兹列特铸机开始连铸连轧工艺. 铸造时间约 10 h, 前箱处合金熔体的温度约为 700 ℃, 铸造结束后,

收稿日期:2014-05-30;修订日期:2014-07-19  
基金项目:河南省重大科技专项资助项目(111100310500)  
作者简介:卢广玺(1966-)男, 河南长垣人, 郑州大学副教授, 主要从事铝合金新型加工、焊接方面研究, E-mail: lugxi@zzu.edu.cn.

对 AA5052 合金成分做光谱分析,取铸嘴处挂渣进行进行 SEM、EDS 分析,对铸嘴挂渣进行研磨获得粉状颗粒物,对粉状颗粒进行 XRD 检测。

扫面电子显微镜 (SEM): 菲利普公司的 Quanta-250 型电镜;X 射线衍射分析 (XRD): 菲利普公司的 X - Pert 型 X 射线衍射分析仪,测试速度为 4°/min;光谱仪: 德国布鲁克高端立式真空型直读光谱仪。

2 实验结果与形成机理分析

2.1 物相分析与显微组织

图 1 是在 700 ℃ 温度下浇筑 8 h 后,铸嘴材料和 AA5052 铝合金熔体的结合物粉末 X 射线衍射分析图。XRD 分析表明,铸嘴挂渣成分主要由镁铝尖晶石、硅酸镁、镁橄榄石、莫来石 4 种相组成,其中尖晶石含量最多,此外还含有少量氧化镁。

图 2 是对结合区域不同位置的 SEM 和 EDS 图。SEM 分析表明,AA5052 铝液凝固后形成一层

较为致密的材料,未发现气孔,局部有裂纹,组织形貌和颜色分布不均匀。对 SEM 照片中不同的形貌区域进行 EDS 区域分析,结果表明结合面的主要存在元素为镁、铝、硅、氧等,镁和氧元素的含量最高,一些少量元素,如氟、硫和碳是铸嘴中的杂质引入,判断结合区域的材料成分主要是  $MgAl_2O_4$ 、 $MgSiO_3$ 、 $Mg_2SiO_4$ 、 $Al_2SiO_5$ 。

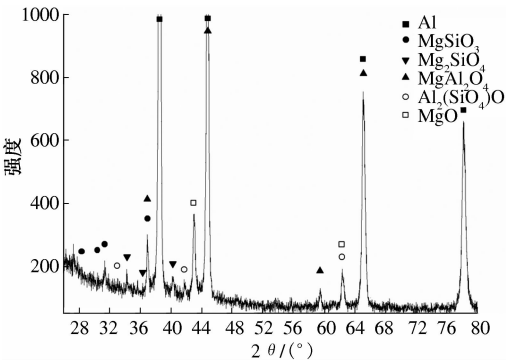


图 1 铸嘴结合物的 XRD 图  
Fig. 1 XRD diagram of nozzle conjugate

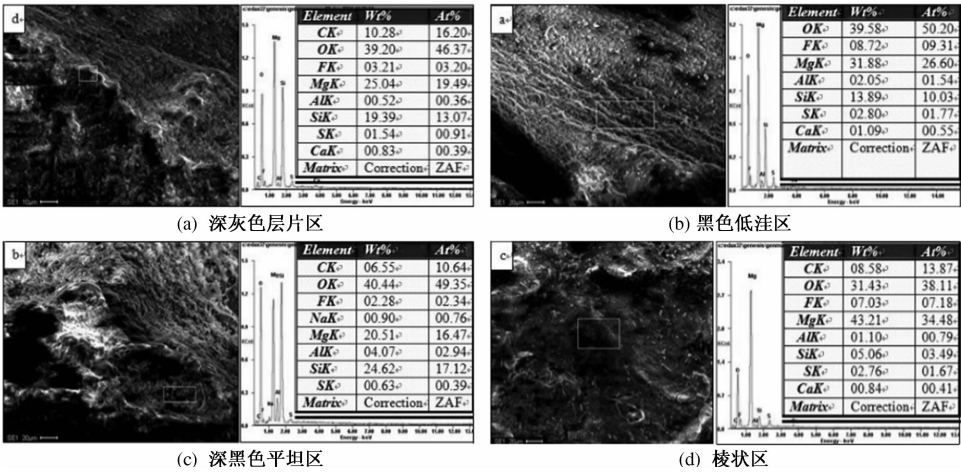
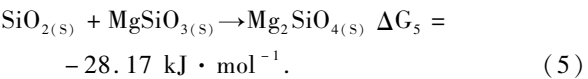
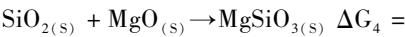
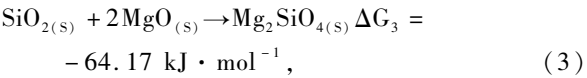
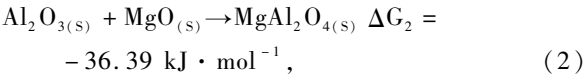
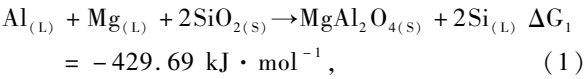


图 2 不同位置结合表面的 SEM 和 EDS 图谱  
Fig.2 SEM and EDS diagrams of different conjugate positions

2.2 挂渣机理分析

哈兹列特铸嘴的主要成分为  $Al_2O_3$  和  $SiO_2$ , AA5052 熔体的接触面主要是 Al、Mg、MgO 和少量  $Al_2O_3$ 。

根据热力学手册计算<sup>[5]</sup>,在 1 000 K 的条件下,反应式的吉布斯自由能如下:



以上 5 个反应的吉布斯自由能均为负值,因此均能发生,且  $\Delta G_1 < \Delta G_3 < \Delta G_2 < \Delta G_4 < \Delta G_5 < 0$ 。从图 1 可知结合生成物尖晶石的含量是最多的,式(1)和式(2)为在这个体系中反应生成尖晶石的两种途径, $\Delta G_1$  要远远小于  $\Delta G_2$ ,也就是说,在热力学上式(1)发生反应远比式(2)容易得多。据 V. M. Ust'yantsev, A. F. Bessonov 和 S. G. Bepamyatnykh 报道<sup>[6]</sup>,当  $Al_2O_3$  和  $MgO$  的摩尔比是 1:1 时,采用 X 射线衍射分析,在约 780 ℃ 时才检测到尖晶石的存在,随温度升高尖晶石的含

量逐渐增加,如图 3 所示. 但本实验是在约 700 ℃ 条件下发生的,在此条件下判断按照式(2)反应生成尖晶石的含量会很少或者没有. R. J. BRATTON<sup>[7]</sup>在热力学上也证实了这一点,当镁含量大于 1.5% 时,在 750 ℃ 的铝镁合金熔体中, MgO 在热力学上是可以稳定存在的,如图 4 所示. 式(1)的吉布斯自由能小,即有较大的尖晶石形成能,是在铸嘴挂渣反应中生成尖晶石的主导反应. 随 SiO<sub>2</sub> 含量的增加, MgO 由相对稳定变为不稳定,而尖晶石则由不稳定变为稳定<sup>[8]</sup>,铸嘴材料中的 SiO<sub>2</sub> 含量较高,这与式(1)反应生成尖晶石的热力学条件相吻合,据李国彬等人报道式(1)在 620 ℃ 即可发生反应生产尖晶石. 不稳定的 MgO 会与剩余的 SiO<sub>2</sub> 按照式(3)~(5)反应得到 Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 和 MgSiO<sub>3</sub>,其中式(3)的 ΔG 最小,反应最有利,而且 MgSiO<sub>3</sub> 在足量 MgO 的条件下还有变为 Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 的趋势,因此 Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 的含量要高于 Mg-SiO<sub>3</sub>. 如图 2(a) 深灰色的层片区的 EDS 分析结果,深灰色层片区主要由 Mg、Si 与 O 构成,根据 O 元素与 Mg、Si 元素的自由能关系及成分来看,判断此区域形成 Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. 铸嘴挂渣形成机理:在连续铸造过程中,铸嘴中的 SiO<sub>2</sub> 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 AA5052 熔体中的 Al、Mg 和 MgO 等长时间接触发生反应,生成尖晶石、镁橄榄石、硅酸镁等,其中主要是尖晶石成分,最终导致铸嘴挂渣.

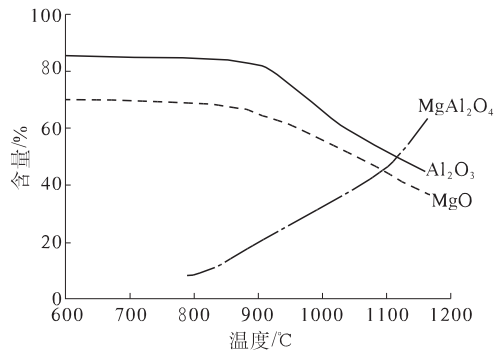


图 3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO 和 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 在不同温度下含量的变化关系

Fig. 3 Relationship between intensity of lines and temperature characterizing the phase changes in mixtures (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)

3 结论

(1) 哈兹列特工艺生产 AA5052 铝合金铸嘴挂渣的主要成分为尖晶石、镁橄榄石、硅酸镁等,

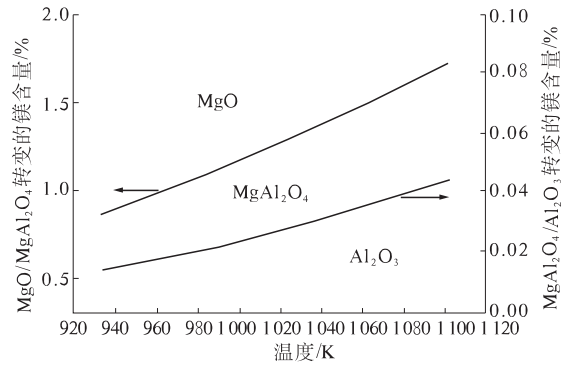


图 4 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 MgO 在液态铝镁合金中的热力学稳定图  
Fig. 4 Thermodynamic stability of Al-Mg oxides in liquid Al-Mg alloys

尖晶石的含量最多,镁橄榄石次之.

(2) 铸嘴中的 SiO<sub>2</sub> 或 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、AA5052 熔体中的 Al、Mg、MgO 之间在连铸连轧过程中发生反应,生成尖晶石、硅酸镁、镁橄榄石等导致铸嘴挂渣.

参考文献:

[1] 马道章. 连铸连轧—降低汽车用铝材高成本的好工艺[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(6): 6-7.  
[2] 马道章. 哈兹列特连铸连轧工艺的技术进步与铝板带产品的品种和应用[C]. 中国首届铝加工技术创新论坛论文集, 2007: 136-140  
[3] 关绍康. 铝合金板带连铸连轧节能新工艺关键技术研究[C]. 铝冶炼节能新技术研讨会论文集, 2011: 1-26.  
[4] 马道章. 哈兹列特工艺在铝板带连铸连轧应用中的若干问题的探讨[J]. 铝加工, 2005(3): 18-24.  
[5] 叶大伦, 胡建华. 实用无机物热力学数据手册[M]. 第二版. 北京: 冶金工业出版社, 2002.  
[6] UST'YANTSEV V M, BESSONOV A F, BESPAMYAT-NYKH S G. Phase inversions in mixtures of spinel MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and magnesia, alumina and silica, Refractories[J]. 1966, 7(7/8), 465-468.  
[7] MCLEOD A D, GABRYEL C M. Kinetics of the growth of spinel, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, on alumina particulate in Aluminum Alloys Containing Magnesium, Metallurgical transactions A [J]. 1992(23A): 1279-1283.  
[8] 李国彬, 孙继兵, 郭全梅. 等. 20SiO<sub>2</sub>/Al-Mg 复合材料的界面反应及其微结构[J]. 复合材料学报, 2003, 20(3): 41-46.

Study on Composition and Mechanism of Nozzle Cavity Slag  
of Hazelett Continuous Casted and Rolled AA5052 Aluminum Sheet

LU Guang-xi, WANG Peng, GUAN Shao-kang, ZHOU Chong, JIA Zhi-xiang, XIN Xiao-yang

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** This paper studied the dross composition and dross Mechanism of nozzle cavity on Hazelett continuous casted and rolled AA5052 aluminum alloy by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive analysis (EDS), X-ray diffraction (XRD), etc. Using The Gibbs free energy thermodynamic function calculated driving forces of forming dross compound of nozzle cavity and analyzed formation on reaction of dross compound of nozzle cavity. The results showed that dross compound of nozzle cavity consisted of spinel, forsterite, Florisil, etc. The SiO<sub>2</sub> or Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in nozzle cavity reacted with Al, Mg and MgO in AA5052 aluminum alloy melt to MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, MgSiO<sub>3</sub>, which were mainly spinel composition during casting process, eventually leading to dross of nozzle cavity.

**Key words:** Hazelett continuous casting and rolling; AA5052 aluminum alloy; dross of nozzle cavity; spinel

(上接第 111 页)

Effects of Al-P Master Alloy Modification on Microstructure and Machinability  
in Hypereutectic Al-Si Alloys

ZHAO Hong-liang<sup>1</sup>, DING Zi-yang<sup>1</sup>, LI Huai-wu<sup>2</sup>, REN Shu-qing<sup>2</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Yinhu Aluminum Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The hypereutectic Al-Si alloys were modified with Al-P master alloy and evaluation of machinability by comparing the tool life and surface quality at room temperature. The experimental results show that after Al-P master alloy modification, primary silicon becomes small, scattered and round passivation, the tool life is 1.75 times than before, friction-time curve becomes smooth and weight loss becomes small, and those results show that materials hard particles for tool wear become smaller and modification improves machinability.

**Key words:** hypereutectic Al-Si alloys; primary silicon; modification; microstructure; machinability

白酒糟高温好氧堆肥过程中氮素转化规律及堆肥周期探究

郭夏丽, 王兴胜, 朱正威, 王 岩

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

摘 要:以白酒糟为材料,在敞开式自然通风条件下进行高温好氧堆肥实验,来研究白酒糟堆肥过程中氮素转化的规律以及堆体腐熟时间,以期为白酒糟的资源化利用提供科学依据和技术指导.结果表明:在 28 d 的堆肥过程中堆体温度在第 7 d 达到 50 ℃,50 ℃ 以上维持了 10 d;在堆肥过程中,堆体中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量呈先升后降的趋势, $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量变化趋势与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  相反,堆肥结束, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量分别较初始值升高 82.0% 和降低 44.5%.有机氮和总氮含量均呈先降后升的趋势,至堆肥结束,有机氮和总氮含量分别升高了 17.1% 和 1.9%.在第 28 d,堆体的种子发芽指数达到 90.4%,堆体完全达到了腐熟条件.结合堆肥过程中温度和 pH 的变化,可以断定在敞开式自然通风、每 3 d 翻一次堆的条件下,堆体经过 22 d 已经基本腐熟.

关键词:白酒糟;堆肥;氮素转化;腐熟

中图分类号:TQ440.9;X705 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.027

0 引言

白酒糟是以高粱、小麦、玉米、谷物等为原料经过发酵、蒸馏提取酒精后的残留物,作为生产白酒时产生的副产物,富含粗蛋白、酸性洗涤纤维、粗淀粉和无氮浸出物等营养成分<sup>[1-2]</sup>.据统计,2009 年我国白酒糟产量就高达 2 121 万 t<sup>[3]</sup>.鲜白酒糟水分含量达 60%,pH 为 3.4~4.0,易腐败变质,不利于贮存、运输,必须及时处理,否则会严重污染环境<sup>[4-5]</sup>.近年来,我国针对白酒糟进行的应用研究颇多,主要用于生产饲料、提取甘油、制作生物质燃料棒、生产食用菌等<sup>[6]</sup>,但以上方法对白酒糟的利用率低,附加成本高,并不适合白酒糟的大规模资源化利用.利用丰富的白酒糟原料制作有机肥料,既能解决环保问题,又可为绿色食品的生产提供有机环境,实现资源再利用,具有较高的环保效益、经济效益和社会效益.高温堆肥被认为是一种固体废物资源化、无害化、减量化的有效手段,可促使有机废物稳定,并在高温发酵时杀死病原菌,最终产物能作为有机肥料或土壤调节剂<sup>[7]</sup>.本研究以酱香型的白酒糟为原料,在人工翻堆、敞开环境自然通风情况下,研究白酒糟高温好氧堆肥过程中碳氮转化情况并对腐熟周期进行探讨,以期为实现白酒糟的资源化和堆肥化处理

提供依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

白酒糟:取自某白酒厂;堆肥材料酒糟的基本理化性质如表 1 所示.

表 1 堆肥原料的主要理化指标  
Tab.1 Physical and chemical properties of the compost materials

堆置原料	有机碳 TOC /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN /(g·kg <sup>-1</sup> )	含水率 ω/%	C /N
鲜酒糟	508.6±2.1	39.6±0.7	56	12.8

1.2 实验堆置方案与采样方法

本实验采用人工堆积自然通风的方法,让物料充分混合均匀后堆置成锥形堆,总重量为 150 kg.堆置期间每天下午 3 点测定堆体 4 个腰部温度.每 3 d 人工翻堆一次,翻拌均匀后采样,样品总量控制在 500 g 左右,其中鲜样 300 g 用塑料封口袋 4 ℃ 保存,用于氮素、pH 的测定及水浸提液的提取,测定前取出恢复至室温.其余 200 g 风干、粉碎后过 1 mm 筛贮存备用.

1.3 测定指标与方法

温度采用温度计测定;pH 值测定:取混合后

收稿日期:2014-05-10;修订日期:2014-07-29

作者简介:郭夏丽(1966-),女,河南新乡人,郑州大学副教授,博士,主要从事环境微生物研究,E-mail:guoxl@zzu.edu.cn.

的样品,用去离子水,按样品和水 1:10(w/v) 浸提 30 min 用 pH 计测定浸提液的 pH 值;凯氏氮用凯氏定氮法测定;水溶性氨态氮:样品经 2 mol/L KCl 溶液浸提之后用纳氏试剂比色法测定(GB7479—87《水质铵的测定—纳氏试剂比色法》);硝态氮用紫外分光光度法测定(NY/T 1116—2006);种子发芽指数(GI)用 28 ℃ 培养法测定.总氮等于凯氏氮加硝态氮,有机氮等于凯氏氮减去氨态氮.

2 结果与讨论

2.1 堆体温度和 pH 的变化

堆肥过程中温度的变化反映了堆体内微生物活性的变化,是使堆肥达到无害化和稳定化的重要条件<sup>[8]</sup>,由图 1 可知在整个堆肥周期中环境温度变化范围为 28~35.5 ℃,堆体的温度在前两天有所降低,是由于酒糟在储存时温度较高,在堆肥前期微生物活动弱,产生的热量没有往外界传递的热量多的缘故,但随着微生物的大量繁殖,其温度从第 4、5 d 开始迅速升高.堆体温度在第 7 d 温度已经达到 50 ℃,在第 13 d 达到最高值,为 60.5 ℃,50 ℃ 和 55 ℃ 以上分别持续 10 d 和 7 d,达到了堆肥无害化处理的卫生指标.15 d 以后堆体开始降温,进入后腐熟期.

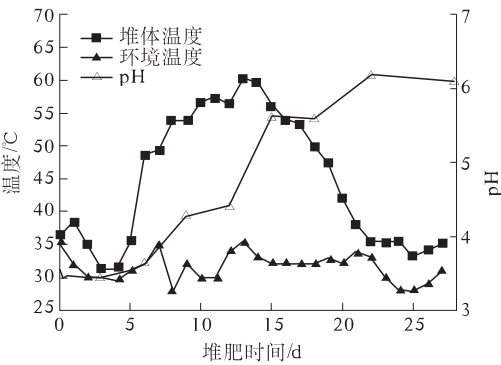


图 1 堆肥周期中温度和 pH 的变化

Fig.1 Variation of temperature and pH during composting

鲜酒糟的酸性较大,在堆肥初始阶段 pH 为 3.5,随着堆肥的进行,堆体 pH 随着温度的升高而逐渐增大,这是因为白酒糟中氮含量较高,其氮元素大部分以蛋白质等有机氮形态存在,在微生物作用下有机氮转化为氨态氮,氨态氮溶于水呈碱性,使 pH 逐渐升高.在第 22 d 堆体 pH 升到 6.2,在堆肥后期,pH 维持在 6.1~6.2 之间.也达到了有机肥腐熟时 pH 的指标(5.5~8.0).

2.2 堆肥周期中氮素转化

堆肥化过程中的氮素转化作用主要包括氧化作用、硝化作用、反硝化作用以及固氮作用.堆肥原材料中的含氮有机物首先在氨化微生物的作用下产生氨态氮.产生的氨态氮一部分供微生物自身生长利用,一部分在硝化微生物的作用下被转化为硝酸盐,另一部分氨态氮在高温的堆肥环境下会以 NH<sub>3</sub> 的形式挥发掉.硝化作用产生的硝酸盐在堆肥缺氧的条件下,又会在反硝化微生物的作用下还原为分子态氮或一氧化氮.在堆肥压过程中还伴随着生物固氮作用,其是指空气中的分子态氮在固氮微生物的作用下还原成氨和其他含氮化合物的过程.

2.2.1 堆肥周期中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 含量的变化

堆肥周期中氨态氮含量如图 2 所示,在整个堆肥周期中,堆体初始 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量为 0.75 g/kg,堆体中的峰值出现在第 18 d,其峰值为 2.5 g/kg.至堆肥结束,堆体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量为 1.4 g/kg,比初始含量升高了 82.0%.堆体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量呈现先升后降的趋势,这是由于堆肥初期微生物活动促使有机氮分解产生了 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N,而高温期过后,堆体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量因为微生物的氧化作用、氨挥发以及硝化作用而逐渐减低,标志着堆肥的逐渐腐熟,这与赵建荣等<sup>[9]</sup>研究结果类似.

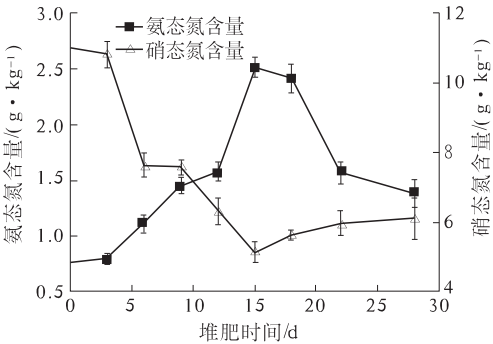


图 2 堆肥周期中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 的变化

Fig.2 Ammonia-N content and Nitrate-N content variation during composting

堆肥周期中硝态氮含量的变化也如图 2 所示,堆体中硝态氮含量变化趋势与氨态氮呈负相关,呈先降后升的趋势.堆体中硝态氮初始含量为 11.0 g/kg,比氨态氮初始含量高. Díaz<sup>[10]</sup> 等认为,初期阶段酒糟的硝态氮含量较高主要是由于底物酒糟原料的特殊性,在存储时氮素矿化作用所致.各堆体在 2~15 d 为中高温期,此阶段硝态氮有



所降低,一方面是因为微生物的大量繁殖,利用硝态氮合成自身所需物质,另一方面是因为高温抑制了硝化作用<sup>[11]</sup>.到堆肥后期,堆体温度降低,通透性变好,硝化微生物大量生长,硝化作用强烈,堆体中前中期产生的大量氨态氮在硝化微生物作用下,经氧化转化为硝态氮,硝态氮含量逐渐升高,也标志着堆肥的逐渐腐熟.至堆肥结束,堆体中硝态氮含量为 6.1 g/kg.其含量比堆肥初始含量低 44.5%.

### 2.2.2 堆肥周期有机氮含量的变化

堆肥周期中有机氮的变化如图 3 所示.其初始含量为 29.4 g/kg,在第 6 d 时降至 25.8 g/kg.随后有机氮含量随着堆肥的进行而逐渐升高,至堆肥结束,有机氮含量为 34.5 g/kg,比初始含量高 17.3%.堆体中有机氮呈先下降后上升的趋势,可能是由于堆肥的初始阶段,有机氮在微生物作用下分解为无机氮源<sup>[12]</sup>,导致有机氮含量下降,而堆肥后期,由于微生物的大量繁殖,部分无机氮又转化为其自身所需物质而致使有机氮含量上升.

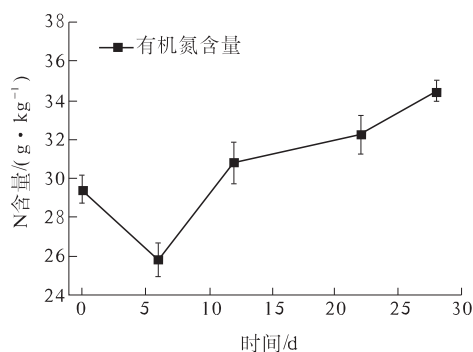


图 3 堆肥周期中有机氮含量的变化

Fig. 3 Org-N content variation during composting

### 2.2.3 堆肥周期总氮含量的变化及氮素损失

堆肥周期中总氮含量的变化如图 4 所示,堆肥过程中总氮含量变化也呈先升后降的趋势,这与有机氮含量变化相关.堆肥初始总氮含量为 41.2 g/kg,第 6 d 时降至 34.6 g/kg,随后逐渐上升,至堆肥结束,总氮含量为 42.0 g/kg,比初期含量高 0.8 g/kg,提升幅度为 1.9%.在堆肥后期有机氮和总氮含量均逐渐升高,一方面可能是由于无机氮被转化为有机氮,被同化固定下来的缘故,而有机氮又是总氮的主要组成部分,另一方面可能是由于堆肥后期有机氮、总氮随着堆体质量和体积的变化其含量被浓缩,表现为有机氮和总氮浓度提高,这与贾程<sup>[13]</sup>的研究结果一致.

由图 4 可以看出,随着堆肥的进行,氮素损失

率在不断增加,说明整个堆肥阶段均存在氮素损失,但各个阶段损失量有所不同.整个堆肥周期中氮素损失率为 23.7%,在第 12 d 氮素损失率已经达到了 20.3%,为总损失率的 85.7%.氮损失主要是集中在前中期,这是由于堆肥的前中期堆体已经处于高温期,微生物大量繁殖,而此时堆体含水率高,容重大,堆体的溶氧低,局部处于厌氧状态,致使氮素部分以  $\text{NH}_3$  形式挥发掉.笔者研究中氮素损失率相对较低仅为 23.7%,而杨延梅<sup>[14]</sup>等用厨余垃圾堆肥总氮损失率为 50.0%,姜继韶<sup>[15]</sup>等用猪粪秸秆堆肥过程中总氮损失率为 40.2%,这可能是由于酒糟的酸性特点,在前中期抑制了  $\text{NH}_3$  的挥发,减少了氮损失的缘故,这说明利用白酒糟为材料进行堆肥化处理具有优越性.

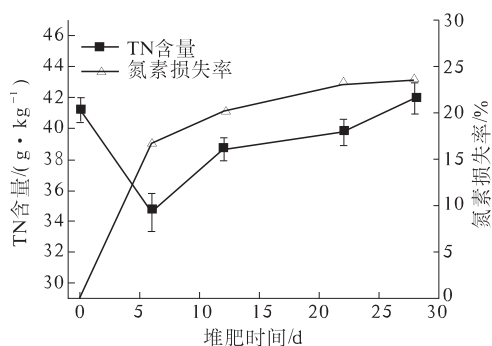


图 4 堆肥周期中总氮含量和损失率的变化

Fig. 4 TN content and nitrogen loss rate variation during composting

### 2.3 堆肥过程中发芽指数 GI 的变化

种子发芽指数是判断有机肥腐熟重要参数之一,未腐熟的堆肥对植物的健康生长产生抑制作用,国内外许多学者认为种子发芽指数的变化体现了堆肥腐熟程度的变化. Zucconi 等<sup>[16]</sup>最初认为,当  $\text{GI} > 50\%$  时,说明堆肥已腐熟并达到了可接受的程度,即基本没有毒性.但随着堆肥毒性相关研究的开展,包括 Zucconi 在内的众多学者普遍认为,当  $\text{GI}$  达到  $80\% \sim 85\%$  时,可以认为堆肥没有植物毒性或堆肥已腐熟.本研究中种子的发芽指数情况如图 5 所示.

由图可知,随着堆肥的进行,堆体的种子发芽指数逐步上升.到堆肥中期,发芽指数有所降低,可能是由于中期大量产生的  $\text{NH}_3$  和小分子有机酸抑制了种子发芽<sup>[17]</sup>的缘故.在堆肥第 22 d,堆体的  $\text{GI}$  值已经达到了 85.3%,堆体已经基本腐熟.至堆肥结束,堆体的种子发芽指数达到了 90.4%,堆体已完全达到了腐熟的条件.结合堆肥过



程中温度和 pH 的变化,可以断定在敞开式自然通风、每 3 d 翻一次堆的条件下,堆体经过 22 d 已经基本腐熟.

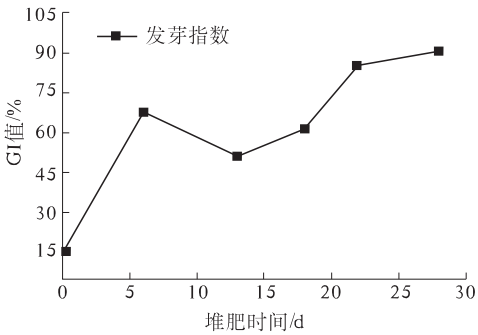


图 5 堆肥周期中 GI 的变化  
Fig.5 Change of GI during composting

3 结论

(1)堆体温度在第 7 d 达到 50 ℃,50 ℃ 以上持续 10 d,55 ℃ 以上持续 7 d,达到了高温堆肥无害化处理的卫生指标.至堆肥结束,堆体 pH 达到了 6.2,符合有机肥国标(5.5~8.0).

(2)在堆肥过程中,堆体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 含量呈先上升后下降的趋势,至堆肥结束,含量较初始升高了 82.0%. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>—N 含量变化趋势与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>—N 相反,至堆肥结束,含量较初期降低了 44.5%. 有机氮和总氮含量变化趋势一致,均呈先降低后升高的趋势,至堆肥结束,有机氮和总氮含量分别升高了 17.1% 和 1.9%. 整个堆肥周期中氮素损失率为 23.7%,在 0~12 d 中高温期间氮素损失率达到 20.3%,为总损失率的 85.7%.

(3)在堆肥第 22 d,堆体的 GI 值已经达到了 85.3%,堆体已经基本腐熟.至堆肥结束,堆体的种子发芽指数达到了 90.4%,堆体已经完全达到了腐熟的条件.结合堆肥过程中温度和 pH 的变化,可以断定在敞开式自然通风、每 3 天翻一次堆的条件下,堆体经过 22 d 已基本腐熟.

参考文献:

[1] 黄亚东,邵虎. 酒糟-麦秆型生物有机肥的堆制及其应用研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(36): 17923-17925.

[2] WANG Ze, REN Peng, LIN Wei-gang, et al. Composition of the liquid product by pyrolysis of dried distiller's grains with solubles[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2012,98:242-246.

[3] 汪善锋,陈安国. 白酒糟资源的开发利用途径[J]. 饲料工业, 2003, 24(5):43-46.

[4] 施安辉. 国内白酒工业固体酒糟环保生态化利用的现状 & 前景[J]. 中国酿造, 2006(3):4-7.

[5] OCTAVIO C, CIRILO N H, DULCE M, et al. Treatment of vinasse from tequila production using polyglutamic acid[J]. Journal of Environmental Management, 2012,95:66-70.

[6] 袁颀,邱树毅,彭正东,等. 固态白酒生产酒糟的资源化利用研究进展[J]. 酿酒科技, 2012, 215(5):88-91.

[7] 杨锦凤. 有机固体废物堆肥化及有机肥的特点[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(2):56-59.

[8] 柴晓利,张华,赵由才. 固体废物堆肥原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:83-84.

[9] 赵建荣,高德才,汪建飞,等. 不同 C/N 下鸡粪麦秸高温堆肥腐熟过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5):1014-1020.

[10] DÍAZ M J, MADEJÓN E, LÓPEZ F, et al. Composting of vinasse and cotton gin waste by using two different systems[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 34(4):235-248.

[11] 刘学玲. 猪粪高温堆肥中氮转化复合微生物菌剂及其保氮机理研究[D]. 西安:西北农林科技大学资源环境学院, 2012.

[12] ILLMER P, SCHINNER F. Compost turning-a central factor for a rapid and high-quality degradation in household composting[J]. Bioresource Technology, 1997, 59(11):157-162.

[13] 贾程,张增强,张永涛. 污泥堆肥过程中氮素形态的变化[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11):2269-2276.

[14] 杨延梅,张相锋,杨志峰,等. 厨余好氧堆肥中的氮素转化与氮素损失研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12):54-56.

[15] 姜继韶,黄懿梅,黄华,等. 猪粪秸秆高温堆肥过程中碳氮转化特征与堆肥周期探讨[J]. 环境科学学报, 2011, 31(11):2511-2517.

[16] ZUCCONI F, FOREM M A. Biological evaluation of compost maturity[J]. Biocycle, 1981,22:27-29.

[17] 席晓黎. 污泥基炭的重金属吸附性能及其对污泥堆肥的影响[D]. 郑州:郑州大学化工与能源学院, 2013.

(下转第 123 页)

文章编号:1671-6833(2014)05-0120-04

# 1,4-丁二醇-二乙二醇二元物系真空下气液平衡研究

陈卫航<sup>1</sup>, 李清亚<sup>1</sup>, 蒋元力<sup>2</sup>, 孙书培<sup>1</sup>, 张晓明<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南煤化集团, 河南 郑州 450046)

**摘 要:** 煤制乙二醇过程中产生的副产物 1,4-丁二醇和二乙二醇对获得高纯度的乙二醇有着重要影响. 采用真空精馏方法分离提纯设计计算时, 需要 1,4-丁二醇和二乙二醇气液平衡数据. 为此在 6.67 kPa 压力下测定了 1,4-丁二醇—二乙二醇的气液相平衡数据, 并进行了热力学一致性检验, 结果表明实验数据符合热力学一致性. 分别用 WILSON 和 NRTL 模型对实验数据进行关联, 发现两个模型误差都不大, 均可满足工程设计的需要.

**关键词:** 气液平衡; 1,4-丁二醇; 二乙二醇; WILSON 模型; NRTL 模型

**中图分类号:** TQ013.1; O642.42 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.028

## 0 引言

乙二醇是一种重要的化工原料, 在聚酯纤维、润滑剂、防冻剂的生产等领域应用非常广泛<sup>[1-2]</sup>. 目前我国乙二醇的生产主要采用石油路线<sup>[3-4]</sup>. 但由于石油资源匮乏, 找到一种替代石油制取乙二醇的方法很有必要, 因此我国开发了煤制乙二醇技术. 但是在煤制乙二醇的过程中会生成乙二醇甲醚、乙醇酸甲酯、1,4-丁二醇、1,2-丁二醇和二乙二醇等副产物, 为了获得高纯度的乙二醇并回收含量较高的二乙二醇, 需要采用真空精馏进行分离. 为进行精馏工艺的放大设计, 需要该多元体系的气液平衡数据, 经检索发现该体系的气液平衡数据未见报道, 而直接测定多元体系的气液平衡数据较为困难. 为此希望测定相关二元体系的气液平衡数据, 然后拟合得到 WILSON 和 NRTL 方程参数, 进而计算该多元体系的气液平衡关系. 作者已完成 1,2-丁二醇-乙二醇的气液平衡数据测定<sup>[5]</sup> 和乙二醇甲醚-乙醇酸甲酯二元体系气液平衡<sup>[6]</sup>. 本文拟在 6.67 kPa 下测定 1,4-丁二醇-二乙二醇二元物系的气液平衡数据, 为相关物质分离提纯的工艺设计提供基础数据.

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂

1,4-丁二醇: 分析纯, 质量分数  $\geq 99.5\%$ , 天津光复精细化工研究所. 二乙二醇: 分析纯, 质量分数  $\geq 99.5\%$ , 天津市化学试剂二厂.

### 1.2 实验装置

改进的 Rose 气液平衡釜(已校验<sup>[7]</sup>); DYM-1 型动槽式水银气压计; 真空泵; U 型管水银压差计; 0~50℃ 和 100~150℃ 精密温度计各一支, 在使用前进行刻度校正、零点校正及露颈校正; GC2010plus 气相色谱仪, 岛津公司.

### 1.3 实验方法

配置不同摩尔浓度的 1,4-丁二醇-二乙二醇的混合物, 把混合物加入到平衡釜中, 打开冷凝水, 在 6.67 kPa 下缓慢加热, 调节伴热电压到合适大小, 当液体沸腾时开始回流, 当平衡釜中温度稳定 2~3 h 后, 气液两相处于平衡状态, 分别取气液两相的样品.

## 2 结果讨论

### 2.1 气液平衡数据及热力学一致性检验

在低压下, 可以把气相看为理想气体, 气液平衡关系式可以简化为式(1)

$$py_i = p_i^s \gamma_i x_i, \quad (1)$$

收稿日期: 2014-05-13; 修订日期: 2014-07-16

基金项目: 河南省重大科技专项资助项目(豫科计[2011]6号)

作者简介: 陈卫航(1957-), 女, 湖南湘潭人, 郑州大学教授, 主要从事化学分离工程研究, E-mail: cwh295@126.com.

式中: $P$  为系统压力; $x_i$ 为液相摩尔分数; $y_i$ 为气相摩尔分数; $p_i^s$ 为纯物质的饱和蒸气压; $\gamma_i$ 为活度系数;1,4-丁二醇和二乙二醇的饱和蒸气压可以用安托因方程<sup>[8]</sup>式(2)和式(3)来计算

$$\lg P = 22.455 - \frac{4\,202.3}{T} - 4.201\,5 \lg T - 7.45 \times 10^{-10} \times T + 6.18 \times 10^{-7} T^2,$$

$$\lg P = 7.636\,7 - \frac{1\,939.4}{(T + 162.7)}.$$

(2)

(3)

经过计算实验数据见表 1,以  $x_1$  为  $x$  轴, $\ln(\gamma_1/\gamma_2)$  为  $y$  轴作图,如图 1 所示.

令

$$\left\{ \begin{aligned} D &= 100 \times \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \right|; \\ J &= 150 \times \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\min}} \end{aligned} \right.$$

(4)

式中: $S_1$  是图中曲线和坐标轴所围面积的上部分; $S_2$ 为所围面积的下部分; $T_{\max}$ 和  $T_{\min}$ 分别是体系测定的最高沸点和最低沸点.一般的,如果  $D - J < 10$ ,就认为通过热力学一致性检验数据是可靠的.经过计算得到  $D = 11.54$ ,  $J = 3.16$ ,  $D - J = 8.38 < 10$ ,所测数据通过热力学一致性检验.

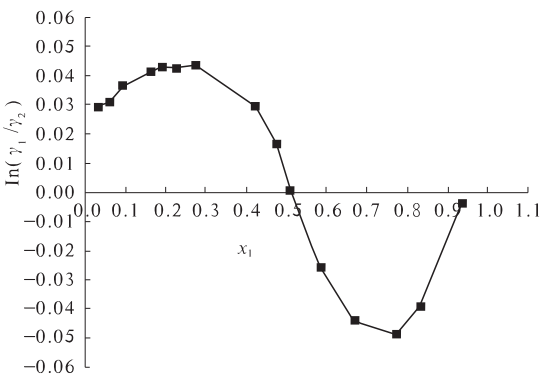


图 1  $\ln(\gamma_1/\gamma_2) - x_1$  曲线图  
Fig 1 Diagram of  $\ln(\gamma_1/\gamma_2) - x_1$

2.2 实验数据模型关联

选用目标函数为

$$F = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{T_i^{\text{cal}} - T_i^{\text{exp}}}{\sigma^T} \right)^2 + \left( \frac{y_i^{\text{cal}} - y_i^{\text{exp}}}{\sigma^y} \right)^2 \right],$$

(5)

式中: $T^{\text{exp}}$ 和  $y_i^{\text{exp}}$ 为实验值; $T^{\text{cal}}$ 和  $y_i^{\text{cal}}$ 为模型计算值; $n$ 为实验点数; $\sigma^T$ 和  $\sigma^y$ 分别为温度和气相组成的标准偏差.

用牛顿迭代法对所测得的数据用使用广泛的 WILSON<sup>[9]</sup>和 NRTL<sup>[10]</sup>模型进行关联,先用 WILSON 和 NRTL 方程求出活度系数然后迭代得到液相组成对应的气相组成,关联结果如表 1.

表 1 6.67 kPa 压力下 1,4-丁二醇-二乙二醇二元体系气液平衡数据及拟合结果  
Tab. 1 The VLE data and fitting results of 1,4-Butylene glycol(1)-Diethylene glycol(2) binary system under 6.67 kPa pressure

T/K	$x_{1\text{exp}}$	$y_{1\text{exp}}$	$\gamma_1$	$\gamma_2$	WILSON 模型		NRTL 模型	
					$y_{1\text{cal}}$	$ \Delta y_1 $	$y_{1\text{cal}}$	$ \Delta y_1 $
437.69	0.000 0	0.000 0	—	0.974 5	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
437.28	0.037 8	0.055 9	1.002 4	0.972 9	0.053 9	0.002 0	0.054 2	0.001 7
436.97	0.059 9	0.087 7	1.005 4	0.974 7	0.084 5	0.003 2	0.084 8	0.002 9
436.24	0.095 2	0.137 6	1.023 5	0.986 9	0.131 8	0.005 8	0.132 2	0.005 4
434.89	0.163 6	0.229 6	1.052 8	1.009 9	0.219 5	0.010 1	0.219 6	0.010 0
434.50	0.192 5	0.266 7	1.056 7	1.012 2	0.255 0	0.011 7	0.255 0	0.011 7
433.88	0.229 4	0.312 3	1.066 4	1.021 4	0.299 3	0.013 0	0.299 0	0.013 3
433.57	0.275 2	0.366 9	1.058 2	1.013 0	0.352 5	0.014 4	0.351 9	0.015 0
432.45	0.422 8	0.524 3	1.032 9	1.002 7	0.512 5	0.011 8	0.511 4	0.012 9
432.13	0.473 8	0.572 2	1.020 1	1.003 0	0.564 0	0.008 2	0.562 9	0.009 3
431.72	0.508 6	0.602 1	1.017 9	1.016 8	0.598 2	0.003 9	0.597 1	0.005 0
431.21	0.582 1	0.665 3	1.004 9	1.030 8	0.667 6	0.002 3	0.666 7	0.001 4
430.60	0.666 0	0.735 9	0.997 7	1.042 6	0.742 7	0.006 8	0.742 2	0.006 3
430.07	0.772 1	0.824 9	0.987 1	1.036 5	0.831 4	0.006 5	0.831 5	0.006 6
429.87	0.829 1	0.872 0	0.980 3	1.019 4	0.876 3	0.004 3	0.876 6	0.004 6
429.15	0.933 5	0.953 3	0.982 4	0.986 4	0.953 8	0.000 5	0.954 1	0.000 8
428.67	1.000 0	1.000 0	0.982 7	—	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0

注:  $\Delta y_1 = y_{1\text{cal}} - y_{1\text{exp}}$ .

当用 WILSON 方程时,对 1,4-丁二醇气组成的实验值和模拟值进行比较发现,最大的绝对误差为 0.014 4,平均误差为 0.007 0. WILSON 方程的二元交互作用参数  $a_{12}$  为  $-1.510\ 2$ 、 $a_{21}$  为  $-1.487\ 3$ 、 $b_{12}$  为  $761.937\ 3$ 、 $b_{21}$  为  $525.291\ 5$ ;当用 NRTL 方程时最大的绝对误差为 0.015 0,平均误差为 0.007 1. NRTL 方程的二元交互作用参数  $a_{12}$  为  $1.854\ 0$ 、 $a_{21}$  为  $1.450\ 7$ 、 $b_{12}$  为  $-633.302\ 6$ 、 $b_{21}$  为  $-783.279\ 5$ 、 $\alpha$  为 0.3.

由以上关联结果发现,对于 1,4-丁二醇和二乙二醇体系 WILSON 模型和 NRTL 模型进行关联的偏差都比较小,均可用于本物系气液平衡数据的关联,均可以满足分离设计的要求.

### 2.3 气液平衡相图

由气液平衡数据作气液平衡相图  $y$ - $x$  图和  $T$ - $y$ - $x$  图如图 2 和图 3 所示:

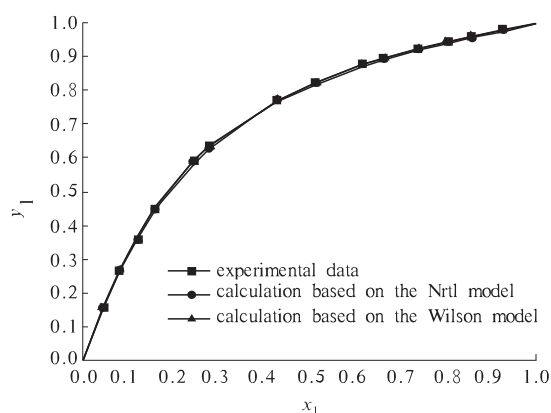


图 2 1,4-丁二醇(1)-二乙二醇(2)的  $y_1$ - $x_1$  图

Fig. 2  $y_1$ - $x_1$  diagram of the 1,4-Butylene glycol(1) - Diethylene glycol(2)

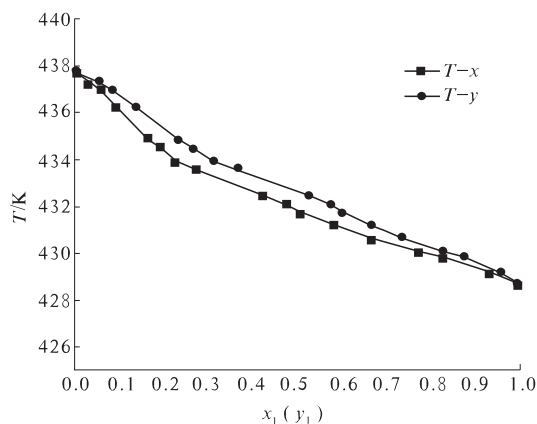


图 3 1,4-丁二醇(1)-二乙二醇(2)的  $T$ - $y_1$ - $x_1$  图

Fig. 3  $T$ - $y_1$ - $x_1$  diagram of the 1,4-Butylene glycol(1) - Diethylene glycol(2)

## 3 结论

(1)实验测定了 6.67 kPa 下 1,4-丁二醇-二乙二醇二元物系的气液平衡数据,经热力学一致性检验,所得数据通过热力学一致性检验.

(2)所测数据用 WILSON 和 NRTL 方程进行关联,求出了 WILSON 和 NRTL 模型进行关联时液相组成对应的气相组成与实验值的差值,并给出了两个方程的二元交互作用参数.结果表明计算值与实验值之间的偏差较小,可以满足工程上分离设计的要求.

## 参考文献:

- [1] 江镇海. 国内外合成气制乙二醇技术进展[J]. 合成技术及应用, 2010, 25(4): 27-30.
- [2] DREISEITLOVÁJ, REHÁK K, MORÁVEK P. Liquid-liquid equilibrium in ternary systems containing ethylene glycol, monofunctional benzene derivative, and ethyl acetate[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2011, 56(5): 1899-1902.
- [3] 杨志剑, 任楠, 唐颐. 环氧乙烷催化水合制备乙二醇的研究进展[J]. 石油化工, 2010, 39(5): 562-569.
- [4] PANG Ji-feng, ZHENG Ming-yuan, WANG Ai-qin, et al. Catalytic hydrogenation of corn stalk to ethylene glycol and 1,2-propylene glycol[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(11): 6601-6608.
- [5] 陈军航, 陈卫航, 蒋元力. 真空下 1,2-丁二醇-乙二醇二元体系气液平衡数据的测定及关联[J]. 天然气化工, 2013, 38(4): 55-59.
- [6] 陈卫航, 周辉, 蒋元力, 等. 真空下乙二醇甲醚-乙醇酸甲酯二元体系气液平衡研究[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2013, 34(2): 11-14.
- [7] WANG Xun-qiu, ZHUANG Xin-liang, CHEN Jing-bo, et al. Study on the vapor-liquid equilibrium for cyclohexene-cyclohexanone binary system under normal atmospheric pressure [J]. J Chem Eng of Chinese Univ, 2011, 25(2): 183-186.
- [8] YAWS C L. Chemical properties handbook: physical, thermodynamic, environmental, transport, safety, and health related properties for organic and inorganic chemicals[M]. 北京: 世界图书出版公司, 1999.
- [9] WILSON G M. Vapor-liquid equilibrium: XI. a new expression for the excess free energy of mixing[J]. J. Am. Chem. Soc, 1964, 86(2): 127-130.
- [10] RENON H, PRAUSNITZ J M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures [J]. AIChE J, 1968, 14(1): 135-144.

Study on Isobaric Vapor-Liquid Equilibrium for  
the Binary System 1,4-Butylene glycol- Diethylene Glycol under Vacuum

CHEN Wei-hang<sup>1</sup>, LI Qing-ya<sup>1</sup>,JIANG Yuan-li<sup>2</sup>, SUN Shu-pei<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-ming<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Coal Chemical Industry Group Co. Ltd, Zhengzhou 450046, China)

**Abstract:** Large amount of byproducts (1,4-Butylene glycol and Diethylene glycol) are generated in the process of coal glycol. The basic data were inadequate for separation and purification process design. We used only vapor phase circulation method to measure vapor-liquid equilibrium values of 1,4-Butylene glycol and Diethylene glycol at 6.67KPa. Thermodynamic consistency test was conducted with area test method, and the experimental data of the binary system measured in our work passed the test. WILSON and NRTL activity coefficient models were respectively applied to correlate the experimental data. The results showed that these two models both had very small deviation from the experimental results, which can meet the separation requirements of the process.

**Key words:** vapor-liquid equilibrium; 1,4-butylene glycol; diethylene glycol; WILSON model; NRTL model

(上接第 119 页)

Study of Nitrogen Transformation and Composting Period in High  
Temperature Aerobic Composting of Vinasse

GUO Xia-li, WANG Xing-sheng, ZHU Zheng-wei, WANG Yan

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to study the nitrogen transformation and composting period in high temperature aerobic composting of vinasse, an experiment was carried out on the condition of an open environment and natural ventilation, which is expected to provide scientific basis and technical guidance for vinasse resource utilization. results showed that: in the 28-day process of composting, temperature reached 50 ℃ on the seventh day, the temperature above 50 ℃ lasted 10 days; the content of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  offered upgrade firstly and then descending latter tendency. Until the end of composting, the content of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  increased by 82.0%. The content tendency of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  was contrary to  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  content was reduced by 44.5% compared with the initial stage. The content of Org-N and TN had the same variation trend, offered upgrade firstly and then descending latter tendency. Until the end of composting, the contents of Org-N and TN were 17.1% and 1.9% higher than initial stage respectively. On the 28th day, germination index reached 90.4%, compost maturity fully met the requirements. In consideration of the change of temperature and pH in the process of composting, it can be concluded that the period of vinasse compost is 22 days on the condition of open environment, natural ventilation and once artificial turning every 3 days.

**Key words:** vinasse; compost; nitrogen transformation; compost maturity

文章编号:1671-6833(2014)05-0124-05

# 地温空调井布局方式对地下水流场和温度场的影响分析

窦明<sup>1</sup>, 张彦<sup>1</sup>, 米庆彬<sup>1</sup>, 任辉<sup>2</sup>, 邓元玲<sup>2</sup>, 张华云<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 安阳市水利局, 河南 安阳 455000)

**摘要:**作为一种新能源利用技术,地温空调系统近年来得到了快速发展和应用,然而其大规模的开发利用容易造成局部地下水系统动态平衡被打破,并由此引发一系列的负面影响.为了评估不同布局方式对地下水造成的影响程度,笔者以安阳市某地温空调井为研究对象,建立了地下水数值模型,在地下水地温空调井“1抽1回”、“1抽2回”和“2抽3回”三种布局方式下,对地温空调系统运行后的地下水流场和温度场进行了模拟计算分析.模拟结果表明,抽水井与回灌井的合理配比和布局对地下水流场和温度场有较大的影响,1抽2回的布局方式是最适合该地区的布局方式.

**关键词:**地温空调;布局方式;地下水流场;温度场

**中图分类号:** P641.5<sup>+</sup>5

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.029

## 0 引言

地温空调系统是一种利用地下浅层地热资源,既可供热又可制冷的高效节能空调系统.通过建造抽水井将地下水抽出,经提取热量或释放热量后,再由回灌井回灌入地下.王慧玲对地下水源热泵系统的地下水流场和温度场进行模拟计算分析,得到不同抽回灌模式下的地下水流场和温度场的演化规律<sup>[1]</sup>;付志敏等通过对地源热泵工程含水介质水-热耦合运移进行模拟,得到最合理的井距、抽注水轴线与地下水流的角度及抽注层面选择等方案<sup>[2]</sup>;杨武成等通过采用不同变量对合理井距进行模拟研究,得到温度场的变化范围受井距和抽回灌量影响明显并呈一定的规律性<sup>[3]</sup>;田良河通过对不同的布井方案分析,得到选择直线型布井,抽回灌井连线平行于天然水力坡度方向,且天然水力坡度由抽水井指向回灌井的方式效果最好<sup>[4]</sup>;刘立才等运用数值法求得地温空调系统运行过程中地下水的温度变化,并用定量化的手段科学评价了场地抽回灌井的布局及其可行性<sup>[5]</sup>;胡继华等利用含水层储能的一般特点,分析了流贯通和热贯通并建立地下水流动和热量运输的耦合数值模型<sup>[6]</sup>;于林弘通过模拟三

种不同抽回灌方式下,不同井距的抽回灌井布置方案,得到随着抽回灌井井距的增加,抽水井温度受热贯通现象的影响越来越弱<sup>[7]</sup>;赵立杰等通过抽水及回灌试验所获成果计算含水层的渗透系数及回灌渗透系数,并求得合理的布井方案<sup>[8]</sup>.以上研究虽然从不同的视角对抽回灌井布局、地下水流场和温度场方面作了详细的分析,但受地下水问题复杂性的影响,均有一定的适用条件和局限性.为了研究地温空调井布局方式对地下水系统的影响,以安阳市地区作为研究对象,采用 MODFLOW,通过设置不同的布局方式情景,对地下水流场和温度场的演化规律进行模拟分析,其结果在地温空调井布局方式方面对今后安阳市地温空调系统的发展提供了依据.

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

安阳市处于太行山脉与华北平原交界的过渡地带,地势总趋势是西高东低,自西向东呈阶梯状下降,大致以京广铁路为界.西部为山丘区,兼有小型盆地,由于山丘区断裂、沟谷、溶蚀裂隙和小型溶洞十分发育,山间盆地较平坦,因此有利于降水和地表水对地下水的入渗补给,地下水与地表

收稿日期:2014-06-11;修订日期:2014-08-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1304509);河南省高校科技创新团队支持计划资助项目(13IRTSTHN030)

作者简介:窦明(1975-),男,山东桓台人,郑州大学教授,博士,主要从事水资源与水环境研究,E-mail:dou\_ming@

163.com.

水相互转化密切. 东部为冲积平原,平原区广泛分布着承压水,承压含水层主要由砂砾石与中粗砂层组成,隔水顶、底板多由粉质黏土组成,且连续性较差,含水层产状复杂;主要是接受垂向补给和侧向径流补给,人工开采是该层地下水排泄的主要方式.

安阳市地温资源丰富,目前安阳市市区内的地温空调开发规模大概有 127.4 万  $\text{m}^2$ ,年取水量达到了 2 001.3 万  $\text{m}^3$ ,地温空调项目有 43 个,其中抽水井有 100 眼,回水井有 171 眼. 安阳市地区的地温空调井布局方式有“1 抽 1 回”、“1 抽 3 回”、“1 抽 2 回”、“2 抽 3 回”和“3 抽 5 回”. 但由于安阳市水文地质条件的因素,其主要的布局方式为“1 抽 1 回”、“1 抽 2 回”和“2 抽 3 回”,并且其所占比例分别为 26.92%、63.46%、9.62%.

1.2 研究方法

笔者通过应用数值模拟的方法,在合理的假设条件下,地温空调抽回灌井采用不同布局方式,对研究区域地下水流场和温度场演化规律进行了模拟分析.

地下水数值模型主要是对地温空调采用不同布局方式下的地下水流场和温度场进行模拟计算,以定量推求地温空调项目的运行对地下水位及水温的影响. 在地温空调系统在运行过程中,所抽取的置换冷量(或热量)后的地下水须回灌到同一含水层,地下水流场和温度场的变化范围通常集中于抽水、回灌井附近一定区域内. 进行模拟计算时,选定以抽水、回灌井为中心的适当范围即可.

1.2.1 地下水流场模拟

模型模拟计算时,地下水流动系统可概化为:含水层为水平结构、非均质、各向异性、三维稳定流系统. 地下水运动的基本微分方程为<sup>[9-11]</sup>:

$$\begin{cases} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \omega = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \right. \\ H(x,y,z,t) = H_0(x,y,z,t), & (x,y,z) \in \Omega \\ H(x,y,z,t) = H_0(x,y,z,t), & (x,y,z) \in S \\ q_n = q\mathbf{n} = -q_b(x,y,z,t) \end{cases}$$

(1)

式中: $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$ 为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的渗透系数,  $\text{LT}^{-1}$ ;  $h$  为水头,  $L$ ;  $\omega$  为源汇项,表示单位体积含水层在单位时间流出或者流入地下水的体积,  $T^{-1}$ ;  $S_s$  为储水系数,其物理意义为含水层地下水水头降低(或者升高)一个单位时,由于含水层垂向压缩和地下水弹性膨胀从单位体积含水层释放(或者储

存进去)的水的体积;  $H_0(x,y,z,t)$  为某一已知函数;  $\Omega$  为渗流区域;  $s$  为三维区域的边界曲面;  $q$  为边界面上沿法线方向的单位面积流入量;  $\mathbf{n}$  为边界外法线的单位矢量.

1.2.2 地下水温度场模拟

模拟中假设地下水与含水层骨架的热动平衡是瞬时完成的,且忽略自然对流的影响,则热量传输数学模型可用如下方程进行描述<sup>[9-11]</sup>

$$\begin{cases} n\rho_0\beta_p\beta\frac{\partial P}{\partial t}+n\rho_0\beta_f\frac{\partial \theta}{\partial t}+\rho a_b c_f\beta\frac{\partial P}{\partial t}+n\rho c_f\frac{\partial \theta}{\partial t}-\rho_s c_s T a_b\frac{\partial P}{\partial t}+(1-n)\rho_s c_s\frac{\partial \theta}{\partial t}= \\ \Delta\cdot(nK_f+(1-n)K_s)\times I\nabla\theta+\nabla\cdot nD_H\nabla\theta-\nabla\cdot n\rho\rho_f\theta+q\rho^*c_f\theta^*,(x,y,z)\in\Omega,t\geq 0 \\ \theta(x,y,z,t)|_{z=0}=\theta_0(x,y,z), & (x,y,z)\in\Omega \\ \theta(x,y,z,t)|_{\Gamma_1}=\theta_1(x,y,z,t), & (x,y,z)\in\Gamma_1, t\geq 0 \\ q_{h,n}|_{\Gamma_2}=(q_{h,x},q_{h,y},q_{h,z}), & (x,y,z)\in\Gamma_2, t\geq 0 \end{cases}$$

(2)

式中:  $I$  为 3 阶单位矩阵;  $D_H$  为热动力弥散系数张量;  $c_s$  为孔隙介质比热容;  $c_f$  为流体比热容;  $\rho_s$  为孔隙介质密度;  $K_f$  为流体热导率;  $K_s$  为孔隙介质热导率;  $\theta_0$  为渗流区初始温度分布;  $\theta_1$  为已知温度边界的温度分布;  $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  为边界条件;  $q_{h,n}$  为热流边界流量.

1.2.3 情景设计

通过对安阳市地温空调项目调研分析,地温空调项目抽、回灌井井径的规格基本上是一致的,并且其井径的规格可以分为以下 4 种,即小于 30 cm、30 cm、60 cm 和大于 60 cm,各种井径所占比分别为 2.17%、56.53%、28.26%、13.04%. 另外,在安阳市地温空调项目中,抽回灌井井管所使用的管材一般为水泥管、混凝土管和钢管,这三种管材所占比分别为 18.61%、9.31%、72.08%.

结合以上分析,由于井径为 30 cm 和管材为钢管在安阳市地温空调项目中运用的最广泛,所以在考虑不同布局方式时将二者作为定值,不再进行设定. 另外对于钢管,其滤水管孔隙率一般为 25% 左右. 故对不同布局方式的情景设计见表 1. 依据设计出的情景,结合水文地质条件,模拟不同情景下地下水流场和温度场的演变规律.

表 1 模拟情景设置  
Tab.1 Simulation scenario settings

情景	井径/cm	孔隙率/%	布局方式
情景 1	30	25	1 抽 1 回
情景 2	30	25	1 抽 2 回
情景 3	30	25	2 抽 3 回

2 实例应用

笔者以安阳市南湾湖商务酒店地温空调工程



为例,其位于安阳市殷都区文峰大道南侧,属于地下水强富水区.地层表层多为黄土状土,地下水接受补给较慢,含水岩组主要为洹河(安阳河)冲洪积扇松散砂卵石层,位于冲洪积扇主体带的中下游,地下水自西向东流.主要含水层顶板埋深 52 m 左右,地下水埋深在 40~50 m,含水层厚度 30~40 m.含水层上部为黏性土,含水介质为砂、卵砾石,其中卵砾石成分为灰岩、石英砂岩,磨圆度较好,分选一般.

该项目工程布局的方式是 1 抽 2 回,井深 100 m 左右,井径为 30 cm,管材为钢管,出水井温度一般为 15℃,回水井温度冬夏分别为 11℃、24℃,地下水埋深为 32.5 m.由于所选的项目工程范围较小,且处在一个比较完整的水文地质单元,模拟时将其区域含水层概化为一层,假设含水层为均质各向异性.在模拟计算时,在目标区域内设置 70 m×70 m 的方形地区内设置了 1 抽 1 回、1 抽 2 回和 2 抽 3 回 3 种不同的布局方式.根据《安阳市南湾湖大酒店地温空调工程水资源论证报告》,可设定满足地温空调系统正常运转的取水量为 400 m<sup>3</sup>/d,两口回水井回灌量均为 200 m<sup>3</sup>/d;三口回水井回灌量分别为 140、140、120 m<sup>3</sup>/d.为了满足模拟计算和分析的要求,设置模拟时间分别为 48、240 和 720 h.另外,对目标区域内的监测数据进行参数率定,模型率定参数见表 2.

表 2 模型参数率定值

Tab.2 Calibrating value of parameters in the model

参数	数值	参数	数值
水平渗透系数 /(m·d <sup>-1</sup> )	350	横向弥散度/m	20
垂向渗透系数 /(m·d <sup>-1</sup> )	50	纵向弥散度/m	10
孔隙度	0.25	时间步长/d	1

2.1 对地下水流场的影响

根据以上设计抽回灌井布局方式的情景,运用地下水数值模型模拟得到研究目标区域不同情景下的地下水流场的变化过程,如图 1 所示.

由图 1 可以看出,对于同一抽回灌的布局方式,随着模拟时间增加,从抽水井中抽取的水量和回灌到含水层中的水量增加,抽、回灌井对地下水的影响范围也逐渐扩大,并且抽水井的水位降深下降的幅度有增大的趋势,回灌井的水位降深上升的幅度也有增大的趋势.如 1 抽 1 回的布局方式下,240 h 和 720 h 时抽水井点处水位降深变幅

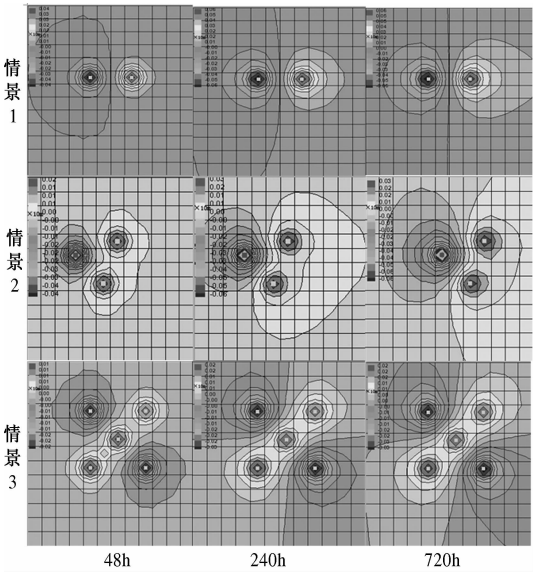


图 1 不同布局方式下地下水水位降深图

Fig.1 The figure of groundwater drawdown in different layouts

下降到了 0.6 m;240 h 和 720 h 时回灌井点处水位降深变幅上升到了 0.6 m.1 抽 2 回的布局方式下,240 h 和 720 h 时抽水井点处水位降深变幅下降到了 0.6 m;240 h 和 720 h 时回灌井点处水位降深变幅上升到了 0.3 m.2 抽 3 回的布局方式下,240 h 和 720 h 时抽水井点处水位降深变幅下降到了 0.3 m;240 h 和 720 h 时回灌井点处水位降深变幅上升到了 0.2 m.

另外,从每种布局方式下的后两张模拟图可以看出,在 1 抽 1 回和 2 抽 3 回的布局方式下,在模拟时间为 240 h 和 720 h 时,抽、回灌井周围的水位降深梯度几乎一致,同时此时抽、回灌井的影响半径变化缓慢,说明抽、回灌井之间在 240 h 左右的时候出现流贯通,形成了强迫对流.而在 1 抽 2 回的布局方式下,在模拟时间为 240 h 和 720 h 时,抽、回灌井周围的水位降深梯度变化较大,同时此时抽、回灌井的影响半径变化明显,说明抽、回灌井之间在 720 h 左右的时候还没有形成流贯通.通过对比发现,1 抽 2 回的布局方式出现流贯通的时间相对较晚.

在相同时间,不同抽回灌井布局方式下,抽、回灌井同时运行对地下水水位降深及影响半径都有相对较明显的影响.但总体来讲,地下水水位降深变化呈减小趋势,同时,由 1 抽 1 回和 1 抽 2 回的布局方式对比可以看出,增加回灌井的数量,可以缩小抽水井抽水对地下水含水层的影响范围,也可减小地下水水位降深.造成这种情况的原因是

回灌井数量的增加,增加了相同时间内回灌到含水层中的水量,使得回灌井对地下水的影响范围加大.在 1 抽 2 回和 2 抽 3 回两种布局方式下,后者抽水井、回灌井数量都多于前者,由模拟图可以看出,3 口回水井回水要满足 2 口抽水井的需求,使得回水相对分散,不能很好地回补抽水损失,导致抽水井影响范围扩大.

总体来讲,现有的 3 种布局方式,在相同井径和孔隙率条件下,1 抽 2 回的布局方式下抽水对地下水流场影响效果最小,此布局方式为最优的布局方式.

2.2 对地下水温度场的影响

根据以上设计抽回灌井布局方式的情景,运用地下水数值模型模拟得到研究目标区域不同情景下的地下水温度场的变化过程,如图 2 所示.

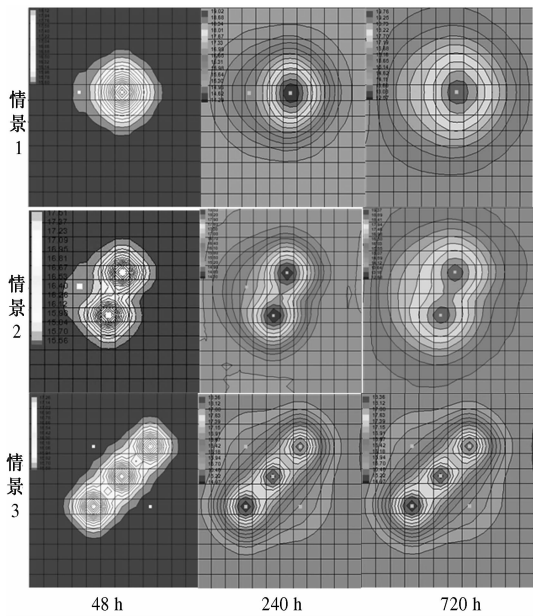


图 2 不同布局下地下水温度场变化图  
Fig.2 The figure of groundwater temperature field in different layouts

由图 2 可以看出,对于同一抽回灌井布局方式,随着模拟时间加长,从回灌井回到含水层中的水对地下水温度的影响显著增大,且时间越长,回灌井的持续运行对地下水温度的影响范围越大,温度变化越明显.尤其在 1 抽 2 回的布局方式下,每增加一段时间,其影响范围都有大幅的变化,说明此布局方式下回灌到含水层中的水量最多,回水效率最高.如 1 抽 1 回的布局方式下,48 h、240 h 和 720 h 时回灌井点处的温度分别达到了 18.12℃、19.02℃和 19.76℃;1 抽 2 回的布局方式下,48 h、240 h 和 720 h 时回灌井点处的温度分别达

到了 18.5℃、19.37℃和 19.37℃;2 抽 3 回的布局方式下,48 h、240 h 和 720 h 时回灌井点处的温度分别达到了 17.26℃、18.36℃和 18.36℃.

另外,从每种布局方式下的后两张模拟图可以看出,在 1 抽 1 回和 1 抽 2 回的布局方式下,随着模拟时间的变长,抽水井的温度影响范围变化明显,温度梯度变化比较大,说明抽、回灌井之间在 720 h 的时候还没有出现热贯通.而在 2 抽 3 回的布局方式下,抽水井的温度影响范围变化缓慢,温度梯度变化不大,说明抽、回灌井之间在 240 h 的时候已经形成热贯通.

在相同时间,不同抽回灌井布局方式下,抽、回灌井同时运行对地下水温度的变化同样有相对较明显的影响,影响的总体趋势为回水对温度的影响范围逐渐缩小,温度梯度逐渐变小.由 1 抽 1 回和 1 抽 2 回的布局方式对比可以看出,相同时间间隔下,1 抽 2 回布局方式温度场的变化程度大于 1 抽 1 回的布局方式.综合分析,1 抽 2 回的布局方式是较适宜该地区的井布局.

综合对以上三种布局方式下的地下水流场和温度场变化进行分析可以得出,抽水井与回灌井的合理配比和布局方式对地下水流场和温度场有较大的影响.增加回灌井数量,固然可以提高回灌效率,但容易形成热贯通,不利于能量的利用.因此,1 抽 2 回的布局方式相对较适合地区,这也与该地区的实际情况相符合,1 抽 2 回的布局方式占主导地位.

3 结论

(1)当井径、孔隙率一定时,对于地下水流场,在同一抽回灌井布局方式下,随着模拟时间的加长,抽水井水位降深有增大的趋势,回灌井中水位降深有反向增大的趋势;在相同的模拟时间下,增加回灌井的数量,可以缩小抽水井作业对地下水含水层的影响范围,也可减小地下水位降深.

(2)当井径、孔隙率一定时,对于地下水温度场,在同一抽回灌井布局方式下,随着模拟时间的加长,回灌井的持续运行对地下水温度的影响范围越大,温度变化越明显;在相同的模拟时间下,增加回灌井的数量,更容易形成热贯通.

(3)总体上,在井径和孔隙率设定不变的情况下,1 抽 2 回的布局方式下抽水对地下水流场影响效果最小.虽然增加回灌井个数,可以提高回灌效率,但容易形成热贯通,不利于能量的利用,故 1 抽 2 回的布局方式对于地下水温度场变化也

是最为合适的。

### 参考文献:

- [1] 王慧玲. 地源热泵系统抽回灌模式对地下水流动场和温度场的影响[J]. 水文地质工程地质, 2009(5): 133 - 137.
- [2] 付志敏, 向衍, 高西望. 井点布置对采能区地下水温度场的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31(6): 34 - 38.
- [3] 杨武成, 陈赫, 李国正. 地下水源热泵采能区水热耦合模拟研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(12): 139 - 142.
- [4] 田良河. 地下水源热泵系统布井方案分析[J]. 地质与勘探, 2013, 49(2): 367 - 372.
- [5] 刘立才, 王理许, 丁跃元, 等. 水源热泵抽灌井布局及其运行过程中地下温度变化[J]. 水文地质工程地质, 2007(6): 1 - 5.
- [6] 胡继华, 张延军, 于子望, 等. 水源热泵系统中地下水流贯通及其对温度场的影响[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2008, 38(6): 992 - 998.
- [7] 于林弘. 地下水源热泵系统抽灌井井群优化布置及试验研究[D]. 西安: 长安大学环境科学与工程学院, 2012.
- [8] 赵立杰, 陈彦群. 地温中央空调系统提水及回灌井设计方案探讨[J]. 河北地质, 2009(1): 18 - 20.
- [9] 薛禹群, 谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2007, 30 - 75.
- [10] DIERSCH H J. Computational aspects in developing an interactive 3D groundwater transport simulator using FEM and GIS[S]. Estonia: IAHS Publication, 1994: 313 - 326.
- [11] DIERSCH H J, VOIGT R. Visio metric techniques in a 3D groundwater transport code[S]. Heidelberg: Kluwer Academic Publishers, 1994: 1449 - 1456.

## Impact of Ground Temperature Air-conditioning in Different Layouts on Groundwater Flow Field and Temperature Field

DOU Ming<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, MI Qing-bin<sup>1</sup>, REN Hui<sup>2</sup>, DENG Yuan - ling<sup>2</sup>, ZHANG Hua-yun<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Water Conservancy Bureau of Anyang, Anyang 455000, China)

**Abstract:** As a new energy technology, the ground temperature air-conditioning has been the rapid development and application in recent years. However, the dynamic equilibrium of groundwater system is very easy to be broken because large-scale development and utilization, which can cause a series of negative effects. In order to assess the impact of different layouts for the groundwater, Anyang as the research object in the paper, a numerical model of groundwater is established. There are three layouts, which are 1 to 1, 1 to 2, 2 to 3 for ground temperature air-conditioning system. The simulation analysis is done for groundwater flow field and temperature field with ground temperature air-conditioning system. The simulation results show that there is a great influence for groundwater flow field and temperature field in reasonable proportion and layout of the pumping and injection wells, the most suitable layout of the region is 1 to 2.

**Key words:** ground temperature air-conditioning; layout; groundwater flow field; temperature field