

- 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



2019.3

第40卷 第3期
Vo1.40 No.3
2019年5月出版

ISSN 1671-6833



05>

9 771671 683199



郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE

编 委 会

特邀编委：

申长雨(中国科学院院士)

何季麟(中国工程院院士)

张孟杰(新西兰惠灵顿维多利亚大学)

刘炯天(中国工程院院士)

金耀初(英国萨里大学)

Kay Chen Tan (香港城市大学)

编委会主任：

邵国胜(郑州大学)

编委(按姓氏笔画为序)：

王 凌(清华大学)

王忠勇(郑州大学)

公茂果(西安电子科技大学)

叶国田(郑州大学)

刘国际(郑州大学)

刘春太(郑州大学)

许 群(郑州大学)

李 杰(同济大学)

吴泽宁(郑州大学)

张 涛(北京航空航天大学)

陈伟能(华南理工大学)

陈德良(郑州大学)

单崇新(郑州大学)

贾 瑜(郑州大学)

郭院成(郑州大学)

梁 静(郑州大学)

董 林(郑州大学)

臧双全(郑州大学)

王亚明(郑州大学)

王宗敏(中原工学院)

左其亭(郑州大学)

刘 波(中国科学院数学与系统科学研究院)

刘金盾(郑州大学)

关绍康(郑州大学)

麦立强(武汉理工大学)

李勇平(上海应用物理所)

张 冰(郑州大学)

张少军(郑州大学)

陈静波(郑州大学)

庞新厂(郑州大学)

赵明皞(郑州大学)

高丹盈(河南工程学院)

唐 珂(南方科技大学)

梁长浩(合肥物质科学院)

韩一帆(郑州大学)

潘复生(重庆大学)

目 次

智能计算

- 基于霍夫投票的变电站设备三维点云识别算法 纪 勇,刘丹丹,罗 勇,王朋帅(1)
- 融合人眼掩蔽效应和图像梯度的块效应评价方法 王 杰,王禹博,朱晓东,任向阳(7)
- 锚杆钻机转速的头脑风暴最优自抗扰控制 郭一楠,程 伟,杨 欢,杨 帆,陆希望(13)
- 基于自适应量化器选择的编码率失真优化判决算法 李娜娜,黄琨强,张秋闻,刘 宽(19)
- 干扰约束下基于用户需求的多信道频谱接入机制 穆晓敏,徐茹茹,张松伟,韩刚涛(26)
- 基于全矢稀疏编码的滚动轴承故障识别方法 郝 伟,林辉翼,郝旺身,高亚娟,董辛旻(31)
- 经济负荷分配问题中的约束处理方法研究 吴 擎,张春江,高 亮(36)

化工与材料工程

- $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸降解莲房中高聚体原花青素研究 陈卫航,张 惠,张 婕(42)
- 重金属捕集剂 TDDP 的合成及性能研究 张 翔,冯 修,职红涛,马楠楠,韩双乔(48)
- 磷酸插层氧化石墨烯强化膜质子传导特性研究 张 婕,陈 闯,周国莉,王景涛,郑梦欣(52)
- 橡胶沥青黏度影响因素及黏流特性分析 丁 湛,蒋修明,赵浚凯,栗培龙,陈 冲(57)
- 有序定构聚集态 β -iPP 薄膜的重结晶行为研究 刘忠柱,秦 琦,李睢水,郑国强,米立伟(63)

交通工程

- 陕西省连续箱梁桥底板实测竖向温度梯度研究 邬晓光,贺 攀,何启龙,冯 宇(68)
- 信号交叉口第一辆车到达分布及影响因素分析 张惠玲,杨林玉,敖谷昌(73)
- 基于 EDEM 的沥青混合料搅拌机叶片参数匹配
..... 赵利军,申 岩,邓 欣,刘本学,董 武,李 耀(79)
- 基于双侧非对称破坏模式的临坡地基极限承载力分析 蒋 洋,郭建坤,王晓谋,侯超群(85)
- 连续刚构桥单肢空心薄壁墩实心段计算长度分析 李艺林,黄叙钦,邬晓光(92)

CONTENTS

【Computational Intelligence】

- Recognition of Three-dimensional Substation Equipment Based on Hough Transform
..... **JI Yong , LIU Dandan , LUO Yong , WANG Pengshuai (1)**
- A Blocking Artifacts Evaluation Method Integrating Human Eye Masking Effect and Image Gradient
..... **WANG Jie , WANG Yubo , ZHU Xiaodong , REN Xiangyang (7)**
- An Optimal Active-disturbance-rejection Controller for the Rotary Speed of An Anchor-hole Drill Based on Brain Storm Optimization Algorithm
..... **GUO Yinan , CHENG Wei , YANG Huan , YANG Fan , LU Xiwang (13)**
- Rate Distortion Optimization Decision Algorithm of Coding Based on Adaptive Quantizer Selection
..... **LI Nana , HUANG Kunqiang , ZHANG Qiuwen , LIU Kuan (19)**
- Demand-Aware Multichannel Opportunistic Spectrum Access Mechanism under Interference Constraint
..... **MU Xiaomin , XU Ruru , ZHANG Songwei , HAN Gangtao (26)**
- Fault Recognition Method of Rolling Bearing Based on Full Vector Sparse Coding
..... **HAO Wei , LIN Huiyi , HAO Wangshen , GAO Yajuan , DONG Xinmin (31)**
- Study of Constraint Handling Methods in Economic Load Dispatch Problem
..... **WU Qing , ZHANG Chunjiang , GAO Liang (36)**

【Chemical Engineering and Material Engineering】

- Research on Degradation of High Polymer Procyanidins from the Lotus Seed Pot with $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ Solid Acid
..... **CHEN Weihang , ZHANG Hui , ZHANG Jie (42)**
- Synthesis of Heavy Metal Capturing Agent TDDP and Investigation on Its Performance
..... **ZHANG Xiang , FENG Xiu , ZHI Hongtao , MA Nannan , HAN Shuangqiao (48)**
- Investigation of Proton Conduction Enhancement of Membrane by Phosphoric Acid Intercalated Graphene Oxide
..... **ZHANG Jie , CHEN Chuang , ZHOU Guoli , WANG Jingtao , ZHENG Mengxin (52)**
- The Influencing Factors Analysis of Viscosity and Viscous Flow Properties for Rubber Asphalt
..... **DING Zhan , JIANG Xiuming , ZHAO Junkai , LI Peilong , CHEN Chong (57)**
- The Crystallization Behavior of β -iPP Film with Different Ordered Melt Structures
..... **LIU Zhongzhu , QIN Qi , LI Suishui , ZHENG Guoqiang , MI Liwei (63)**

【Traffic Engineering】

- Study on Bottom Plate Measured Vertical Temperature Gradient of Continuous Box Beam Bridge in Shaanxi Province
..... **WU Xiaoguang , HE Pan , HE Qilong , FENG Yu (68)**
- Analysis on the Arrival Distribution and Influencing Factors of the First Car Arrival at the Signalized Intersection
..... **ZHANG Huiling , YANG Linyu , AO Guchang (73)**
- Parameters Matching of Mixing Blades for Asphalt Mixture Mixer Based on EDEM
..... **ZHAO Lijun , SHEN Yan , DENG Xin , LIU Benxue , DONG Wu , LI Yao (79)**
- Analysis on Ultimate Bearing Capacity of Ground Foundation Adjacent to Slope Based on Bilateral Asymmetry Failure Mode
..... **JIANG Yang , GUO Jiankun , WANG Xiaomou , HOU Chaoqun (85)**
- Solid Sections' Calculation Length Analysis of Continuous Rigid Frame Bridge Hollow Single Thin-walled Pier
..... **LI Yilin , HUANG Xuqin , WU Xiaoguang (92)**

基于霍夫投票的变电站设备三维点云识别算法

纪勇¹, 刘丹丹², 罗勇³, 王朋帅³

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467001; 3. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采取霍夫投票法对激光扫描器获取的变电站设备三维点云数据进行匹配与识别。首先, 利用八叉树法对点云进行精简和去噪, 得到精简有效的点云数据及数字表面模型深度图像; 然后, 通过霍夫投票得到物体质心的票数, 再与模型库的距离直方图相比求相似度, 根据相似度的阈值得到初识别的结果; 最后, 在初识别的候选设备中通过霍夫投票进行识别。实际数据测试表明, 该方法可使得设备的最终识别率达到 90.1%, 单个设备的平均识别时间为 15.6 s, 并可有效避免所有元器件特征点的冗长搜索过程。同时能在点云缺失较大情况下将不同设备进行有效分类, 达到预期效果。

关键词: 三维识别; 激光点云; 霍夫投票; 八叉树

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.015

0 引言

随着 GIS 向三维领域的发展, 三维数字化变电站的研究得到了较快发展, 其中基于三维点云的目标识别是需要解决的关键问题。Stein 等^[1]提出了结构表达法, 由表面法向量的分布确定物体局部边缘以及曲面, 从而可对任意形态的物体目标进行表达。Zhang 等^[2]使用调和形状图像的方式对物体进行表达。由于实际的点云会遇到遮挡、缺失和姿态变化等情况, 直接进行目标识别无法解决以上的问题。因此, 搜寻一种对遮挡、缺失和姿态变化具有较强的鲁棒性, 同时又能够有效地通过局部特征进行三维目标整体识别的算法已成为现实需求。

霍夫变换原理是利用点与线的对偶性, 原始坐标空间的曲线表达式对应参数空间的一个点, 因此图像的特定曲线的检测问题就转化为在参数空间搜寻峰值问题^[3]。由于霍夫变换是利用全局特征, 所以受噪声和边缘数据缺失的影响比较小, 鲁棒性高。因此可以通过有效的局部特征描述和霍夫变换进行三维目标识别。

局部特征是三维识别的一个关键, Johnson

等^[4]将一个平面以特征点法向量为轴旋转, 根据周围点落在这个平面上的位置, 构造了自旋图特征。该算法对遮挡和复杂场景具有较强的鲁棒性, 但是特征维度高, 计算量大。Zhong^[5]利用球形角度空间中点的分布提出了内蕴形状特征。该特征在现实场景中获得了比自旋图特征更高的识别率, 但同一个特征点在多次特征提取试验中可能有不同的特征向量, 特征的可重复性受限。窦本君等^[6]采用基于 Alpha Shapes 的滚圆法获取边界曲率并识别目标。但对于边界凹凸变化过于明显的情况, 存在一定的局限性。Ye 等^[7]将室内三维物体的点云投影到平面, 将物体平面投影之间的相互关系作为特征, 供机器人进行目标识别。Guo 等^[8]在三个平面上求出点云的投影点, 然后获得旋转投影统计特征。三维点的“指纹(Fingerprint)”表达法被 Chen 等^[9]引入, 它是通过测地圆在切平面上投影的二维轮廓形成每一点的指纹, 测地圆的法向方差信息显示在“指纹”中, 找到指纹的对应也就找到点的对应。这两种方法对噪声和遮挡都具有较强的鲁棒性, 但特征提取过程的计算量较大、耗时长, 不能满足实际场景的识别要求。

收稿日期:2018-05-06; 修订日期:2018-07-22

基金项目:国家自然科学基金项目(61401403); 河南省重点科技攻关项目(152102210036)

作者简介:纪勇(1972—), 男, 江苏沭阳人, 西安交通大学博士研究生, 教授级高工, 主要从事电力信息化研究。

通信作者:罗勇(1977—), 男, 湖南常德人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事模式识别、自动控制和最优决策研究, E-mail: luoyong@zzu.edu.cn.

以上三维目标识别存在特征维度高、计算量大等问题,据此进行改进,首先利用距离直方图(DSM)进行预识别,然后在预识别的结果中引入局部直方图^[10]的特性进行局部特征描述,最后通过霍夫投票进行物体整体性识别.这种识别方法耗时短、特征提取过程中鲁棒性较强、计算效率高,适用于实际场景的三维目标快速识别.

1 算法流程

设备点云识别过程包括:数据预处理、获取DSM、霍夫投票、点云识别.首先,由预处理后的数据得到距离直方图和待测设备的局部描述符;然后,通过待测样本与模型库的距离直方图的相关系数进行初次筛选;最后,进行霍夫投票得到质心票数,输出识别结果.流程如图1所示,线上是对测试数据进行处理识别;线下是后台数据库存储的对比数据和模型.

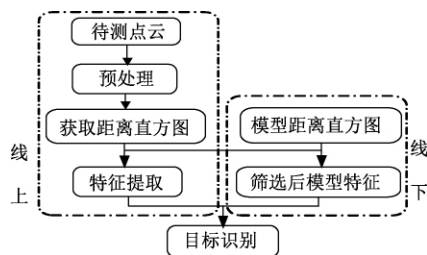


图1 算法流程图

Fig.1 The flow chart of algorithm

该算法的实施步骤为:①对待测点云进行数据预处理;②获取待测点云的距离直方图;③设定阈值,对比目标点云与模型库的距离直方图,将差别超阈值的模型舍去,得到初选结果;④根据局部点云分布得到局部描述符,再进行特征点的匹配;最后将匹配的特征点转换至全局坐标系中,进行投票;⑤若得到的票数超过阈值则直接输出识别结果,否则视为该模型库中无模型与待测点云匹配.

2 点云数据预处理

2.1 数据精简

由于变电站设备的点云数据量大、数据之间不连续、分布散乱,所以直接对数据进行识别会降低效率.笔者用线性八叉树法^[11]对变电站设备点云进行精简.数据精简的步骤如下:①根据最小立方体的边长,确定分割层数;②将点云中的每个点坐标值换成索引值,然后将索引值用二进制表示,构成点的编码值;③按照编码值排序,将编码

值一样的点存放于相同的小立方体内;④每个小立方体内,保留距离小立方体的中心点最近的点,删除其他所有的点.

图2是KV500_DS_1A_1设备点云数据精简前后的图像,其中精简前点云数为322 738,精简后为5 421.通过图2可以发现,精简后的点云变得更稀疏,而实体外形特征却未发生任何变化,说明数据精简未改变实体特征,可保证后续识别算法的正确进行.

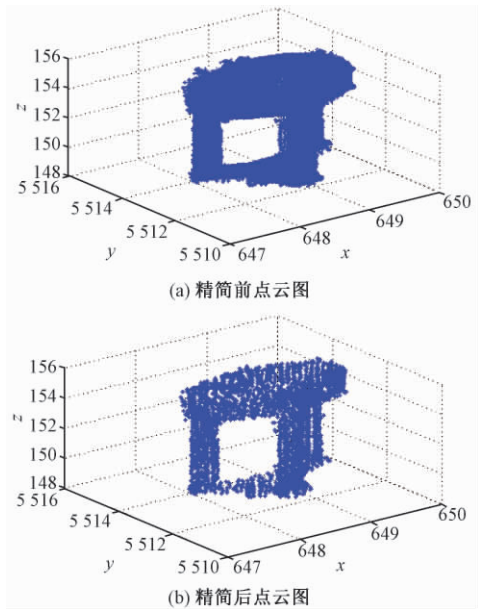


图2 点云精简对比图

Fig.2 Compared diagram of simplifying point cloud

2.2 去噪

2.2.1 去除地面点

由于激光扫描数据含有地面点数据(不是物体表面的点),在识别时应该予以去除.笔者采用高程和梯度相结合的方法将这些点去除.

首先,对设备点云进行水平投影,获得待处理区域的最大和最小坐标.然后,将其在 xoy 平面按 x 与 y 的大小进行网格划分,获得每个网格中的点云数据,求出各区域的高程差;同时获取相邻区域两法向量的余弦值.最后,判断网格中点云的平均高度与设定阈值的关系;同时判断法向量的余弦值.如果小于阈值,则判断为地面点;否则,判断为非地面点.

根据多次不同阈值的试验,从中选取识别率最高的阈值,将既满足高程差小于总高程差的0.5倍且又满足法向量的余弦值大于0.8的区域点云去除,就可以实现去除地面点的要求.图3为去除地面点的效果图,其中深颜色的区域为所去除地面点集合.

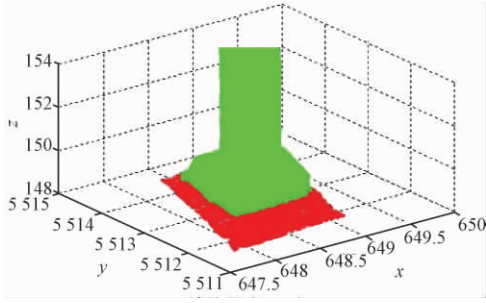


图3 去除点图

Fig. 3 Sketch of moving ground points

2.2.2 离群点去除

笔者选择基于距离的方法,根据数据的精简密度设定阈值,实现对离群点的识别.当某点距离它最近的点大于该阈值时,就将其视为离群点并舍去.在离群点去除的过程中采用八叉树法对无序点云建立空间索引,进行 k 近邻搜索,可减少大量的计算时间.其中,某元器件点云的离群点去除效果如图4所示.

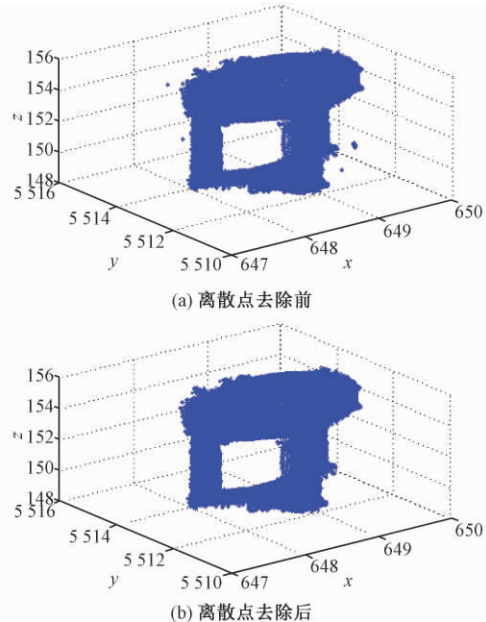


图4 离群点去除图

Fig. 4 Sketch of moving noise points

3 距离直方图的初步筛选

3.1 距离直方图

直接对点云进行分割和特征点提取,既耗时长也无法得到满意结果.由点云和深度图像的关系可知,点云是深度图像的间接表达形式,距离直方图的深度值经过换算可得到点云坐标,因此利用点云生成深度图像.当多个点的 x 和 y 的值一样时,只选取高度坐标值大的点,其中避雷器与阻波器的深度图像如图5所示.

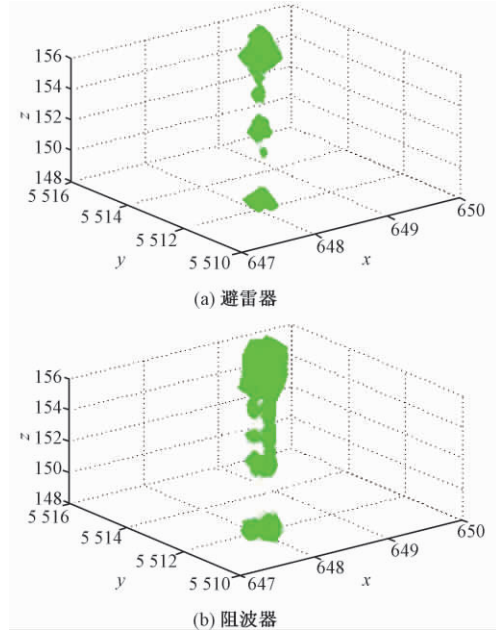


图5 设备的深度图像

Fig. 5 The figure of depth image

深度图像的深度特征在解决三维识别问题中有辅助作用,所以可以通过深度分布得到距离直方图,阻波器的距离直方图如图6所示.其中,纵坐标表示具有该深度的点占所有深度点的比例.

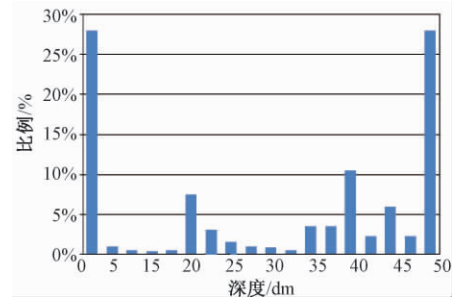


图6 距离直方图

Fig. 6 The distance histogram

3.2 直方图相似度测量

在进行目标识别的过程中,往往需要比较待测数据和目标数据的相似度大小,其中比较相似度的方法^[12]也较多,例如闵可夫斯基距离、豪斯多夫距离和相关测度等^[13].笔者选择一种既区分简单、又效果较好的相关测度方法,它的基本原理是将直方图转化为表达物体特征的矢量,它们之间的相似性测度就是距离测度^[14].由于在同等条件下,余弦相似度倾向给出更优解,即最准确的度量差异,因此相似度采用余弦相似度 ρ_{corr} 的值越大相似度越高,计算公式如下:

$$\rho_{corr}(x, y) = \frac{|cov(x, y)|}{\sqrt{var(x) var(y)}}, \quad (1)$$

式中: $cov(x, y)$ 为协方差; var 为方差; x 为待测数据的直方图对应的特征矢量; y 为目标数据的直方图对应的特征矢量。

4 基于霍夫变换的霍夫投票

4.1 特征点的局部坐标建立

特征点即前面点云进行稀疏得到的所有点。点云特征提取是提取局部点云的分布方位直方图,局部坐标构建是特征提取的基础。对于特征点 F 和所有以特征点 F 为球心、半径为 r 的球内的点的协方差为:

$$\sum = \frac{1}{\sum_{d_i} (r - d_i)} \sum (r - d_i) (p_i - F) (p_i - F)^T, \quad (2)$$

式中: $d_i = \|p_i - F\|_2$, 为 p_i 到 F 之间的距离。

通过式(2)得到三个特征值,并由大到小排列,对应的单位特征向量为 S_1, S_2, S_3 , 它们的方向为点云的高密度方向。协方差得到的特征向量相互垂直,其中,特征向量 S_2 可用另外两个特征向量的内积表示,则局部参考系的 x, y, z 轴分别由 S_1, S_2, S_3 表示,坐标原点为特征点 F 。

4.2 描述符的构建

描述符的构建对于识别至关重要,它的鲁棒性和描述能力将会影响到识别的精准性。以特征点 F 为球心、半径为 r , 获得沿半径 4 等分、仰角 2 等分和方位角 8 等分的空间子块。根据点云的分布个数得到特征点的特征向量 $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_{64}]$, 其中 Q_i 为第 i 空间子块中点的总个数。然后,对特征向量进行归一化,这样描述符具有更强的鲁棒性。

4.3 识别

标准模型中的每一点在局部参考系空间中都有一个 64 维的投票向量。将场景中的点与模型库中的点进行比较,若能找到特征之间的欧氏距离小于某一阈值的点,即对应点,如式(3)所示,则模型中的点和场景中的点具有一样的局部投票向量。

$$\|Q^M - Q^S\|_2 < \tau, \quad (3)$$

式中: Q^M 为模型的特征点对应的特征向量; Q^S 为场景设备的特征点对应的特征向量; τ 为比较的阈值。

在模板中,所有的特征点在同一个三维空间中,具有相同的全局坐标系,质心点 C^M 和特征点 F_i^M 之间的关系可以由矢量 V_{iG}^M 表示(如图 7 中的实线向量所示,目标中的矢量用 V_{iG}^S 表示),如式

(4) 所示:

$$V_{iG}^M = C^M - F_i^M. \quad (4)$$

另外,全局向量 V_{iG}^M 可以由坐标的转换矩阵,转化成在局部坐标系下的表示方式,如式(5)所示:

$$V_{iL}^M = R_{GL}^M V_{iG}^M, \quad (5)$$

式中: 旋转矩阵 R_{GL}^M 的每一行是由点 F_i^M 及周围点构成的局部坐标系的特征向量组成,如式(6)所示:

$$R_{GL}^M = [L_{ix}^M, L_{iy}^M, L_{iz}^M]^T. \quad (6)$$

通过求模板与目标特征点描述符的欧氏距离获得特征对应点,即 $F_j^S \leftrightarrow F_j^M$ 。所以,目标的特征点位置就是对应模板特征点的位置。由于在局部坐标系表示的特征点至质心的矢量具有旋转和平移不变性,并且在局部坐标系建立时已经单位化,则目标的特征点至质心的矢量 V_{iL}^S 与模板中的矢量 V_{iL}^M 可认为相等。因此,将 V_{iL}^S 转化至全局坐标系下的 V_{iG}^S ,如式(7):

$$V_{iG}^S = R_{LG}^S \cdot V_{iL}^S + F_i^S. \quad (7)$$

式(7)为局部和全局之间的向量转换。其中, V_{iG}^S 为全局坐标系下的矢量; V_{iL}^S 为局部坐标系下的矢量。

对于旋转矩阵 R_{LG}^S ,每一列都是由点 F_i^M 及周围点构成的局部坐标系的特征向量组成,如式(8):

$$R_{LG}^S = [L_{jx}^S, L_{jy}^S, L_{jz}^S]^T, \quad (8)$$

将场景中的所有对应的特征点转换至全局坐标系中,在转换过程中特征点与物体质心点之间的向量保持不变^[14]。每个特征点根据式(7)通过自己与质心的矢量都能找到目标的质心,这样通过局部特征转化为对目标质心的投票。如果有足够的投票,则可确定该物体所在的位置以及类别。这样,就可以由特征点局部向量转换至全局的一个微小的三维空间霍夫投票,如图 7 所示。根据阈值可判定模型库是否有该模型,并输出识别结果。

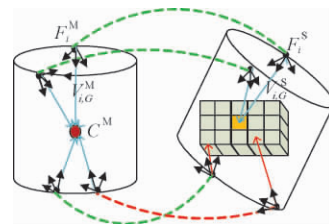


图 7 霍夫投票示意图

Fig. 7 The picture of Hough voting

5 实验结果与分析

5.1 实验数据及参数设置

利用激光扫描仪获取郑州某变电站设备点云数据,共 200 组数据,33 种类型设备,每种类型平均 6 组数据. 每种类型选取一组作为模板,其余为测试样本. 用 MATLAB 实现上述算法和目标识别.

通过不断地调整实验得到相关参数: 数据精简时压缩量为 8^4 , 获取局部曲面特征时选取的邻域个数为 27, 搜寻半径为 0.1, 距离直方图的相似度阈值为 0.7, 对应点搜寻的阈值为 0.1, 霍夫投票的阈值为 0.2.

5.2 目标识别

理想状态下的目标识别是指获取的数据和模型数据是在无视点差异情况下获取的,姿态一致,无数据的缺失,但实际过程中无法获取无差异的数据. 表 1 列举了 4 种设备之间的距离直方图的相似度,通过相似度可反映出不同类别设备的距离直方图的差异. 由于同类设备之间一样,所以将相似度都定为 1,识别率为 1. 虽然这是理想情况下的一种假设,但是通过表 1 可以看出,使用距离直方图相似度的方法能够很好地将不同类型的设备进行初步选择.

表 1 4 种设备的距离直方图的相似度

Tab.1 Similarity of DSM of four kinds of device

设备型号	CT_A_1	DS_1A_1	LA_A_1	PT_A_1
CT_A_1	1.00	0.75	0.30	0.25
DS_1A_1	0.75	1.00	0.21	0.38
LA_A_1	0.30	0.21	1.00	0.06
PT_A_1	0.25	0.38	0.06	1.00

在实验中对于实际场景中出现遮挡情况的模拟方法为: 将模型中的某些连续的点的位置坐标值置 0. 例如,对于设备 KV500_DS_1A_1, 将模型中的 4 299 个顶点中的 407 个顶点三维坐标值变为 0, 则遮挡占比为 9.5%, 如图 8 所示. 其中深色的是位置坐标值为 0 的点.

表 2 中的相关系数阈值为利用 DSM 深度图像进行预识别时的阈值,票数阈值为霍夫投票的阈值. 所以,在三维目标识别的过程中,首先,通过求取距离直方图的相关系数进行初步识别,即将待测的距离直方图与模型库中的距离直方图相对比,求取大于相关系数阈值的设备类型;然后,在初选结果的设备类型中进行霍夫投票. 若票数最大值大于投票的阈值则直接输

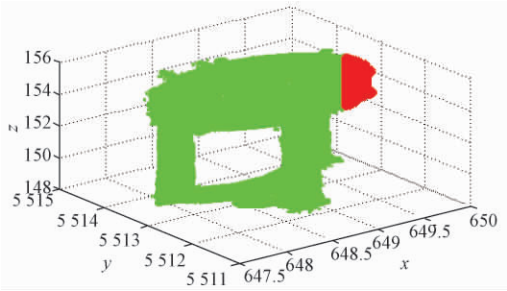


图 8 设备被遮挡的情形

Fig.8 Device is shielded

出结果,否则识别失败.

表 2 同一遮挡占比(6%)下设备的识别率

Tab.2 Recognition rates of the same shielding percentage(6%)

相关系数阈值	票数阈值	识别率/%
1.0	40	83.6
0.9	35	85.5
0.9	30	86.7
0.8	30	89.1
0.7	30	84.8

表 2 为遮挡占比为固定时(6%)识别率与阈值之间的关系. 选取不同的阈值进行实验,由于篇幅限制,只列出几个关键的阈值和对应的识别率. 因此,选取识别率最高的相关系数阈值为 0.8 和票数阈值为 30 作为该遮挡占比下的最终阈值. 据此,对不同遮挡占比下的识别率进行了测试,结果如表 3 所示.

表 3 不同遮挡占比下设备的识别率

Tab.3 Recognition rates of different shielding percentages

遮挡占比/%	相关系数阈值	票数阈值	识别率/%
0	1.0	40	100.0
2	0.9	35	98.8
4	0.9	30	92.7
6	0.8	30	89.1
8	0.8	30	86.1

表 3 中,当遮挡占比为 8% 时,相关系数的阈值为 0.8,投票的阈值为 30 时,识别率为 86.1%;当遮挡占比为 2% 时,识别率增加到 98.8%. 结果表明,在实际运用过程中,当遮挡占比下降的时候,通过适当提高相关系数阈值和票数阈值,可以提高识别率.

5.3 实验对比

为了验证本文方法的有效性,将本文方法与同样进行变电站设备识别的边界点曲率法^[6]进行比较. 文献[6]使用半径为 α 的圆来实现对设

备在三个投影面上边界点的提取,然后利用点到弦的距离积累求出设备点云在三个投影面上的边界点曲率.选取 5.1 节中 33 种类型变电站设备数据作为测试数据,其中包括 47 个设备,进行两种方法的识别效果比较.本次的实验过程在同一台计算机上进行测试,测试数据共 172 个,边界曲率法正确识别 170 个,本文方法正确识别 155 个.本文算法部分结果如表 4 所示.

表 4 两种方法识别效果比较

Tab.4 Comparison of recognizing effect of two methods

设备型号	边界点曲率法		本文方法	
	识别	时间/s	识别	时间/s
CB_A_1	是	81.94	是	11.2
CB_B_2	是	58.76	是	10.4
CP_D_1	是	135.27	否	11.2
...
PT_A_3	是	85.71	是	18.5
CT_A_3	是	135.71	是	17.8

由表 4 可得,边界点曲率法识别率为 98.8%,平均识别时间 85.91 s;本文方法的识别率为 90.1%,平均识别时间为 15.6 s.从识别率上看,边界点曲率法优于本文方法,但平均识别时间却长于本文方法.究其原因,本文方法首先用八叉树法对数据进行精简,可大大缩短识别时间,另外使用距离直方图法与模型库数据进行初步筛选,也可减少数据的处理量.而文献[6]对点云 3 个方向的曲率都进行计算,由于曲率计算非常耗时,文献[6]整体计算时间势必增加,因此霍夫投票的方法用时要少于边界点曲率法.

综上所述,尽管边界点曲率法识别率较高,但用时太长.而本文方法尽管识别率略有降低,但是识别时间减少了一个数量级.在实际工程中,如果按照边界点曲率法进行识别,计算机在十几个小时内都很难完成.而本文方法可保证在数小时内完成整个变电站识别.因工程项目要求一般识别率应达到 80% 以上,而采用本文方法识别率可达 90%,因此,完全可以满足该类实际问题的要求.

6 结论

(1) 采取霍夫识别方法对三维设备进行识别.首先通过八叉树法对点云数据进行精简,并通过基于距离直方图的方法去噪得到高质量的点云数据,然后由 DSM 深度图像得到距离直方图.

(2) 通过与模型库距离直方图对比求相关

系数,相似度满足某一阈值的模型样本作为比较样本.

(3) 最后通过霍夫投票算法获得识别结果.以 Focus 3D 激光扫描仪获取的某变电站设备点云数据对以上方法进行检验,结果表明该方法能将不同设备进行有效分类,可达到预期效果.

参考文献:

- [1] STEIN F, MEDIONI G. Structural indexing: efficient 3-D object recognition [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 1992, 14(2): 125-145.
- [2] ZHANG D M, HEBERT M. Harmonic maps and their applications in surface matching [C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Fort Collins: IEEE, 1999: 524-530.
- [3] 张新雨, 刘丁, 杨文, 等. 基于人工鱼群霍夫变换的单晶硅直径检测 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 940-947.
- [4] JOHNSON A E, HEBERT M. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 1999, 21(5): 433-449.
- [5] ZHONG Y. Intrinsic shape signatures: A shape descriptor for 3D object recognition [C]//IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops. Kyoto: IEEE, 2010: 689-696.
- [6] 窦本君, 纪勇, 郑尚高, 等. 基于降维数据边界点曲率的变电站设备识别 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 61-65.
- [7] YE C, QIAN X F. 3D object recognition of a robotic navigation aid for the visually impaired [J]. IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 2018, 26(2): 441-450.
- [8] GUO Y Y, SOHEL F, BENNAMOUM M, et al. Rotational projection statistics for 3D local surface description and object recognition [J]. International journal of computer vision, 2013, 105(1): 63-86.
- [9] CHEN H, BHANU B. 3D free-form object recognition in range images using local surface patches [J]. Pattern recognition letters, 2007, 28(10): 1252-1262.
- [10] SALT I S, TOMBARI F, STEFANO L D. SHOT: Unique signatures of histograms for surface and texture description [J]. Computer vision & image understanding, 2014, 125(8): 251-264.
- [11] 贾世宇, 张维忠, 于晓康, 等. 基于八叉树的柔性体切割仿真中并行化的碰撞算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(12): 2180-2188.

融合人眼掩蔽效应和图像梯度的块效应评价方法

王 杰,王禹博,朱晓东,任向阳

(郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:针对 JPEG 格式的图像采用分块离散余弦变换的压缩方式易产生块效应的情况,提出了一种高效的无参考块效应评价方法。首先,对图像块边界处像素点的梯度进行变换得到图像块效应映射图(主要包括图像块效应边界的位置和强度信息);然后,计算人眼对图像的亮度和纹理掩蔽效应,将其结合到块效应映射图中,得到显著性块效应映射图,并使用 Minkowski 法计算出图像块效应评价指标;最后,在 LIVE 等图像质量评价数据库中进行了大量的试验仿真。仿真结果中单调一致性指标——SROCC 和 KROCC 分别达到了 0.9、0.7 以上。

关键词:图像梯度;人眼掩蔽效应;DCT;块效应;单调一致性

中图分类号:TP399

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.013

0 引言

JPEG 是广泛应用的图像压缩方式^[1],原理为分块离散余弦变换(DCT)。在压缩时,图像会丢弃一些对图像质量影响不大的高频分量,导致恢复后的图像块边界出现不连续的跳变,即块效应(如图1所示)。



图1 “woman”块效应对比图

Fig.1 Comparison blocking artifact for “woman”

根据对原始图像的依赖程度,块效应评价方法主要分为:全参考(FR)、部分参考(RR)和无参考(NR)评价方法。FR和RR主要是将原始图像和退化图像之间的差异进行量化,并将量化结果作为评价指标。常见的评价指标有结构相似度指标(SSIM)、感知相似度指标(PSIM)。PSIM是Gu

等^[2]综合考量图像的多尺度梯度、色彩信息以及视觉感知统计信息来评价图像质量。这两个指标的优点在于运算时间短,但是在多数的实际应用中,原始图像的信息都是无法获取的。

相比FR、RR,NR因不需要原始图像信息而被大量的学者所研究。根据图像中存在的失真类型数目不同,NR算法分为特定失真块效应评价算法和非特定失真块效应评价算法。针对非特定失真的块效应评价算法进行研究时,Liu等^[3]利用图像局部空间的光谱熵特征,采用支持向量机(SVM)来训练得到的特征,得到图像质量预测模型(SSEQ)。当图片仅存在块效应失真时,这种方法可用于图像块效应评价,但是由于处理的图像失真种类较多,会影响到对图像块效应的评价。针对特定失真的块效应评价算法进行研究时,Ryu等^[4]利用局部小波系数和显著性的边缘分布信息(MDCS)来评价图像中的块效应,这种方法能够实现对块效应的准确定位。但是由于忽略了人类视觉系统(HVS)的特性,评价结果不能很好地与人类主观评价保持一致。针对上述算法的不足,王璐烽等^[5]认为,图像块效应不仅能反映在图像的真实结构上,也能反映在图像的伪结构上,因此提出利用图像伪结构并结合HVS的亮度特性的算法,采用SVM训练该特征得到块效应评价模型(BAML)。由于HVS系统的特性有许多,如何合理地将其结合到块效应的评价算法中是

收稿日期:2018-04-27;修订日期:2018-07-28

基金项目:国家自然科学基金项目(61773351)

作者简介:王杰(1959—),男,河南周口人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事智能控制研究,E-mail: wj@zzu.edu.cn.

当前研究的重点和难题。

笔者提出了一种无参考的特定失真图像块效应评价算法。首先,基于图像块边界处像素点的梯度信息直方图,测量发生块效应边界的位置和强度;然后,结合人眼对图像纹理和亮度的掩蔽效应,得到图像块效应评价指标。该方法简单高效,与人类主观评价具有较高的单调一致性。

1 算法描述

本文算法流程如图 2 所示。首先,根据图像块边界处像素点梯度值,对边界发生块效应的位置以及强度进行检测,得到图像块效应映射

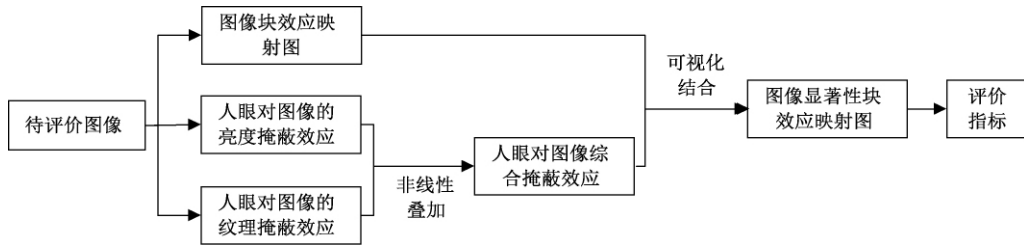


图 2 本文算法框图

Fig. 2 The algorithm block diagram

1.1 图像块效应映射图

目前,图像中发生块效应的边界主要是依据图像块边界两侧的两个像素点灰度值的变化实现检测^[7-8],但是这种方法无法检测到跨度超过两个像素点的灰度值变化。笔者利用图像块边界像素点的梯度来反映边界灰度值变化情况,选择常用的 Sobel(3×3)算子计算图像梯度。

假设 P 为原始图像处理后的梯度映射图, $P(\alpha, \beta)$ 表示横坐标为 α 、纵坐标为 β 的像素点; $M \times N$ 表示选定的图像块尺寸,定义以下符号:

$$P_{a,b}(i,j) \xrightarrow{\text{Sobel}} P(\alpha, \beta), \quad (1)$$

其中 $a = \left\lfloor \frac{\alpha}{M} \right\rfloor$, $b = \left\lfloor \frac{\beta}{N} \right\rfloor$, $i = \alpha - aM$, $j = \beta - bN$,

式中: a, b 是图像块索引; i, j 是块 (a, b) 内像素点索引。

JPEG 压缩采用 8×8 的 DCT,因此式(1)中 M, N 都取为 8。笔者仅以水平块边界为例进行详细的算法说明,垂直块边界采用相同的处理方式。

定义 $D_{a,b}^H(i)$ 是沿着 (a, b) 块的底部水平边界,为位置 i 处的上边界与下边界预处理结果的和,具体计算如下:

$$D_{a,b}^H(i) = \{P_{a,b}(7, i) + P_{a+1,b}(0, i)\}, \quad (2)$$

其中 $1 \leq i \leq 6$ 。

图。第二,对图像的亮度掩蔽效应和纹理掩蔽效应进行检测。依据图像块的 DCT 系数,将图像块 B 分为平缓块(W)、纹理块(T)。基于人眼对不同图像块的失真敏感性存在差异的特点,对图像纹理掩蔽效应进行检测;亮度掩蔽效应的检测是通过计算图像块的背景亮度来完成的。第三,采用非线性的方法将图像的纹理和亮度掩蔽效应叠加起来得到图像综合掩蔽效应图。最后,将图像的块效应映射图和综合掩蔽效应图可视化结合起来,得到与 HVS 感知相一致的图像显著性块效应映射图,并使用 Minkowski^[6]方法计算得到块效应的综合评价指标。笔者主要以图 1(b) 为例进行算法说明。

文献[7-8]根据像素绝对值差的直方图,确定图像块效应的参考强度(记为 K)。笔者在此基础上进行了改进,预处理时块边界处的像素绝对值差经过 Sobel 运算时增加 4 倍,并且每一个 $D_{a,b}^H(i)$ 为上边界和下边界预处理结果的和,因此 $D_{a,b}^H(i)$ 等于对应位置像素绝对值差的 8 倍。这表明在 $D_{a,b}^H(i)$ 直方图中,水平坐标小于 8 的 $D_{a,b}^H(i)$ 对应的位置代表的是图像平滑区域。以 $D_{a,b}^H(i)$ 直方图中水平坐标 8 右边区域中最高峰值的水平坐标作为水平块效应参考强度(K^H)。考虑到发生块效应的边界连续性,将满足条件 $0.5 \cdot K^H \leq D_{a,b}^H(i) \leq 2.5 \cdot K^H$ ($i = 1, \dots, 6$) 对应的像素点位置,标记为发生块效应的边界。如图 3 所示(白色部分表示不存在块效应,黑色的深浅代表块效应的强弱),本文算法相比改进前的方法,能够识别到更多发生块效应的图像块边界。

1.2 图像的纹理掩蔽效应

根据图像 DCT 的原理,可以将图像块 B 分成 W 和 T。HVS 对纹理区的掩蔽效应要强于平缓区。根据 DCT 的特点,将 8×8 图像块 DCT 后的系数划分成如图 4 所示的 4 个指示性区域^[9],分别用符号 S(黑色区域)、L(蓝色区域)、R(红色区域)和 Y(黄色区域)表示。笔者用区域 R 和 Y 的

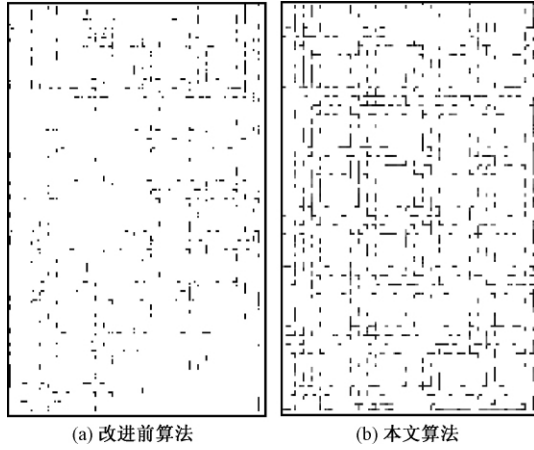


图3 “woman”块效应对比图

Fig.3 Comparison chart of blocking artifacts for "woman" DCT 域能量作为图像块分类指标,图像块 B 的分类如下:

$$B = \begin{cases} T, & \text{if } E_R(a, b) + E_Y(a, b) \geq E_r; \\ W, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

式中: B 表示横坐标为 a 、纵坐标为 b 的图像块; $E_R(a, b)$ 、 $E_Y(a, b)$ 分别表示 B 在对应区域 R、Y 的 DCT 域能量; 阈值 E_r 为 DCT 域能量阈值, 取 960.

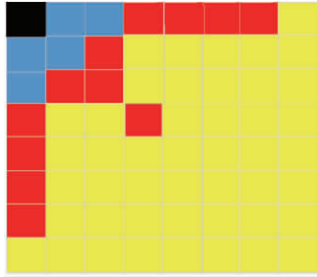


图4 图像块 DCT 系数指示图

Fig.4 Image block DCT coefficient indicator

分类完成后,采用结合尺度因子的线性归一化方法计算图像块的纹理掩蔽效应:

$$E_T(a, b) = t \times \frac{E_J(a, b) - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}, \quad (3)$$

式中: $E_T(a, b)$ 为 B 的纹理掩蔽能量; $E_J(a, b) = E_R(a, b) + E_Y(a, b)$, 代表 B 的交流能量; E_{\min} 和 E_{\max} 为整幅图像中所有纹理块的交流能量最小值和最大值; t 为尺度因子, 取 2.25.

如图 5(a) 所示为“woman”纹理掩蔽效应图, 从中可以发现, “woman”的帽子以及围巾部分, 显示出了较强的纹理掩蔽效应; 图像背景以及“woman”的肩膀等图像的平滑区域部分不存在纹理掩蔽效应.

1.3 图像亮度掩蔽效应

文献[10]表明,图像中较亮或者较暗的区

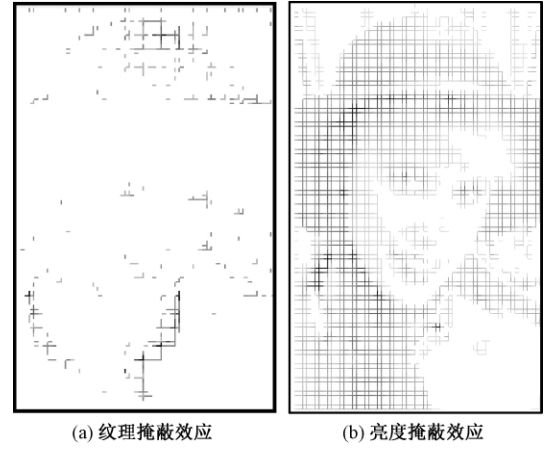


图5 “woman”掩蔽效应图

Fig.5 Masking map for "woman"

域会有较强的亮度掩蔽效应,而亮度适中的区域对应的亮度掩蔽效应相对较弱. 为了更加符合 HVS 的特点,笔者计算图像块边界处像素点的亮度掩蔽效应时,对文献[10]中的方法进行改进. 将块边界相邻的两个图像块 DCT 变换后的区域 S 的 DCT 域能量均值作为图像的背景能量,具体计算如下:

$$E_L(a, b) = \begin{cases} 17 \left(1 - \sqrt{\frac{E_Z(a, b)}{127}} \right) + 3, & \text{if } 0 \leq E_Z(a, b) \leq 127; \\ \frac{3}{128} [E_Z(a, b) - 127] + 3, & \text{if } 127 < E_Z(a, b) \leq 255, \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_L(a, b)$ 为图像块 B 的亮度掩蔽能量; $E_Z(a, b) = [E_S(a, b) + E_S(a+1, b)]/16$, 表示 B 的背景能量. 其中, $E_S(a, b)$ 、 $E_S(a+1, b)$ 为图像块 B 以及相邻的图像块在 S 区域的 DCT 能量.

如图 5(b) 所示, “woman”中亮度值较大的帽子、围巾以及亮度较暗的眼睛部分显示出了较强的亮度掩蔽效应.

1.4 图像块效应的强度估计

因为同一个图像块同时存在纹理和亮度两种掩蔽效应,笔者采用式(5)所示的方法进行两种掩蔽效应的结合,得到图像块的综合掩蔽效应:

$$E_O(a, b) = \lambda \times E_T(a, b) + E_L(a, b) - \xi \times \min\{\lambda \times E_T(a, b), E_L(a, b)\}, \quad (5)$$

式中: $E_O(a, b)$ 、 $E_L(a, b)$ 、 $E_T(a, b)$ 分别为 B 的综合掩蔽能量、亮度掩蔽能量、纹理掩蔽能量; λ 为纹理掩蔽效应的权重系数, 取 10; ξ 为增益衰减因子 $\xi \in (0, 1)$, 取 0.3.

笔者采用可视化的方法将图像块效应映射图

与综合掩蔽效应结合得到图像显著性块效应,具体方法如下:

$$S_{ab}^H(i) = \begin{cases} D_{ab}^H(i) \cdot [E_0(a, b)]^{-1} & \text{if } E_0(a, b) \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $1 \leq i \leq 6$.

对比图 3(b) 和图 6 有助于理解可视化结合方法. 如果直接利用图 3(b) 进行图像块效应的评价指标计算, 会与 HVS 感知有较大的偏差. 采用 HVS 感知图像块效应时, 对于“woman”的帽子以及围巾部分的块效应是不敏感的, 如果把它们同“woman”的背景部分看成同等权重进行块效应计算是不合理的. 相比于图 3(b) 的效果, 在结合人眼掩蔽效应之后, 可以获得与 HVS 感知一致性更高的图像块效应映射图, 如图 6 所示.

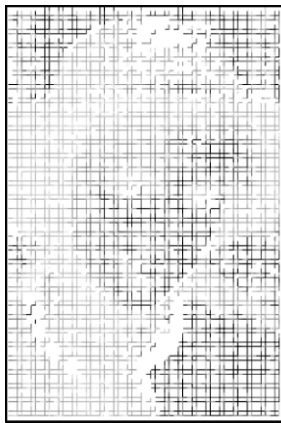


图 6 “woman”显著性块效应映射图

Fig. 6 Noticeable blocking artifact map for “woman”

笔者采用了 Minkowski^[6] 方法对整幅图像所有图像块计算, 得到水平和竖直两个方向的 $S_{ab}(i)$, 进行求和得到图像的块效应评价指标 Q :

$$Q = \frac{M \times N}{A \times B \times 6} \left\{ \sum_{a=1}^{A/M} \sum_{b=1}^{B/N} \sum_{i=1}^6 S_{(ab)}(i)^\theta \right\}^{1/\theta}, \quad (7)$$

式中: A, B 表示图像共有 A 行和 B 列个像素点; $\theta = 2 \sim 4$, 称作 Minkowski 指数^[6], 主要突出 $S_{ab}(i)$ 中的较大的数值, 从而更符合 HVS 对于块效应更强的边界关注度更高的特点, 本文中 $\theta = 2$.

2 试验结果分析

为了验证笔者提出的算法性能的优劣, 在图像质量评价数据库 IVC^[11]、LIVE^[12]、TID 2008^[13] (表 1) 中, 进行 9 种图像块效应评价算法的对比.

9 种算法为全参考图像质量评价的 PSNR(峰

值信噪比)、PSIM^[2] 算法以及常用的无参考块效应评价算法, 如 BRISQUE^[14-15]、SSEQ^[3]、JQS^[16]、SHMCD^[17]、MDCS^[4]、BAML^[5]、NBM^[7].

表 1 图像质量评价数据库

Tab. 1 Databases for image quality assessment

数据库类型	原始图片数	失真类型数	失真图片数	JPEG 失真图片数
LIVE	29	5	779	179
IVC	10	4	235	50
TID2008	25	17	1 700	100

笔者主要对比图像块效应评价指标与人类对图像质量的主观评价分数之间的 S_{ROCC} ^[18] (spearman 秩相关系数) 和 K_{ROCC} ^[18] (kendall 秩相关系数), 这两个指标主要反映的是算法预测的单调性, 取值范围在 $[0, 1]$. 其取值越接近 1, 表明算法的单调性越高, 对应的评价性能越好.

表 2 给出了不同算法在 3 个数据库中的性能指标, 对最优的评价值进行加粗处理. 可以看出, 本文算法获得了非常好的性能指标(由于 BRISQUE、BAML 和 SSEQ 算法使用 LIVE 图片进行训练, 因此得到的评价指标没有实际意义, 在表格中用“训练”代表), 尤其是在 IVC 和 TID2008 数据库上 S_{ROCC} 分别为 0.950 8、0.942 1, K_{ROCC} 分别为 0.794 4、0.788 1. 纵向来看, 本文算法在 3 个数据库上都取得了最优的性能指标, 并且远远高于全参考评价算法以及非特定的无参考块效应评价算法. 相对特定失真的块效应评价算法 JQS、SHMCD、NBM、MDCS、BAML 也有不同程度的提升. 这说明本文算法对于图像块效应的评价性能是非常有效的, 与人类主观感知具有较高的单调一致性.

3 结论

对于图像块效应的评价, 大多数算法都是在一种变换域(空域或者 DCT 域)上对图像进行分析. 笔者提出的算法结合了图像在两种变换域上的信息, 利用空域上的梯度信息获得图像块效应映射图, 并利用 DCT 域上信息获得了 HVS 对图像的掩蔽效应, 进而对块效应做出评价. 通过在多个图像数据库中的仿真, 发现该算法的评价结果与主观质量评价具有高度的单调一致性, 比当前的主流块效应评价算法有了明显的提升. 考虑到整个算法没有复杂的转换, 且不需要原始图像, 因

表2 算法性能指标对比
Tab.2 Performance comparison of algorithms

算法	LIVE		IVC		TID2008	
	S_{ROCC}	K_{ROCC}	S_{ROCC}	K_{ROCC}	S_{ROCC}	K_{ROCC}
本文算法	0.898 9	0.713 6	0.950 8	0.794 4	0.942 1	0.788 1
PSNR	0.840 9	0.635 9	0.674 1	0.518 7	0.871 7	0.684 7
PSIM	0.821 2	0.610 5	0.284 0	0.382 3	0.831 7	0.622 1
BRISQUE	训练	训练	0.873 6	0.686 7	0.807 4	0.635 2
SSEQ	训练	训练	0.840 3	0.622 1	0.886 7	0.717 3
JQS	0.879 9	0.701 6	0.940 0	0.786 2	0.940 0	0.786 2
SHMCD	0.892 8	0.700 3	0.930 6	0.786 2	0.926 3	0.736 3
NBM	0.886 2	0.699 3	0.944 4	0.781 0	0.910 3	0.725 9
MDCS	0.861 3	0.675 4	0.921 3	0.732 2	0.899 5	0.776 5
BAML	训练	训练	0.925 0	0.778 4	0.931 4	0.778 7

此该算法可以用在无参考的图像质量评价体系中,对图像增强或者图像质量优化的参数选择有指导意义。

参考文献:

- [1] 张卫党,吴琳.基于喷泉码及CDMA扩频的数字水印盲算法[J].郑州大学学报(工学版),2017,38(6):23-28.
- [2] GU K, LI L D, LU H, et al. A fast reliable image quality predictor by fusing micro-and macro-structures[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(5): 3903-3912.
- [3] LIU L X, LIU B, HUANG H, et al. No-reference image quality assessment based on spatial and spectral entropies[J]. Signal processing: image communication, 2014, 29(8): 856-863.
- [4] RYU S, SOHN K. Blind blockiness measure based on marginal distribution of wavelet coefficient and saliency[C]//IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing. Vancouver, BC: IEEE, 2013: 1874-1878.
- [5] 王璐烽,刘辉元.基于机器学习的图像块效应盲评价算法[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2014,26(6):856-860.
- [6] WINKLER S. Quality metric design: a closer look[C]//SPIE 3939 Human Vision and Electronic Imaging V. San Jose: SPIE, 2000: 37-44.
- [7] ZHAI G, ZHANG W, YANG X, et al. No-reference noticeable blockiness estimation in images[J]. Signal processing: image communication, 2008, 23(6): 417-432.
- [8] LIEW A W C, YAN H. Blocking artifacts suppression in block-coded images using overcomplete wavelet representation[J]. IEEE transactions on circuits & systems for video technology, 2004, 14(4): 450-461.
- [9] TONG H H Y, VENETSANOPOULOS A N. A perceptual model for JPEG applications based on block classification, texture masking, and luminance masking[C]//1998 International Conference on Image Processing. Chicago: IEEE, 1998: 428-432.
- [10] CHOU C H, LI Y C. A perceptually tuned subband image coder based on the measure of just-noticeable-distortion profile[J]. IEEE transactions on circuits & systems for video technology, 1995, 5(6): 467-476.
- [11] CALLET P L, AUTRUSSEAU F. Subjective quality assessment IRCCyN/IVC database[DB/OL]. (2015-02-04). [2018-05-04]. <http://www.irccyn.ec-nantes.fr/ivcdb/>.
- [12] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, et al. LIVE image quality assessment database Release2[EB/OL]. (2005-06-16). [2018-05-04]. <http://live.ece.utexas.edu/research/quality>.
- [13] PONOMARENKO N, LUKIN V, ZELENSKY A, et al. TID2008-A database for evaluation of full-reference visual quality assessment metrics[J]. Adv modern radioelectron, 2009, 10: 30-45.
- [14] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. Blind/referenceless image spatial quality evaluator[C]//2011 Conference Record of the Forty-fifth Asilomar Conference on Signals Systems and Computers. Pacific Grove, CA: IEEE, 2011: 723-727.
- [15] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain[J]. IEEE transactions on image processing, 2012, 21(12): 4695-4708.
- [16] WANG Z, SHEIKH H R, BOVIK A C. No-reference perceptual quality assessment of JPEG compressed images[C]//International Conference on Image Processing. Rochester, NY: IEEE, 2002: 477-480.
- [17] LEE S, PARK S J. A new image quality assessment method to detect and measure strength of blocking artifacts[J]. Signal processing: image communication, 2012, 27: 31-38.

[18] 王志明. 无参考图像质量评价综述[J]. 自动化学

报 2015 41(6):1062-1079.

A Blocking Artifacts Evaluation Method Integrating Human Eye Masking Effect and Image Gradient

WANG Jie, WANG Yubo, ZHU Xiaodong, REN Xiangyang

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

Abstract: Blocking artifacts were the result of block-based discrete cosine transform in JPEG coding. An efficient no-reference method to measure the blocking artifacts was proposed in this paper. Firstly, the gradient of the pixels at block boundaries was transformed into the blocking artifact map, which mainly included the positions and intensity information of blocking artifact boundaries. Then the effects of luminance and texture masking on blocking were figured out and integrated into the blocking artifact map to form an noticeable blocking artifacts map. Based on the noticeable blocking artifacts map, the Minkowski method was used to calculate the metric of image blocking artifacts. Finally, a large number of experimental simulations were performed in LIVE and other image quality assessment databases. The simulation results showed that SROCC and KROCC reached 0.9, 0.7 or more.

Key words: image gradient; human eye masking effect; DCT; blocking artifacts; monotonous

(上接第6页)

[12] RAMANI K, LOU K, JAYANTI S, et al. Three-dimensional shape searching: state-of-the-art review and future trends [J]. Computer-aided design, 2005, 37(5): 509-530.

[13] 方民权, 张卫民, 周海芳. 集成众核上快速独立成分分析降维并行算法[J]. 计算机研究与发展,

2016, 53(5): 1136-1146.

[14] ALDOMA A, TOMBARI F, STEFANO L D, et al. A global hypotheses verification method for 3d object recognition[C]// European Conference on Computer Vision. Berlin: Springer, 2012: 511-524.

Recognition of Three-dimensional Substation Equipment Based on Hough Transform

Ji Yong¹, LIU Dandan², LUO Yong³, WANG Pengshuai³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Henan Pinggao Electrical Co. Ltd., Pingdingshan 467001, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Based on Hough voting method, the recognizing of substation equipment was achieved by using 3D point cloud data obtained by laser scanner. Firstly, the equipment point cloud data was preprocessed to obtain appropriate experimental data, including point cloud simplifying and denoising by octree. Secondly, the number of votes of the mass center of the point cloud was got by Hough voting after obtaining DSM. Thirdly, similarity degrees could be got by comparing the DSM with any model DSM in model set, and initial identification results could be obtained by comparing the above similarity degrees with the threshold. Lastly, the final identification result was got by Hough voting based on initial identification result. The actual test showed that this method could effectively avoid the lengthy searching process for all feature points, and could be effective in recognizing of substation equipment in the situation of a larger points lacking. It turned out that this method was effective.

Key words: 3D recognition; laser point cloud; Hough voting; octree

锚杆钻机转速的头脑风暴最优自抗扰控制

郭一楠¹, 程伟¹, 杨欢¹, 杨帆^{1,2}, 陆希望¹

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 山西潞安集团和顺李阳煤业有限公司, 山西 长治 032701)

摘要: 锚杆钻机作为巷道掘进支护的关键设备, 其控制主要依赖于操作人员经验。不合理的钻机转速经常导致别杆、断杆等故障发生, 大大降低了钻进效率。考虑到钻机回转系统固有的非线性和参数时变性, 以及由多种因素引起的内外扰动, 提出了锚杆钻机转速的头脑风暴最优自抗扰控制方法。该方法基于钻进围岩顶板条件, 动态估计转速的给定值; 为兼顾系统的动、稳态控制性能要求, 采用头脑风暴优化算法实现自抗扰控制参数优化整定。基于 Matlab 和 AMESim 的联合仿真平台, 面向单一围岩, 考虑无扰和存在外部扰动的两种情况进行验证。实验表明, 相比于已有最优 PID 控制方法, 所设计的最优自抗扰控制器具有更好的动、稳态性能和更强的鲁棒性。

关键词: 头脑风暴优化算法; 自抗扰控制; 钻机转速; 围岩性状; 参数整定

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.03.005

0 引言

锚杆钻机的性能直接决定了整个工程的进度和质量。钻机的执行机构由推进机构和回转机构两部分构成, 二者协调配合, 实现对岩石的破碎和钻进。

为实现钻机的高效工作, 控制钻机的推进与回转过程是其核心问题。已有研究主要集中在利用推进力的自适应控制来适应岩层变化, 从而提高钻机打眼效率^[1]。然而, 钻机在推进旋转破岩的过程中, 除了推进力外, 回转速度也会受到岩层性状的影响, 这也会影响旋转切削和破岩钻孔效果, 是提高锚固速度和效率的关键因素之一。目前, 钻机旋转速度的控制大都依据工程技术人员经验和意愿来实现, 无法根据岩层性状自适应调节, 不能实现钻机的高效运行, 且关于回转速度自适应控制方法的相关研究较少。

由于锚杆钻机的推进回转机构采用液压油作为动力源, 所以钻机控制系统本质上是电液控制系统。目前, 电液系统的控制已日趋成熟。Alleyne A 等^[2]采用 PID 控制解决了电液伺服系统的位置

和力跟踪问题。彭金柱等^[3]提出基于 DRNN 网络的改进鲁棒控制方法, 实现轮式机器人控制。针对液压系统固有的非线性和参数不确定, Guo 等^[4]提出基于高增益观测器的输出反馈控制。该控制器在一定程度上能够保证系统的稳定性, 但是控制性能会受到摩擦力和外负载干扰的影响。郭栋等^[5]将自抗扰技术应用到钢坯闪光对焊中液压顶锻力控制, 提高了系统的鲁棒性以及力伺服响应的速度。然而, 锚杆钻机回转系统存在高度非线性、参数时变性与不确定性, 这些都使回转系统控制困难。考虑到自抗扰控制器对系统扰动具有较好的抑制作用, 笔者采用自抗扰控制器实现锚杆钻机转速的控制。

自抗扰控制器(active-disturbance-rejection control, ADRC)具有较多待整定参数, 人工试凑法耗时较长, 且无法兼顾控制系统的各方面要求。李述清等^[6]提出利用系统时间尺度的控制器参数整定方法, 推导出二阶系统的时间尺度参数整定计算公式。但是, 该方法仅针对二阶系统, 具有一定局限性, 且算法复杂度较高。李海生等^[7]和刘丁等^[8]分别采用基于惩罚策略的浮点遗传优化算

收稿日期:2018-10-30; 修订日期:2018-12-12

基金项目:国家自然科学基金项目(61573361); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046306-6); 江苏省六大高峰人才项目(2017-DZXX-046)

作者简介:郭一楠(1975—), 女, 山西太原人, 中国矿业大学教授, 博士, 主要从研究方向为智能优化与控制、数据挖掘与知识发现, E-mail: nanfly@163.com.

$$\dot{P}_{m2}) + \left(C_{mi} + \frac{C_{me}}{2} \right) (P_{m1} - P_{m2}). \quad (6)$$

令 C_{tm} 为液压马达总泄漏系数, 满足 $C_{tm} = (C_{mi} + C_{me})/2$; V_t 为液压马达两腔及连接管道的总压缩容积, 满足 $V_t = 2V_0$; 由于 $P_s = P_{m1} + P_{m2}$, 所以 $\dot{P}_{m1} + \dot{P}_{m2} = 0$, 则简化式(6)为:

$$Q_L = D_m \dot{\theta}_m + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{P}_L + C_{tm} P_L. \quad (7)$$

根据牛顿第二定律, 建立上述阀控液压马达系统的负载动力学模型为:

$$D_m P_L = J_t \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + M_L. \quad (8)$$

通常, 由于马达的外泄漏量较小, 所以在忽略马达外泄漏量条件下, 负载流量近似等于阀口流量, 即 $Q_L = Q_v$. 由此, 结合式(3)、式(7)和式(8), 记 $K_{ce} = K_c + C_{tm}$ 为总的流量压力系数, 得到锚杆钻机回转系统传递函数为:

$$\dot{\theta}_m = \frac{\frac{K_q k_v}{D_m} i_v - \frac{K_{ce}}{D_m^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right) M_L}{\frac{J_t V_t}{4\beta_e D_m^2} s^2 + \left(\frac{J_t K_{ce}}{D_m^2} + \frac{B_m V_t}{4\beta_e D_m^2} \right) s + \left(1 + \frac{B_m K_{ce}}{D_m^2} \right)}. \quad (9)$$

由式(9)可知, 钻机回转系统是一个存在非线性和时变因素, 以及多类干扰的典型二阶系统.

2 锚杆钻机转速最优自抗扰控制

自抗扰控制系统的控制器设计不依赖于系统具体模型, 只需考虑系统的相对阶数, 设计简单. 因此, 笔者给出一类钻机转速的自抗扰控制策略. 然而, 由于自抗扰控制器待整定参数较多, 人工整定耗时且效果不佳, 所以提出一种基于头脑风暴算法的自抗扰控制器参数自整定方法. 另外, 根据钻进岩层条件来估算最优转速, 作为自抗扰控制器的设定值, 提供其转速跟踪依据. 锚杆钻机转速的最优自抗扰控制系统框图如图2所示.

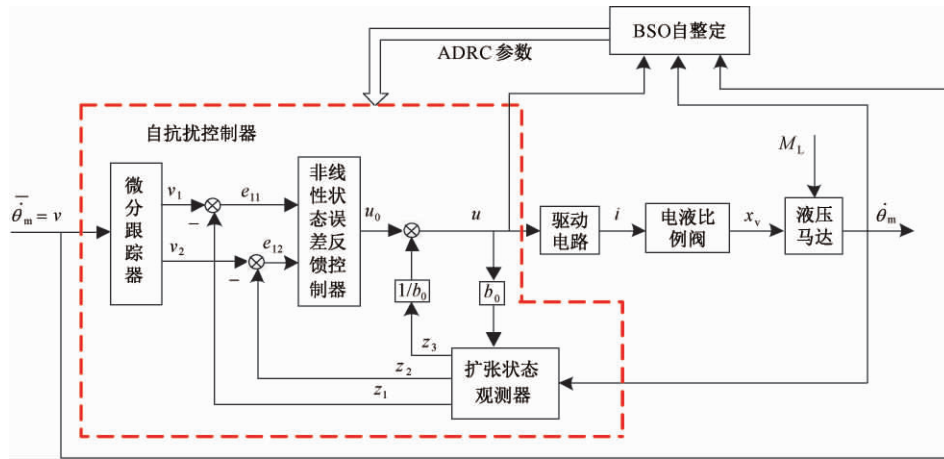


图2 锚杆钻机回转系统控制框图

Fig. 2 The control block diagram of the rotating system in anchor-hole drills

2.1 最优转速获取

根据比留柯夫的研究可知, 针对某一类岩石, 存在一个最优回转转速, 且该最优转速与岩石普氏硬度系数和钻杆直径的平方根乘积成反比^[11]. 在该转速下, 可得到最大的钻进速度. 当回转转速超过其最优值时, 随着回转转速增大, 钻刃切削时的岩石变形得不到充裕时间向前传递, 已破碎下来的岩屑来不及排除而造成重复破碎, 钻进速度反而降低, 造成钻杆严重损坏.

令 D 为钻头直径, c 为切削速度常数, f 为岩石硬度系数, 则钻机最优回转速度 $\bar{\theta}_m$ 为:

$$\bar{\theta}_m = \frac{c}{f\sqrt{D}} \quad (10)$$

2.2 自抗扰控制器结构

自抗扰控制器主要由三个部分组成^[12]: 微分跟踪器 (tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器 (expansion state observer, ESO) 和非线性状态误差反馈控制器 (nonlinear state error feedback, NLSEF), 如图2所示.

微分跟踪器用于生成合理的过渡过程, 提取相应的微分信号. 假设 R 为被控量给定值, v_1 和 v_2 分别为 R 在过渡过程中的期望序列及其一阶微分, h 为采样步长, h_0 为滤波因子, $fhan()$ 为最优控制函数^[12]. 由此, 建立微分跟踪器模型为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k); \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hf(k); \\ f(k) = fhan(v_1(k) - R(k), v_2(k), r, h_0). \end{cases} \quad (11)$$

令 z_1 和 z_2 为状态变量, z_3 为总干扰量, 扩张状态观测器用于实时估计内外扰动总和.

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_{01}e(k)); \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_{02}fal(e(k) - 0.5\delta) + b_0u(k)); \\ z_3(k+1) = z_3(k) + h(-\beta_{03}fal(e(k) - 0.25\delta)); \\ e(k) = z_1(k) - y(k). \end{cases} \quad (12)$$

式中: $fal(\cdot)$ 为非线性函数^[12]; 观测器增益 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 和参数 b_0 为待整定参数.

$fal(\cdot)$ 为非线性函数,

$$fal(e - a\delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-a}}, & |e| \leq \delta; \\ |e|^a \text{sign}(e), & |e| > \delta. \end{cases} \quad (13)$$

非线性状态误差反馈控制率用于对 TD 和 ESO 的输出量进行非线性组合, 并对总干扰进行补偿, 记为:

$$\begin{cases} u(k) = u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b_0}; \\ u_0(k) = \beta_{11}fal(e_1(k) - a_1\delta_1) + \beta_{12}fal(e_2(k) - a_2\delta_1); \\ e_1(k) = v_1(k) - z_1(k); \\ e_2(k) = v_2(k) - z_2(k), \end{cases} \quad (14)$$

式中: β_{11} 和 β_{12} 为控制器的比例增益和微分系数; u_0 为非线性反馈输出; 非线性系数 a_1 、 a_2 满足 $0 < a_1 < 1 < a_2$, 本文选取 $a_1 = 0.75$, $a_2 = 1.25$; $\delta_1 = 0.001$.

2.3 自抗扰控制器参数的头脑风暴整定方法

自抗扰控制器中, ESO 的 β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} 和 b_0 , 以及 NLSEF 的 β_{11} 和 β_{12} , 都会对回转速度的控制性能产生影响. 因此, 采用头脑风暴优化算法对上述参数进行整定, 以获得满意的控制效果.

由于自抗扰控制器中待整定参数均为实数, 所以进化个体 $x_i = (\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, \beta_{11}, \beta_{12}, b_0)$ 采用实数编码^[13]. 采用时间乘绝对误差积分准则这一综合控制性能指标作为目标函数^[14]. 另外, 由于转速调节在实际系统中不允许超调, 所以在目标函数中增加了系统超调量. 记系统的瞬时误差为 $e(t)$, 超调量为 M_p , 时间乘绝对误差和超调量之间的权值为 ω_1 、 ω_2 , 得到综合目标函数为:

$$J = \int_0^\infty (\omega_1 t |e(t)| + \omega_2 |M_p|) dt. \quad (15)$$

头脑风暴算法的核心在于通过变异算子生成新个体. 记 $x_{ij}(t)$ 和 $\bar{x}_{ij}(t)$ 分别为第 i 个个体的第 j 维变量变异前后的取值, $\lambda \sim N(\mu, \sigma)$ 为服从高斯分布的随机数, $\beta \sim U(0, 1)$ 为服从均匀分布的随机数, $\xi(t)$ 为变异尺度, ρ 为斜率, t 和 T 分别为进化代数和最大迭代次数, 则变异算子为:

$$\bar{x}_{ij}(t) = x_{ij}(t) + \xi(t)\lambda; \quad (16)$$

$$\xi(t) = \log \text{sig} \left(\frac{0.5T - t}{c} \right) \beta. \quad (17)$$

基于头脑风暴优化算法的自抗扰控制器参数整定方法的具体流程如下.

Step 1 初始化. 随机生成 n 个个体, 构成种群.

Step 2 评价. 将每个个体所对应的自抗扰控制器参数, 代入钻机转速控制系统, 仿真运行获得其目标值.

Step 3 聚类. 采用 k -means 聚类算法, 将 n 个个体聚为 m 个类, 依据每个个体的目标值, 对每个类中个体排序, 选取具有最佳目标值的最优个体作为聚类中心; 产生随机数 $R_1 \in [0, 1]$, 判断是否满足 $R_1 < P_1$. 如果满足, 则随机选择一个聚类中心; 否则, 随机生成一个个体替代该聚类中心.

Step 4 变异. 产生随机数 $R_2 \in [0, 1]$, 判断是否满足 $R_2 < P_2$. 如果满足, 则执行 Step 4. 1; 否则, 执行 Step 4. 2.

Step 4.1 随机选择一个类, 依据随机数 $R_3 \in [0, 1]$, 判断是否满足 $R_3 < P_3$. 如果满足, 则依据该类的中心, 通过变异产生新个体; 否则, 从该类中随机选择一个个体, 通过变异产生新个体.

Step 4.2 随机选择两个类, 依据随机数 $R_4 \in [0, 1]$, 判断是否满足 $R_4 < P_4$. 如果满足, 则依据两类中心, 通过变异产生新个体; 否则, 从两类中各随机选择一个个体, 通过变异产生新个体.

Step 4.3 如果新生成个体优于原有个体, 则采用新个体替代原有个体.

Step 5 如果达到最大迭代次数, 则终止进化, 并输出全局最优解作为控制系统最优参数; 否则, 跳转到 Step 2.

3 实验仿真与结果分析

为验证笔者所设计的锚杆钻机最优自抗扰控制策略的有效性, 采用 AMESim 和 Matlab 联合仿

真平台搭建控制系统,如图3所示。AMESim 用于锚杆钻机回转系统的物理模型搭建,Matlab 实现基于头脑风暴的转速最优自抗扰控制算法。设定头脑风暴优化算法参数如表2所示。针对表3所示晋城寺河矿巷道顶板岩石状况^[15],实验分析了锚杆钻机在单一围岩钻进时所提控制器性能,验证了岩层性状波动情况下所提控制器的鲁棒性。

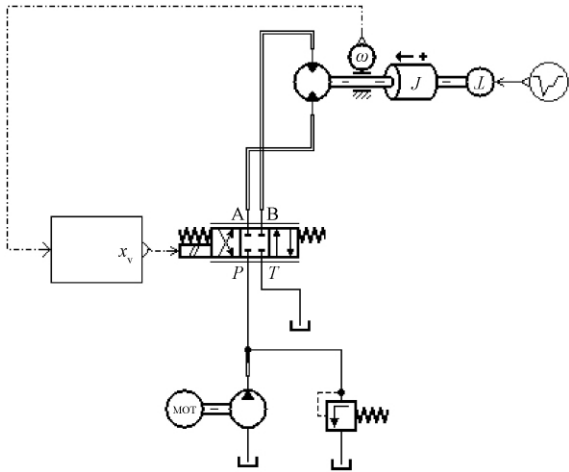


图3 锚杆钻机回转系统的联合仿真平台
Fig.3 The joint simulation platform of the anchor drilling's rotary system

表2 头脑风暴优化算法参数

Tab.2 Parameters of BSO algorithm

n	m	P_1	P_2	P_3	P_4	c	T
100	5	0.2	0.8	0.4	0.5	20	100

表3 晋城寺河矿巷道顶板围岩性状

Tab.3 The properties of the rock stratum in JinCheng

SiHe coal mine

岩性	累计厚度/m	厚度/m	抗压强度/MPa	岩石硬度系数	岩性描述
砂质泥岩	10.00	3.67	45.2	5	局部夹有薄层砂岩,结构面少,较完整
细砂岩	6.33	1.10	114.9	12	结构面不发育,完整性好,坚硬
中砂岩	4.91	0.55	72.8	8	岩层完整,比较坚硬
砂质泥岩	4.36	2.96	31.5	4	层理发育,比较破碎
煤层	1.40	1.40	21.9	3	厚度稳定,性脆,内生裂隙发育,含1~4层夹矸

3.1 单一围岩条件下最优转速跟踪性能

以巷道顶板最常见的砂质泥岩为例,其岩石硬度系数为 $f=5$ 。由此根据式(10),得到砂质泥

岩的钻机最优旋转速度 $\bar{\theta}_m = 408 \text{ r/min}$ 。采用头脑风暴优化算法,分别对自抗扰控制器和传统PID控制器进行参数寻优。

设定待整定参数的搜索范围: $\beta_{01} \in (0, 300)$, $\beta_{02} \in (0, 1000)$, $\beta_{03} \in (0, 1000)$, $\beta_{11} \in (0, 700)$, $\beta_{12} \in (0, 50)$, $b_0 \in (0.01, 10)$, $k_p \in (0.1, 200)$, $k_i \in (0.1, 0.8)$, $k_d \in (0.1, 5)$ 。

依照图4所示的头脑风暴优化算法参数寻优过程,获得控制器整定参数。①BSO-ADRC: $r = 9965.2548$, $h_0 = 0.0052$, $\beta_{01} = 30.0361$, $\beta_{02} = 1000$, $\beta_{03} = 0.021$, $\beta_{11} = 485.6725$, $\beta_{12} = 0$, $b_0 = 5.6471$; ②BSO-PID: $k_p = 105.2647$, $k_i = 0.1033$, $k_d = 2.9964$ 。

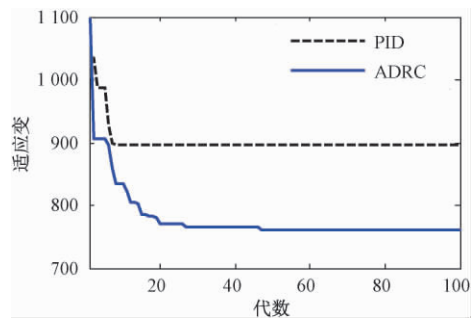


图4 基于BSO的控制器参数寻优过程

Fig.4 The evolution process of BSO-based controller

设定控制器参数为寻优获得的最优参数,得到单一围岩条件下的转速控制性能,如图5所示。

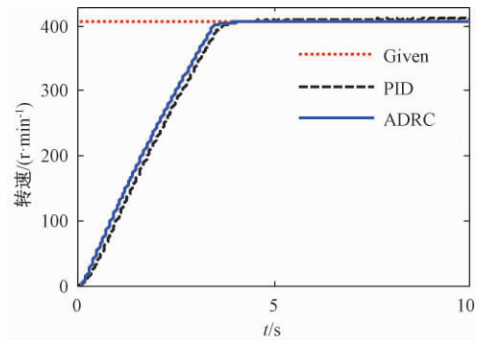


图5 转速控制性能比较

Fig.5 Comparison of controllers performances

由如图4可知,相比于PID控制参数寻优过程,ADRC控制参数寻优过程较慢。这是因为,设定的PID控制参数搜索范围是依据经验整定方法获得的,且待整定参数维度较小。由图5和表4可见,最优自抗扰控制器具有比最优PID控制器更好的控制性能。特别是在无扰动情况下,自抗扰控制器能够很好地满足钻进过程中响应快速且无超调的控制要求。另外,最优PID控制器不仅具有较差的动、稳态性能,其综合控制性能(如图4所

示)也劣于最优自抗扰控制器的控制性能。

表4 ADRC 与 PID 控制性能对比

Tab.4 Comparison of ADRC and PID control performance

控制性能	单一围岩(无扰动)		单一围岩(有扰动)	
	ADRC	PID	ADRC	PID
上升时间 t_r/s	3.129	3.281	—	—
超调量 $\delta/\%$	0	1.23	1.86	20.25
调节时间 t_s/s	3.477	3.695	0	0.96
稳态误差 e_{ss}	0.31	-5.1	0.54	-3.43

3.2 转速最优自抗扰控制器鲁棒性能

钻进过程存在诸多干扰因素,为验证所提控制策略的鲁棒性,在单一砂质泥岩的巷道围岩条件下,当 $t=10\text{ s}$ 时,给系统加入 $15\text{ N}\cdot\text{m}$ 的干扰,转速跟踪性能如图6所示。

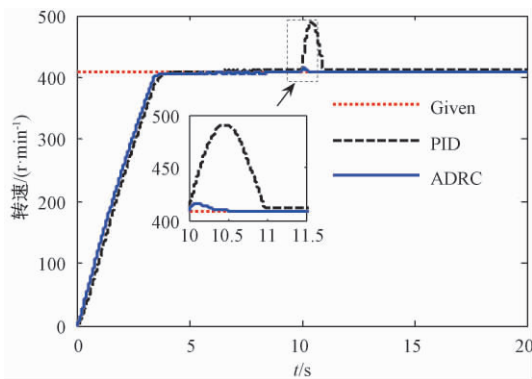


图6 干扰下的转速控制性能

Fig.6 The control performance of rotary speed under disturbance

由图6和表4可见,当突加外部干扰时,PID控制器瞬间产生较大超调,且需要经过1s左右,才能追踪到原设定转速,鲁棒性较差,不利于钻机运行。相比而言,自抗扰控制器在受到外部扰动时,超调量小于2%稳态值,表明其具有较强鲁棒性;并且,其稳态性能也优于PID控制器,控制更加精确。因此,自抗扰控制具有较好的抗干扰能力,能更好地满足锚杆钻机这种存在多类外部干扰的实际系统的控制需求。

4 结论

锚杆钻机转速的自适应调节是改善钻进效率和钻孔质量的关键因素。因此,笔者提出基于头脑风暴优化算法的钻机转速最优自抗扰控制方法。首先,根据回转系统组成建立其数学模型,经线性化处理后,确定回转系统模型为二阶。其次,根据钻进的顶板围岩性状,估算不同围岩的最佳转速,作为自抗扰控制器的给定信号。由于钻机回转系统具有高度非线性、参数时变特性以及多种内外部扰动,

所以采用自抗扰控制器,并采用头脑风暴优化算法,对6个控制参数进行寻优,得到最佳的动、稳态性能。最后,基于Matlab和AMESim的联合仿真平台的验证可知,相比于传统PID控制器,笔者提出的控制方法具有更加优越的动、稳态性能和更强鲁棒性,为实现可靠稳定的巷道掘进支护提供了实现基础。锚杆钻机利用推进系统和回转系统的协调配合完成钻孔工作,因此,推进回转协同控制策略的实施将是后续工作的核心。

参考文献:

- [1] 胡志坚,彭嵩,耿莉. 工程地质钻机回转钻进比例控制系统的模拟分析[J]. 机床与液压, 2009, 37(10): 219-221.
- [2] ALLEYNE A, LIU R. On the limitations of force tracking control for hydraulic servosystems[J]. Journal of dynamic systems, measurement & control, 1999, 121(2): 184-190.
- [3] 彭金柱,卞英楠,周树亮. 基于DRNN网络的轮式机器人鲁棒 H_∞ 控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(4): 64-69.
- [4] GUO Q, YU T, JIANG D. High-gain observer-based output feedback control of single-rod electro-hydraulic actuator[J]. IET control theory & applications, 2015, 9(16): 2395-2404.
- [5] 郭栋,付永领,卢宁,等. 自抗扰控制在电力伺服系统中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1): 115-119.
- [6] 李述清,张胜修,刘毅男,等. 根据系统时间尺度整定自抗扰控制器参数[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(1): 125-129.
- [7] 李海生,朱学峰. 自抗扰控制器参数整定与优化方法研究[J]. 控制工程, 2004, 11(5): 419-423.
- [8] 刘丁,刘晓丽,杨延西. 基于AGA的ADRC及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1909-1911.
- [9] SHI Y H. Brain storm optimization algorithm [C]// ICSI'11 Proceedings of the Second International Conference on Advances in Swarm Intelligence. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 303-309.
- [10] YANG F G, LI Y B, RUAN J H, et al. ADRC based study on the Anti-braking system of electric vehicles with regenerative braking [C]//2010 8th Word Congress on Intelligent Control and Automation. Jinan: IEEE, 2010: 2588-2593.
- [11] 贺立军. 新型全液压多功能锚杆钻机关键技术的研究[D]. 武汉: 中国地质大学信息与控制工程学院, 2010.
- [12] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

文章编号:1671-6833(2019)03-0019-07

基于自适应量化器选择的编码率失真优化判决算法

李娜娜¹, 黄琨强², 张秋闻¹, 刘宽¹

(1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州工商学院 机械与电信工程学院, 河南 郑州 451400)

摘要: 针对高效率视频编码标准(high efficiency video coding, HEVC) 编码复杂度高的问题, 提出一种高效的自适应量化器选择的率失真优化量化判决算法. 通过对变换系数量化水平是否相等以及量化水平是否小于设定阈值来进行量化器判决. 若量化水平相等或为零, 则直接采用率失真优化量化; 否则进行阈值判决, 从而最终确定最佳量化器. 结果表明, 提出的算法能有效地对计算量小的均匀量化和比特率小的率失真优化量化这两种量化方法进行自适应选择, 降低了编码器计算复杂度. 采用该算法节省了大约 10.52% 的编码时间.

关键词: HEVC; 量化; 率失真; 复杂度

中图分类号: TN919.81

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.03.001

0 引言

采用率失真(rate-distortion optimization, RDO)^[1]是 HEVC 编码复杂度高的的重要因素之一, 而如何有效对其进行优化来降低计算量成为难题.

针对上述问题, 研究人员已经从率失真计算的预测过程出发, 在率失真函数和编码器编码单元的层面进行了优化, 通过降低函数本身的运算量来提升 HEVC 编码器的性能, 并以此达到优化编码时间的目的. 文献[2]提出了离散余弦变换系数和基于全零块率失真优化量化跳过算法, 提升了编码效率. 文献[3]通过训练传输集合后选择最合适的传输模式来分类传输变换系数, 从而降低视频比特率. 文献[4]提出了变换编码传输约束条件实现了简化率失真代价计算的效果. 文献[5]提出了一种基于运动特性的编码块分割算法, 有效加快了帧内编码的速度. 文献[6]提出了主动选择变换编码块的率失真优化量化(rate-distortion optimized quantization, RDOQ)的决策算法, 得到了较好的编码增益. 文献[7]使率失真优化量化代价计算随着标准测试

模型中的量化值变化, 实现了压缩率的提高. 文献[8]采用一种基于自由量化框架的快速 RDO 算法, 该算法在帧内、帧间预测过程都很有效, 明显地降低了率失真计算复杂度. 文献[9]利用感知特征引导率失真优化算法来改善视频编码中编码效率低的问题, 提出通过空域中梯度幅值率特征和时域中梯度相似度偏差率特征来描述相关性, 从而自适应地选择 RDO 编码过程中拉格朗日乘子来提升编码性能. 文献[10]对编码块复杂度进行了分类, 并根据分类情况对编码单元快速分割, 有效地判决了编码块深度, 提升了编码效率. 文献[11]简化 35 种帧内编码模式到 11 种模式后, 增加最有可能模式组成候选预测集, 从而有效减少率失真优化过程中需计算代价值的模式数量, 以此来降低计算复杂度. 文献[12]介绍了对编码块和对应视频帧中已编码的编码块进行分类的压缩方法, 改变了遍历计算的方式. 但是, 这些算法都是针对量化过程中的率失真计算进行的优化, 忽略了应根据编码块特点来选择低计算复杂度量化器的方式.

基于此, 笔者针对 HEVC 中可以使用不同的

收稿日期:2018-08-29; 修订日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(61771432, 61501407, 61572445); 河南省高校科技创新人才项目(17HASTIT022); 河南省科技攻关项目(182102210156); 河南省教育厅科技攻关重点项目(17B510011)

作者简介:李娜娜(1980—), 女, 河南周口人, 郑州轻工业学院讲师, 主要从事信号处理研究.

通信作者:张秋闻(1982—), 男, 河南许昌人, 郑州轻工业学院副教授, 博士, 主要从事视频信号处理研究, E-mail: zhylnew@163.com.

量化方法对变换系数进行量化的特点,提出了量化器判决条件,实现了标量量化和率失真优化量化的自适应选择,从而减少遍历计算量,缩短编码器编码时间.实验表明,笔者基于量化过程的自适应判决方法在全帧内(all intra, AI)实验条件下可以节省大约 10.52% 的编码时间,同时仅约有 0.04% 的码率上升和 0.0071 dB 的信噪比下降.

1 均匀标量量化与率失真优化量化技术特征分析

均匀标量量化(uniform scalar quantizer)的量化步长 Q_s 可以由输入信号变化区间和重建值数量决定:

$$Q_s = \frac{m - n}{M}, \quad (1)$$

式中: m 和 n 分别表示信号的最大值和最小值; M 表示重建值数量.则量化后输出:

$$y_i = \frac{x_i + x_{i+1}}{2}, \quad i = 0, 1, \dots, M-1. \quad (2)$$

其中, x_i 和 x_{i+1} 分别是对应区间端点对应的映射值.假设输入值服从均匀分布,则以 E_{MS} 衡量的量化误差为:

$$E_{MS} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{1}{Q_s} \int_{y_i - Q_s/2}^{y_i + Q_s/2} (y_i - \hat{y}_i)^2 dy = \frac{Q_s^2}{12}, \quad (3)$$

式中: \hat{y}_i 为重建值; M 为重建个数.传统上 HEVC 使用的标量量化是

$$y'_i = \text{floor}\left(\frac{D_i}{Q_s} + f\right), \quad (4)$$

式中: y'_i 表示输入信号量化后的值; floor 表示向下取整; D_i 是 DCT 系数; Q_s 是量化步长; f 是偏移值控制舍入关系,根据 IPB 帧的分类原则取值为 1/3 或者 1/6^[13-14].均匀标量量化的特点在于失真小,量化过程简单,计算量低,尤其是对均匀变化范围的量化,能够在保证精度的情况下降低计算复杂度.

RDOQ 在 HEVC 编码器中的计算需要不断利用 RDO 准则.以官方测试平台 HM 为例分析.首先,需要确定候选的量化值,公式如下:

$$|l_i| = \text{round}\left(\frac{|c_i|}{Q_s}\right), \quad (5)$$

式中: c_i 为变换块系数; l_i 为系数量化后的值^[15-16]; round 为舍入关系.

首先,根据变换块系数及每个候选量化值计算所有候选量化值的代价,利用 RDO 遍历计算所有系数包含的所有候选值的代价值,并选取它

们较低代价值对应的量化值作为最优量化值.

然后,还需要利用 RDO 准则来遍历搜索每一个系数块组(coefficient group, CG)是否量化为全零组,以达到较好的量化效果.最后,量化过程还需要确定最后一个非零系数的位置,通过确定熵编码中的该位置信息来解决拖尾零系数造成的编码比特升高问题.因此,与标量量化相比, RDOQ 虽然提高了编码器的性能,但由于利用了 RDO 准则,需要遍历计算候选量化值以及全零组、最后一个非零系数位置等率失真代价值,因此,总的编码时间大约增加了 10% ~ 15%.

2 高效的率失真优化量化判决算法

2.1 均匀标量量化和率失真量化判决

对于变换块,如何自适应地合理分配标量量化和率失真优化量化,对变换过程降低计算复杂度至关重要.量化是对变换系数进行量化,根据其量化水平可以对量化器合理有效地判决.然而在下列两个条件下,两种量化器都将无法有效提升编码性能.

(1) 变换系数量化为零;

(2) 变换系数 RDOQ 量化水平等于变换系数均匀标量量化水平.

为此,我们对同一帧图像变换块变换系数进行 RDOQ 量化和标量量化后量化水平相等的概率进行了分析,如表 1 所示.其中, G_0 表示量化水平为零; G_{SQ} 表示均匀量化水平; G_{RDOQ} 表示 RDOQ 量化水平.通过对不同尺寸编码块在两种量化模式下量化为零或有相同量化水平的可能性分析进行第一步的筛选.当量化水平为零或相同时不需量化器选择,不同时则进行下一步的量化器选择判决.从表 1 可以看出,大约有 14% 的变换块系数在进行量化时,无论是使用标量量化还是率失真优化量化,量化水平都相同,两种方法编码效率也一样,不需进行量化模式选择.而在 $G_{SQ} = G_{RDOQ}$ 和 $G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$ 两种情况下,又分别有 74.7% 和 21.3% 的变换块系数量化为零,零变换块不需进行量化.所以,在 $G_{SQ} = G_{RDOQ}$ 或量化水平为零或变换块变换系数近似为零时,两种量化方法对视频编码效率并没有较大的影响.此时,对变换块进行量化时,采用传统的标量量化或者 RDOQ 任一种即可.在进行视频编码时跳过笔者提出的量化器模式选择过程.但是,在 $G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$ 且 RDOQ 量化水平不等于零时,大约 86% 中仍然有 78.7% 的变换块系数需要进一步判定量化方法.为此,继续

表1 两种量化方法系数量化水平之间的关系

Tab.1 The correlation of quantization level of coefficients between two quantization methods

编码尺寸	均匀量化水平和 RDOQ 量化水平是否相同的概率		两种量化方法的量化水平相等及不相等时 RDOQ 量化水平为零的概率	
	$G_{SQ} = G_{RDOQ}$	$G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$	$G_{RDOQ} = G_0 (G_{SQ} = G_{RDOQ})$	$G_{RDOQ} = G_0 (G_{SQ} \neq G_{RDOQ})$
4×4	0.27	0.73	0.651	0.235
8×8	0.20	0.80	0.654	0.215
16×16	0.09	0.91	0.798	0.232
32×32	0.01	0.99	0.883	0.172
平均值	0.14	0.86	0.747	0.213

分析了不同尺寸变换块变换系数进行 RDOQ 后量化水平的平均和,如表2所示。

表2 系数量化水平不为零时 RDOQ 量化水平平均和

Tab.2 The mean sum of quantization level after RDOQ when quantization level of coefficients not equal to zero

编码尺寸	量化水平平均和	
	$G_{SQ} = G_{RDOQ}, G_{RDOQ} \neq G_0$	$G_{SQ} \neq G_{RDOQ}, G_{RDOQ} \neq G_0$
4×4	1.95	10.11
8×8	1.58	18.38
16×16	1.81	53.43
32×32	3.56	213.43
平均值	2.23	73.84

表2中,在变换系数量化水平不为零,且量化水平和小于平均量化水平平均和(2.23)时,可以直接将变换系数量化为零,不再进行 RDOQ 量化。在变换系数量化水平不为零且 $G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$ 情况下,若量化水平和小于最小尺寸 4×4 变换块对应的 10.11,则 RDOQ 量化相对于计算复杂度带来的编码时间增高并没有较大幅度的比特率节省,编码器将选择均匀标量量化方法。

为了进行以上量化方法的选择,需要计算变换系数量化水平和,如式(6)所示:

$$\sum_{m=0}^{N-1} l_m = \sum_{m=0}^{N-1} \left[\frac{|c_m|}{Q_s} + f \right] \cong \sum_{m=0}^{N-1} \frac{|c_m|}{Q_s} = \frac{1}{Q_s} \sum_{m=0}^{N-1} |c_m|, \quad (6)$$

式中: l_m 表示 m 级量化水平; c_m 表示未量化系数; N 表示系数总量; f 表示量化补偿。

所以,根据表2实验结果设定阈值 T 为 10.11,并进行以下判决:

$$\sum_{m=0}^{N-1} l_m < T \rightarrow \sum_{m=0}^{N-1} l_m \cong \frac{1}{Q_s} \sum_{m=0}^{N-1} |c_m| < T. \quad (7)$$

判断条件(7)可以进一步简化为:

$$\sum_{m=0}^{N-1} |c_m| < T \cdot Q_s. \quad (8)$$

即 $G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$ 且量化水平不为零时,若 $\sum_{m=0}^{N-1} l_m$ 小于

阈值 T 时将不再进行 RDOQ 量化。

所以,在进行 HEVC 视频编码时,变换系数量化水平和若满足条件式(8),量化过程将跳过 RDOQ,直接进行均匀标量量化;否则,HEVC 进行 RDOQ 量化。HEVC 编码器通过笔者提出的判决条件进行量化器的选择,可以在保证在失真较低的条件较大降低量化过程中的计算复杂度。

2.2 算法流程

步骤1 提取当前需编码变换块变换系数。

步骤2 确定变换系数的 RDOQ 量化候选值,当 $G_{SQ} = G_{RDOQ}$ 或量化水平为零时,变换块变换系数选择标量量化或者 RDOQ 并无区别,此时跳出此量化器选择算法,直接采用标准的 RDOQ 方法进行量化过程。否则需要进行下一步的选择判决。

步骤3 根据式(6)计算变换系数量化水平和。若量化水平和小于平均量化水平平均和 2.23 时,则直接将变换系数量化为零,不再进行 RDOQ 量化;否则需要进行下一步判断。

步骤4 设定 10.11 为阈值 T ,根据判决条件式(8)进行量化模式判决。若量化水平和满足判决条件(8)则使用均匀标量量化;否则则使用 RDOQ 判决结束。

步骤5 进行下一变换块的量化模式判决。

2.3 算法时间复杂度

从以上分析可知,采用了该选择判决算法后,由于大约有 14% 的变换块系数在进行量化时 $G_{SQ} = G_{RDOQ}$;有 86% 的变换块系数在进行量化时 $G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$ 。而在 $G_{SQ} \neq G_{RDOQ}$ 条件下,21.3% 的变换块系数量化为零,所以大约有 $14\% + 86\% \times 21.3\% = 32.32\%$ 的变换块系数在步骤2后跳出量化器选择算法,直接采用标准的 RDOQ 方法进行量化过程,在此种情况下并没有减少时间复杂度;而大约有 $86\% \times (1 - 21.3\%) = 67.68\%$ 的变换块系数需要进行步骤3以下的判断。当其

量化水平和小于平均量化水平平均和(2.23)时,直接将变换系数量化为零,不再进行RDOQ量化。接下来当量化水平和小于10.11时,则判断需要使用均匀标量量化,不再进行RDOQ量化。该算法在这两种情况下均不再进行遍历计算候选量化值以及全零组、最后一个非零系数位置等率失真代价值,减少了编码时间。

3 实验结果

实验使用HEVC官方测试(HEVC Test Model, HM) 16.0平台,在AI、随机接入(random access, RA)、低延迟(low delay, LD)3种条件下分别对不同分辨率和纹理变化特性的视频测试序列进行测试。

笔者提出的算法较HEVC编码器的平均节省时间(average saving time, AST)的百分率 A_{ST} 计算如下:

$$A_{ST} = \frac{t_A - t_P}{t_A} \times 100\% \quad (9)$$

式中: t_A 是HEVC编码时间; t_P 是本文算法的编码时间。所以 A_{ST} 值越高,性能较HEVC编码器越好。

3.1 与HEVC编码标准及其他改进算法的比较

试验在设定的标准测试条件下以峰值信噪比变化(bjontegaard delta peak signal-to-noise rate) R_{BDPSN} 和码率变化(bjontegaard delta bit rate) R_{BDB} 判定编码性能,以 A_{ST} 节省的时间多少表示编码复杂度降低程度,试验结果如表3所示。

表3 提出的算法与原始HEVC编码器的结果比较

Tab. 3 Comparison results between the proposed algorithm and the original HEVC encoder

测试序列	AI-main			RA-main			LD-main		
	$R_{BDB}/\%$	R_{BDPSN}/dB	$A_{ST}/\%$	$R_{BDB}/\%$	R_{BDPSN}/dB	$A_{ST}/\%$	$R_{BDB}/\%$	R_{BDPSN}/dB	$A_{ST}/\%$
Traffic	0.0	0.000	10.5	0.0	0.002	9.1	—	—	—
PeopleOnStreet	0.0	0.000	9.8	0.0	0.000	10.2	—	—	—
ParkScene	0.0	0.000	11.1	0.0	0.001	9.4	0.0	0.001	9.0
BQTerrace	0.0	-0.001	10.7	0.1	-0.002	9.8	-0.1	0.001	8.9
BasketballDrive	0.0	0.000	8.9	-0.1	0.001	12.4	0.0	0.002	9.3
BasketballDrill	0.0	0.000	6.9	0.2	-0.008	11.2	0.0	0.000	8.7
BQMall	0.0	-0.001	10.0	0.1	-0.006	9.5	0.1	-0.005	8.0
PartyScene	0.1	-0.006	10.7	0.2	-0.011	8.9	0.2	-0.010	9.7
BasketballPass	0.0	0.002	12.4	0.2	-0.009	8.4	0.2	-0.009	8.4
RaceHorses	0.0	0.000	12.9	0.2	-0.011	9.4	0.2	-0.011	9.8
BlowingBubbles	0.0	-0.001	12.6	0.0	0.000	11.3	0.0	0.000	10.8
FourPeople	0.0	-0.001	10.9	0.0	0.002	11.3	-0.3	0.009	10.1
Johnny	0.0	0.000	8.5	0.1	0.000	9.6	-0.5	0.007	8.2
KristenAndSara	0.0	0.000	8.9	0.1	-0.003	10.5	-0.4	0.015	10.6
BasketballDrillText	0.0	-0.001	9.8	0.1	-0.002	8.7	0.2	-0.007	9.3
SlideShow	0.3	-0.025	25.2	0.4	-0.038	29.4	0.5	-0.034	26.4
SlideEditing	0.8	-0.119	9.7	0.9	-0.247	11.0	0.4	-0.064	12.7
平均值	0.07	-0.009	11.23	0.15	-0.0195	11.19	0.04	-0.0071	10.52

由表3可知,笔者提出的算法具有较好的量化效果,在3种配置条件下分别实现了11.23%、11.19%和10.52%的编码时间节省。其中,AI条件下SlideShow最高实现了25.2%的时间节省,BasketballDrill序列也降低了6.9%的编码时间;RA条件下SlideShow最高实现了29.4%的时间降低;BasketballPass也降低了8.4%的编码时间;

LD条件下SlideShow序列实现了26.4%的时间降低;BQMall序列实现大约8.0%的时间节省。同时,3种条件下分别平均有0.07%、0.15%、0.04%的码率上升和0.009、0.0195、0.0071 dB的峰值信噪比降低。实验结果中,SlideShow视频测试序列因为具有较为单调的背景和较为复杂前景的特点,在提出的判决条件下进行编码,量化过

程更多地选择了均匀标量量化,从而节省了大量的编码时间.与此同时,序列复杂也造成了较高的峰值信噪比(peak signal-to-noise rate) R_{PSN} 下降,但是仍在可接受范围内;而且,不同分辨率和运动特性的测试序列几乎都保持了较好的编码质量, R_{PSN} 和比特率(bit rate) R_B 在提出的算法中较 HEVC 编码器分别下降和升高得并不明显,如图 1 所示为测试视频序列率失真(rate distortion, RD) 曲线图.可见,无论是 R_{BDPSN} 还是 R_{BDB} , 其变化都是非常微小的.在时间节省方面,文献[5]基于运动特性的编码块分割算法节省了 4.7% 的编码时间;文献[7]中基于代价值计算的 RDOQ 优化算法节省大约为 3.74% 编码时间;文献[10]基于编码块复杂度分类情况进行的编码单元快速分割算法节省了大约 9.11% 的编码时

法的 10.5% 的时间节省.

因此,基于实验分析,笔者提出的本文算法能够在保证视频质量的同时还能节省编码时间,具有良好的编码性能.

3.2 试验结果主观质量分析

图 2 显示了编码后图像及其红色矩形区域的局部放大图.对比可知,笔者提出的量化判决方法能有效地对均匀量化和率失真优化量化进行自适应选择,量化器选择更加合理.采用本文算法进行编码后,图像局部放大图仍然保留了图像结构信息以及细节,表明该算法在降低了编码器的计算复杂度的同时,仍然能保持图像质量;同时可以看出,虽然本文算法理论上会造成一定的失真(如图 1 所示,视频 R_{PSN} 值有轻微降低),但从主观上看,对视频质量的影响却是有限的.

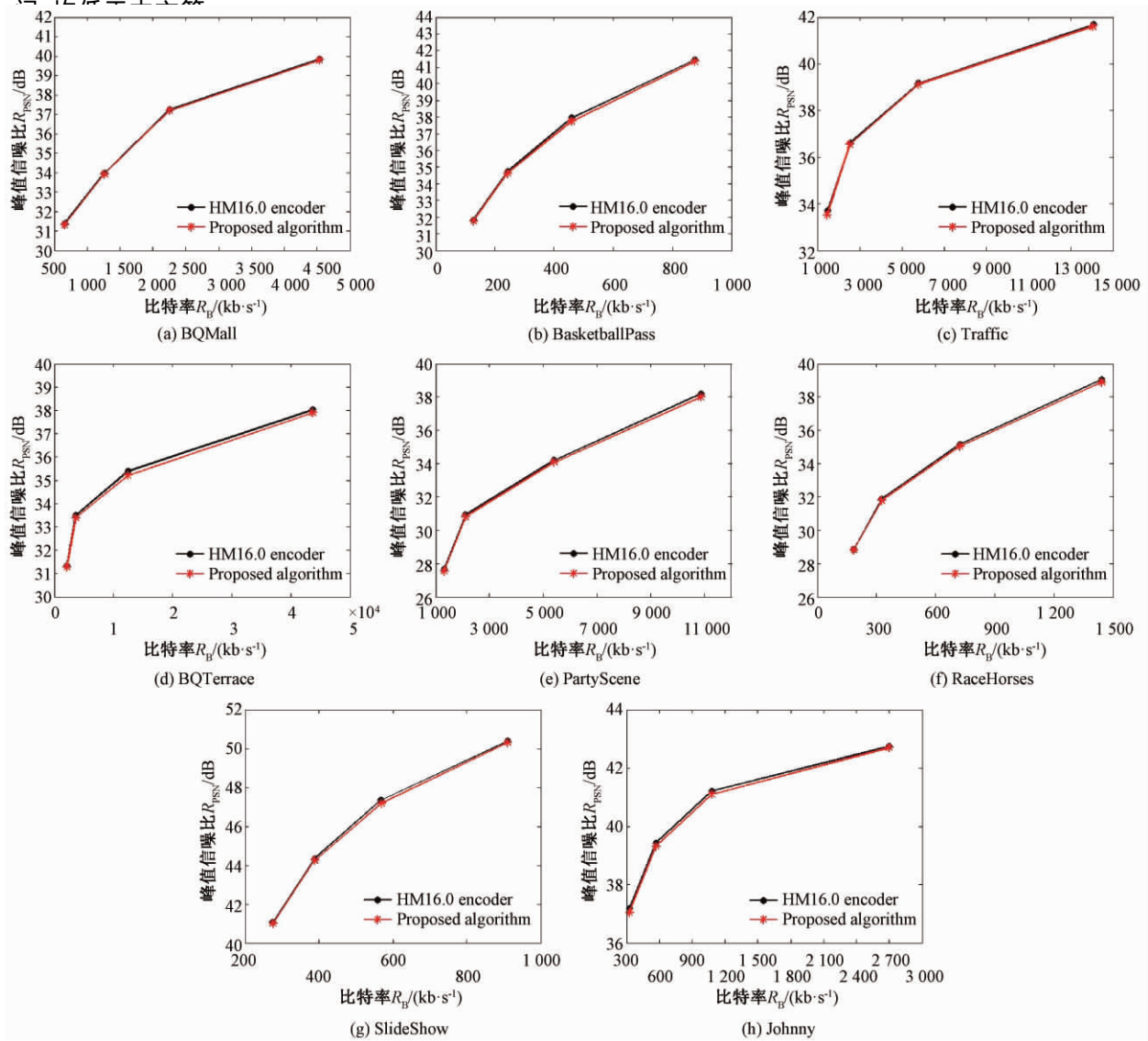


图 1 测试视频序列 RD 曲线图

Fig. 1 The RD curve of test sequences

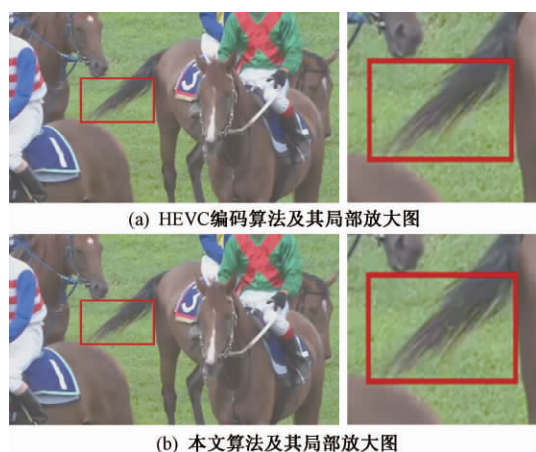


图2 主观质量对比

Fig. 2 The comparison of video subjective qualitys

4 总结

笔者对比分析了视频编码标准中均匀标准量化与率失真优化量化的不同特性,提出了一种基于量化水平的量化器自适应分配方法,通过对不同区域的特征分析自适应地选择合适的量化器.提出的算法不仅能降低 HEVC 编码复杂度,而且实现了较好的编码效果.实验表明,使用本文算法较 HEVC 编码器能节省大约 10.52% 左右的编码时间,同时保持了较好的编码质量.

参考文献:

- [1] TECH G, CHEN Y, MÜLLER K, et al. Overview of the multiview and 3D extensions of high efficiency video coding[J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2016, 26(1): 35–49.
- [2] ZHANG Y F, TIAN R, LIU J G, et al. Fast rate distortion optimized quantization for HEVC[C]// Visual Communications and Image Processing. Singapore: IEEE, 2015: 1–4.
- [3] ZOU F, AU O C, PANG C, et al. Rate-distortion optimized transforms based on the Lloyd-type algorithm for intra block coding[J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2013, 7(6): 1072–1083.
- [4] ARRUFAT A, PHILIPPE P, DÉFORGES O. Rate-distortion optimised transform competition for intra coding in HEVC[C]//IEEE Visual Communications and Image Processing Conference. Valletta, Singapore: IEEE, 2014: 73–76.
- [5] XU Z, MIN B, CHEUNG R C C, et al. A fast inter CU decision algorithm for HEVC[J]. Signal processing image communication, 2018, 60: 211–223.
- [6] LEE H, YANG S, PARK Y, et al. Fast quantization method with simplified rate-distortion optimized quantization for an HEVC encoder[J]. IEEE transactions on circuits & systems for video technology, 2016, 26(1): 107–116.
- [7] STANKOWSKI J, KORZENIEWSKI C, DOMANSKI M, et al. Rate-distortion optimized quantization in HEVC: performance limitations[C]// Picture Coding Symposium. Cairns, Australia: IEEE, 2015: 85–89.
- [8] YANG A S, ZENG H Q, CHEN J, et al. Perceptual feature guided rate distortion optimization for high efficiency video coding[J]. Multidimensional systems and signal processing, 2017, 28(4): 1249–1266.
- [9] ZHANG M M, ZHAI X J, LIU Z. Fast and adaptive mode decision and CU partition early termination algorithm for intra-prediction in HEVC[J]. Eurasip journal on image and video processing, 2017(1): 86.
- [10] FERNÁNDEZ D G, BARRIO A A D, BOTELLA G, et al. Complexity reduction in the HEVC/H265 standard based on smooth region classification[J]. Digital signal processing, 2017, 73: 24–39.
- [11] ORTEGA A, RAMCHANDRAN K. Rate-distortion methods for image and video compression[J]. IEEE signal processing magazine, 1998, 15(6): 23–50.
- [12] SEZER O G, HARMANCI O, GULERYUZ O G. Sparse orthonormal transforms for image compression[C]//2008 15th IEEE International Conference on Image Processing. San Diego, CA: IEEE, 2008: 149–152.
- [13] RAMEZANPOUR M, ZARGARI F. Fast HEVC I-frame coding based on strength of dominant direction of CUs[J]. Journal of real-time image processing, 2016, 12(2): 397–406.
- [14] RAHMANI F, ZARGARI F. Compressed domain visual information retrieval based on I-frames in HEVC[J]. Multimedia tools & applications, 2017, 76(5): 7283–7300.
- [15] LI X, OERTEL N, HUTTER A, et al. Laplace distribution based lagrangian rate distortion optimization for hybrid video coding[J]. IEEE transactions on circuits & systems for video technology, 2009, 19(2): 193–205.
- [16] GONZÁLEZ-DE-SUSO J L, MARTÍNEZ-ENRÍQUEZ E, DÍAZ-DE-MARÍA F. Adaptive lagrange multiplier estimation algorithm in HEVC[J]. Signal processing: image communication, 2017, 56: 40–51.

Rate Distortion Optimization Decision Algorithm of Coding Based on Adaptive Quantizer Selection

LI Nana¹, HUANG Kunqiang², ZHANG Qiuwen¹, LIU Kuan¹

(1. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. College of Mechanical and Telecommunications Engineering, Zhengzhou Technology and Business University, Zhengzhou 451400, China)

Abstract: In order to solve the problem of high complexity of High Efficiency Video coding(HEVC), an efficient adaptive quantizer selection and rate distortion optimized quantization decision algorithm was proposed in this paper. The quantizer determined whether the quantization level of the transform coefficient was equal or zero and whether the sum of quantization levels was less than the set threshold. If the quantization level was equal or zero, the Rate-Distortion Optimized Quantization(RDOQ) was used directly. Otherwise, a threshold decision was made and finally determine the optimal quantizer. The proposed decision algorithm could select two quantization methods: Uniform Scalar Quantizer with small computational complexity and RDOQ with low bit rate self-adaptively, and the computational complexity of the encoder was reduced. The experimental results showed that our proposed algorithm could save about 10.52% of coding time.

Key words: HEVC; quantization; rate-distortion; complexity

(上接第18页)

- [13] GUO Y N, CHENG J, CAO Y Y, et al. A novel multi-population cultural algorithm adopting knowledge migration[J]. *Soft computing* 2011, 15(5): 897-905.
- [14] 曹奔, 袁忠于, 刘洪. 基于粒子群算法的烧结炉系

统辨识及神经网络控制[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2017, 38(5): 39-43.

- [15] 康红普, 王金华. 煤巷锚杆支护理论与成套技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.

An Optimal Active-disturbance-rejection Controller for the Rotary Speed of An Anchor-hole Drill Based on Brain Storm Optimization Algorithm

GUO Yinan, CHENG Wei, YANG Huan, YANG Fan, LU Xiwang

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shanxi Luan Heshun Li Yang Coal Industry Co., Ltd, Changzhi 032701, China)

Abstract: As the key equipment of tunneling a roadway, controlling the anchor-hole drills mainly depends on the operator's rich controlling experience. Improper rotary speed of an anchor-hole drill generally resulted in sticking or breaking pipes, which would reduce the drilling efficiency. Especially, the nonlinearities and time-varying parameters, as well as the disturbances resulted from various factors in the anchor-hole drill rotary system should be taken into consideration. A novel optimal active-disturbance-rejection controller was proposed in the paper. The set value of the rotary speed was dynamically estimated in terms of the geological condition of surrounding rocks. Brain storm optimization algorithm was employed to find the optimal parameters of the controller, which could have the best dynamic and steady control performances. Based on the simulation platform composed of AMESim and Matlab, the experimental results for a single surrounding rock with or without the external disturbance showed that the proposed ADRC controller has better dynamic and steady performances and stronger robustness than the optimal PID controller.

Key words: brain storm optimization algorithm; active-disturbance-rejection control; the rotary speed of anchor-hole drills; geological condition of surrounding rocks; parameter tuning

干扰约束下基于用户需求的多信道频谱接入机制

穆晓敏, 徐茹茹, 张松伟, 韩刚涛

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对认知无线网络中在干扰约束下基于用户需求的分布式多信道机会频谱接入问题, 定义了用户满意度函数用来测度用户满意度, 并基于博弈论构建了信道选择中的优化问题, 在定义用户收益函数时引入干扰约束, 即使认知用户综合考虑用户满意度和干扰两个因素, 在最小化自身干扰量的同时兼顾满意度, 以提高网络整体性能。证明了该博弈问题是至少具有一个纯策略纳什均衡的精确势能博弈, 且纳什均衡点是上述优化问题的最优解。数值仿真结果表明: 兼顾满意度和干扰约束可以使整个网络的总干扰显著降低; 同时提高了公平性, 提升了系统的总体性能。

关键词: 认知无线电; 机会频谱接入; 用户需求; 干扰; 势能博弈; 纳什均衡

中图分类号: TN92

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.023

0 引言

由于人们的无线接入需求不断增长、可分配的频谱资源有限、授权频谱利用率低及频谱利用情况极不平衡等情况的发生, 认知无线电技术应运而生。机会频谱接入是认知无线电技术的一个热门方向^[1-3], 是解决无线频谱资源短缺、频谱利用率低的有效方法。

纵观现有的大部分研究, 往往是考虑到最小化系统干扰, 或者最大化系统吞吐量^[4-6]。随着通信技术的飞速发展, 结合用户需求为其分配资源成为一个热点问题。因此, 近年来从用户角度出发研究基于用户需求的机会频谱接入问题激发了人们的研究兴趣, 并出现了一些研究成果^[7-9]。文献[7-9]均借助博弈论的方法, 构建效用函数时同时考虑用户自身和相邻用户的满意度, 从而达到用户满意度的全局最优。文献[7]根据用户吞吐量大小衡量用户满意度; 文献[8]将业务分为脆性业务、流媒体业务、弹性业务, 根据用户不同的业务类型采用不同的体验函数衡量用户体验水平; 文献[9]则同时考虑频谱接入、功率分配和用户调度3个因素, 衡量小区满意度水平。

上述文献中, 目标是合理分配信道和功率资源, 使每个用户尽可能达到自己的需求, 而忽

略了用户之间相互干扰, 这些干扰将导致网络性能下降, 进而影响用户体验, 因此在考虑用户需求的同时将干扰作为约束条件是必要的。为此, 笔者在文献[7]的基础上, 考虑每个用户的干扰, 构建基于满意度的效用函数, 其目的是在最小化认知用户自身干扰量的同时兼顾满意度, 提高系统总体性能。文中证明了该优化问题是一种精确势能博弈, 且该博弈至少具有一个纯策略纳什均衡点, 并且其纳什均衡点是全局最优解。仿真结果表明, 相对于文献[7], 本文方法考虑认知用户干扰因素后, 在网络总干扰显著降低的同时, 获得了更高的公平性。

1 系统模型和问题描述

1.1 系统模型和基于用户需求的满意度函数

考虑一个包含 N 个认知用户和 M 个授权信道的认知无线动态频谱接入系统。 N 个认知用户在授权用户不使用授权信道时接入信道。 M 个授权信道可以随机被授权用户使用。这里用 $J_n = \{j \in N; (j, n) \in \mathcal{E}_d\}$ 表示用户 n 的相邻用户集合, 即干扰用户集合。图1举例说明了两个授权用户; 4个授权信道 $\{1, 2, 3, 4\}$; 4个认知用户的认知无线网络分布及对应的干扰图。用 $T = \{N, \mathcal{E}_d\}$ 来描述用户之间的干扰关系, 这里顶点集 N 表示认

收稿日期:2018-01-12; 修订日期:2018-03-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1604159, 61571401)

作者简介:穆晓敏(1955—), 女, 河南郑州人, 郑州大学教授、博士生导师, 主要研究方向为多天线无线通信系统、认知无线电、通信信号处理、图像信号处理等, E-mail: iexmmu@zzu.edu.cn.

知用户的集合. 边缘集 $\varepsilon_d = \{ (i, j); \|d_i - d_j\| \leq \delta, i, j \neq i \in N \}$ 表示干扰边的集合. 如果两个认知

用户之间存在边缘, 当这两个用户同时使用相同的信道时, 将产生干扰.

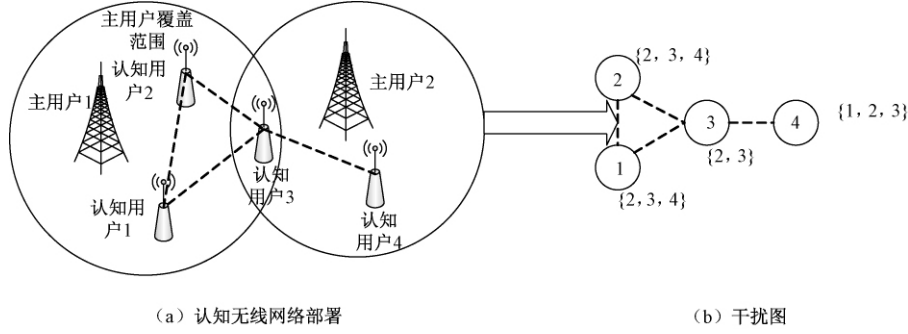


图1 认知无线网络分布及其干扰关系图例

Fig. 1 Example of the considered cognitive radio network and interference graph

用户 n 可用的信道集合可以表示为:

$$A_n = \{m \in M\}. \quad (1)$$

由图 1(b) 可知: $A_1 = A_2 = \{2, 3, 4\}$, $A_3 = \{2\}$, $A_4 = \{1, 2, 3\}$.

文献 [7] 中引入的满意度函数为:

$$s(r_n) = \frac{1}{1 + e^{-c(r_n - d_n)}}, \quad (2)$$

式中: r_n 表示实际分配给用户的资源, 本文为认知用户在多条信道上传输数据时的总吞吐量; d_n 表示用户实际所需吞吐量大小; c 用来调节曲线的坡度. 由式 (2) 分析可知: c 较小时用户需要获取更多的吞吐量才能获得较高的满意度; c 较大时用户满意度虽然较大, 但初始阶段用户即使获得一定量的吞吐量时满意度依然较低. c 的取值不能很好地表示出用户满意度、实际分配的吞吐量和所需吞吐量三者之间的关系. 这里考虑选取一种新的与实际分配给用户的资源大小直接相关的满意度函数.

采用文献 [9] 中的满意度函数如下:

$$s_n(r_n) = \begin{cases} r_n/d_n, & r_n \leq d_n; \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_n 表示实际分配给用户的资源大小; d_n 表示用户需要的资源大小.

由该满意度函数可知, 随着分配给用户的资源增加, 满意度线性增大; 当分配给用户的资源增大到用户所需资源大小时满意度变为 1, 此后如果分配给用户的资源继续增多时满意度不再增加.

1.2 问题描述

本文研究的问题为干扰约束下基于用户需求的多信道机会频谱接入优化问题. 关于此问题文献 [7] 给出了基于用户需求的优化问题, 但实际

应用中用户之间存在较大干扰, 也会对网络的接入产生影响. 因此, 笔者在文献 [7] 的基础上, 构建干扰约束下基于用户需求的多信道机会频谱接入优化问题.

在式 (1) 中, 当 $A_n \neq \phi$ 时, 假定用户 n 选择一组信道集合 $a_n \subset A_n$ 传输数据, 即用户 n 在这一组信道上传输数据.

$$a_n = \{e_n^1, e_n^2, \dots, e_n^i, \dots, e_n^{l_n}\}, \quad (4)$$

式中: e_n^i 表示用户 n 选择的信道集合中的第 i 条信道. 用户 n 在全体用户信道选择 $a = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ 的情况下的吞吐量为:

$$r_n(a_1, a_2, \dots, a_N) = \sum_{i=1}^{l_n} \frac{f(c_n^i + 1) R_{e_n^i}}{c_n^i + 1}, \quad (5)$$

式中: $f(k)$ 为 k 个用户竞争一个单独的信道时的吞吐量损失函数; $R_{e_n^i}$ 为信道 e_n^i 的传输速率; $c_n^i = \sum_{j \in J_n} \delta(e_n^i, a_j)$ 为用户 n 的相邻用户中与用户 n 竞争信道 e_n^i 的用户数目; 求和式表明用户 n 的总吞吐量为用户 n 选择的信道集合中的各个信道的吞吐量之和.

$$\delta(e_n^i, a_j) = \begin{cases} 1, & e_n^i \in a_j; \\ 0, & e_n^i \notin a_j. \end{cases} \quad (6)$$

文献 [7] 中认知用户 n 的收益函数的度量标准就是其满意度函数. 改进后的效用函数如式 (7) 所示, 等式右边第一项为认知用户 n 的满意度, 可以理解为其获得的收益, 第二项为其他用户对认知用户 n 的干扰和, 可以理解为付出的代价. 因此, 用户 n 的净收益函数可以表示为式 (8).

$$u_n(a_1, a_2, \dots, a_N) = s_n(a_1, a_2, \dots, a_N) - \sum_{i=1}^{l_n} c_n^i, \quad (7)$$

$$U_0(a) = \sum_{n \in N} u_n(a_1, a_2, \dots, a_N). \quad (8)$$

本文研究的目标是最大化整个网络的净收益

函数,即认知用户在获得较高的满意度时将用户间干扰降至最小,在满意度和干扰之间进行折中,优化问题如式(9)所示:

$$P: \operatorname{argmax} U_0(a). \quad (9)$$

2 基于博弈论的分布式认知网络多信道机会频谱接入问题

由于该网络模型没有中心控制器,这就促使我们对这个问题建立博弈模型求解,博弈论是研究没有中心控制器的分布式信道选择问题的有效工具.小节以(7)式为基础,充分利用认知用户间的局部相互作用关系,构建效用函数时同时考虑用户自身及其相邻用户的净收益,并证明了该博弈模型是至少存在一个纳什均衡^[10]的精确势能博弈,且其纳什均衡点能够最大化系统净收益.

2.1 效用函数

定义认知用户 $\forall n \in N$ 效用函数如下:

$$U_n(a_n, \mu_{J_n}) = u_n(a_n, \mu_{J_n}) + \sum_{k \in J_n} u_k(a_k, \mu_{J_k}) - [u_n(a_0, \mu_{J_n}) + \sum_{k \in J_n} u_k(a_k, \mu_{J_{k \setminus n}})] = u_n(a_n, \mu_{J_n}) + \sum_{k \in J_n} [u_k(a_k, \mu_{J_k}) - u_k(a_k, \mu_{J_{k \setminus n}})]. \quad (10)$$

式中: $a_{J_n} \in P_{A_{J_n}}$ 表示认知用户 n 的相邻用户策略集合; $I_n = \{k \in J_n: a_k \cap A_n \neq \phi\}$ 表示认知用户 n 的相邻用户中可能和其竞争信道的认知用户集合; $a_0 = \phi$ 表示用户 n 不参与竞争信道; $a_{J_{k \setminus n}}$ 表示当用户 n 放弃竞争信道时用户 k 的相邻用户的策略集合.

由式(10)可以看出,认知用户 n 的效用函数包括自身和其相邻用户的收益.与文献[7]不同的是,每个用户的收益不仅考虑其满意度,还考虑了干扰,使得其在最小化自身干扰量的同时兼顾满意度.

因此,该博弈可以描述如下:

$$G: \max U_n(a_n, \mu_{J_n}). \quad (11)$$

2.2 纳什均衡解的分析

定理 1 G 是至少具备一个纳什均衡的精确势能博弈,并且其纳什均衡点是 P 的最优解^[11].

证明 构建势能函数如下:

$$\Phi(a_1, a_2, \dots, a_N) = \sum_{n \in N} u_n(a_n, \mu_{J_n}). \quad (12)$$

由上式可以看出,势能函数就是网络的净收益.

假设认知用户 n 单方面从信道 a_n 改变到信道 \bar{a}_n , 因此势能函数的变化值为:

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{a}_n, \mu_{-n}) - \Phi(a_n, \mu_{-n}) &= \\ u_n(\bar{a}_n, \mu_{J_n}) - u_n(a_n, \mu_{J_n}) &+ \\ \sum_{k \in I_n} [u_k(a_k, \bar{\mu}_{I_k}) - u_k(a_k, \mu_{I_k})] &+ \\ \sum_{k \in \{J_n \setminus I_n\}} [u_k(a_k, \bar{\mu}_{I_k}) - u_k(a_k, \mu_{I_k})] &+ \\ \sum_{k \in N \setminus \bigcup_n k \neq n} [u_k(a_k, \bar{\mu}_{I_k}) - u_k(a_k, \mu_{I_k})]. \end{aligned} \quad (13)$$

用户 n 的行为改变仅仅影响它的相邻用户中一部分可能和用户 n 竞争信道的用户,可以得到下式:

$$u_k(\bar{a}_k, \mu_{I_k}) - u_k(a_k, \mu_{I_k}) = 0, \forall k \in N \setminus \bigcup_n k \neq n; \quad (14)$$

$$u_k(\bar{a}_k, \mu_{I_k}) - u_k(a_k, \mu_{I_k}) = 0, \forall k \in J_n \setminus I_n k \neq n. \quad (15)$$

认知用户 n 单方面从信道 a_n 改变到信道 \bar{a}_n , 效用函数的变化值为:

$$\begin{aligned} U_n(\bar{a}_n, \mu_{J_n}) - U_n(a_n, \mu_{J_n}) &= u_n(\bar{a}_n, \mu_{J_n}) - \\ u_n(a_n, \mu_{J_n}) &+ \sum_{k \in I_n} [u_k(a_k, \bar{\mu}_{I_k}) - u_k(a_k, \mu_{I_k})] \\ \Phi(\bar{a}_n, \mu_{-n}) - \Phi(a_n, \mu_{-n}) &= U_n(\bar{a}_n, \mu_{J_n}) - U_n(a_n, \mu_{J_n}). \end{aligned} \quad (16) \quad (17)$$

根据式(17)可以看出,该博弈是精确势能博弈.精确势能博弈有如下的性质:任何精确势能博弈至少具有一个纯策略纳什均衡点;势能函数全局或局部最大点是该精确势能博弈的纳什均衡,也就是说,势能函数最优解就是该纯策略纳什均衡点.

定理得证.

3 数值仿真与分析

本节运用常见的学习算法 Spatial Adaptive Play(SAP)^[4]进行数值仿真.因为文献[7]也采用该算法仿真,仿真的过程中已经计算了用户间干扰,而本文只是将计算得到的干扰值构建在效用函数中,所以本文算法和原算法复杂度相同.

基本仿真参数参考文献[7],设置如下:认知用户个数 $N = 20$,信道个数 $M = 3$,假定所有信道具有相同的传输速率 1 Mb/s.由于不同的用户所需的传输速率一般不同,这里设置 70% 的认知用户所需的传输速率分布在 $[0, 1]$, 25% 的认知用户所需的传输速率分布在 $[1, 2]$, 5% 的认知用户所需的传输速率分布在 $[2, 3]$.干扰图如图 2 所示,每个小圆表示一个认知链路.

图 3 纵坐标表示整个网络的干扰水平.可以看出,在考虑干扰因素以后,当迭代次数达到 75 次时,全局干扰衰减为 0,即最终达到系统的稳定状态.这是因为,随着各用户的策略更新,每个用户的干扰值越来越小,从而使得系统中的总干扰

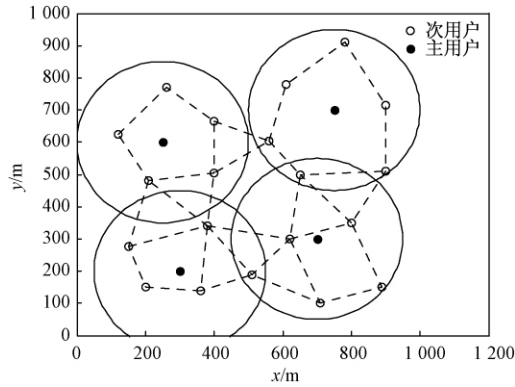


图2 干扰图

Fig. 2 Interference graph

在不断减小,当达到纳什均衡状态时,所有用户都不再改变其策略,全局干扰达到最小值且不再变化.而采用原文献[7]中的方法得到的结果是:随着迭代次数的增加,整个网络干扰值依然很大.这是由于认知用户为了得到较高的满意度会选择多条信道传输信息,此时并没有针对性考虑干扰因素,导致整个网络的干扰很大.

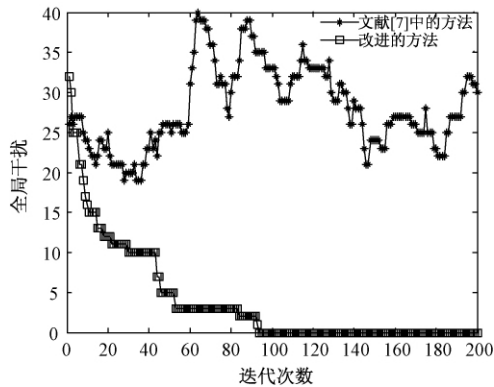


图3 总干扰对比

Fig. 3 Comparison of the total interference

为了使比较更有意义,这里统一采用本文算法的满意度函数.随着分配给用户的资源增大,用户满意度线性增大,当分配给用户的资源增大到用户所需资源时用户满意度变为1.由图4可以看出,随着授权信道空闲概率的增加,用户平均满意度逐渐增加.因为,随着授权信道空闲概率增大,认知用户可用信道资源增加,用户平均满意度必然增加.由图4还可以看出,考虑干扰因素以后用户满意度只是略微低于不考虑干扰时的用户满意度,这是因为考虑干扰因素以后,认知用户会在降低干扰的同时提高满意度,即兼顾两个因素以提高网络的整体性能.

公平度是无线通信比较关注的问题,这里用Jain公平指数(J_{fi})研究公平度问题. J_{fi} 的变化从0~1, J_{fi} 越大,公平性越高,资源分配就越

公平.由图5可以看出, J_{fi} 随着授权信道空闲概率的增大而增大,因为授权信道空闲概率较小时,空闲信道资源较少,仅能满足少量认知用户,因此 J_{fi} 较小.授权信道空闲概率较大时,空闲信道资源增加,在满足更多的认知用户的同时提高了各个用户的满意度,使得 J_{fi} 增加.由图5还可以看出,采用改进的方法的 J_{fi} 比原文献的高,资源分配更加公平.

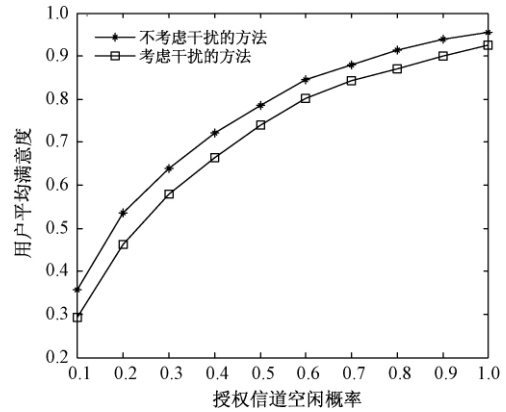


图4 用户平均满意度比较

Fig. 4 Comparison of the users' average satisfaction

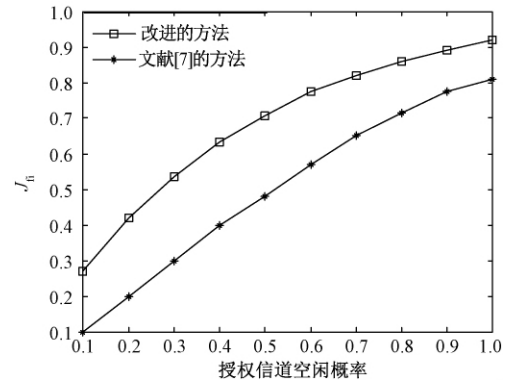


图5 Jain公平指数比较

Fig. 5 Comparison of the Jain's fairness index

4 结束语

笔者同时考虑认知用户需求和干扰两个因素,构建了干扰约束下基于用户需求的多信道机会频谱接入问题.以用户满意度减去干扰值为净收益函数,最大优化采用博弈论的方法,证明该博弈是至少具有一个纯策略纳什均衡的精确势能博弈,且纳什均衡点是上述优化问题的全局最优解.仿真结果证明了优化问题的合理性和有效性,表明考虑干扰因素后,可以显著降低整个网络的抗干扰水平,同时得到较高的用户满意度和更高的公平性,提升了系统总体性能.

参考文献:

- [1] 穆晓敏, 师光强, 刘颖, 等. 一种基于合约的认知网络协作频谱共享策略[J]. 郑州大学学报(工学版) 2016, 37(3): 1-5.
- [2] SAKIN S A, RAZZAQUE A. Game theoretic downlink resource scheduling for self-coexisting cognitive radio networks[C]//International Conference on Networking Systems and Security. Dhaka, Bangladesh: IEEE, 2016: 1-7.
- [3] FUDENBERG D, TIROLE J. Game theory [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1991.
- [4] ACERO D O, EKICI E. Distributed multiple access in multichannel cognitive radio networks via potential games [C]//2015 13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Mumbai, India: IEEE, 2015: 123-130.
- [5] XU Y H, WU Q H, SHEN L, et al. Opportunistic spectrum access with spatial reuse: graphical game and uncoupled learning solutions[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(10): 4814-4826.
- [6] CHEN X, HUANG J W. Distributed spectrum access with spatial reuse[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2013, 31(3): 593-603.
- [7] WU Q H, WU D C, XU Y H, et al. Demand-aware multichannel opportunistic spectrum access: a local interaction game approach with reduced information exchange[J]. IEEE transactions on vehicular technology. 2015, 64(10): 4899-4904.
- [8] ZHANG Y H, YANG F, KAN C R, et al. QoE-aware distributed carrier aggregation in cognitive small cell networks: a game-theory approach [C]//2016 25th Wireless and Optical Communication Conference. Chengdu, China: IEEE, 2016: 1-5.
- [9] ZHANG N, ZHANG S, ZHENG J C, et al. User satisfaction-aware radio resource management in ultra-dense small cell networks [C]//2016 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Chengdu, China: IEEE, 2016: 10-15.
- [10] XU Y H, WANG J L, WU Q H, et al. Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks: global optimization using local interaction games [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2012, 6(2): 180-194.
- [11] GHOSH A, COTTATELLUCCI L, ALTMAN E. Normalized nash equilibrium for power allocation in cognitive radio networks [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking 2015, 1(1): 86-99.

Demand-Aware Multichannel Opportunistic Spectrum Access Mechanism under Interference Constraint

MU Xiaomin, XU Ruru, ZHANG Songwei, HAN Gangtao

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

Abstract: In the paper, the problem of demand-aware distributed multichannel opportunistic spectrum access in cognitive radio networks was investigated. And users' satisfaction function was defined to measure users' satisfaction effect. Moreover, an optimization problem for channel selection was constructed based on game theory. Interference constraint was introduced into the definition of users' income function, which made cognitive users minimizing both users' satisfaction and interference, so the network performance was globally improved. That the game was proved to be an accurate potential game with at least one pure strategy Nash equilibrium, and the Nash equilibrium was also proved to be the optimal solution for the above optimization problem. The simulation was given to verify the correctness of our theoretical analysis. The numerical results showed that taking both satisfaction and interference into account could remarkably reduce the total interference of the whole network, while achieving higher user satisfaction and the best fairness as well; This research could improve the overall performance of the system.

Key words: cognitive radio; opportunistic spectrum access; users' demand; interference; potential game; Nash equilibrium

基于全矢稀疏编码的滚动轴承故障识别方法

郝伟, 林辉翼, 郝旺身, 高亚娟, 董辛旻

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对利用时域信号进行稀疏编码存在的特征时移现象以及单通道信号分析易造成信息遗漏等问题, 将全矢谱技术与稀疏编码相结合, 提出了一种新的滚动轴承故障识别方法: 首先对各状态下的滚动轴承同源双通道信号进行全矢信息融合; 然后将融合后得到的主振矢信号进行字典学习, 以构造各类信号的冗余字典; 最后利用各类字典分别重构测试样本, 将其重构误差的大小作为判断样本状态类别的依据。该方法通过将时域信号全矢融合后转化为主振矢信号, 其训练样本中所包含的信息更加全面准确, 且免去了特征提取步骤, 减少了人为因素的影响。实验结果表明, 该方法计算效率高, 实用性好, 可有效判断出滚动轴承的故障类型。

关键词: 全矢谱; 稀疏编码; 故障诊断; 滚动轴承; 字典学习

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标志码:** doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.007

0 引言

滚动轴承的运行状态良好与否将直接影响机械系统的可靠性和使用寿命, 准确地判断出滚动轴承的运行状态将在很大程度上避免事故发生, 因此对滚动轴承进行状态识别具有重要意义^[1]。

近年来, 由压缩感知发展而来的基于稀疏编码的模式识别方法已广泛应用于图像识别、语音识别等相关领域。在国外, Wright等^[2]首先将稀疏编码应用于模式识别, 其提出的稀疏表征分类(sparse representation classification, SRC)方法经验证是一种有效的人脸识别方法。Yang等^[3]在SRC方法的基础上进行了相关改进, 提出了Meta-face方法, 分别对每类样本学习一组字典, 大大缩小了字典规模, 提高了SRC的识别效率。稀疏编码是一种自适应好、稳定性高的机器学习方法^[4]。近年来国内一些研究人员已尝试将其应用于旋转机械的故障识别, 并提出了一些有效的故障识别方法, 降低了故障诊断的工作难度。Liu等^[5]利用移不变稀疏编码(SISC)对信号进行字典学习, 从而解决了时域信号分割所造成的特征时移问题, 并利用LDA分类器对所提取的稀疏特

征进行模式识别, 取得了较优异的效果, 但是该方法所需的计算量非常大, 在处理海量冗余数据方面具有一定的局限性。朱会杰等^[6]利用频域信号进行字典学习, 且利用计算效率更高的稀疏编码对滚动轴承进行状态识别, 该方法既解决了时域信号特征时移问题, 又提高了识别效率和准确率。但由于该方法仅将单通道信号作为训练样本进行字典学习, 存在信息利用不全面等问题, 所构造字典的鲁棒性有待进一步提高。

基于以上分析, 笔者提出一种结合全矢谱和稀疏编码的滚动轴承故障识别方法。首先利用全矢谱技术对训练样本进行信息融合, 然后利用全矢融合后的主振矢信号构造自适应字典, 从而避免了信息遗漏问题, 由于主振矢信号属于频域信号, 因此也不会出现特征时移现象。最后, 利用稀疏编码对滚动轴承各类信号进行状态识别。

1 全矢谱与稀疏编码理论

1.1 全矢谱理论

在各谐波频率组合作用下, 转子的涡动轨迹为一系列椭圆。全矢谱技术定义上述椭圆的长轴和短轴分别为主振矢和副振矢, 将其作为评价转子振动强度的指标和故障诊断的依据。

收稿日期:2017-10-11; 修订日期:2018-01-22

基金项目:国家重点研发计划专项项目(2016YFF0203100)

作者简介:郝伟(1963—), 男, 山东菏泽人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机械故障诊断研究, E-mail: hwzdj@vip.sina.com。

设 x, y 方向上的离散信号分别为 $\{x_n\}$ 和 $\{y_n\}$, 将其融合为复序列, 即

$$\{z_n\} = \{x_n\} + j\{y_n\}. \quad (1)$$

对 $\{z_n\}$ 做傅里叶变换得到 $\{Z_n\}$, 由傅里叶变换的共轭性可得到:

$$\begin{cases} X_k = \frac{1}{2} [Z_k + Z_{N-k}^*]; \\ Y_k = -\frac{j}{2} [Z_k - Z_{N-k}^*]; \end{cases} \quad (2)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1).$$

再根据傅里叶变换性质可得下式(具体推导过程参考文献[7]):

$$\begin{cases} R_{Lk} = \frac{1}{2N} [|Z_k| + |Z_{N-k}|]; \\ R_{Sk} = \frac{1}{2N} [|Z_k| - |Z_{N-k}|]; \end{cases} \quad (3)$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, N-1),$$

式中: R_{Lk} 为主振矢; R_{Sk} 为副振矢.

全矢谱在算法上结构稳定, 且与单通道分析方法兼容, 可满足实际诊断要求.

1.2 稀疏编码模型

稀疏编码源自生物神经学, 旨在以最高效的编码方式最大程度地反映信号的特征信息. 稀疏编码的数学模型可表示为:

$$X = Ds + \varepsilon = \sum_{k=1}^K d_k s_k + \varepsilon, \quad (4)$$

式中: $X \in \mathbf{R}^{M \times T}$ 为一个输入信号; $D \in \mathbf{R}^{M \times K}$ 为过完备字典; d_k 为字典中的基函数; s 为信号 X 的稀疏表征系数; ε 一般为高斯白噪声.

在式(4)所示模型中, 信号 X 的维数应小于基函数 d_k 的个数, 即 $M < K$, 且在大部分情况下 $M \ll K$, 即字典 D 为过完备字典. 这是由于稀疏编码模型旨在求 X 的稀疏解, 而 D 若为满秩矩阵则将不满足要求.

通常采用 l_0 范数的大小来表征稀疏性, 因此稀疏编码的过程可转化为求解下式:

$$\begin{cases} \min \|s\|_0, \\ \text{s. t. } X = \sum_{k=1}^K d_k s_k. \end{cases} \quad (5)$$

1.3 自适应字典学习

字典学习是稀疏编码中的重要部分, 主要包括固定字典和自适应字典^[8]. 其中自适应字典能根据不同类型的信号自适应地产生最能匹配信号内在结构的基函数库.

采用 K-SVD 算法构造自适应字典, 该算法灵活性、匹配精度高, 主要步骤如下:

(1) 依次将样本信号以列向量赋值给字典矩阵, 构造初始字典 D ;

(2) 根据上述稀疏编码模型, 求解稀疏系数 s ;

(3) 更新字典. 该计算步骤等同于求解以下问题:

$$\min_{D, s} \{ \|X - Ds\|_2^2 \}, \text{ s. t. } \forall i, \|s_i\|_0 \leq T_0, \quad (6)$$

式中: T_0 为稀疏编码中对应基函数上限, 即稀疏度.

2 全矢稀疏编码模式识别原理

2.1 基于全矢谱的模式识别机理

将一段较长的时域信号分割为若干信号段来进行分析是一种常见的信号处理方法. 然而, 由于时域信号中的特征位置分布具有随机性, 因此其中的特征模式会因信号分割而被移动, 从而造成特征时移现象^[9]. 图1为不同状态下滚动轴承两个方向的时域振动信号.

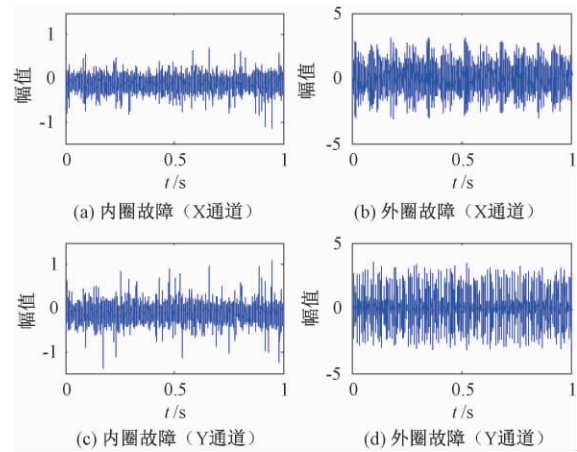


图1 不同状态下的轴承时域信号

Fig. 1 Bearing time domain signals under different status

由图1可知, 当滚动轴承处于不同运行状态时, 其时域信号差异明显. 且当其运行状态相同时, 由于信号采集位置及截取起点的不同, 其时域信号也具有差异. 因此, 基于时间序列对相同状态下的信号进行稀疏编码不能保证其特征模式相同.

文献[6]利用单通道实际信号验证了当滚动轴承处于不同状态时, 其频谱之间具有很大差异, 因此无法互相稀疏表征. 而当滚动轴承处于相同状态时, 其频谱的统计规律相似, 因此可相互稀疏表征.

然而, 对于同一截面上的同源振动信号, 当传感器布置的方向不同时, 所采集到的信号之间往往存在差异. 图2为上述时域信号对应的频谱和将其进行全矢融合后的主振矢谱.

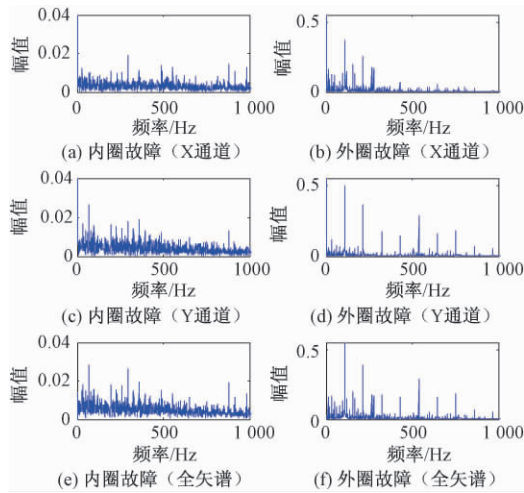


图2 不同状态下的轴承频谱及全矢谱

Fig. 2 Bearing frequency spectrum and full vector spectrum under different status

由图2可知,不同通道的同源信号的频谱结构差别明显,因此相互稀疏表征的效果将会较差.而图2(e)和图2(f)所示的主振矢谱有效地融合了两个通道的频率特征信息,因此可以更好地实现频谱的相互稀疏表征,避免了信息缺失问题的出现.

由上述可知,将两个方向的时域样本信号进行全矢融合后得到其主振矢谱,可更好地利用稀疏编码对样本信号进行状态识别.

2.2 基于稀疏重构误差的模式识别原理

由式(6)可知:当稀疏度 T_0 (稀疏编码的基函数个数)确定时,采用由字典学习算法得到的字典 D 对原信号 X 进行重构,可得到最小的重构误差,即

$$\|X - Ds\|_2^2 \leq \|X - D_l s\|_2^2, \text{ s.t. } \forall i, \|s_i\|_0 \leq T_0, \quad (7)$$

式中: l 为不符合稀疏编码条件的字典的编号, $l \in (0, n)$.

由上述分析可知,当样本信号 X 与字典 D 所对应的状态一致时,该字典 D 符合稀疏编码的模型成立条件,即该样本信号 X 可在已指定的稀疏度 T_0 下很好地被稀疏重构,且其重构误差将会很小.由于不同状态下的主振矢信号之间具有明显差异,则其各自由字典学习算法得到的字典也将差别显著.因此,当样本信号 X 与当前字典 D_l 所对应的状态不同时,字典 D_l 将不适用于对样本信号 X 进行稀疏编码,即样本信号 X 在理论上无法在稀疏度 T_0 下很好地被稀疏重构,其重构误差将会明显较大,即

$$\|X - D_l s\|_2^2 \geq \varepsilon_0, \text{ s.t. } \forall i, \|s_i\|_0 \leq T_0, \quad (8)$$

式中: ε_0 为稀疏编码的误差限.

因此,可根据上述稀疏编码的特点进行状态识别.为了便于对比,将与样本之间具有最小重构误差率的字典类别作为该样本的状态.稀疏编码的重构误差率表示为:

$$\delta = \frac{\|X - Ds\|_2^2}{\|X\|_2^2}. \quad (9)$$

基于全矢稀疏编码的滚动轴承模式识别方法主要步骤如下:

(1) 利用全矢谱技术对滚动轴承同源双通道信号进行融合,把得到的主振矢信号作为训练样本;

(2) 分别对处于每类状态下的主振矢信号进行字典学习,以构造各类状态下所对应的子字典,则所有子字典构成了一个大的基函数库;

(3) 确定稀疏编码中的稀疏度 T_0 ,利用已构造的各类子字典以相同的稀疏度分别对样本信号进行稀疏编码,得到该样本在各类子字典下进行稀疏编码后的重构信号;

(4) 按照式(12)所示计算样本信号和各子字典重构信号之间的重构误差率,当样本与子字典的类别相同时,所得的重构误差率将会很小,且明显小于使用其他子字典重构时所得的误差率.将所得误差率最小的子字典的类别作为该样本的状态类别.

3 实验与分析

本实验采用美国辛辛那提大学智能维护中心提供的滚动轴承数据进行分析.该实验装置如图3所示,其主轴上安装有4个轴承,实验装置中的传动轴由一个直流电机驱动,电动机的转速约为2 000 r/min.转轴和轴承上通过弹性系统施加径向载荷为6 000磅,并且所有轴承都得到了充分润滑.轴承参数如表1所示.在实验中,每个轴承座安装有两个美国PCB公司生产的353B33型ICP加速度传感器(相互垂直布置:一个水平方向,一个垂直方向),因此所采集到的信号属于同源双通道信号,可满足全矢谱融合的基本条件.采样频率为20 000 Hz,每10 min记录一组数据,每组数据共有20 480个点.

表1 实验轴承参数

Tab. 1 Experimental bearing parameters

轴承型号	滚子个数	滚子直径/节圆直径/接触角/ mm mm (°)		
		mm	mm	(°)
ZA-2115 双列轴承	16	8.4	71.5	15.17

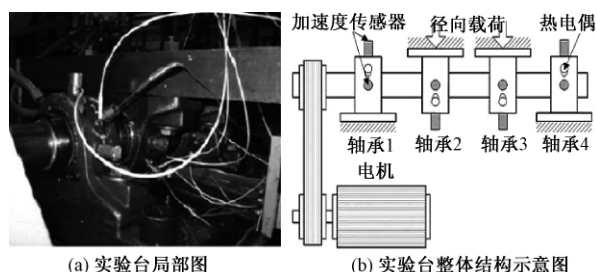


图3 实验装置说明图

Fig. 3 Test Rig Illustration

为了更全面地获取信号中的特征信息,首先,利用全矢 Hilbert 方法对实验信号进行信息融合,得到各信号的 Hilbert 主振矢谱,并以其作为构造字典的训练样本.然后,利用自适应字典学习算法分别对处于内圈故障、外圈故障、滚动体故障及正常状态下的训练样本进行字典学习,得到滚动轴承在各状态下所对应的子字典.每类子字典的基函数个数为 30,稀疏度为 5,训练迭代次数为 80.各类字典中的部分基函数波形如图 4 所示.

由图 4 可知,不同类型字典的基函数差别显著,而相同类型字典的基函数之间具有相似的统计规律.

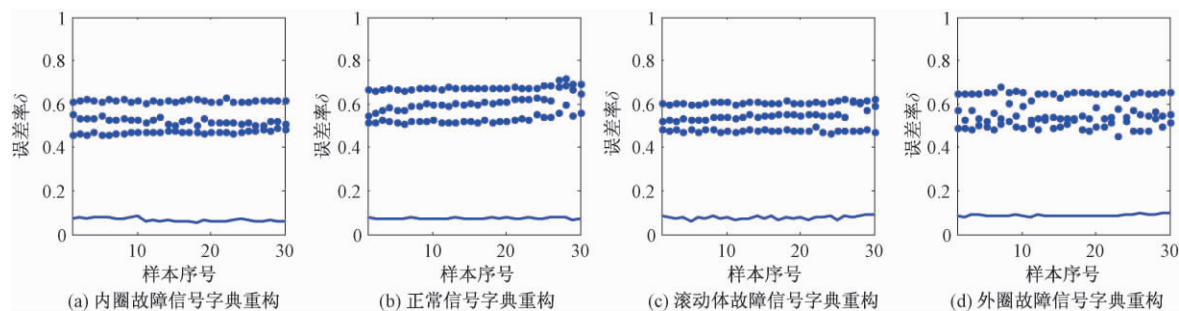


图5 全矢稀疏编码方法得到的分类结果

Fig. 5 Classification result obtained by using the method of full vector sparse coding

由图 5 可知,各类测试样本在与其状态相同的字典下的稀疏重构误差率均远低于在其他字典下的稀疏重构误差率,因而可明显地识别出测试样本的状态类型,且具有很高的准确率.

文献[6,10]分别使用时域信号和单通道频谱作为训练样本构造字典,然后利用稀疏编码的特性对轴承进行了故障检测和分类.为了突出本文方法的优势,分别利用各状态下本实验轴承的时域信号和单通道频谱构造字典,其他分析步骤与本文方法相同,稀疏编码重构结果分别如图 6 和图 7 所示.

由图 6 可知,采用各类字典重构所得到的重构误差率的值很不稳定,区分度也较低.对于与各

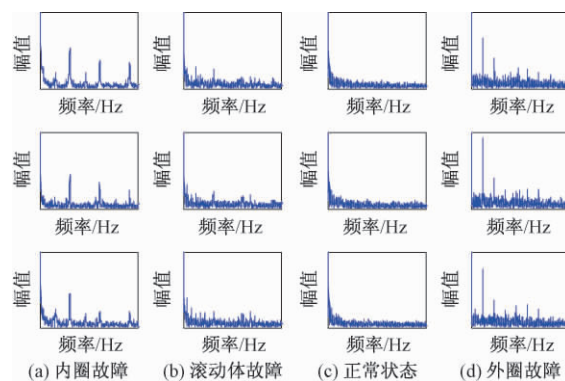


图4 各类字典中的部分基函数

Fig. 4 Some basis functions of each class dictionary

为了验证本文所述方法的有效性,将各状态下的实验信号分割为长度为 2 048 点且不互相重叠的样本,共得到两个通道的样本各 300 组,然后将样本信号进行全矢信息融合,最后以融合后得到的 Hilbert 主振矢谱作为测试样本,利用已构造的各类子字典依次对其进行稀疏编码.实验表明:该方法在所有状态下的平均识别准确率为 99.8%,所得到的部分相应重构误差结果(选取 30 组)如图 5 所示.图中“•”表示采用不同状态类别的字典得到的重构结果,实线表示采用相同状态类别的字典得到的重构结果.

字典状态类别相同的测试样本,其重构误差率仍然较高,甚至多次出现高于其他类型测试样本的情况.因此,通过比较时域信号的重构误差率大小无法判断出测试样本的状态类型,即使用时域信号进行状态识别的效果不太理想.

由图 7 可知,相对于时域分析方法,基于单通道频谱的分析方法可有效识别实验轴承的状态类型,但是其识别准确率低于本文所提出的方法,而且测试样本在对应状态字典下的重构误差和在其他状态类别字典下的重构误差之间的区分度较低,误差率波动也较大,这说明基于单通道频谱的识别方法在稳定性方面也低于基于全矢谱的识别方法.

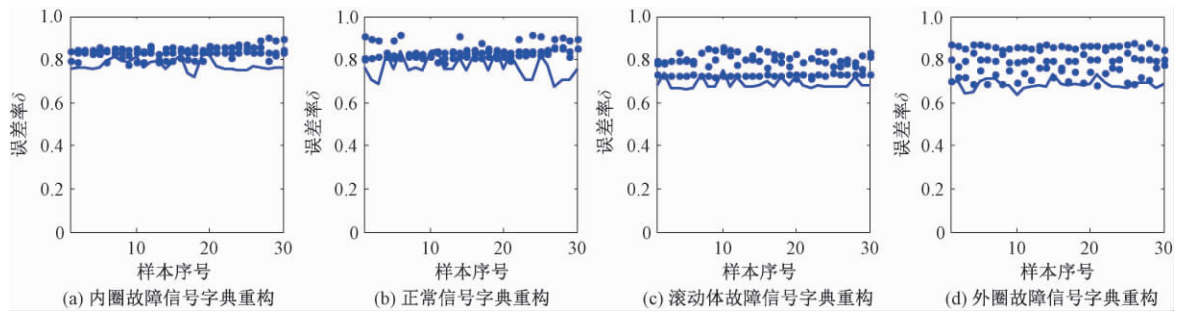


图6 以时域信号作为训练样本得到的分类结果

Fig. 6 Classification result obtained by using time-domain signals as training data

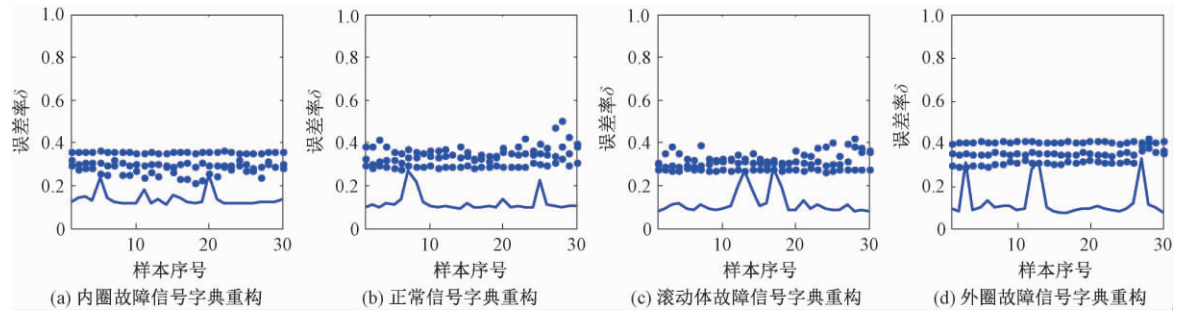


图7 以单通道频谱作为训练样本得到的分类结果

Fig. 7 Classification result obtained by using single channel frequency spectrum as training data

综上所述,融合了双通道信息的全矢稀疏编码模式识别方法的综合性能优于时域分析方法和单通道频谱分析方法。

4 结论

(1) 提出了一种结合全矢谱和稀疏编码的滚动轴承故障识别方法,将滚动轴承信号进行全矢信息融合后得到的主振矢谱作为训练样本进行字典学习,既解决了时域信号的特征时移问题,又解决了单通道信号的特征信息遗漏问题,提高了所构造字典的鲁棒性。实验结果表明,该方法能以较高的准确率和效率实现对滚动轴承信号的状态识别。

(2) 与传统的稀疏编码模式识别方法相比,本文方法省去了人工提取特征的步骤,可减少前期工作量,在处理海量冗余数据方面具有明显的优势。

参考文献:

- [1] 熊庆,张卫华.基于MF-DFA与PSO优化LSSVM的滚动轴承故障诊断方法[J].振动与冲击,2015,34(11):188-193.
- [2] WRIGHT J, YANG A Y, GANESH A, et al. Robust face recognition via sparse representation[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2009, 31(2): 210-227.
- [3] YANG M, ZHANG L, YANG J, et al. Metaface learning for sparse representation based face recognition[C]//IEEE International Conference on Image

Processing. Hong Kong, China: IEEE, 2010: 1601-1604.

- [4] DING X X, HE Q. Time-frequency manifold sparse reconstruction: A novel method for bearing fault feature extraction[J]. Mechanical systems & signal processing, 2016, 80: 392-413.
- [5] LIU H N, LIU C L, HUANG Y X. Adaptive feature extraction using sparse coding for machinery fault diagnosis[J]. Mechanical systems & signal processing, 2011, 25(2): 558-574.
- [6] 朱会杰,王新晴,芮挺,等.基于频域信号的稀疏编码在机械故障诊断中的应用[J].振动与冲击,2015,34(21):59-64.
- [7] 李凌均,陈超,韩捷,等.全矢支持向量回归频谱预测方法[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(3):78-82.
- [8] ZHANG H, CHEN X F, DU Z H, et al. Nonlocal sparse model with adaptive structural clustering for feature extraction of aero-engine bearings[J]. Journal of sound & vibration, 2016, 368: 223-248.
- [9] 苗中华,周广兴,刘海宁,等.基于稀疏编码的振动信号特征提取算法与实验研究[J].振动与冲击,2014,33(15):76-81.
- [10] 张新鹏,胡葛庆,程哲,等.信号稀疏分解理论在轴承故障检测中的应用[J].国防科技大学学报,2016,38(3):141-147.

(下转第47页)

经济负荷分配问题中的约束处理方法研究

吴 擎¹, 张春江², 高 亮³

(1. 华中农业大学 工学院, 湖北 武汉 430070; 2. 南洋理工大学 电机与电子工程学院, 新加坡 639798;
3. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 经济负荷分配是电力系统中重要的优化问题, 该问题有若干约束, 以往文献常采用罚函数法来处理约束, 但罚函数法难以设置罚系数。可行性规则和 ε 约束法是两种高效且常用的约束处理技术, 却难以直接应用于经济负荷分配问题。结合问题的特点, 提出了一种将负荷平衡等式约束转化为边界不等式约束的方法: 利用功率平衡约束, 采用近似法和二次方程求根公式求出一个变量, 并对该变量增加两个边界不等式约束, 然后采用可行性规则或 ε 约束法来处理约束。实验部分采用两个经典的经济负荷分配问题对算法进行了测试。结果表明, 与其他算法相比, 该方法能求得更优的解。

关键词: 经济负荷分配; 约束处理方法; 差分进化算法

中图分类号: TM71 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.003

0 引言

经济负荷分配问题 (economic load dispatch problem, EDP) 的目标是在满足各种等式与不等式约束的情况下减少总燃料成本。求解 EDP 的优化方法大体可以分为两类: 传统的数值优化方法和智能优化方法。传统的优化方法包括线性规划、二次规划和内点法等^[1-2]。这类方法高效且精确, 但对初始值很敏感, 易提前收敛于局部最优解。智能优化方法包括遗传算法^[3-4]、进化策略^[5]、粒子群优化^[6-7]和差分进化算法 (differential evolution, DE)^[8-9]等。此类方法对所求问题的特性没有要求, 还能应用于复杂的大规模优化问题^[10], 因而被越来越多的学者所采用。为了提高效率和精度, 这些算法往往经过了复杂的改进, 例如有些算法^[11]还需借助于二次序列规划的局部搜索能力, 这些改进在很大程度上给使用者带来了麻烦。因此, 笔者将采用最基本的差分进化算法^[12]来求解该问题。

本文的重点在于约束处理方法。前面提到的方法大部分采用罚函数法, 该方法需要设置罚系数, 易造成过惩罚或欠惩罚的问题。智能优化算法中最常用的约束处理方法有可行性规则 (feasibility rules, FR)^[13]和 ε 约束法^[14]。这两种方法简单高效且易于与进化算法结合, 因而得到了非常广泛的应用^[15]。但在 EDP 中, 却鲜少发现这两种方法的存在。通过分析 FR 和 ε 约束法的特性以及所求问题的特点, 发现了这两种方法不适合求解 EDP 问题的原因。在此基础上, 结合 EDP 问题的特点, 笔者提出了一种将负荷平衡约束转化为边界不等式约束的方法, 转化后在进化算法中采用 FR 和 ε 约束法便十分有效了。实验结果表明, 即便采用最简单的差分进化算法, 仍然能求得非常有竞争力的解。

EDP 的目标是在一定时间内在满足电力系统运行条件的情况下, 通过对发电机组的发电功率进行优化使得系统的燃料成本最小。

电力系统燃料成本 FC 是每个发电机组燃料成本的总和, 如式 (1) 所示:

1 EDP 的数学模型

$$\text{Min } FC = \text{Min} \sum_{i=1}^n FC_i(p_i), \quad (1)$$

式中: n 为系统的发电机组数; p_i 为第 i 台发电机组功率; $FC_i(p_i)$ 为第 i 个发电机组的燃料成本函数。 $FC_i(p_i)$ 通常被拟合为一个二次多项式, 如式

收稿日期: 2018-01-25; 修订日期: 2018-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61603145)

作者简介: 吴擎 (1988—), 女, 湖北孝感人, 华中农业大学讲师, 博士, 主要从事智能优化算法及其应用研究, E-mail: wuqing@mail.hzau.edu.cn.

(2) 所示:

$$FC_i(p_i) = a_i p_i^2 + b_i p_i + c_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

式中: a_i, b_i, c_i 为燃料成本的系数.

考虑以下4个约束.

(1) 功率平衡约束. 在考虑系统损耗的情况下, 电力系统的发电功率应等于实际功率需求 D 与系统的转运损耗 P_L 之和, 如式(3)所示:

$$\sum_{i=1}^n p_i = D + P_L. \quad (3)$$

系统的转运损耗由式(4)计算:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i B_{ij} p_j + \sum_{i=1}^n B_{i0} p_i + B_{00}, \quad (4)$$

式中: B_{ij}, B_{i0}, B_{00} 为损耗系数.

(2) 电机发电功率范围约束. 单个发电机组的发电功率 p_i 必须满足最小与最大功率约束 p_{imin}, p_{imax} , 即

$$p_{imin} \leq p_i \leq p_{imax}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

(3) 功率升降限制约束. 考虑输出功率的升降限制, 即较前一次的输出功率相比, 当前的输出功率要在一定的范围之内. 具体约束如下式所示:

$$p_i^0 - DR_i \leq p_i \leq p_i^0 + UR_i, i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

式中: p_i^0 为前一次的输出功率; DR_i 为当前功率下降时下降范围的限度; UR_i 为功率上升时上升范围的限度.

(4) 禁止功率区域约束. 某些发电机组有一些禁止功率区域. 其约束如式(7)所示:

$$p_i \in \begin{cases} p_i^{\min} \leq p_i \leq p_i^l; \\ p_{i, k-1}^u \leq p_i \leq p_{i, k}^l; & k = 2, \dots, zo_i. \\ p_{i, zo_i}^u \leq p_i \leq p_i^{\max}, \end{cases} \quad (7)$$

式中: $p_{i, k}^l$ 和 $p_{i, k}^u$ 为发电机组 i 的第 k 个禁止区的下界和上界.

2 约束处理

当采用进化算法求解上述问题时, 式(5)表示的电机发电功率范围约束通常被处理为自变量的边界约束.

数学模型中有4个约束, 通常将发电机组功率范围约束和功率升降限制约束结合形成如下的自变量边界约束:

$$\max(p_i^{\min}, p_i^0 - DR_i) \leq p_i \leq \min(p_i^{\max}, p_i^0 + UR_i), \quad (8)$$

可对新解中的越界分量重新赋值来处理该约束. 对于功率平衡约束和禁止功率区域约束, 以往文献中通常采用罚函数法. 除罚函数法以外, 可行性规则(feasibility rules, FR)与 ε 约束处理法是进化

算法中两种常见的约束处理方法^[15], 都可以用来比较两个解的优劣.

FR最初用于遗传算法中的锦标赛选择, 其具体表述如下: 当两个解都不可行时, 根据约束违反量的大小来比较优劣; 当两个解一个可行、另一个不可行时, 可行解优于不可行解; 当两个解都是可行解时, 根据目标函数的大小比较优劣.

ε 约束法最初由 Takahama 和 Sakai^[16] 提出, 与 FR 一样, ε 约束法也可用来比较两个解的优劣, 只是在比较的时候增加了一个参数 ε . 比较规则如下: 当两个解的约束违反量都大于 ε 时, 根据约束违反量的大小比较优劣; 当两个解的约束违反量一个小于 ε 、另一个大于 ε 时, 前者优于后者; 当两个解的约束违反量都小于 ε 时, 根据目标函数的大小来比较优劣. 实际上, 当 $\varepsilon = 0$ 时, ε 约束法就等同于 FR. 通常采用下式来控制 ε 值^[15]:

$$\varepsilon(0) = \varphi(X_\theta);$$

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon(0) (1 - t/T_c)^{cp}, & 0 < t < T_c; \\ 0, & t \geq T_c, \end{cases} \quad (9)$$

式中: ε 的初值 $\varepsilon(0)$ 被设为在初始种群中排第 θ 位的约束违反量 $\varphi(X_\theta)$; t 为当前迭代次数. 当迭代次数 t 小于 T_c 时, ε 值按指数形式下降, 下降速度由参数 cp 控制; 否则的话, 将 ε 取值为 0.

EDP 中功率平衡等式约束会使得约束优化的可行域变为一个超平面. 当问题的维度很大时, 很难找到这个超平面上的可行解. 另一方面, 这个可行域超平面还很大, 这意味着当偏好可行解的 FR 找到一个可行解后, 就很难搜寻到远处的最优解了. ε 约束法能增加可行域的大小, 在一定程度上能克服 FR 的缺点, 但这种对可行域的扩增是暂时的, 当 ε 下降为 0 时, 其本质上仍然是可行性规则. 如果此时还没有找到超平面上邻近最优解的可行解, 就很容易陷入超平面上的局部最小值. 为了降低求解难度, 通常的做法是将等式约束松弛为一个不等式约束, 如式(10)所示. 但这一方面难免影响到解的精确性, 另一方面松弛为不等式约束后, 可行域的范围还是很小.

$$\left| \sum_{i=1}^n p_i - D - P_L \right| - \sigma < 0, \quad (10)$$

式中: σ 为一个很小的常数, 如 $1e-3$.

这里采用以下的改进方法处理功率平衡约束: 采用 DE 来求解该问题时, 只对前 $n-1$ 个变量进行优化. 在计算目标函数时, 先根据功率平衡约束求解第 n 个未被优化的变量 p_n , 并增加 p_n 的

两个边界约束,如式(11)所示,然后采用可行性规则或 ε 约束法来处理这两个约束:

$$\begin{cases} p_{n\min} - p_n < 0; \\ p_n - p_{n\max} < 0. \end{cases} \quad (11)$$

功率平衡约束为一个二次式.对于二次式,可采用求解二次方程的方法来进行转换,将式(3)转化如下:

$$B_m p_n^2 + \left(\sum_{i=1}^{n-1} p_i B_{in} + \sum_{j=1}^{n-1} B_{nj} p_j + B_{n0} - 1 \right) p_n + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} p_i B_{ij} p_j + \sum_{i=1}^{n-1} (B_{i0} - 1) p_i + B_{00} + D = 0.$$

$$\text{令 } a = B_{nn}; b = \sum_{i=1}^{n-1} p_i B_{in} + \sum_{j=1}^{n-1} B_{nj} p_j + B_{n0} - 1;$$

$$c = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} p_i B_{ij} p_j + \sum_{i=1}^{n-1} (B_{i0} - 1) p_i + B_{00} + D.$$

则根据一元二次方程的求根公式可得:当 $b^2 - 4ac \geq 0$ 时 $p_n = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.在这种情况下 b

值通常接近 -1 , $\sqrt{b^2 - 4ac} < b$,因此,方程的两个根都是正值.但是两根中的较小值通常符合范围约束,而较大值却远远超出可行域的范围,因此,在这里取根为:

$$p_n = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (12)$$

但并不是所有的情况下,都满足 $b^2 - 4ac \geq 0$.尤其是在搜索过程的早期,通常 $b^2 - 4ac < 0$,此时不能采用一元二次函数的求根公式求解 p_n 值.因此,对式(3)进行简单变形,如下式所示:

$$p_n = D + P_L - \sum_{i=1}^{n-1} p_i. \quad (13)$$

此处采用了上次迭代中的 p_n 值来计算 P_L ,能够如此简化的原因是,相对于 p_n , P_L 的值较小, p_n 对 P_L 的贡献值也很小,采用不精确的 p_n 对 P_L 的影响不大.通过上式可求得 p_n 的近似值,也能很快搜寻到可行域附近.当搜寻到可行域附近后,易满足 $b^2 - 4ac \geq 0$ 的条件,然后就可根据式(12)求得满足功率平衡约束的可行解.

该约束处理方式的优势有三点:最重要的是将可行域极小的等式约束转化为了可行域较大的不等式约束,易找到可行解.其二,缩减了问题的一个维度,把 n 维的问题缩减到了 $n-1$ 维.第三,不需要对等式约束进行松弛,能获得精确解.

对于功率禁止区域约束,如果 p_i 位于第 k 个禁止区域中: $p_{ik}^l \leq p_i \leq p_{ik}^u$,采用式(14)计算其

约束违反量的值.对每一项求和就可得到功率禁止区域约束的约束违反量值.

$$\phi(p_{ik}) = \min(p_i - p_{ik}^l, p_{ik}^u - p_i). \quad (14)$$

3 实验结果与分析

3.1 约束差分进化算法

这里采用差分进化算法作为优化方法.差分进化算法(DE)最初由Storn & Price^[12]在1997年提出,它具有简单、高效、参数少、易于编程实现等优点.DE是近年来得到关注最广泛的进化算法之一.它有4个基本步骤:初始化;变异;交叉;选择.根据变异策略及交叉方式的不同,DE算法有很多变种,这里采用最基本的DE/rand/1/exp.

结合可行性规则的DE的伪代码如图1所示.结合 ε 约束法的DE的伪代码与之类似.

```

DE/rand/1/exp-FR
{
    P(0): 从可行域随机生成N个个体{x'}为初始种群;
    for (t=1; t ≤ T_max; t++) {
        for (i=1; i ≤ N; i++) {
            从 [1, N] 中随机选择 p1, p2 和 p3
            s.t. p1 ≠ p2 ≠ p3 ≠ i;
            x^new = x' ∈ P(t-1);
            从 [1, n] 中随机选择 j;
            k=1;
            do { //交叉
                x_j^new = x_j^p1 + F(x_j^p2 - x_j^p3) //变异
                if (x_j^new < L_k || x_j^new > U_k) //边界处理
                    x_j^new = x_j^i
                j = (j+1) % n;
                k++;
            } while (k ≤ n && u(0,1) < CR);
            采用可行性规则比较 x^new 和 x' //选择
            if (x^new 优于 x')
                z^i = x^new;
            else
                z^i = x';
        }
        P(t) = {z^i, i=1, 2, ..., N}
    }
}

```

图1 结合可行性规则的DE/rand/1/exp的伪代码

Fig. 1 Pseudo code of DE/rand/1/exp with Feasibility rules

3.2 实例描述及参数设置

选用两个经典问题^[7]来进行测试,将其分别命名为EDP1和EDP2.EDP1包含6个发电单元,26根总线和46根传输线,总功率需求是1263 MW,6个单元的特性及损耗系数 B 值见文献[7].

EDP2包含15个发电单元,总功率需求是2630 MW,15个单元的特性及 B 值见文献[7],约束差分进化算法参数设置如表1所示.

表 1 算法参数设置

Tab. 1 Parameter setting of algorithm

参数符号	参数含义	参数值
N	种群数量	20
$MaxFES$	最大评估次数	5 000(EDP1) 20 000(EDP2)
F	缩放系数	0.95
CR	交叉概率	0.98
σ	约束容许量	0.000 1
θ	ε 约束参数 1	0.8 N
T_c	ε 约束参数 2	0.4 T_{max}
cp	ε 约束参数 3	4

3.3 实验结果

3.3.1 4 种方案比较

将 FR 与 DE 结合并采用式(10)处理功率平衡约束称为方案 1;将 ε 约束法与 DE 结合并

采用式(10)处理功率平衡约束称为方案 2;将 FR 与 DE 结合并采用改进方法处理功率平衡约束称为方案 3;将 ε 约束法与 DE 结合并采用改进方法处理功率平衡约束求称为方案 4.

4 种方案在 EDP1 和 EDP2 上独立运行 30 次的统计结果如表 2 所示.从表 2 可见,对于 EDP1 和 EDP2,方案 3 和方案 4 的结果明显优于方案 1 和方案 2.对于 EDP1,方案 2 的结果也明显优于方案 1,可见对于该问题 ε 约束法是有效的.方案 3 和方案 4 没有显著性差异,这是因为采用改进方法处理功率平衡约束后,算法的效率很高,方案 3 和方案 4 都能找到很好的解.对于 EDP2,方案 1 的最优值和最差值要优于方案 2,但方案 2 的平均值要优于方案 1,而方案 4 的结果优于方案 3,可见 ε 约束法表现较好.

表 2 4 种方案在 EDP1 和 EDP2 上的统计结果

Tab. 2 Statistical results for four tests on EDP1 and EDP2

方案	EDP1				EDP2			
	最优值	平均值	最差值	标准差	最优值	平均值	最差值	标准差
方案 1	15 444.13	15 465.46	15 499.12	17.402 2	32 955.35	33 107.18	33 239.68	75.594 12
方案 2	15 444.10	15 459.46	15 493.81	10.654 0	32 972.38	33 079.71	33 251.82	75.081 19
方案 3	15 443.57	15 443.57	15 443.57	3.82E-07	32 698.79	32 705.12	32 751.61	14.841 84
方案 4	15 443.57	15 443.57	15 443.57	2.79E-07	32 698.38	32 700.12	32 702.80	1.144 96

4 种方案在两个问题上的收敛过程如图 2 和图 3 所示.在搜索前期,方案 1 出现了目标函数值的波动,这是因为在可行性规则下,方案 1 力求找到可行解,只优化约束违反量.而方案 2 在 ε 约束的作用下,可以先优化目标函数,因而刚开始时方案 2 获得了很小的目标函数值,但随着 ε 的减小,目标函数值越来越大;当 ε 快变为 0 时,收敛曲线在最优解附近停留了一段时间,但最终丢失了该解,陷入了局部最优.这是因为在功率平衡等式约束下,可行域太小,而可行性规则和 ε 约束法偏

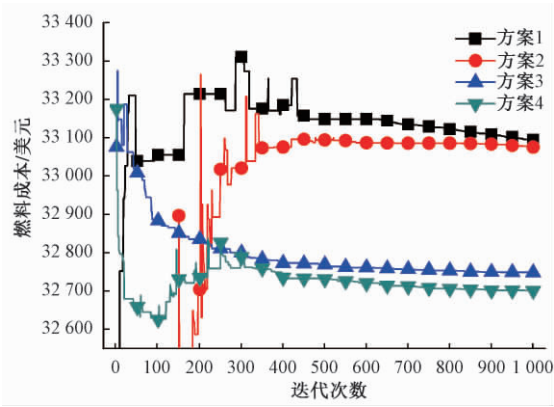


图 3 4 种方案在 EDP2 上目标函数的收敛图

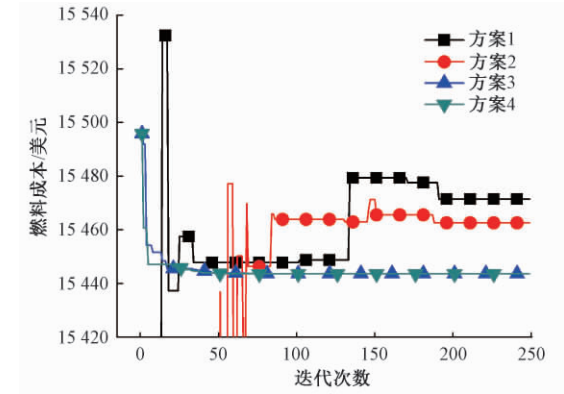


图 2 4 种方案在 EDP1 上目标函数的收敛图

Fig. 2 Convergence plots of four tests on EDP1

Fig. 3 Convergence plots of four tests on EDP2

好可行解,难以找到全局最优.而方案 3 和方案 4 对唯一的等式约束进行了处理,使算法中的种群都是可行解,能直接优化目标函数.因此,方案 3 和方案 4 都极快地收敛到了全局最优解.

对于 EDP2,方案 1 和方案 2 的表现与 EDP1 中类似.但因为该问题维度较高,方案 1 和方案 2 的解与方案 3 和方案 4 相差较大.方案 3 和方案 4 相比,很显然, ε 约束法在这里起了很大作用.方案 4 中,目标函数值先迅速下降,随着 ε 的减小,略有上升,然后再缓慢下降.与方案 2 不同的是,

方案 4 中的目标函数值变化比较缓慢,不至于丢失近优解。

3.3.2 与文献方法的比较

文献中有很多算法对该问题进行了求解,如模拟退火算法(simulated annealing, SA)^[17]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[6]、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)^[6-7,18]、人工免疫系统(artificial immune system, AIS)^[19]。这些算法均采用罚函数方法来处理约束,并且大多在基础算法上进行了改进。

各种算法的统计结果如表 3 和表 4 所示。表中展示了各算法在多次运行下的最优值、平均值、最差值和标准差。某些算法的标准差未知,对于函数评估次数,PSO 和 GA 均为 20 000 次;CPSO(charotic particle swarm optimization)算法在文献[7]中未给出局部搜索的参数,但能推算出函数评估次数要大于 14 400;对于 SOH_PSO(self-organizing hierarchical particle swarm optimization)^[18]在 EDP2 上的种群数量达到了 400 和 500,即使其函数迭代次数只有 125,其函数评估次数也分别为 50 000 和 62 500,远超方案 3 和方案 4 在 EDP2 上的最大函数评估次数 20 000。通过这些数据可知,方案 3 和方案 4 在 EDP1 和 EDP2 上的最大函数评估次数(分别为 5 000 和 20 000)是比较少的。

表 3 在 EDP1 上各算法的统计结果

Tab. 3 Statistical results of some algorithms on EDP1

美元				
算法	最优值	平均值	最差值	标准差
SA	15 461.10	15 488.98	15 545.50	28.37
GA	15 459.00	15 469.00	15 524.00	—
PSO	15 450.00	15 454.00	15 492.00	—
CPSO	15 446.00	15 449.00	15 490.00	—
SOH_PSO	15 446.02	15 497.35	15 609.64	—
AIS	15 448.00	15 459.70	15 472.00	6.25
方案 3 算法	15 443.57	15 443.57	15 443.57	3.82E-07
方案 4 算法	15 443.57	15 443.57	15 443.57	2.79E-07

表 4 在 EDP2 上各算法的统计结果

Tab. 4 Statistical results of some algorithms on EDP2

美元				
算法	最优值	平均值	最差值	标准差
SA	32 786.40	32 869.51	33 028.95	112.32
GA	33 113.00	33 337.00	33 228.00	—
PSO	32 858.00	33 331.00	33 105.00	—
CPSO	32 834.00	33 021.00	33 318.00	—
SOH_PSO	32 751.00	32 878.00	32 945.00	—
AIS	32 854.00	32 873.25	32 892.00	10.81
方案 3 算法	32 698.79	32 705.12	32 751.61	14.84
方案 4 算法	32 698.38	32 700.12	32 702.80	1.14

从表 3 可见,对于 EDP1,方案 3 和方案 4 的结果要全面优于所比较的算法。其原因就在于等式约束的存在,而采用罚函数的方法容易造成过惩罚,使算法偏好可行解,容易收敛到局部最优。

从表 4 可见,对于 EDP2,方案 4 在所有指标中都是最优的;而方案 3 的结果也远优于其他算法。由此可见,对于维度较大的问题,采用罚函数法来处理约束的效果更差。采用改进方法处理功率平衡约束后,FR 和 ε 约束法均能求得较好的结果,特别是 ε 约束法的效果更佳。

4 结语

可行性规则与 ε 约束法是进化算法中两种常用的约束处理方法。在以往的文献中,虽然有很多的进化算法被用来求解 EDP 问题,但大部分约束处理方法都是传统的罚函数法。笔者分析了 EDP 问题中不适合采用可行性规则和 ε 约束法的原因,并提出了一种将 EDP 中的功率平衡约束转换为不等式约束的方法。实验结果表明,采用该方法时,即便是采用最基本的差分进化算法,也能求得非常有竞争力的解。

参考文献:

- [1] ADLER R B, FISCHL R. Security constrained economic dispatch with participation factors based on worst case bus load variations[J]. IEEE transactions on power apparatus and systems, 1977, 96(2): 347-356.
- [2] IRISARRI G, KIMBALL L M, CLEMENTS K A, et al. Economic dispatch with network and ramping constraints via interior point methods[J]. IEEE transactions on power systems, 1998, 13(1): 236-242.
- [3] LING S H, LEUNG F H F. An improved genetic algorithm with average-bound crossover and wavelet mutation operations[J]. Soft computing, 2007, 11(1): 7-31.
- [4] 杨胡萍,李威仁,左士伟,等. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化[J]. 郑州大学学报(工学版) 2015, 36(6): 66-69.
- [5] PEREIRA-NETO A, UNSIHUAY C, SAAVEDRA O R. Efficient evolutionary strategy optimisation procedure to solve the nonconvex economic dispatch problem with generator constraints[J]. IEEE proceedings-generation, transmission and distribution, 2005, 152(5): 653-660.
- [6] GAING Z L. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints[J]. IEEE transactions on power systems, 2003, 18

- (3): 1187 – 1195.
- [7] CAI J J, MA X Q, LI L X, et al. Chaotic particle swarm optimization for economic dispatch considering the generator constraints [J]. Energy conversion and management, 2007, 48(2): 645 – 653.
- [8] COELHO L S, MARIANI V C. Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve-point effect [J]. IEEE transactions on power systems, 2006, 21(2): 989 – 996.
- [9] 吴亮红,王耀南,袁小芳,等. 基于快速自适应差分进化算法的电力系统经济负荷分配[J]. 控制与决策, 2013, 28(4): 557 – 562.
- [10] 梁静,刘睿,瞿博阳,等. 进化算法在大规模优化问题中的应用综述[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(3): 15 – 21.
- [11] VICTOIRE T A A, JEYAKUMAR A E. Hybrid PSO – SQP for economic dispatch with valve-point effect [J]. Electric power systems research, 2004, 71(1): 51 – 59.
- [12] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. J Global Optim, 1997, 11(4): 341 – 359.
- [13] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2000, 186(2/4): 311 – 338.
- [14] TAKAHAMA T, SAKAI S. Constrained optimization by the ε constrained differential evolution with gradient-based mutation and feasible elites [C]//2006 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (CEC). Vancouver, BC: IEEE, 2006: 1 – 8.
- [15] MEZURA-MONTES E, COELLO C A C. Constraint-handling in nature-inspired numerical optimization: past, present and future [J]. Swarm and evolutionary computation, 2011, 1(4): 173 – 194.
- [16] TAKAHAMA T, SAKAI S, IWANE N. Constrained optimization by the ε constrained hybrid algorithm of particle swarm optimization and genetic algorithm [C]//Proceeding of AI 2005: Advances in Artificial Intelligence. Berlin: Springer, 2005: 389 – 400.
- [17] POTHIA S, NGAMROO I, KONGPRAWECHNON W. Application of multiple tabu search algorithm to solve dynamic economic dispatch considering generator constraints [J]. Energy conversion and management, 2008, 49(4): 506 – 516.
- [18] CHATURVEDI K T, PANDIT M, SRIVASTAVA L. Self-organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch [J]. IEEE transactions on power systems, 2008, 23(3): 1079 – 1087.
- [19] PANIGRAHI B K, YADAV S R, AGRAWAL S, et al. A clonal algorithm to solve economic load dispatch [J]. Electric power systems research, 2007, 77(10): 1381 – 1389.

Study of Constraint Handling Methods in Economic Load Dispatch Problem

WU Qing¹, ZHANG Chunjiang², GAO Liang³

(1. School of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore; 3. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Economic load dispatch was an important problem in power system. Some constraints existed in this problem. In the literature, penalty function methods were usually used. However, it was difficult to set proper penalty coefficients. Feasibility rules and ε constraint method were two popular constraint handling techniques. However, they were not efficient for economic load dispatch problem. A constraint handling method that could transform the load balance constraint to two boundary constraints was proposed in this paper. Taking advantage of the load balance constraint, variable was solved by using approximation method and the root of quadratic equation. Therefore, two boundary inequality constraints were added for the variable. Feasibility rules and ε constraint method were used to handle the constraints. Two classic instances were tested in the numerical experiment part. The results showed the proposed algorithm could obtain better solutions than other coarsed algorithms in the literature.

Key words: economic load dispatch problem; constraint handling method; differential evolution

文章编号:1671-6833(2019)03-0042-06

$\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸降解莲房中高聚体原花青素研究

陈卫航, 张惠, 张婕

(郑州大学 化工与能源学院 河南 郑州 450001)

摘要: 高聚体原花青素的抗氧化性能明显不如低聚体,而且不易被人体吸收利用. 该研究致力于制备性能优良的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸催化剂,采用该固体酸降解莲房中提取的高聚体原花青素. 用紫外分光光度计和凝胶色谱仪进行分析,以平均聚合度和降解率作为参考指标,对该反应的降解效果进行评价. 研究表明,以 10 mL 高聚体原花青素溶液作为降解原料,固体酸加入量为 0.05 g,反应温度为 70 ℃,反应时间为 60 min 的反应条件下,高聚体的平均聚合度从 5.95 降为 2.31,降解率可以达到 61.18%.

关键词: 高聚体原花青素; 固体酸; 降解; 平均聚合度; 降解率

中图分类号: TQ461; TS201.1 文献标志码: A doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.010

0 引言

原花青素(Proanthocyanidins, PC)是一种抗氧化剂^[1]. 经研究发现,其是目前世界上清除人体自由基最有效的天然产物,大量存在于植物的种子、花和皮等部位中,在医药、保健品、化妆品领域应用广泛. 莲房含有丰富的原花青素,如提取,可变废为宝^[2]. 原花青素按聚合度划分,分为低聚体(平均聚合度 ≤ 4)和高聚体(平均聚合度 > 4). 低聚体的抗氧化活性远远高于高聚体,故高聚体降解为低聚体的研究成为热点^[3].

目前,原花青素的催化降解方法主要有氢化降解法、微生物降解法、化学降解法等. 氢化降解法设备昂贵、反应条件苛刻、操作相对复杂,但降解率高;微生物降解法设备简单低廉、操作简便、零二次污染,但合适的微生物难寻,且难培养;化学降解法因设备低廉、操作简便、降解率高等优点已引起国内外研究者的广泛关注,故本研究选用化学降解法. 化学降解法主要为酸降解法, Luo 等^[4]采用亚硫酸作为酸降解剂,将葡萄籽及皮中原花青素降解为低聚体;赵平等^[5]同样采用亚硫酸作为酸降解剂,将原花青素的平均聚合度从 7.06 降到 4.30.

考虑到实际应用中,涉及领域对物质的纯度要求极其高,所以必须保证降解产物的纯度达到

一定的标准. 酸降解剂参与降解反应后,不易进行分离,这势必会影响产物的纯度和后续应用,故笔者在文献[6-7]的基础上首次提出采用固体酸作为催化剂降解高聚体原花青素.

1 试验方案

1.1 试验原材料

新鲜莲房,市售;蒸馏水,实验中心自制;儿茶素 98%,郑州希派克科技有限公司;乙醇、冰乙酸,天津市风船化学试剂科技有限公司,AR;乙酸乙酯、甲醇、浓盐酸,天津市科密欧化学试剂有限公司,AR;硫酸,烟台市双双化工有限公司,AR;芳草醛,阿拉丁工业公司,AR;1#、2# TiO_2 ,玛雅试剂有限公司(1、2号分别指 100 nm TiO_2 、P25 TiO_2).

1.2 试验仪器

电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;集热式恒温加热磁力搅拌器,郑州市中原科技玻璃仪器厂;飞鸽牌离心机,上海安亭科技仪器厂;电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;真空干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;循环水式多用真空泵,巩义市英峪华科仪器厂;马弗炉,上海黔通仪器科技有限公司;UV-1800 紫外可见分光光度计,岛津企业管理有限公司;WQF-510 傅里叶变换红外光

收稿日期:2018-02-12;修订日期:2018-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(21576244)

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@zzu.edu.cn.

谱仪,北京瑞利分析仪器厂; ASAP 2 460 比表面积及孔隙分析仪,美国 Micromeritics 有限公司; Agilent 1 100 凝胶渗透色谱,安捷伦科技有限公司。

1.3 试验内容

1.3.1 莲房高聚体原花青素的提取

将干燥的新鲜莲房粉碎,并过粒径为 0.15 mm 筛子得莲房粉末。将莲房粉浸渍于石油醚中,料液比为 4:15 (g/mL),脱脂 24 h。脱脂后,于通风处自然风干。采用溶剂法提取原花青素。提取剂为 60% 的乙醇溶液,料液比为 1:15 (g/mL),50 °C 下浸提 60 min。提取液于 10 000 r/min 转速下离心,上清液在 45 °C 下旋转蒸发以回收乙醇,得到原花青素粗提液^[8]。然后用乙酸乙酯 3 次萃取分级,水相即为高聚体原花青素悬浮液。将其稀释 10 倍作为降解原料。

1.3.2 固体酸的筛选及制备

筛选 4 种酸溶液和 2 种固体载体,确定采用降解性能好的 H_2SO_4 溶液和吸附性能佳的纳米级 TiO_2 ^[9]。分别取 5 g 1#、2# TiO_2 ,配置 1、2、3 mol/L 的硫酸溶液各 10 mL/g。浸渍沉淀法分别浸渍 1 h^[10]。抽滤后,滤饼于真空干燥箱在 90 °C 下烘 24 h,取出研碎,过粒径为 0.15 mm 筛子。再置于 400 °C 的马弗炉中活化 3 h,制备出的固体酸冷却后待用。

1.3.3 固体酸降解反应实验

取 10 mL 降解原液,加入一定量的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸催化剂,放入一定温度的水浴锅内,降解反应一定时间。取出后过滤固体酸并冷却液体至室温,测定原花青素的平均聚合度及降解率。

平均聚合度采用魏冠红(2006 年)的改良香草醛法测定^[11]。当采用乙酸作为溶剂时,香草醛只与末端黄烷-3-醇发生缩合反应,从而可以确定原花青素的摩尔量。当采用甲醇作为溶剂时,香草醛可以与所有酚羟基发生反应,从而可以确定原花青素的质量。二者结合即可求出原花青素的平均聚合度。

1.4 聚合度及降解率的计算

原花青素的平均聚合度可通过公式(1)计算;原花青素的降解率可通过公式(2)计算:

$$DP = \frac{m}{n \times M}, \quad (1)$$

式中: DP 为平均聚合度; m 为原花青素的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$; n 为原花青素的摩尔浓度, $\mu\text{mol/mL}$; M 为儿茶素的摩尔质量 290.27 g/mol。

$$\text{降解率} = \frac{DP_1 - DP_2}{DP_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: DP_1 为降解前的平均聚合度; DP_2 为降解后的平均聚合度。

1.5 工艺优化试验

在单因素实验的基础上设计正交试验,以找出最优降解反应条件。

1.6 表征

通过 FT-IR、BET 分析来表征 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸的性能;通过降解原料与降解产物的紫外光谱及凝胶色谱对比分析来验证降解反应效果。

2 分析与讨论

考察载体 TiO_2 颗粒大小、固体酸用量、反应温度、反应时间对高聚体原花青素降解效果的影响。

2.1 固体酸降解反应工艺

2.1.1 单因素实验

(1) TiO_2 颗粒大小对降解反应的影响。采用不同粒度 TiO_2 (1#及 2#纳米级 TiO_2) 作载体,制备 1 mol/L $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$,在适宜条件下做降解实验。

保持温度 80 °C,时间 60 min 的反应条件不变。1# TiO_2 作载体制备的固体酸的加入量选择 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35 g; 2# TiO_2 作载体制备的固体酸的加入量选择 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.06 g/(10 mL),所得结果如图 1 所示。

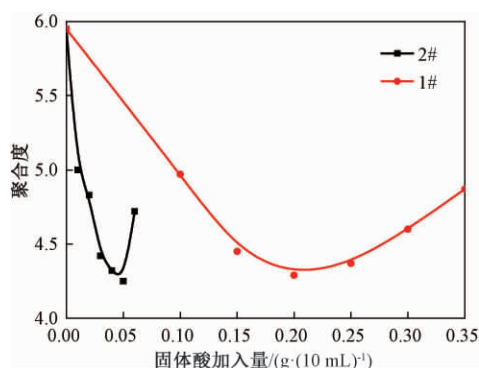


图 1 TiO_2 颗粒大小对聚合度的影响

Fig.1 TiO_2 particle size impacts on polymeric degree

载体粒度的大小直接影响着改性催化剂性能的好坏。由图 1 可以看出:当聚合度降为 4.25 时,1# TiO_2 作载体的催化剂消耗 0.2 g,2# TiO_2 作载体制备的催化剂需 0.05 g。达到相同的降解效果,粒径较小的 2# TiO_2 作载体制备的催化剂用量少。

得多. 故以下实验中催化剂用量、反应温度、反应时间对降解效果的研究, 均采用 2# TiO_2 制备的固体酸.

(2) H_2SO_4 浓度及酸用量对降解反应的影响. 保持温度 $80\text{ }^\circ\text{C}$, 时间 60 min 的反应条件不变, 采用不同浓度 ($1, 2, 3\text{ mol/L}$) H_2SO_4 制备的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸, 加入量均为 $0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$, 所得结果见图 2 和图 3.

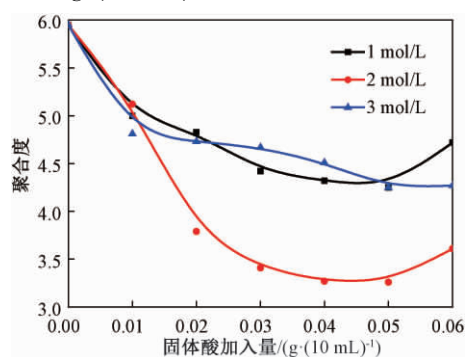


图 2 固体酸加入量对聚合度的影响

Fig. 2 Solid acid addition impacts on polymeric degree

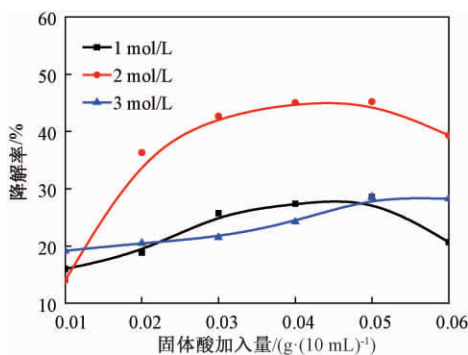


图 3 固体酸加入量对降解率的影响

Fig. 3 Solid acid addition impacts on degradation rate

由图 2、图 3 可以看出: 一定范围内, 随着固体酸加入量的增加, 聚合度先降低后升高, 降解率先升高后下降. $1, 2, 3\text{ mol/L}$ 的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸均有降解作用, 但是其中 2 mol/L $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸的降解效果最佳. 当硫酸浓度为 2 mol/L 时, 固体酸的加入量为 $0.04\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$, 聚合度从 5.95 降为 3.26 , 降解率达到 45.21% . 故考虑温度和时间对降解反应的影响时, 只对 2 mol/L 硫酸制得的固体酸做讨论.

(3) 温度对降解反应的影响. 保持固体酸加入量 0.04 g 、时间 60 min 的条件不变, 采用不同的反应温度, 即 $50, 60, 70, 80, 90\text{ }^\circ\text{C}$, 所得结果见图 4.

反应温度的高低直接影响反应活化能的大小, 进而影响降解反应效果. 由图 4 可以看出: 一

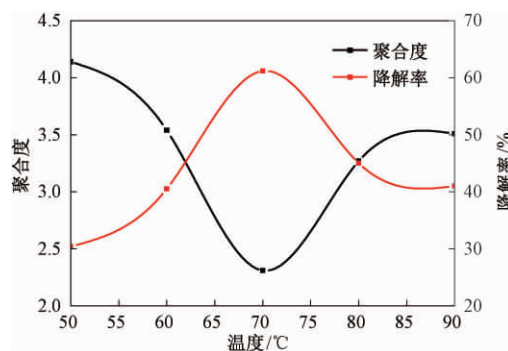


图 4 温度对聚合度及降解率的影响

Fig. 4 Temperature impacts on polymeric degree and rate

定范围内, 随着温度的不断升高, 聚合度先减小后增大, 降解率先增加后减小. 温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 聚合度降为 2.31 , 降解率达到 61.18% . 温度较低时, 高聚体很难将 C_4-C_8 键断开, 故聚合度较高, 降解率较低; 温度过高时, 低聚体的羟基基团很容易被氧化, 从而失去原有的活性, 这与上述的实验结果是相符的.

(4) 时间对降解反应的影响. 保持固体酸加入量为 $0.04\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$, 温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件不变, 采取不同的反应时间, 即 $40, 50, 60, 70, 80\text{ min}$, 所得结果如图 5.

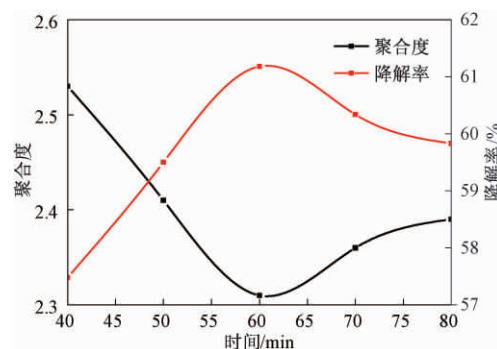


图 5 时间对聚合度及降解率的影响

Fig. 5 Time impacts on polymeric degree and rate

由图 5 可以看出: 当时间为 $40 \sim 60\text{ min}$ 时, 聚合度明显减小; 当时间为 $60 \sim 80\text{ min}$ 时, 聚合度增大, 但较为缓慢. 反应时间过长, 聚合度反而升高, 降解率反而降低. 原因可能是降解后的低聚体原花青素随时间增加又发生了裂解, 生成了别的产物. 当时间为 60 min 时, 聚合度降为 2.31 , 降解率达到 61.18% .

2.1.2 正交实验

依据单因素实验的结果, 以 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸加入量、降解温度及降解时间为变量因素, 设计正交实验, 以考察上述条件对莲房原花青素降解

反应的综合影响. 设计的正交实验水平因素表见表 1, 正交实验结果表见表 2.

表 1 正交实验 $L_9(3^4)$ 水平因素表

Tab.1 Horizontal factor table of orthogonal experiment

水平	A	B	C
	酸用量/($\text{g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$)	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	时间 t/min
1	0.04	60	50
2	0.05	70	60
3	0.06	80	70

实验 编号	A		B	C	聚合度
	酸用量 / (g·(10 mL) ⁻¹)	空列	温度 T/℃	时间 t/min	
1	0.04	0	60	50	3.64
2	0.04	0	70	60	2.31
3	0.04	0	80	70	3.32
4	0.05	0	70	70	2.35
5	0.05	0	80	50	3.36
6	0.05	0	60	60	3.53
7	0.06	0	80	60	3.61
8	0.06	0	60	70	3.93
9	0.06	0	70	50	2.79
K1	9.27	9.6	11.1	9.79	—
K2	9.24	9.6	7.45	9.45	—
K3	10.33	9.64	10.29	9.6	—
k1	3.09	3.2	3.7	3.26	—
k2	3.08	3.2	2.48	3.15	—
k3	3.44	3.21	3.43	3.2	—
极差	1.09	0.04	3.65	0.34	—

由正交实验结果的极差分析可得因素的影响大小顺序为: $B > A > C$, 即温度 $>$ 酸用量 $>$ 时间. 其中, 最佳方案为 $A_1B_2C_2$, 即固体酸用量为 $0.04\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$, 温度为 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 时间为 60 min . 在该反应条件下, 高聚体聚合度可以从 5.95 降为 2.31 . 由于空白列的极差较小, 所以表明本次正交实验没有遗漏掉其他主要参考因素.

2.1.3 验证试验

固体酸用量 $0.04\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ 为边界条件, 故需做验证试验. 设计酸用量 $0.03\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$, 温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 时间 60 min 的实验方案进行降解实验. 结果见表 3. 由表 3 可知: 酸用量 $0.04\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$ 时, 降解效果最佳. 综上所述, 固体酸降解莲房高聚体原花青素的最佳工艺条件为: 催化剂选择 2 号 TiO_2 负载 $2\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 制备 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$, 酸用量 $0.04\text{ g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$, 温度 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, 时间 60 min , 原花青素聚合度从 5.95 降为 2.31 , 降解反应效果

最好.

表 3 验证试验结果

Tab.3 Results of verification test

实验编号	A	B	C	聚合度
	酸用量/($\text{g}\cdot(10\text{ mL})^{-1}$)	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	时间 t/min	
1	0.04	70	60	2.31
2	0.03	70	60	2.33

2.2 固体催化剂的表征

2.2.1 FT-IR 分析

SO_4^{2-} 负载在 TiO_2 上面, 结合力有无机螯合状双配位、共价硫酸盐、桥式配位. 红外光谱如图 6 所示. 由图 6 看出: $1, 2, 3\text{ mol/L SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸的 $1\,413.57, 1\,413.57, 1\,552.42\text{ cm}^{-1}$ 处的反对称伸缩振动吸收峰属于共价键性质的 S—O 键, 即共价硫酸盐吸附. 而对于对称伸缩振动吸收峰 $941.09, 985.45, 987.38\text{ cm}^{-1}$ 的吸收带属于共价硫酸盐吸附, $889.02, 881.31\text{ cm}^{-1}$ 的吸收带属于螯合式吸附. 与纯 TiO_2 红外图对比, SO_4^{2-} 已负载在 TiO_2 上面.

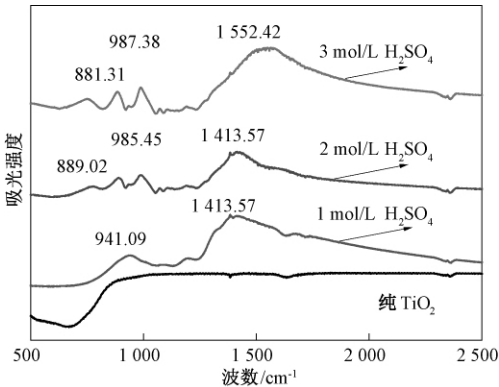


图 6 纯 TiO_2 及不同浓度硫酸处理得到 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸的红外光谱

Fig.6 Infrared Spectrum of pure TiO_2 and $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$

2.2.2 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸的 BET 分析

$\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 的 BET 见表 4. 由表 4 可知: 改性 TiO_2 与未处理 TiO_2 相比, H_2SO_4 浓度为 1 mol/L 和 2 mol/L 时, 比表面积均增大; H_2SO_4 浓度为 3 mol/L 时, 比表面积大幅度减小, 故 H_2SO_4 浓度不是越大越好. 硫酸浓度小时, 比表面积增大可能是 TiO_2 与 SO_4^{2-} 结合产生多孔结构造成的; 硫酸浓度增大时, 比表面积减小可能是硫酸盐覆盖在多孔上造成的.

2.2.3 原料与降解产物的紫外光谱分析

由图 7 可知, 降解前原花青素与降解后产物

表 4 不同浓度硫酸制备的固体酸 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 的比表面积

TiO ₂ 的 比表面积	SO ₄ ²⁻ /TiO ₂ 比表面积 m ² ·g ⁻¹		
	1 mol·L ⁻¹ 硫酸	2 mol·L ⁻¹ 硫酸	3 mol·L ⁻¹ 硫酸
74.847	104.393	159.238	21.736

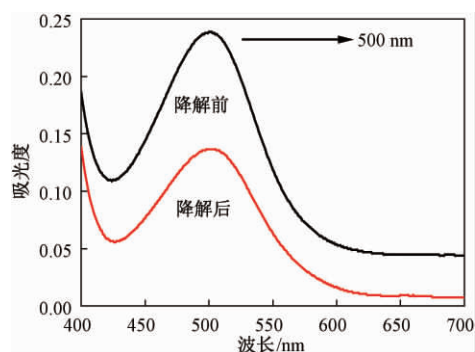


图 7 降解前后物质的最大吸收波长

Fig. 7 Maximum absorption wavelength of the material 的最大吸收波长均为 500 nm, 且两者的紫外吸收光谱相近, 故降解产物具有原花青素分子中黄烷醇单元的特征吸收峰, 也证实固体酸降解主要断裂的是单体间的链接键, 而并未破坏黄烷醇单元的结构。

2.2.4 原料与降解产物的 GPC 分析

凝胶色谱的工作原理为: 分子量大的物质先出峰, 分子量小的物质后出峰。图 8 表明: 降解反应前, 原花青素主要以高聚物存在; 降解反应后, 高聚体含量大大减少, 低聚体含量增加。所以说, 固体酸降解反应达到了目的。

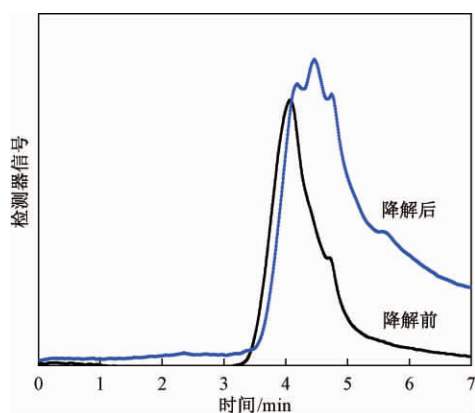


图 8 降解前后物质的凝胶色谱

Fig. 8 Gel chromatography of substances

3 结论

笔者制备出性能良好的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸催化剂, 可以有效地降解高聚体原花青素, 以实现

生物活性最高的二聚体原花青素的制备。实验确定了固体酸降解高聚体原花青素的最佳工艺条件: 采用 2# 纳米级 TiO_2 制备出的含 H_2SO_4 浓度为 2 mol/L 的 $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体酸, 固体酸加入量为 $0.04 \text{ g} \cdot (10 \text{ mL})^{-1}$, 反应温度 70°C , 反应时间 60 min。此条件下高聚体的平均聚合度从 5.95 降为 2.31, 降解率可达到 61.18%。紫外光谱表明, 固体酸降解反应没有破坏原花青素应有的分子结构。凝胶色谱表明, 降解产物低聚体含量显著增多。这说明降解反应得以实现。此研究所确定的工艺条件及实验结果为莲房原花青素的充分和高效利用提供了有效的途径。

参考文献:

- [1] BAGCHI D, BAGCHI M, STOHS S, et al. Free radicals and grape seed proanthocyanidin extract: importance in human health and disease prevention [J]. Toxicology, 2000, 148(213): 187-197.
- [2] 陈卫航, 谭美亭, 张婕. 响应曲面法优化莲房原花青素提取工艺研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(2): 31-35.
- [3] OU K Q, GU L W. Absorption and metabolism of proanthocyanidins [J]. Journal of functional foods, 2014, 7(1): 43-53.
- [4] LUO L X, CUI Y, CHENG J H, et al. An approach for degradation of grape seed and skin proanthocyanidin polymers into oligomers by sulphurous acid [J]. Food chemistry, 2018, 256: 203-211.
- [5] 赵平, 刘俊英, 张月萍. 原花青素高聚体水解工艺 [J]. 食品科技, 2011, 36(2): 174-178.
- [6] 刘超英, 杨晓瑞, 束艳方, 等. 固体酸降解木质纤维素的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2016, 37(7): 387-391.
- [7] 梁润娟. 离子液体环境下固体酸催化纤维素降解的研究 [D]. 金华: 浙江师范大学物理化学研究所, 2013.
- [8] LI B G. Extraction and purification of oligomeric proanthocyanidins from pine bark and its hypolipidemic effects [J]. Medicinal plant, 2011, 2(12): 4-6.
- [9] 于荟, 于清跃. $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 型固体酸催化剂的催化及稳定性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(3): 502-510.
- [10] 郭慧. $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ 固体超强酸催化剂的制备与改性和评价 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学应用化学系, 2006.
- [11] 魏冠红, 魏作君, 苏宝根, 等. 测定原花青素平均聚合度的一种新方法 [J]. 中国食品学报, 2006, 6(6): 112-116.

Research on Degradation of High Polymer Procyanidins from the Lotus Seed Pot with $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ Solid Acid

CHEN Weihang, ZHANG Hui, ZHANG Jie

(School of Chemical and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The antioxidant performance of the high-polymer procyanidins was not as good as that of oligomers, and it was not easily absorbed and utilized by the human body. This research focused on the preparation of $\text{SO}_4^{2-}/\text{TiO}_2$ solid acid catalysts with excellent properties. The solid acid was used to degrade the high-polymer procyanidins in lotus seed pot. The analysis was performed by using an ultraviolet spectrophotometer and a gel chromatograph. The average degree of polymerization and the degradation rate were used as reference indicators to evaluate the degradation effect of the reaction. The reaction condition was 10 mL high-polymer procyanidins solution as degradation raw material, solid acid addition amount of 0.05 g, reaction temperature of 70 °C, and reaction time of 60 min. The results showed that the average polymerization degree of the high-polymer was decreased from 5.95 to 2.31 and the degradation rate could reach 61.18%.

Key words: polymer procyanidins; solid acid; degradation; average polymeric degree; degradation rate

(上接第35页)

Fault Recognition Method of Rolling Bearing Based on Full Vector Sparse Coding

HAO Wei, LIN Huiyi, HAO Wangshen, GAO Yajuan, DONG Xinmin

(Research Institute of Vibration Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming to solve the problem of shift phenomenon of time domain signal sparse coding and the problem of single channel analysis often result in inadequate use of information, a new method for fault identification of rolling bearings was proposed by combining the full vector spectrum technique and sparse coding. Firstly, full vector information fusion of the homogeneous dual-channel signal of the rolling bearing in each state was carried out. Then, the main vibration vector signals obtained were applied to construct all kinds of redundant dictionaries. Finally, these dictionaries were employed to reconstruct the test samples, and the reconstruction residual was taken as the criterion to identify the status of these samples. Through converting the time-domain signals into main vector signals, the information contained in the training samples was more comprehensive and accurate. Besides, the feature extraction step could be eliminated, so it could reduce the effect of human factors. The test results demonstrated that the proposed method, which had high efficiency as well as good practicability, and could effectively identify the fault pattern of rolling bearing.

Key words: full vector spectrum; sparse coding; fault diagnosis; rolling bearing; dictionary learning

重金属捕集剂 TDDP 的合成及性能研究

张翔,冯修,职红涛,马楠楠,韩双乔

(郑州大学 化工与能源学院,河南 郑州 450001)

摘要:以二并呋嗪和二硫化碳为原料合成了一种四基配位重金属捕集剂 N,N,N,N-4(二硫代羧基)二并呋嗪(TDDP),并考察了其在不同条件下对含铜锌铅废水处理效果.实验结果表明,处理 10 mg/L 的含 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 废水, pH 值为 4~11, $n(\text{TDDP})/n(\text{重金属离子})=0.6$, 反应时间 5 min, 废水中重金属离子剩余浓度分别为 0.35、0.39、0.89 mg/L, 达到国家工业污染物排放标准(GB 25466—2010). 在混合离子溶液中, 酸性条件下 TDDP 对重金属螯合能力大小排序为: $\text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$.

关键词:重金属废水; 捕集剂; 二硫代氨基甲酸盐类; 二并呋嗪

中图分类号: X703

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.014

0 引言

随着重金属废水的排放标准越加严格,广泛使用的氢氧化物或硫化物沉淀法难以满足废水的排放要求.其缺点在于:药剂用量大;需严格控制 pH;易造成二次污染^[1].而二硫代氨基甲酸盐类(DTC)因其具有极强的络合重金属能力,能与废水中重金属离子螯合形成稳定沉淀物,成为研究较多的一类重金属捕集剂.

DTC 重金属捕集剂可以分为高分子和小分子捕集剂.高分子捕集剂如刘立华等^[2]制备的高分子螯合絮凝剂 ACPF,分子中含有大量螯合基团,沉淀效果好,但由于存在空间位阻,部分螯合基团不能与重金属配位.小分子捕集剂的螯合基团利用率高,但大多数小分子 DTC 捕集剂如二乙基二硫代甲酸钠^[3]、N,N-双(二硫代羧基)乙二胺^[4]、N,N-呋嗪二硫代氨基甲酸钠^[5]等,分子中螯合基团含量少,造成单分子捕集剂螯合重金属离子数量少,形成的螯合物体积小,不易于沉淀,需维持适当过量才能达到较好的沉降效果.而黄兰等^[6]制备的二硫代氨基三聚氰酸钠(TDC)及 Fu 等^[7]制备的六氢三嗪二硫代氨基甲酸钠(HT-DC),其分子中含有 3 个螯合基团,提高了单分子螯合重金属离子的数量,并且重金属离子可以与分子内不同位点或分子间的螯合基团进行配位,

使得螯合沉淀物体积不断增大,有助于絮凝沉降.在此基础上,笔者进一步提高了分子中螯合基团数量来加强沉降效果,采用二并呋嗪和二硫化碳为原料合成了一种分子中含有 4 个二硫代羧基基团的化合物——N,N,N,N-4(二硫代羧基)二并呋嗪(简称为 TDDP),并考察了其对废水中 Cu、Pb、Zn 离子的去除性能.

1 实验部分

1.1 实验试剂

二并呋嗪(实验自制)^[8];二硫化碳;氢氧化钠;盐酸;硝酸铜;硝酸铅;硫酸锌;硝酸镉;聚丙烯酰胺(PAM);以上均为分析纯.

1.2 分析仪器和检测方法

Elementar Vario ELIII 进行元素分析(CNSH);红外光谱仪 Nicolet Model 400D(KBr 压片)对产物结构表征;火焰原子吸收分光光度计(TAS-990)测定溶液中重金属的浓度;PHS-3C 型精密 pH 计调节溶液酸碱度.

1.3 TDDP 的合成

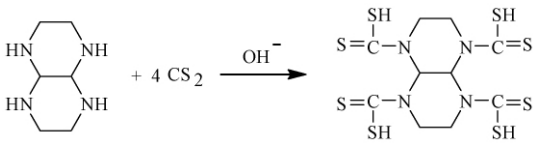
反应物的摩尔比是 $n(\text{二并呋嗪}):n(\text{CS}_2)=1:4$.先将 1.5 g 二并呋嗪溶于 15 mL 水中倒入三口烧瓶,加入少许 NaOH 溶解并搅拌冷却,然后在冰水浴下滴加 CS_2 和乙醇混合溶液,保持温度在 10℃ 以下.30 min 滴加完毕后,将水浴升温至

收稿日期:2018-03-09;修订日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(21206151)

通信作者: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.

30 ℃ 冷凝回流 3 ~ 4 h. 出现黄色沉淀物, 抽滤水洗. 在真空干燥箱中 40 ℃ 干燥 24 h, 得到黄色固体粉末 TDDP. 反应式如下:



1.4 单一重金属离子去除实验

将 TDDP 溶于氢氧化钠溶液中, 调节 pH = 8 , 在室温条件下分别配制浓度为 10 mg/L 的 Cu²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺ 溶液, 调节溶液 pH 取 50 mL 于锥形瓶中作为水样. 加入不同剂量的 TDDP, 搅拌一定时间, 然后再加入质量分数 1‰ PAM 搅拌 5 min. 静置一段时间, 取上层清液测重金属含量. 实验研究了 TDDP 的用量、溶液的 pH 值、反应时间对单一重金属去除的影响.

1.5 混合离子去除实验

配制浓度为 0.1 mmol/L 的 Cu²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺、Cd²⁺ 溶液, 调节 pH 为 5.5. 分别加入不同剂量的 TDDP, 反应 5 min 后加入质量分数 1‰ 的 PAM, 搅拌 5 min 后静置. 取上层清液测量重金属含量, 研究 TDDP 对重金属离子螯合能力的大小.

2 实验结果与讨论

2.1 TDDP 的结构表征

TDDP 的红外光谱见图 1. 从图 1 可以看出, 在 TDDP 的光谱中原料二并哌嗪在 3 183.9 cm⁻¹ 处的 N—H 伸缩振动峰消失, 并在 1 467 cm⁻¹ 和 1 014 cm⁻¹ 出现新的吸收峰, 分别是一 NCS₂ 的伸缩振动吸收峰和 C—S 的吸收峰, 说明产物分子中确实含有二硫代氨基甲酸基团.

TDDP 产物提纯后进行元素分析(表 1). 根据分

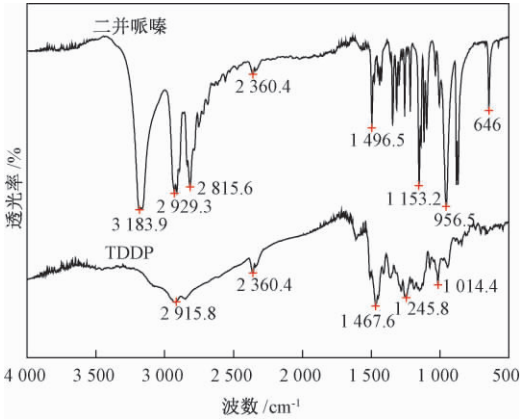


图 1 TDDP 和二并哌嗪的红外光谱图
Fig.1 FT IR spectra of TDDP and dipiperazine

子结构可知, C、N、S 和 H 的原子比为 2.5:1:2:3.5 , 与 TDDP 的理论值非常接近, 因此可推断产物结构与目标结构相同.

表 1 TDDP 的元素分析
Tab.1 Elemental analyses of TDDP

元素	C	N	S	H
质量分数/%	27.13	12.46	57.30	3.11
原子比	2.5	1	2	3.5

2.2 TDDP 与重金属螯合产物结构

为了确定 TDDP 与重金属的螯合产物的结构, 研究了产物与重金属离子最佳去除效果时的比例关系(图 2). 从图 2 可以看出, 溶液中剩余的 Cu²⁺ 浓度随着 n(TDDP) / n(Cu²⁺) 增大而逐渐减小, 当 n(TDDP) / n(Cu²⁺) 达到 0.5 时, Cu²⁺ 浓度几乎不再变化, 这说明一个 TDDP 分子可以与两个 Cu²⁺ 进行配位.

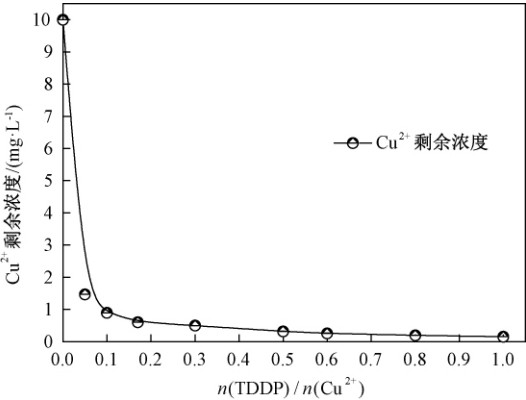


图 2 n(TDDP) / n(Cu²⁺) 对剩余 Cu²⁺ 浓度的影响
(pH = 5.5)

Fig.2 The effect of residual Cu²⁺ concentration by molar ratio of TDDP and Cu²⁺ (pH = 5.5)

2.3 TDDP 用量对重金属离子去除率的影响

各取 50 mL 浓度为 10 mg/L 的 Cu²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺ 溶液, 在室温环境和 pH = 5.5 的条件下, 加入不同剂量的 TDDP, 搅拌 5 min, 然后加入一定量 1‰ PAM 继续搅拌 5 min. 静置 15 min, 取上层清液滤纸过滤后测量. 观察 TDDP 用量对重金属离子处理效果的影响, 结果如图 3 所示. 图中 TDDP 用量换算成与废水中重金属离子 (Cu²⁺、Pb²⁺、Zn²⁺) 的摩尔比.

从图 3 可知, 各重金属离子的去除率随着 TDDP 用量的增加而增大, 在 n(TDDP) / n(重金属离子) = 0.5 处趋于平缓. 当 n(TDDP) / n(重金属离子) = 0.6 时, Cu²⁺、Pb²⁺ 的去除率可达 96% 以上, Zn²⁺ 的去除率达到 91% 以上, 剩余浓度分

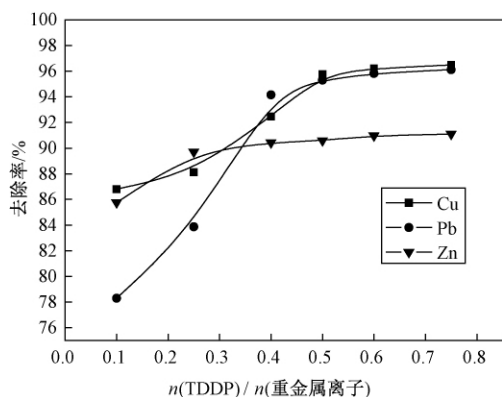


图3 TDDP 用量对重金属离子的去除影响 (pH=5.5)

Fig. 3 Effect of TDDP dosage on removal efficiency (pH = 5.5)

别为 0.35 mg/L、0.39 mg/L、0.89 mg/L, 均达到国家排放标准 [$c(\text{Cu}^{2+}) \leq 0.5 \text{ mg/L}$, $c(\text{Pb}^{2+}) \leq 0.5 \text{ mg/L}$, $c(\text{Zn}^{2+}) \leq 1.5 \text{ mg/L}$]. 故本实验 TDDP 最佳用量为 0.6 倍废水中各重金属离子摩尔量, 即 $n(\text{TDDP})/n(\text{重金属离子}) = 0.6$.

2.4 溶液 pH 对重金属离子去除率的影响

在 $n(\text{TDDP})/n(\text{重金属离子}) = 0.6$ 和反应时间为 5 min 的条件下, 调节各溶液的 pH 值为 3 ~ 11, 观察 pH 值对去除效果的影响.

从图 4 可以看出, 在 pH 值为 4 ~ 11 内 TDDP 对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 都有良好的去除效果, 其中 Zn^{2+} 的去除率在 pH = 3 就能达到 85%, 剩余浓度小于国家排放标准 1.5 mg/L. 因此, TDDP 可以直接用于处理酸性废水, 弥补中和沉淀法 pH 适用范围窄的不足.

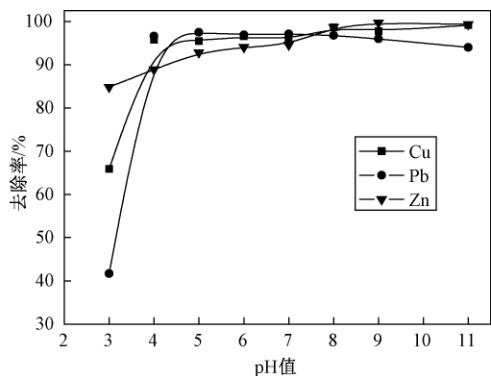


图4 pH 对重金属离子去除率的影响

Fig. 4 Effect of pH on removal efficiency

2.5 反应时间对去除效果的影响

各取 50 mL 浓度为 10 mg/L 的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 溶液 $n(\text{TDDP})/n(\text{重金属离子}) = 0.6$, 搅拌反应不同时间, 观察反应时间对重金属离子处理效果的影响. 由图 5 得出, 随着时间的增加, 去除率先增大而后趋于平缓. 不同的重金属离子趋于平缓的时间也不同, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 基本在 1 min 后就

可以达到较高的去除率, 3 min 后去除率基本不变. Zn^{2+} 在 5 min 后去除率稳定. 因此 TDDP 可以快速去除废水中的重金属, 且螯合速率大小排序为: $\text{Cu}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$.

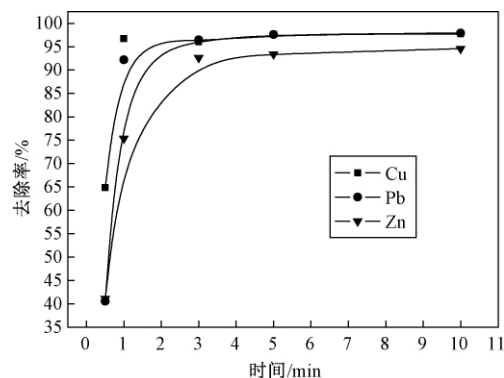


图5 反应时间对重金属离子去除率的影响 (pH=5.5)

Fig. 5 Effect of reaction time on removal efficiency (pH = 5.5)

2.6 TDDP 对混合离子溶液的去除效果

为了考察 TDDP 对多种重金属离子的螯合性顺序, 配置等摩尔浓度的混合溶液进行实验. 取 50 mL 浓度为 0.1 mmol/L 的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的混合溶液, 调节 pH = 5.5, 加入不同剂量的 TDDP, 观察对多种重金属离子去除的效果, 结果如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 随着 TDDP 用量的增加, 各重金属离子的去除率变大; 当 $n(\text{TDDP})/n(\text{重金属离子}) = 0.5$ 时, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 的去除率分别为 99.6%、98.7%、97.7%、87.5%, 剩余浓度除 Cd^{2+} 外均可达到排放标准. 因此 TDDP 可以共同去除混合重金属离子.

在摩尔浓度相同的混合体系中, 重金属离子间存在复杂的竞争关系. 根据软硬酸碱理论可知: TDDP 为软碱, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 属于交界酸, Cd^{2+} 属于软酸, 理论上优先去除 Cd^{2+} ; 但根据配位场

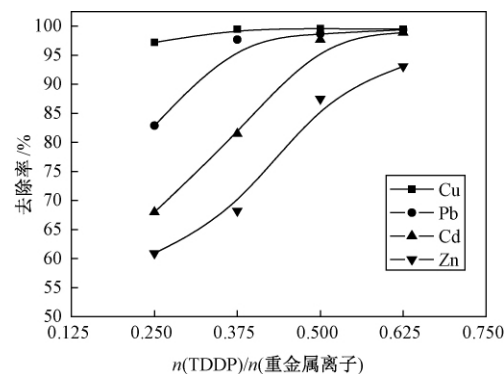


图6 TDDP 对混合离子溶液的去除效果

Fig. 6 Effect of TDDP on removal of mixed heavy-metal ions

理论 d 轨道全空的 Pb^{2+} 形成的螯合物比 d 轨道全满的 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 稳定,综合考虑 TDDP 对 4 种重金属离子的选择性顺序为: $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$,与实验结果一致.相似的结论在王刚制备的聚乙烯亚胺基黄原酸钠(PEX)文献[9]中也有报道,PEX 去除各种重金属离子的选择性为: $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Ni^{2+} > Zn^{2+}$;而在 LI 的文献[10]中,其制备的 CDTC 对多种金属的选择性为: $Cu^{2+} > Zn^{2+} > Pb^{2+} > Cd^{2+}$.这与重金属捕集剂官能团连接的基体结构有关,不同的基体结构对重金属离子的螯合性存在差异.

3 结论

(1) 以二并哌嗪和 CS_2 制备了一种 DTC 类重金属捕集剂 TDDP,产物是黄色固体粉末. TDDP 分子中含有 4 个单键— CS_2 基团,能高效螯合重金属离子,有利于处理含重金属离子的废水.

(2) 处理 10 mg/L 的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的废水,当 $n(\text{TDDP})/n(\text{重金属离子}) = 0.6$ 时, Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 的去除率可达 96% 以上, Zn^{2+} 的去除率达到 91% 以上. TDDP 处理重金属废水时适应的 pH 值范围较宽, pH 为 4~11 都有较高的去除效果;并且沉淀快,5 min 内处理后的溶液可达国家标准.

(3) TDDP 可以共同去除混合重金属离子,且对 4 种重金属离子的选择性顺序为: $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$.

参考文献:

- [1] 张浩勤,黄满满,张晓飞,等. 新型重金属捕集 DTC—U 处理含铅废水的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 44–47.
- [2] 刘立华,周智华,吴俊,等. 两性高分子螯合絮凝剂与 $Cu(II)$ 、 $Pb(II)$ 、 $Cd(II)$ 、 $Ni(II)$ 的螯合稳定性[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 79–87.
- [3] ABU R, ZABIN S A. Removal efficiency of Pb, Cd, Cu and Zn from polluted water using dithiocarbamate ligands[J]. Journal of taibah university for science, 2017, 11(1): 57–65.
- [4] 肖晓,孙水裕,严苹方,等. 高效重金属捕集剂 EDTC 的结构表征及对酸性络合铜的去除特性研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 537–543.
- [5] FU F, CHEN R, XIONG Y. Application of a novel strategy-coordination polymerization precipitation to the treatment of Cu^{2+} -containing wastewaters[J]. Separation and purification technology, 2006, 52(2): 388–393.
- [6] 黄兰,付丰莲,陈润铭,等. 沉淀剂 TDC 的合成及其性能研究[J]. 广州化工, 2006, 34(4): 1–4.
- [7] FU F, ZENG H, CAI Q, et al. Effective removal of coordinated copper from wastewater using a new dithiocarbamate-type supramolecular heavy metal precipitant[J]. Chemosphere, 2007, 69(11): 1783–1789.
- [8] 陈静. 二并哌嗪合成工艺和反应动力学及热力学性质的研究[D]. 上海: 华东理工大学化工学院, 2012.
- [9] 王刚. 重金属絮凝剂聚乙烯亚胺基黄原酸钠的制备及性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学环境与市政工程学院, 2013: 142–163.
- [10] LI Z L. Synthesis of a carbamide-based dithiocarbamate chelator for the removal of heavy metal ions from aqueous solutions[J]. Journal of industrial and engineering chemistry, 2014, 20(2): 586–590.

Synthesis of Heavy Metal Capturing Agent TDDP and Investigation on Its Performance

ZHANG Xiang, FENG Xiu, ZHI Hongtao, MA Nannan, HAN Shuangqiao

(School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A new kind of four-group coordination agent tetra(dithiocarbamate) dipiperazine (TDDP) was synthesized by dipiperazine and carbon disulfide, And the treatment efficiency of TDDP as a capturing agent on heavy metal waste water under different conditions was investigated. The experimental results showed that: for 10 mg/L mass concentration of Cu^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , the residual concentration could be reduced to 0.35 mg/L, 0.39 mg/L, 0.89 mg/L in the conditions of $n(\text{TDDP})/n(\text{metal ions}) = 0.6$, pH 4–11 and 5 min of reaction time. Besides TDDP was selective for removing heavy metal ions, the chelating ability of TDDP for heavy metal ions is $Cu^{2+} > Pb^{2+} > Cd^{2+} > Zn^{2+}$ in acidic condition.

Key words: heavy metal wastewater; precipitant; dithiocarbamates; dipiperazine

磷酸插层氧化石墨烯强化膜质子传导特性研究

张 婕¹, 陈 闯¹, 周国莉¹, 王景涛¹, 郑梦欣²

(1. 郑州大学 化工与能源学院 河南 郑州 450001; 2. 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100081)

摘 要: 实验采用改进后的 Hummers 法制备氧化石墨烯(GO), 在片间插层磷酸后进而制得磷酸插层氧化石墨烯(PGO), 通过流涎法将 GO 和 PGO 填充到磺化聚醚醚酮(SPEEK)基质中制备复合质子交换膜, 系统测定分析了复合膜的物化特性和质子传递特性. 实验结果表明: 所制备的复合膜在 290 ℃下具有良好的热稳定性; 无水条件下, PGO 的加入在膜内形成了高效质子传递通道, 显著提升了复合膜的质子传递能力; 在 150 ℃下, SPEEK/PGO-50 的质子传导率达 $7.92 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 是 SPEEK 空白膜的 5.7 倍、SPEEK/GO 膜的 4.6 倍.

关键词: 磷酸插层氧化石墨烯; 质子交换膜; 传递通道; 质子传导率

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.012

0 引言

质子传导率是质子交换膜(PEM)的一个核心指标, 直接决定着电池的开路电压和输出电流^[1]. 质子透过 PEM 的传递机理有运载机理和跳跃机理两种. 对于这两种机理, 均要求膜内具有连续的质子传递通道, 以取得高的质子传导性能. 目前, 商业化的 Nafion^[2]膜在持水时因具有微相分离形成的连续离子簇通道, 传导率可达到 $0.1 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$. Shen 等^[3]报道了在水条件下, 由质子导体形成连续纳米通道的聚合物膜质子传导率比未形成纳米连续通道聚合物膜的高 2~3 个数量级^[4]. 上述表明了构建连续的质子传递通道对膜质子传导能力的提升极其重要.

杂化法因其简单、通用、易操作等特性, 被广泛用于构建质子传递通道^[5]. 球状、管状和片状等作为常用的填充材料^[6]成为当前的研究热点. 氧化石墨烯(GO)作为二维片层材料, 具有高的比表面积、好的柔韧性, 表面含传导基团(—OH, —COOH, —O—等)而被认为是理想的通道构建材料. 然而 GO 表面的官能团数目有限且分布不均匀, 无法在膜内形成连续的质子传递通道^[7], 而向 GO 片层间引入传导质子的载体是解决这一问题的一个有效途径. 磷酸是一种中强酸, 其两性

的特点使其能够同时作为质子供体和受体, 具有较高的质子传导能力, 从而可以作为质子溶剂用于 PEM 中.

基于上述分析, 本研究将磷酸插入 GO 片层中, 设计制备了磷酸插层的氧化石墨烯(PGO)复合纳米片, 然后将 PGO 填充入磺化聚醚醚酮(SPEEK)基质中制备复合膜^[8]. 通过考察复合膜的质子传导能力, 重点研究了 PGO 在膜内构建质子传递通道的能力以及质子在复合膜内的传递路径与机理.

1 实验方案

1.1 实验原材料

石墨粉, 分析度, Sigma-Aldrich 公司; 浓磷酸溶液, 质量分数大于 85%, 百灵威科技有限公司; 浓 H_2SO_4 溶液, 质量分数为 98%, 洛阳昊华; 聚醚醚酮, 颗粒状, 吉林省中研高性能工程塑料股份有限公司; N,N-二甲基甲酰胺(DMF)溶液, 天津科密欧化学试剂公司.

1.2 实验仪器

电子分析天平(FA2004, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); 透射电子显微镜(TEM-400CX 型, JEOL 公司); X-射线光电子能谱(XPS Escalab250Xi, 美国赛默飞公司); 傅里叶变换红外光谱

收稿日期:2018-05-06; 修订日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(21576244)

通信作者:周国莉(1984—), 女, 山西夏县人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事分离工程和炭材料方面的研究, E-mail: zhouguoli666666@163.com.

(FTIR Thermo Nicolet IR200); X射线衍射(XRD 德国 Bruker D8 Advance ECO 型); 热重分析仪(TGA-50SHIMADZU, 日本岛津公司); 膜机械性能采用万能拉力机(Testometric 350 AX)。

1.3 实验内容

(1) GO 和 PGO 的制备: 采用改进的 Hummers 法将石墨粉剥离成单层, 氧化制备 GO^[9]。将一定量的 GO 加入到相同体积不同质量分数的磷酸溶液(10%、30% 和 50%) 中, 搅拌 1 h, 超声 2 h, 然后室温下搅拌 48 h。将所得混合溶液离心, 洗涤, 然后真空干燥。所得产物分别命名为 PGO- X , 其中 $X=10、30、50$, 为磷酸溶液的浓度。

(2) SPEEK 的制备: 采用磺化法制备 SPEEK^[10]: 量取 147 mL, 质量分数 98% 的浓 H_2SO_4 溶液于三口烧瓶中, 然后称取干燥的聚醚醚酮(PEEK) 颗粒 20 g, 边搅拌边缓慢加入到三口烧瓶中, 在 25 °C 水浴下搅拌反应 3.5 h, 再在 50 °C 下搅拌进行磺化反应 10 h。将最后得到的红棕色混合物溶液缓慢倒入冷水中得到 SPEEK, 用去离子水浸泡、洗涤至中性, 放置于室温下通风干燥 2 天后, 于 60 °C 真空烘箱中干燥。通过酸碱滴定的方法测得 SPEEK 的磺化度(DS) 为 60%。

(3) SPEEK 复合膜的制备: 复合膜的制备示意图如图 1 所示。质子在 PGO 内的传递机理为跳跃传递。 $-PO_4H_2$ 作为质子载体插入 GO 中, 在复合膜中构建了连续质子传递通道, 提供更多供质子跳跃的载体位点, 使质子高效地进行传导。并且在低湿度下 $-PO_4H_2$ 取代水作为质子溶剂, 帮助质子传递, 提高了 PEM 在高温下的传导能力。称取 0.7 g 的 GO 或 PGO, 超声分散于 10 g N,N-二甲基甲酰胺(DMF) 溶液中。待其充分分散后, 称取 0.7 g 的 SPEEK 加入到上述溶液中, 室温下搅拌 24 h, 然后超声 1 h 去除溶液中的气泡。采用流

涎法制膜, 先在 60 °C 下干燥 12 h, 然后升温至 80 °C 下干燥 12 h, 使溶剂完全挥发制得复合膜。将填充 GO 和 PGO 所得复合膜分别记为 SPEEK/GO 和 SPEEK/PGO- X (其中 $X=10、30、50$, 为磷酸溶液的浓度)。相同条件下不加入 GO/PGO 制得的空白膜, 记作 SPEEK。

2 分析与讨论

2.1 实验结果

插入氧化石墨烯片层间的磷酸可减弱片层之间的相互作用, 增大片间距并提供新的质子传递位点, 从而提高复合膜的质子传导特性。

2.2 GO 和 PGO 的表征

首先将所制备的 GO 和 PGO 用超声充分分散于无水乙醇中, 然后将溶液滴加到铜网上, 在真空干燥箱中充分干燥后进行观测。图 2(a)、(b) 为氧化石墨烯层间插入磷酸前后的 TEM 照片。由图 2(a) 可以看出, GO 为透明、边缘卷曲的二维片层结构, 这可能是由 GO 片层间的 $\pi-\pi$ 作用引起的。从图 2(b) 看出, 磷酸的插入加深了片层材料的颜色, 并且 GO 片层卷曲程度降低, 变得平整, 这是因为插入氧化石墨烯片层间的磷酸减弱了片层之间的相互作用。图 2(c) 为 GO 和 PGO-50 的红外图谱, 用来测定材料的化学组成。GO 红外图谱在 1 732、1 630、1 400 和 1 218 cm^{-1} 分别出现了 $C=O$ 伸缩振动峰、 $C=C$ 峰、 $C-OH$ 峰和环氧峰^[11], 说明石墨粉被成功氧化成 GO。插入磷酸之后, PGO 在 1 084、996 和 490 cm^{-1} 处出现了新吸收峰, 分别为磷酸根的不对称伸缩振动峰、 $O-P-O$ 伸缩峰和 $H_2PO_4^-$ 峰^[12], 这表明磷酸成功插入到氧化石墨烯中。

通过 TGA 进一步探测 PGO 的化学组成, 如图 3(a) 所示。GO 和 PGO-50 出现了类似的失重行为, 分为 3 个阶段: 第一阶段是 30 ~ 150 °C, 主要是 GO 和 PGO-50 中水分的蒸发, 其中 PGO-50 在此阶段的失重量(18.2%) 高于 GO(10.8%), 这是由于磷酸的亲水性造成的; 第二阶段是 160 ~ 210 °C, 此阶段的失重主要源于 GO 上含氧官能团的降解以及磷酸分子之间发生缩聚反应失水生成焦磷酸; 第三阶段是 220 ~ 800 °C, 主要是 GO 主体结构的降解和焦磷酸的进一步缩聚反应失水。由 TGA 曲线可得, GO 的最终灰分含量为 32.0%, PGO-50 的灰分含量为 47.0%, 故可计算得 GO 层间插入的磷酸含量为 48.3%。GO 和 PGO-50 的 XRD 曲线如图 3(b) 所示。从 XRD 曲

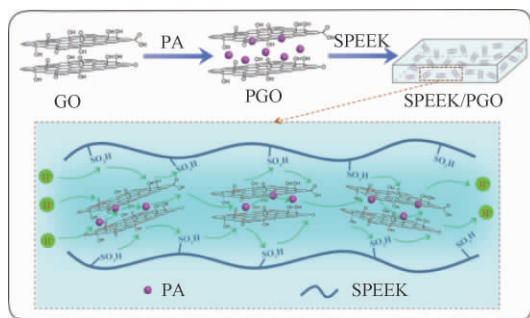


图1 PGO 和复合膜的制备及膜内质子传递机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the preparation of PGO materials and composite membranes, and proton transfer mechanism in composite membrane

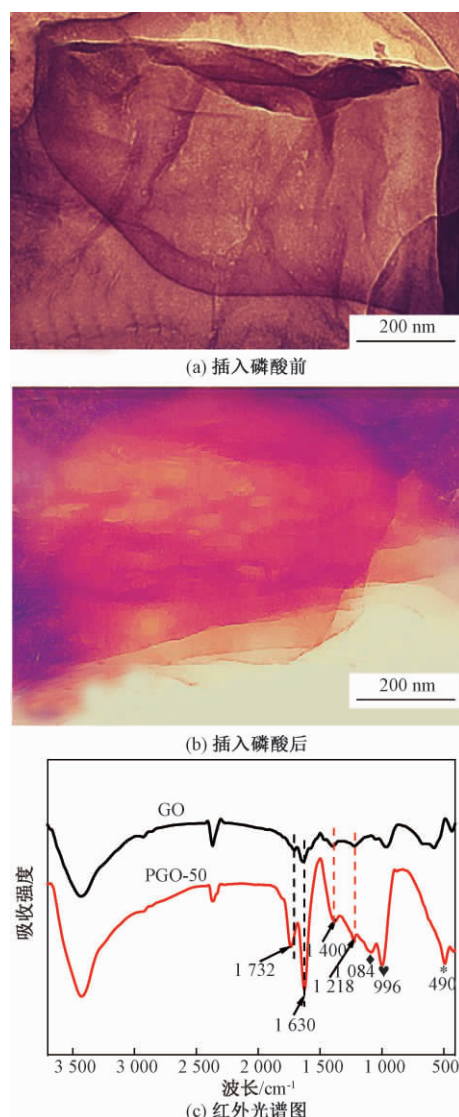


图2 GO 和 PGO-50 的 TEM 图和红外图谱

Fig.2 TEM images of GO and PGO-50 , and FTIR spectrum of GO and PGO-50

线中可以看出,GO 在 $2\theta = 10.0^\circ$ 处出现了 GO 的特征衍射峰,可计算得其相应的片间距为 0.88 nm;而 PGO-50 的特征衍射峰出现在 $2\theta = 8.2^\circ$ 处,相应的片间距为 1.1 nm,说明磷酸成功插入到 GO 的片层中,增大了 GO 的片间距。

2.3 膜的物理化学性质

通过 FTIR 表征膜的化学特性,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,所有的膜在 1 216、1 074、1 019 cm^{-1} 处均出现了 3 个特征峰,分别对应于 SPEEK 链段上磺酸基团的对称和非对称伸缩振动峰。对比 SPEEK 空白膜、SPEEK/GO 和 SPEEK/PGO 复合膜的红外图谱都未出现新峰,说明 GO 和 PGO 被均匀地包裹在 SPEEK 基质中,且两者为物理共混未形成共价键。

膜的 TGA 曲线如图 5(a) 所示。由图 5(a) 可

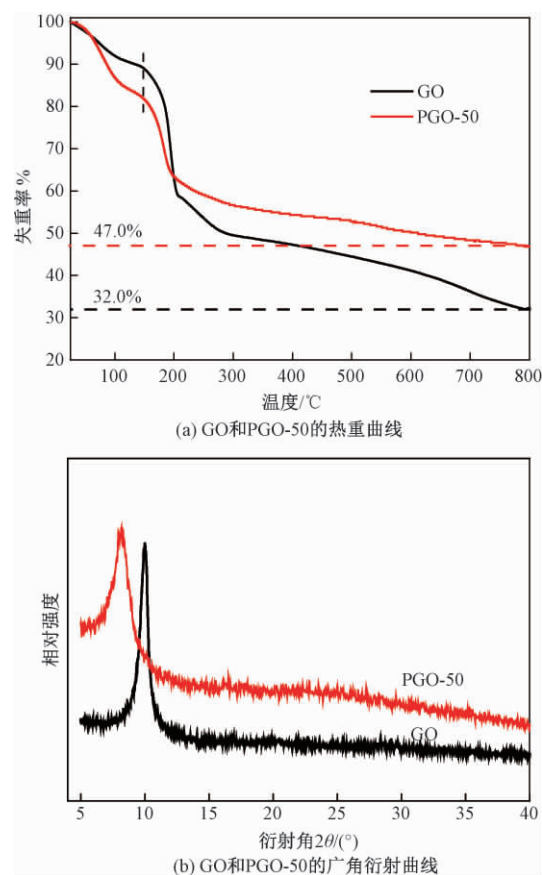


图3 GO 和 PGO-50 的热重曲线和广角衍射曲线

Fig.3 TGA curves and XRD curves of GO and PGO-50

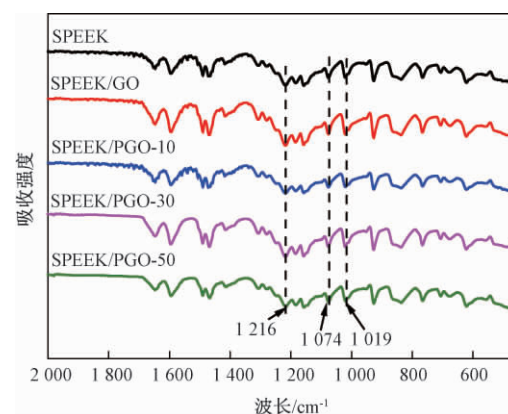


图4 SPEEK 空白膜、SPEEK/GO 和 SPEEK-PGO 的红外曲线

Fig.4 FTIR spectrum of SPEEK control membrane , SPEEK/GO and SPEEK-PGO

以看出,所有膜均经历了 3 个失重阶段:①30 ~ 280 $^\circ\text{C}$,为膜内水分的蒸发,而复合膜的失重高于 SPEEK 空白膜,这是因为 GO/PGO 的加入增强了膜结合水的能力;②290 ~ 420 $^\circ\text{C}$,为 SPEEK 含磺酸侧链的降解;③440 ~ 800 $^\circ\text{C}$,主要是 SPEEK 高分子骨架的降解。由热重曲线图还可以看出,复合膜在第二阶段的起始降解温度高于空白膜,表现出

了更好的热稳定性能.这是因为填充的纳米片抑制了SPEEK链段的运动性.总之,所有复合膜在290℃下均具有良好的热稳定性,可用于氢燃料电池.

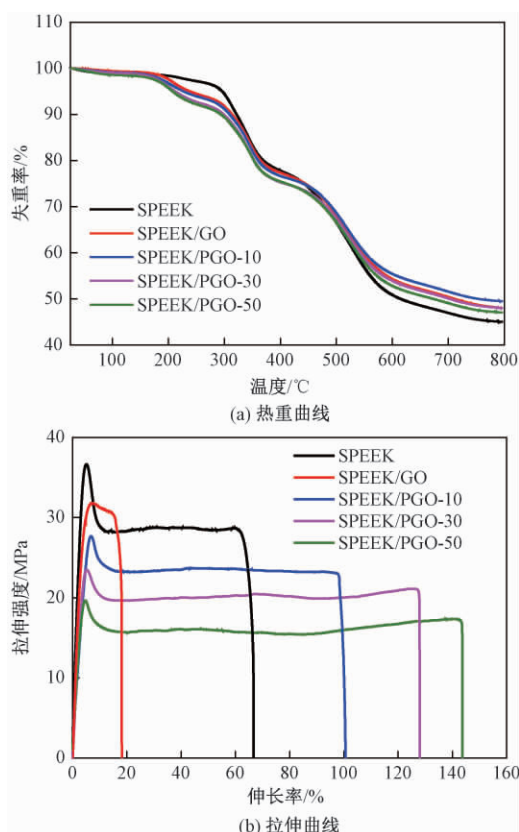


图5 SPEEK空白膜、SPEEK/GO和SPEEK-PGO的热重曲线和拉伸曲线

Fig. 5 TGA curves and stress-strain curves of SPEEK control membrane, SPEEK/GO and SPEEK-PGO

膜的机械性能如图5(b)所示.由图5(b)可以看出,SPEEK空白膜的拉伸强度为36.4 MPa,断裂伸长率为66.7%.GO的加入降低了复合膜的拉伸强度(32.0 MPa)和断裂伸长率(18.3%),这是因为其阻碍了SPEEK链段的离子偶极相互作用.PGO的加入进一步降低了复合膜的拉伸强度,但膜的断裂伸长率增加.这是因为磷酸的塑化效应,降低了膜的力学强度,增强了膜的柔韧性.

2.4 膜的质子传递性能

质子传导率是PEM的核心参数,决定着氢燃料电池的操作电压和输出电流.目前,开发高温低湿条件下具有高传导的PEM成为众多学者研究的热点.因为在此条件下,燃料电池具有较高的电化学反应速率、更优越的铂催化剂CO耐受性以及简化的水热管理等诸多优势.图6为所制备膜在不同温度下的无水质子传导率.SPEEK空白膜在30℃下的质子传导率为 $0.11 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$.加入

GO和PGO之后,SPEEK/GO、SPEEK/PGO-10、SPEEK/PGO-30和SPEEK/PGO-50的质子传导率分别提高到 0.21 、 0.32 、 0.73 、 $1.40 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,分别是SPEEK空白膜的 1.9 、 2.9 、 6.6 和 12.7 倍.这是因为:①加入的GO和PGO表面的含氧官能团可提供供质子跳跃的载体,从而在复合膜中构建了新的连续质子传递通道;②插入GO片层间的磷酸具有优越的质子自解离和结合的能力,可为质子的跳跃提供更多的活性位点,从而进一步增强了复合膜的质子传递能力^[13];③磷酸插层的GO在复合膜中趋于纵向排布,从而更有利于质子在膜内的快速传递.随着温度的升高,所有膜的质子传导率增加.例如,当温度从30℃升高到150℃,SPEEK空白膜的质子传导率从 $0.11 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 升高到 $1.39 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,SPEEK/GO的质子传导率从 $0.21 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 升高到 $1.69 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,而SPEEK/PGO-50的质子传导率从 $1.40 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 升高到 $7.92 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$.这是由于温度升高一方面加强了复合膜内链段的运动性能,提高了其运载的活性;另一方面提高了磷酸的自解离和结合质子的能力,从而显著提升膜的质子传导特性.

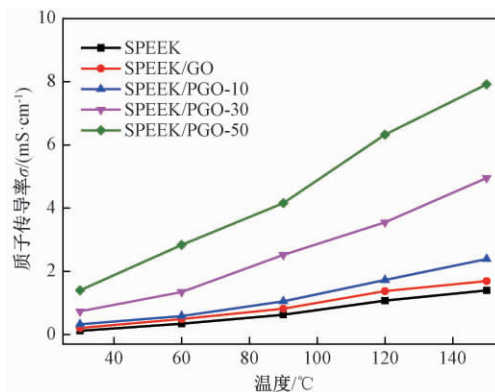


图6 SPEEK空白膜、SPEEK/GO和SPEEK-PGO随时间变化的质子传导率

Fig. 6 Temperature-dependent conductivity of the SPEEK control membrane, SPEEK/GO and SPEEK-PGO

3 结论

(1) 磷酸的加入增强了GO与SPEEK间的兼容性,使得PGO能够在膜内均匀分散,无明显团聚现象.

(2) PGO在膜内构建了连续的质子传递通道,增加了膜中供质子跳跃传递的载体位点数.

(3) 在无水条件下,PGO的加入显著地提高了复合膜的质子传导能力.在150℃下,SPEEK/

PGO-50 复合膜取得了 $7.92 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的质子传导率,是 SPEEK 空白膜的 5.7 倍。

综上所述,PGO 增强了与 SPEEK 基质间的兼容性,构建并连通了膜内的质子传递通道,增加了膜中质子跳跃传递的载体位点,从而显著强化了膜的质子传递特性。

参考文献:

- [1] 韩闯,吴莉莉,支长义. 质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 61–65.
- [2] 易施政. 离子液体掺杂磺化聚醚醚酮质子交换膜的制备与研究[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2011.
- [3] SHEN C H, HSU S L, BULYCHEVA E, et al. Poly-benzimidazole/1H-imidazole-4-sulfonic acid hybrid membranes for high-temperature proton exchange membranes fuel cells[J]. Journal of membrane science, 2012, 399/400: 11–15.
- [4] 马桂林,许佳,张明,等. 无机质子导体的研究进展[J]. 化学进展, 2011, 23(2/3): 441–448.
- [5] 费国平. 磺化聚砜/无机杂化质子交换膜的研究[D]. 上海: 东华大学材料学院, 2008.
- [6] LAN Q Q, YAN N N, WANG Y, et al. Tight ultrafiltration membranes of mesoporous phenolic resin filled in macroporous substrates[J]. Journal of membrane science, 2017, 533: 96–102.
- [7] RAO Z, FENG K, TANG B B, et al. Construction of well interconnected metal-organic framework structure for effectively promoting proton conductivity of proton exchange membrane[J]. Journal of membrane science, 2017, 533: 160–170.
- [8] 赵宇宁. 磷酸化杂化膜高效质子传递通道的构建机制及调控[D]. 天津: 天津大学化工学院, 2014.
- [9] 史春燕,范冰冰,李娅娅,等. 锆氧化物/石墨烯的制备及其对 PO_4^{3-} 的吸附性能[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(4): 23–28.
- [10] 聂玲丽. 磺化聚醚醚酮/磷酸改性粒子复合膜制备与质子传递强化[D]. 天津: 天津大学化工学院, 2013.
- [11] XU C, CAO Y, KUMAR R, et al. A polybenzimidazole/sulfonated graphite oxide composite membrane for high temperature polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Journal of materials chemistry, 2011, 21(30): 11359–11364.
- [12] SCHMIDT C, SCHMIDT-NAAKE G. Proton conducting membranes obtained by doping radiation-grafted basic membrane matrices with phosphoric acid[J]. Macromolecular materials and engineering, 2007, 292(10/11): 1164–1175.
- [13] 张学伟. 质子交换膜燃料电池膜电极的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学应用化学学院, 2007.

Investigation of Proton Conduction Enhancement of Membrane by Phosphoric Acid Intercalated Graphene Oxide

ZHANG Jie¹, CHEN Chuang¹, ZHOU Guoli¹, WANG Jingtao¹, ZHENG Mengxin²

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. NCS Testing Technology Co., Ltd, Beijing 100081, China)

Abstract: Herein, graphene oxide (GO) was synthesized through the improved Hummers method, And then phosphoric acid was intercalated into the interlayers to fabricate phosphoric acid intercalated graphene oxide (PGO). GO and PGO were incorporated into sulfonated poly(ether ether ketone) (SPEEK) matrix to prepare composite membranes through solution casting method. The physicochemical property and proton conduction property of composite membranes were investigated in detail. The results suggested that all the membranes were thermally stable up to 290 °C. Under anhydrous condition, the PGO formed highly efficient transfer channels in composite membrane, which significantly enhanced the proton conduction property of membrane. Particularly, the proton conductivity of SPEEK/PGO-50 reached $7.92 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ at 150 °C, which was 5.7 times of that of SPEEK control membrane and 4.6 times of that of SPEEK/GO.

Key words: phosphoric acid intercalated graphene oxide; proton exchange membrane; transfer channel; Proton conductivity

橡胶沥青黏度影响因素及黏流特性分析

丁 湛¹, 蒋修明², 赵浚凯¹, 栗培龙², 陈 冲²

(1. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了研究橡胶沥青的黏度影响因素以及黏流特性, 制备了不同胶粉掺量、不同混合反应温度和时间条件下的橡胶沥青(RA), 采用布洛克菲尔德黏度计分别测试 180 ℃ 旋转黏度, 分析胶粉掺量、混合温度以及处理时间对 RA 黏度的影响, 并采用 Arrhenius 方程计算橡胶沥青的黏流活化能 E_{η} , 并分析 E_{η} 的变化规律。结果表明, 橡胶沥青的黏度与胶粉掺量符合指数增长模型, 适当提高处理温度和延长处理时间对橡胶沥青黏度具有一定的等效性, 处理温度过高或时间过长都可能引起橡胶分子链的降解而导致橡胶沥青的黏度降低。随着胶粉掺量的增大, 原样与老化后的橡胶沥青黏流活化能 E_{η} 大致呈先增大后减小趋势, 在胶粉掺量 10% ~ 15% 范围内黏流活化能存在峰值, 对于相同的胶粉掺量, 老化后黏流活化能有所增大。从黏度影响及黏流特性的角度, 推荐橡胶粉掺量为 15% ~ 25%, 处理温度 180 ℃, 处理时间 90 min。

关键词: 橡胶沥青; 黏度; 影响因素; 黏流特性; 黏流活化能

中图分类号: U414.1 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.007

0 引言

将废旧橡胶作为改性剂, 加入到沥青中制备橡胶沥青已成为国内外道路工作者研究的热点。橡胶粉在热沥青中会发生溶胀、降解等一系列复杂的物理化学作用, 从而改善沥青的性能^[1-2]。黏度是评价橡胶沥青性能的重要指标, 黏度变化在很大程度上反映了橡胶沥青流变性能的差异^[3-4]。Abdelrahman 等^[2]提出胶粉掺入到沥青中后发生溶胀与降解反应。丁湛等^[5]对橡胶粉在改性沥青中的物化行为进行了分析。Hoang 等^[6]提出了可反映聚合物各材料参数的黏度模型。Putman 等^[7]、芮丽珺^[8]、Lougheed 等^[9]、石雪琴等^[10]、何锐等^[11]学者从不同的角度进行了橡胶沥青的黏度特性研究, 在胶粉掺量、胶粉粒径、橡胶沥青的制备温度、反应时间等因素对橡胶沥青黏度的影响方面取得了大量的研究成果。对于橡胶沥青这种具有复杂的热流变特性的复合材料而言, 黏度特性及影响因素非常复杂, 深入研究橡胶沥青的黏流特性可以从热力学角度认识其黏度及性能衰变机制, 然而相关

的研究较少, 仍需进一步探索。

本研究在不同胶粉掺量、反应温度和时间条件下制备橡胶沥青, 测试不同制备条件下的橡胶沥青的 180 ℃ 黏度, 分析橡胶沥青的黏度变化特性及影响因素; 并在不同温度下测试原样品和 RTFOT 老化后沥青的黏度, 采用 Arrhenius 方程计算橡胶沥青的黏流活化能 E_{η} , 从材料热力学的角度分析橡胶沥青的黏流特性。

1 原材料及试验方法

1.1 试验原材料

试验使用的基质沥青选用壳牌 90# 沥青, 基本技术指标列于表 1 中。橡胶粉采用西安长大华础公司生产的斜交胎胶粉, 平均粒径为 250 μm , 外观呈黑色, 成分组成如表 2 所示。

1.2 橡胶沥青(RA)制备

为了研究橡胶沥青的黏度变化特性及影响因素, 在不同的条件下制备橡胶沥青, 制备工艺参数列于表 3 中。先将基质沥青加热至制备温度, 然后加入胶粉, 采用普通加热搅拌的方法, 边搅拌

收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108037, 51878061); 陕西省自然科学基金项目(2017JM5099); 中央高校创新团队培育项目(300102218405); 中央高校重点科研平台水平提升项目(300102218513)

作者简介: 丁湛(1982—), 女, 黑龙江海伦人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事固体废弃物资源化及环保型道路材料研究, E-mail: dingzhan@chd.edu.cn。

表1 沥青的基本技术指标

Tab.1 Properties of asphalt binders

试验项目	技术要求	测试结果	试验方法
针入度(25℃, 5 s, 100 g) / 0.1 mm	80 ~ 100	88.6	T0604
针入度指数 PI	-1.0 ~ +1.0	-0.6	T0604
延度(5 cm/min, 15℃) / cm	≥100	>100	T0605
软化点(环球法) / °C	≥45	46	T0606
密度(15℃) / (g·cm ⁻³)	≥1.01	1.034	T0603
RTFOT(163℃, 85 min) 老化后质量变化 / %	±0.8	-0.065	T0609
残留针入度比(25℃) / %	≥57	61.2	T0604
残留延度(15℃) / cm	≥8	47.3	T0605

表2 胶粉的成分组成

Tab.2 Composition of crumb rubber %

检测项目	天然橡胶含量	橡胶烃含量	丙酮抽出物	灰分	炭黑含量	金属含量	纤维含量	水分
技术指标	≥40	≥42	≤22	≤8	28—38	<0.01	<0.05	<1

表3 橡胶沥青制备工艺参数

Tab.3 Preparation conditions of RA

胶粉掺量 / %	制备温度 / °C	处理时间 / min
5, 10, 15, 20, 25	180	90
5, 10, 15, 20, 25	140, 150, 160, 180, 195	90
5, 10, 15, 20, 25	180	30, 60, 90, 120, 150

边溶胀, 搅拌速率 500 r/min.

1.3 黏度试验

由于橡胶沥青的黏度较大, 其测试温度显著高于基质沥青和一般改性沥青. 在橡胶沥青的黏度测试中, 国外测试温度有 175、177、190℃等^[12]; 国内普遍采用 180℃测试温度^[8, 13-15]. 根据胶粉在沥青中的溶胀及降解特性, 在不同条件下制备 RA, 然后采用布洛克菲尔德(Brookfield)黏度计(27号转子, 50 r/min), 按照 ASTM D4402: 2012 的试验方法测定 RA 的 180℃黏度, 分析不同制备条件对胶粉沥青黏度的影响. 为了减小试验误差, 每组试验选择 3 个试样进行平行试验后取平均值作为黏度测试结果.

2 橡胶沥青黏度影响因素分析

2.1 橡胶粉掺量对沥青黏度的影响

胶粉掺量是影响橡胶沥青黏度的重要因素. 分别采用占沥青质量 5%、10%、15%、20%、25%

掺量的胶粉, 分别在处理时间 90 min、不同处理温度以及处理温度 180℃、不同处理时间条件下制备橡胶沥青, 胶粉掺量对改性沥青黏度的影响如图 1 所示.

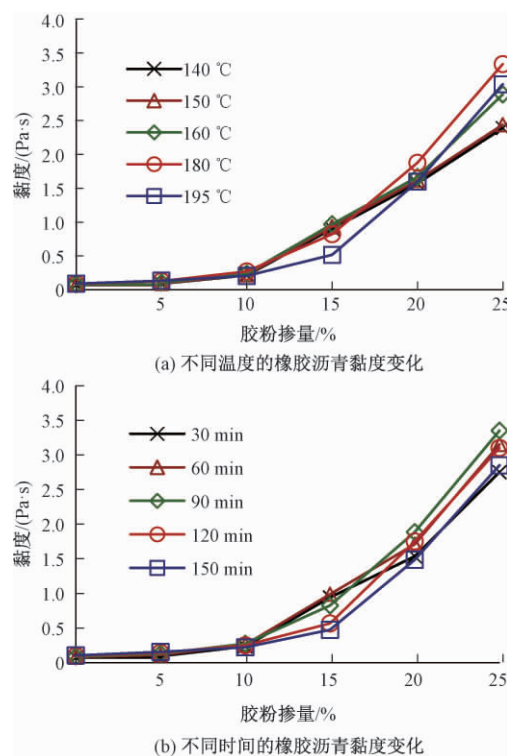


图1 橡胶沥青黏度随胶粉掺量变化

Fig.1 Viscosity change with the increase in dosage of crumb rubber

从图 1 可看出, 随着胶粉掺量的增加, 不同处理温度、不同处理时间下的橡胶沥青黏度不断增大, 但增加的幅度和趋势存在差异. 胶粉掺量较小时(小于 10%), 橡胶沥青黏度随着胶粉掺量的变化比较缓慢, 随着胶粉掺量不断增大, 改性沥青黏度急剧增大. 这是因为橡胶沥青的黏度来源于沥青的黏滞性和胶粉颗粒的位阻效应^[5, 15]. 当胶粉含量较低时, 基质沥青的相对含量很大, 胶粉混合沥青后吸收轻组分的量有限, 对沥青的黏滞性影响较小, 同时胶粉颗粒完全分散在沥青中, 胶粉颗粒互相接触、摩擦、碰撞的作用较弱, 改性沥青的黏度增幅较小. 随着胶粉掺量的增大, 胶粉吸收沥青轻组分的量增大很多, 沥青稠度增大, 同时胶粉的颗粒作用增强, 界面之间发生摩擦及碰撞的几率更大, 胶粉与沥青的交互作用更加充分, 因此黏度的增大程度越来越高.

由图 1(a)可知, 当胶粉掺量超过 20% 后, 处理温度为 180℃时, 黏度增加幅度最大. 这是因为随着温度的升高, 胶粉在沥青中的溶胀效果更好,

但当温度超过 180 ℃ 后,胶粉分子链会发生不同程度的降解,从而延缓了黏度增大速率.由图 1 (b) 可知,当胶粉掺量超过 15% 后,随着胶粉掺量的增加,不同处理时间的橡胶沥青黏度增加幅度差异较大.随着时间的延长,胶粉在沥青中的溶胀更充分,但当时间超过 120 min 后,胶粉分子链会发生一定程度的降解,从而影响了黏度增大速率.由此可见,提高处理温度和延长处理时间存在一定的等效性.

橡胶沥青黏度与胶粉掺量符合指数关系模型:

$$y = y_0 + a \cdot \exp(bx).$$
 (1)

式中: x 为胶粉掺量(胶粉与沥青质量比); y 为胶粉沥青的黏度, Pa·s; y_0 、 a 、 b 为反映原材料黏度特性的参数.

不同制备条件下,橡胶沥青的黏度与胶粉掺量的关系回归模型列于表 4 中.由表 4 可知,橡胶沥青黏度随着胶粉掺量呈指数关系增大,相关性较好.其中,处理温度 160 ℃、混合时间 90 min 与处理温度 180 ℃、混合时间 30 min 条件下的关系模型参数较为接近,这也说明提高温度和延长时间的作用效果有一定的等效性.当混合温度为 180 ℃、混合时间 90 min 时,根据国内橡胶沥青的 180 ℃ 黏度的技术要求范围 1.0 ~ 4.0 Pa·s,并通过橡胶沥青的掺量-黏度回归方程可计算出满足橡胶沥青黏度技术要求的胶粉掺量为: 15.9% ~ 26.3%,因此,本研究建议橡胶粉的掺量为 15% ~ 25%.

表 4 橡胶沥青黏度与胶粉掺量的回归关系
Tab. 4 Relationship of rubber asphalt viscosity with rubber content

处理温度/℃	处理时间/min	回归方程	相关系数 R^2	试样量
140	90	$y = -0.389 + 0.345\exp(8.426x)$	0.973	18
150	90	$y = -0.413 + 0.368\exp(8.279x)$	0.972	18
160	90	$y = -0.257 + 0.239\exp(10.348x)$	0.986	18
180	90	$y = -0.169 + 0.165\exp(12.265x)$	0.991	18
195	90	$y = -0.058 + 0.078\exp(14.755x)$	0.986	18
180	30	$y = -0.229 + 0.215\exp(10.514x)$	0.985	18
180	60	$y = -0.202 + 0.196\exp(11.357x)$	0.990	18
180	90	$y = -0.169 + 0.166\exp(12.265x)$	0.991	18
180	120	$y = -0.092 + 0.108\exp(13.572x)$	0.980	18
180	150	$y = -0.017 + 0.065\exp(15.192x)$	0.986	18

2.2 处理温度及处理时间对橡胶沥青黏度的影响

橡胶沥青的制备属于胶粉-沥青混溶体系发生一系列物理化学作用的过程.处理温度和处理时间对胶粉和沥青之间溶胀、降解等物化作用有重要影响.李廷刚等^[16]分析了反应温度和反应时间对橡胶沥青的性能指标的影响,建议反应温度控制在 180 ~ 190 ℃,制备时间为 45 min 左右,不宜超过 4 h.石雪琴等^[10]研究表明,当搅拌温度超过 200 ℃ 时,胶粉裂解过度而导致性能衰减.为了评估制备过程中老化对黏度的影响,进行了空白试验(胶粉掺量 $D = 0$),处理温度和处理时间对橡胶沥青黏度的影响如图 2 所示.

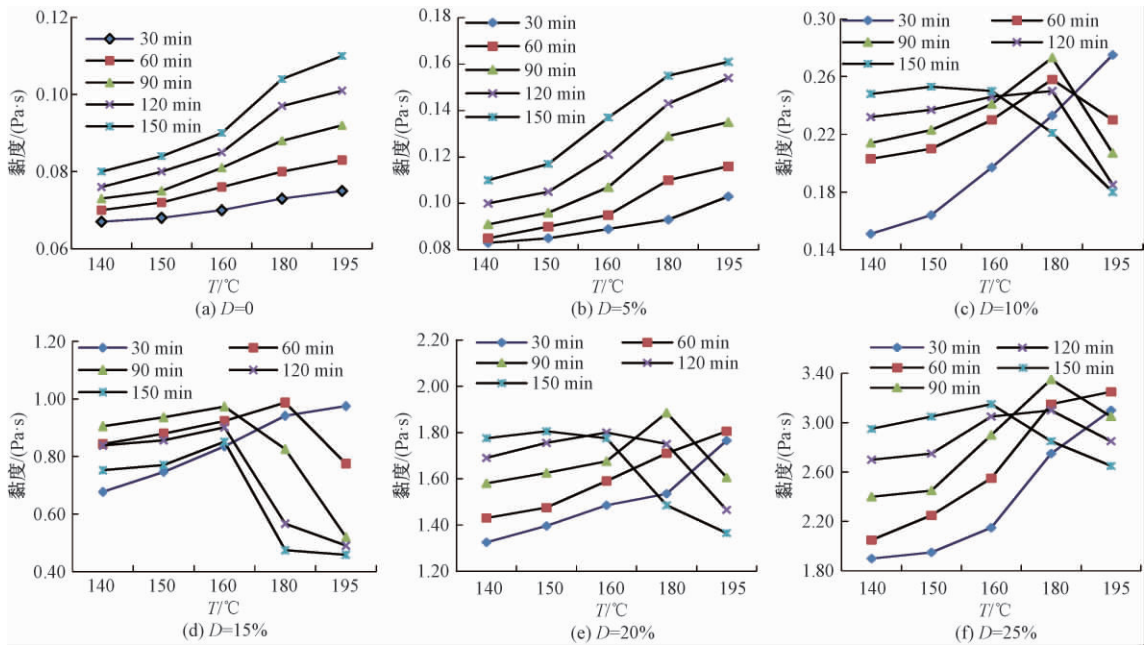


图 2 处理温度对橡胶沥青黏度的影响

Fig. 2 Viscosity changes under the different conditions

由图 2(a) 可以看出,即使不掺加胶粉,随着温度的升高和时间的延长,沥青的黏度均不断增大,即老化效应显著。由图 2(b) 可知,当胶粉掺量较小(5%) 时,沥青的黏度随处理温度的变化趋势与空白试验相似,其主要的原因是胶粉掺量较小,对沥青的改性效果差,沥青老化对黏度的变化贡献较大,两者的黏度差即为胶粉改性作用的影响。由图 2(c) ~ (f) 可以看出,当处理时间较短(如 30 min) 时,随着处理温度的升高,橡胶沥青黏度不断增大;当处理时间较长(如大于 90 min) 时,随着混合温度的升高,沥青的黏度先增大后减小;当处理时间为 60 min 时,橡胶沥青的黏度随温度的变化与胶粉掺量有关,在胶粉掺量为 10% ~ 15% 时,黏度先增大后减小;而当胶粉掺量大于 20% 时,黏度不断增大。可以推断,随着处理温度的升高,不同处理时间的橡胶沥青黏度存在一个黏度衰减拐点。对于相同的胶粉掺量,处理时间越长,拐点温度越低。

当胶粉掺量较低(5%) 时,橡胶沥青黏度随着处理时间的延长而不断增大;当胶粉掺量在 10% ~ 25% 时,温度越高,黏度开始衰减对应的处理时间越短。如果处理时间过短,则胶粉溶胀不充分,难以发挥橡胶的改性效果;但处理时间过长,

不仅能耗很高,而且会发生胶粉过分降解影响改性沥青的性能。当温度达到 195 ℃ 时,胶粉掺量较小时(10% ~ 15%) ,约 30 min 出现黏度衰减;当胶粉掺量大于 20% 时,处理时间 60 min 出现黏度衰减。对于胶粉掺量为 20%、25% 的橡胶沥青,其最大黏度对应的处理温度为 180 ℃,处理时间 90 min,黏度开始衰减。

可见,处理温度和处理时间是影响橡胶沥青黏度的两个关键因素,温度过高或时间过长都可能引起橡胶分子链的降解而导致橡胶沥青的黏度降低。适当提高反应温度和延长处理时间具有一定的等效性,在实际工程中需要根据材料特性确定制备条件。本研究推荐橡胶沥青制备的处理温度采用 180 ℃,处理时间 90 min。

3 橡胶沥青的黏流特性分析

为研究不同类型的橡胶沥青在不同温度下的黏流特性,分别采用不同的胶粉掺量,在处理温度 180 ℃、处理时间 90 min 条件下制备橡胶沥青,并进行旋转薄膜烘箱老化试验(RTFOT) 对老化前的样品测试布氏旋转黏度,测试温度分别为 135、160、170、180 ℃。不同胶粉掺量的橡胶沥青与老化橡胶沥青在 4 种温度下的黏度结果如表 5 所示。

表 5 不同掺量橡胶沥青的黏度

Tab. 5 Viscosity value of rubber asphalt

Pa·s

掺量 /%	原样				RTFOT 老化后			
	135 ℃	160 ℃	170 ℃	180 ℃	135 ℃	160 ℃	170 ℃	180 ℃
0	0.343	0.125	0.105	0.088	0.466	0.155	0.125	0.104
5	0.640	0.187	0.150	0.129	0.890	0.255	0.185	0.140
10	1.370	0.350	0.280	0.210	2.349	0.775	0.525	0.403
15	4.550	2.317	1.350	0.825	8.430	3.033	2.100	1.125
20	22.825	11.550	9.550	7.502	39.467	23.716	20.550	12.300
25	31.501	18.808	16.750	15.333	45.650	29.203	22.250	18.501

材料的黏流活化能 E_η 是表征材料黏流特性的重要参数。 E_η 越大,则材料流动需要的温度越高。当温度远高于玻璃化温度 T_g ,高分子熔体黏度与温度的依赖关系服从 Arrhenius 方程^[17]:

$$\eta(T) = Ke^{\frac{-E_\eta}{RT}} \quad (2)$$

式中: $\eta(T)$ 为温度 T 时的黏度, Pa·s; K 为材料常数; T 为热力学温度, K; $R=8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 为普适气体常数; E_η 为黏流活化能, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。

对式(2) 两边求对数,得

$$\lg \eta(T) = \lg K - \frac{E_\eta}{2.303RT} \quad (3)$$

因此,根据在不同温度下沥青的黏度 $\eta(T)$

值,以 $\lg \eta(T) \sim 1/T$ 作图,如图 3 所示,所得直线的斜率是 $1/T$ 的系数值,即式(3) 中 $-\frac{E_\eta}{2.303R}$ 的值,进而可求得沥青样品的 E_η 大小。不同胶粉掺量的原样与老化后橡胶沥青的黏流活化能 E_η 如图 4 所示。

尽管沥青的黏度随老化时间的延长非线性增加,但黏度的对数值 $\lg \eta(T)$ 和温度的倒数 $1/T$ 呈线性关系,直线的斜率体现了黏度随温度变化的敏感性,其大小可以反映黏流活化能的差异。由图 4 可看出,随着胶粉掺量的增大,原样橡胶沥青的黏流活化能 E_η 先增大后减小,在胶粉掺量

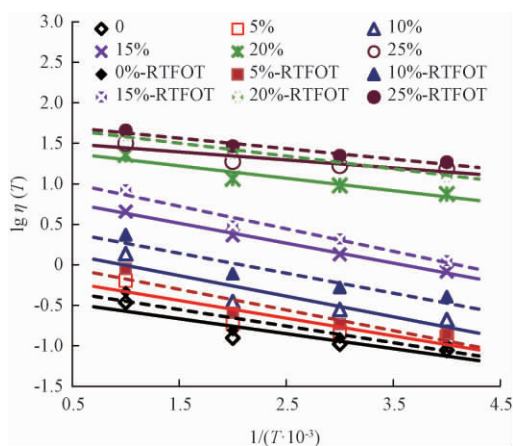
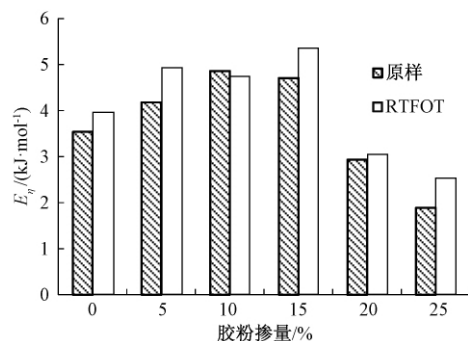
图3 沥青的 $\lg \eta(T) - 1/T$ 关系曲线Fig. 3 Relationship between $\lg \eta(T)$ and $1/T$ 

图4 原样与老化后橡胶沥青的黏流活化能变化

Fig. 4 E_{η} changes for original and aged samples

10% ~ 15% 范围内黏流活化能存在峰值。 E_{η} 的变化直接体现了橡胶沥青微观结构的变化, 胶粉在热沥青中吸收轻组分发生溶胀, 轻组分减少, 沥青变稠, 沥青-胶粉界面效应增强, 分子间作用力及界面黏滞作用更强, 材料运动需要克服的能垒越高。当胶粉掺量较少 ($\leq 10\%$) 时, 黏流活化能随胶粉掺量的增加而增大; 当胶粉掺量逐渐增大, 沥青中的轻组分相对不足, 胶粉溶胀作用受到限制, 胶粉在沥青中主要以物理分散状态存在, 橡胶沥青的黏度贡献主要是胶粉颗粒接触与位阻效应, 而这部分黏度构成与温度关系不大, 并在一定程度上减弱了沥青-胶粉的界面效应对黏度贡献的比重, 因此黏流活化能有所衰减。橡胶沥青分散体系不稳定, 这也从侧面反映了不同胶粉掺量的橡胶沥青黏度构成机理的差异。由此可见, 对于胶粉掺量为 25% 的橡胶沥青, 其黏度最大, 但黏流活化能不一定最高, 可见黏流活化能是沥青流变性能指标, 与橡胶沥青的黏度大小并没有直接关系。当胶粉掺量较大时, 胶粉颗粒位阻效应对黏度的贡献很大, 但对黏流活化能的影响较小。

RTFOT 老化后, 橡胶沥青黏流活化能的变化

趋势与原样橡胶沥青活化能的变化趋势基本一致, 但对于相同的胶粉掺量 (除 10% 外), 老化后黏流活化能有所增大。这是因为老化过程中的沥青发生热氧反应生成了羰基、羧基等极性官能团或分子链聚合, 沥青分子流动所需能量增大, 黏流活化能增大。

4 结论

(1) 橡胶沥青的黏度与胶粉掺量符合指数关系模型, 适当提高处理温度和延长处理时间对橡胶沥青黏度具有一定的等效性, 处理温度过高或时间过长都可能引起橡胶分子链的降解而导致橡胶沥青的黏度降低。

(2) 随着胶粉掺量的增大, 原样与老化后的橡胶沥青黏流活化能 E_{η} 大致呈先增大后减小趋势, 在胶粉掺量 10% ~ 15% 范围内黏流活化能存在峰值。对于相同的胶粉掺量, 老化后黏流活化能有所增大。

(3) 从黏度影响及黏流特性的角度, 推荐橡胶粉掺量为 15% ~ 25%, 处理温度 180 °C, 处理时间 90 min。

参考文献:

- [1] YU Q X. The recycling and reuse of waste tire world-wide [J]. World rubber industry, 2010, 37 (2): 50 - 54.
- [2] ABDELRAHMAN M A, CARPENTER S H. Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier [J]. Transportation research record, 1999, 1661 (1): 106 - 113.
- [3] 孙玉海, 盖国胜, 张培新. 我国废橡胶资源化利用的现状和发展趋势 [J]. 橡胶工业, 2003, 50 (12): 760 - 763.
- [4] HE Z Y, LU Z F, ZHANG W W. Performance study on rubber powder modified asphalt of waste tire [C]// Tenth International Conference of Chinese Transportation Professionals. Beijing: ASCE, 2010: 3272 - 3278.
- [5] 丁湛, 邹鹏, 栗培龙. 胶粉在改性沥青中的物化行为分析 [J]. 应用化学, 2017, 34 (2): 204 - 210.
- [6] HOANG E M, ALLEN N S, LIAUW C M, et al. The thermo-oxidative degradation of metallocene polyethylenes, Part 1: Long-term thermal oxidation in the solid state [J]. Polymer degradation and stability, 2006, 91 (6): 1356 - 1362.
- [7] PUTMAN B J, AMIRKHANIAN S N. Characterization of the interaction effect of crumb rubber modified bind-

- ers using HP-GPC[J]. Journal of materials in civil engineering 2010 22(2): 153 – 159.
- [8] 芮丽琨. 橡胶沥青黏度变化规律研究[J]. 中外公路 2013 33(6): 295 – 297.
- [9] LOUGHEED T J, PAPAGIANNAKIS A T. Viscosity characteristics of rubber-modified asphalts [J]. Journal of materials in civil engineering, 1996, 8(3): 153 – 156.
- [10] 石雪琴, 刘勇, 王都兴. 橡胶粉改性沥青及其性能研究[J]. 科学技术与工程 2013 13(17): 5050 – 5053.
- [11] 何锐, 黄鑫, 耿九光, 等. 废胎胶粉与 HDPE /SBS 三掺复合改性沥青性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版) 2018 39(2): 67 – 72.
- [12] 郝培文, 李志厚, 徐金枝, 等. 橡胶沥青技术性能评价标准现状[J]. 筑路机械与施工机械化 2015 32(6): 47 – 52.
- [13] LI P L, DING Z, ZOU P, et al. Analysis of physico-chemical properties for crumb rubber in process of asphalt modification[J]. Construction and building materials, 2017, 138: 418 – 426.
- [14] 弥海晨, 郭平, 胡苗. 橡胶沥青黏度测试影响因素及黏度值确定方法研究[J]. 中外公路 2010 30(5): 301 – 304.
- [15] 丁湛, 栗培龙. 胶粉改性沥青黏度影响因素及预估模型研究[J]. 公路 2012(7): 213 – 216.
- [16] 李廷刚, 李金钟, 李伟. 橡胶沥青微观机理研究及其公路工程应用[J]. 公路交通科技 2011 28(1): 25 – 30.
- [17] 李丽, 杨继萍, 张正. 几种不同 PE 和 PP 树脂的黏流活化能研究[J]. 应用化工 2008 37(1): 33 – 36.

The Influencing Factors Analysis of Viscosity and Viscous Flow Properties for Rubber Asphalt

DING Zhan¹, JIANG Xiuming², ZHAO Junkai¹, LI Peilong², CHEN Chong²

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Road Structure & Material Ministry of Transport, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To investigate the influencing factors of viscosity and viscous flow properties of rubber asphalt, rubber asphalt (RA) samples were prepared under different conditions of mixing temperature and processing time for different rubber dosage. Brookfield viscosity tests were carried out on RA samples, and the effect of these factors on viscosity of RA was analyzed. The visco-flow activation energy (E_η) of RA was calculated using Arrhenius equation according to the viscosity values of asphalt under different temperatures. The changing regularity of E_η was analyzed. The results and analysis indicated that the viscosity values of RA increased by the exponential growth model continuously with the increase of rubber content. There was a certain equivalence for rubber asphalt viscosity between raising mixing temperature and extending the processing time. But too high temperature or too much time would lead to excessive degradation of rubber molecules, which could cause the decrease of RA viscosity. With the increase in the dosage of crumb rubber, E_η of RA for origin or aged samples both went up first and then dropped down. And peak E_η existed in the range of rubber content from 10% to 15%. The E_η value of aged RA was bigger than that of original sample for the same rubber dosage. From the consideration of viscosity factors and viscous flow properties, the processing conditions were recommended that the dosage of crumb rubber was 15% ~ 25%, preparation temperature was 180 °C and the processing time was 90 min approximately based on this research.

Key words: rubber asphalt (RA); viscosity; influencing factors; visco-flow characteristics; visco-flow activation energy

有序定构聚集态 β -iPP 薄膜的重结晶行为研究

刘忠柱¹, 秦琦¹, 李睢水², 郑国强², 米立伟¹

(1. 中原工学院 材料与化工学院, 河南 郑州 450007; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 采用熔体挤出-拉伸法制备了稀土类 β 成核剂改性等规聚丙烯(iPP)薄膜。然后将上述薄膜加热到不同熔融温度, 通过差示扫描量热法(DSC)和偏光显微镜(POM)实验分别考察了有序熔体结构对 β -iPP 薄膜非等温和等温结晶行为的影响。结果表明: 在非等温结晶过程中, 随着设定温度(T_m)的降低, 部分熔融的 β -iPP 能够诱导形成更多成核位点, 使其在较高温度下发生结晶; 同时, 试样中诱导形成密集的柱晶结构。在等温结晶过程中, 当 $165\text{ }^{\circ}\text{C} < T_m < 169\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在试样内部会发生 β 晶向 α 晶转变; 然而当 $169\text{ }^{\circ}\text{C} < T_m < 172\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 在试样内部的 α 晶逐渐向 β 晶转变。

关键词: 熔体挤出-拉伸; 等规聚丙烯; β 成核剂; 有序熔体结构; 结晶行为

中图分类号: TQ320.66 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.010

0 引言

等规聚丙烯(iPP)是一种典型的半结晶性高聚物, 具有良好的综合性能^[1], 其晶型包括 α 、 β 、 γ 和近晶型, 其中以 α 和 β 晶型最为常见。在这几种晶型中, 含有 β 晶型的 iPP 制品具有相对较高的冲击强度、韧性和较好的延展性等^[2], 因此, 含有部分 β 晶型的 iPP 制品一直是科学界和工业界研究的热点。通常地, 添加 β 成核剂是目前公认的获得高含量 β 晶的最有效途径之一^[3]。

一般来说, 聚合物的分子链结构特性使其熔点分为名义熔点和平衡熔点。而在名义熔点之上一定的温度范围内, 熔体中的部分有序结构或残余未熔融晶体能够保留下来。同时, 熔体结构种类和含量随着熔融温度的不同而发生变化。因此, 对聚合物所施加的熔融温度不足以使其完全熔融时, 聚合物熔体能够保留初始晶体的较强记忆效应(即有序结构), 进而能够在后续结晶过程中作为成核点来提高成核密度^[4-5], 最终使得制品的力学性能得到显著提高。同时, 在含 β 成核剂的 iPP 体系中, 有序熔体结构的存在也能显著提高 β 成核剂的成核效率^[6]。因此, 通过研究 iPP 在升至不同温度条件下的非等温和等温结晶行为, 深入理

解具有不同熔体结构 β -iPP 的 β 晶结晶行为, 从而为进一步调控 iPP 的结晶动力学、形貌与性能之间的关系以及深入理解结晶行为的本质提供有力的帮助, 也能够为高性能 iPP 制品产业化提供理论和实验依据。

笔者前期系统地研究了 β 成核剂含量、拉伸速率和退火温度等对熔体挤出-拉伸 iPP 薄膜的微观结构和宏观性能的影响。研究发现^[7-9], 随着拉伸速率的增加, iPP 及 β -iPP 薄膜的取向度逐渐增大。同时, 当高拉伸速率较高时, 薄膜内部主要形成了条纹状的晶体结构。基于前期研究工作, 现通过 DSC 和 POM 重点考察不同熔体结构对高拉伸速率所制备薄膜熔融重结晶过程的影响。

1 实验部分

1.1 实验原料

等规聚丙烯(iPP): T30S, 粒料, 兰州石油化工有限公司生产, 其熔体流动速率和重均分子量分别为 $2.6\text{ g}/10\text{ min}$ ($190\text{ }^{\circ}\text{C}$, 21.6 N) 和 $5.87 \times 10^5\text{ g/mol}$ 。

稀土 β 成核剂: WBG-II, 白色粉末, 广东炜林纳功能材料有限公司生产。

收稿日期:2018-01-15; 修订日期:2018-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51173171, 21671205)。

作者简介:刘忠柱(1987—), 女, 河南泌阳人, 中原工学院讲师, 博士, 主要从事聚合物成型加工及改性研究, E-mail: zzliu1987@126.com。

1.2 试样制备

首先将一定量的 iPP 和 β 成核剂按一定的质量比例(即质量分数为 0.1%)进行干混,然后经双螺杆挤出机熔融挤出、造粒,将上述粒料经哈克混炼机(德国公司 RC9000 型转矩流变仪)熔融挤出,最后在室温下(25 °C 左右)由几个辊筒组成的牵引装置卷取收集。挤出机的口模尺寸为 1 mm × 50 mm,加料段到口模的温度依次为 165、180、195、185 °C。同时为了尽可能减小挤出过程中熔体经过口模时受到的剪切力,挤出机的螺杆转速设为 0.6 r/min。薄膜收集装置的牵引速率(SR)设为 90 cm/min。同时,在相同条件下也制备出了纯 iPP 薄膜。为了简便起见,上述两种薄膜分别命名为 iPP-0.1-90 和 iPP-0-90。

1.3 测试与表征

1.3.1 XRD 测试

在中国科技大学国家同步辐射实验室进行二维广角 X 射线衍射(2D-WXAD)测试。X 射线波长为 0.154 nm,探测器到样品的距离为 385 mm,接收装置为 MAR345 影像板。为了得到较强的衍射信号,把薄膜进行裁剪,如图 1 所示,再把相同实验条件下获得的裁剪试样进行有序叠放,使其总厚度约为 1 mm。最后将叠放后的试样放置在样品台上进行测试,同时确保取向方向(流动方向)垂直于 X 射线光束。

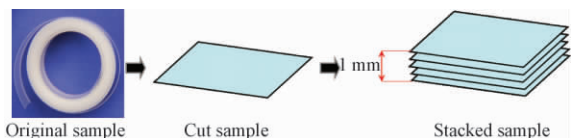


图 1 2D-WAXD/SAXS 测试所用试样制备过程示意图

Fig. 1 Sample preparation for 2D-WAXD/SAXS measurement

在上海同步辐射光源 BL16B1 线站进行二维小角 X 射线散射(2D-SAXS)测试。X 射线波长为 0.124 nm,探测器到样品的距离为 5 200 mm。制样方式以及试样放置方式同 2D-WAXD。

1.3.2 差示扫描量热(DSC)测试

实验中采用的是美国 TA 公司的 DSC Q2000 型号热分析仪来进行非等温和等温结晶实验。操作在 N_2 的保护下进行。非等温结晶过程如下:将 5 ~ 8 mg 样品置于坩埚中,以 10 °C/min 的升温速率将样品加热至不同熔融温度($T_m = 165、166、167、169、172、175、180、190$ °C),保温 5 min,再以 10 °C/min 的降温速率降至 50 °C,由此采集降温过程中热流率随温度变化的信息。等温结晶过程

如下:将 5 ~ 8 mg 样品置于坩埚中,以 10 °C/min 的升温速率将样品加热至不同熔融温度($T_m = 165、166、167、169、172、175、180$ 和 190 °C),再以 30 °C/min 的降温速率降至 134 °C 等温结晶 1 h,然后再以 10 °C/min 的升温速率升至 200 °C,由此采集二次升温过程中热流率随温度变化的信息。

1.3.3 偏光显微镜(POM)测试

采用与 Linkam THMS600 热台联用的 Olympus BX51 型 POM 进行结晶形貌的观察。同时利用与显微镜配合的 PixeLINK PL-A662 高频率 CCD 摄像机实时采集图像。实验过程如下:剪一块方形薄膜置入两盖玻片中间,放入热台上,然后以 30 °C/min 从室温快速升温至 190 °C(或 180 °C),恒温 5 min,然后以 10 °C/min 降温结晶,观察薄膜降温结晶过程中形貌的变化。

2 结果与讨论

2.1 熔体挤出-拉伸 β -iPP 薄膜的取向结晶行为

图 2 分别为 β -iPP 薄膜的 2D-WAXD、2D-SAXS 图样,1D-WAXD 曲线和 DSC 升降温曲线,以及 iPP 原料的 DSC 升降温曲线。从 2D-WAXD 图样可以看出,各个晶面均出现较集中的衍射弧,这表明试样中分子链发生了明显的取向结晶。同时,从 2D-SAXS 散射图样还可以发现,在子午线方向出现明显的两个散射斑,这表明垂直于拉伸方向上形成了有序排列的片晶结构。此外,通过 Hermans 取向参数来分别计算了分子链和片晶的取向度^[10],其值分别为 0.91 和 0.704,这说明通过挤出-拉伸过程使得制品内部形成了较高取向度的晶体结构。另外,从 2D-WAXD 图中还可以发现有代表 β 晶的较微弱的衍射弧出现,并且通过对 1D-WAXD 曲线[见图 2(c)]进行高斯拟合,根据文献[11]中报道的公式计算 β 晶相对含量仅为 6.5%,这主要与拉伸诱导形成的 α 排核和 β 成核剂之间存在竞争作用有关。

从图 2(d)可以发现, β -iPP 薄膜在升温过程中呈现出明显的多重熔融峰现象。167 °C 左右的较大主熔融峰主要归因于 α 晶的熔融;144 °C 左右较小的熔融峰 β' 主要与初始形成的 β 晶有关,而 150 °C 左右的熔融峰 β'' 主要归属于初始晶体部分熔融和重结晶所形成的更加完善片晶或者较厚片晶的熔融^[12]。从冷却曲线上可以发现,与 iPP 原料的 DSC 曲线相比(如图 2(e)所示), β -iPP 薄膜的结晶峰温度(124.8 °C)比原料的结晶峰温度(116.6 °C)高 8.2 °C,这主要归因于 β 成核剂的加入提高了 iPP 的成核效率。

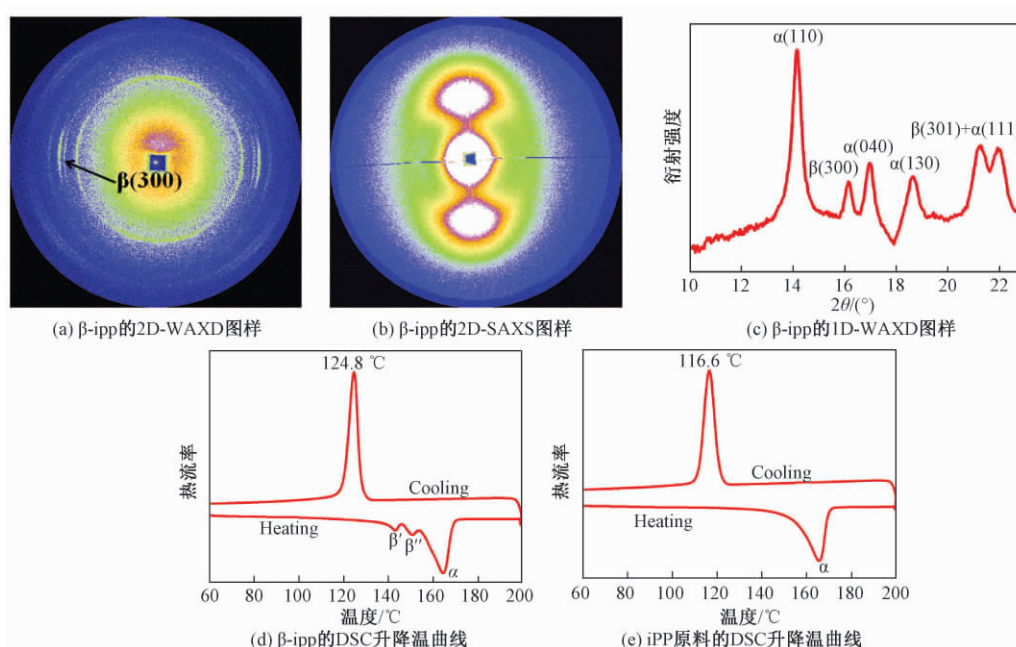


图2 β -iPP 薄膜的 2D-WAXD、2D-SAXS、1D-WAXD 曲线、DSC 曲线以及 iPP 原料的 DSC 曲线

Fig. 2 The results of 2D-WAXD, 2D-SAXS, 1D-WAXD curves and DSC of the β -iPP film and the DSC curves of iPP raw material

2.2 有序结构对 β -iPP 薄膜非等温结晶行为的影响

图3分别为部分熔融和完全熔融 β -iPP 熔体的非等温结晶曲线和根据该曲线得到的结晶参数(起始结晶温度 T_{onset} 、结晶峰温度 T_p 和结晶终止温度 T_{endset})与 T_m 的关系图。从图3(a)可以看出,随着 T_m 的升高, β -iPP 熔体的降温结晶峰向低温方向偏移,即 T_{onset} 、 T_p 和 T_{endset} 均逐渐减小,分别从 $T_m = 165^\circ\text{C}$ 时的 160、144.2、123.6 $^\circ\text{C}$ 降低到 $T_m = 190^\circ\text{C}$ 时的 134.2、125.8、114.6 $^\circ\text{C}$ 。这说明部分熔融 β -iPP 在结晶过程中提供更多的成核位点^[13]来促进结晶过程,使其在较高温度下发生结晶,从而相对地延长了结晶时间^[14]。此外,当 T_m

为 165 $^\circ\text{C}$ 时, β -iPP 薄膜的结晶峰形状与其他结晶峰形状有较大差别,这主要是因为当 T_m 为 165 $^\circ\text{C}$ 时, β -iPP 试样只有极少量部分发生熔融,所以结晶峰面积比较小,同时熔融部分通过自成核进行非等温结晶,使得其结晶温度可达到 145 $^\circ\text{C}$ 。

从图3(b)可以看出,当 T_m 为 180 和 190 $^\circ\text{C}$ 时,两者结晶参数变化不大,说明有序结构的数量相同。因此,通过 POM 来直接观察 $T_m = 190^\circ\text{C}$ 时非等温结晶形貌,如图4(a)所示。从图中可以发现,当温度为 190 $^\circ\text{C}$ 时,试样中仍然能够观察到部分取向的晶体结构。随着温度的降低,该取向晶体结构诱导形成密集的柱晶结构。同时,试样中 β 成核剂诱导生成 β 晶。笔者猜测在 190 $^\circ\text{C}$ 时,试

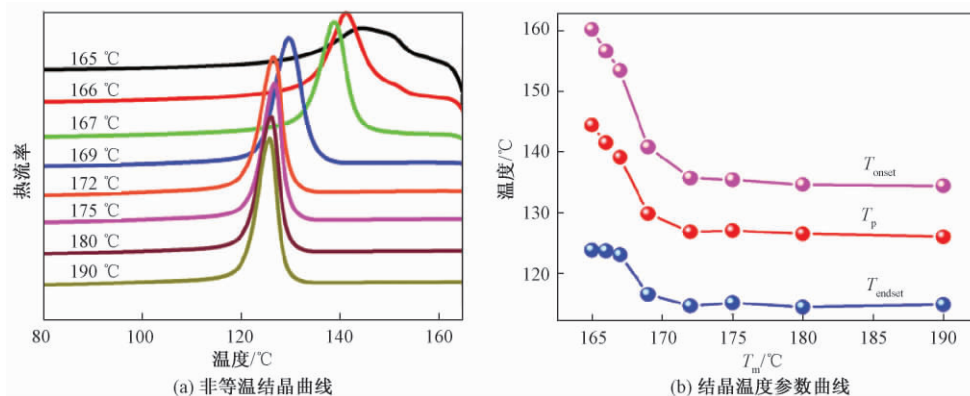


图3 β -iPP 薄膜分别加热到不同设定温度的非等温结晶曲线和结晶参数随 T_m 的变化曲线

Fig. 3 Non-isothermal crystallization cooling curves of β -iPP film after heating to different temperatures and variations of crystallization parameters as a function of T_m

样内部的取向晶体结构可能是由于 β 成核剂自组装成为针状结构, iPP 分子链包覆在针状 β 成核剂表面而形成的. 为此, 笔者又对拉伸速率为 90 cm/min 的纯 iPP 薄膜做了熔融重结晶实验(T_m 为 180 $^{\circ}\text{C}$), 如图 4(b) 所示. 从图中发现, 与 iPP-

0.1-90 相比, 尽管 T_m 较低(180 $^{\circ}\text{C}$), 仍然没有观察到明显取向晶体结构的存在. 并且随着温度的降低, iPP-0-90 试样中形成了较规整的球晶结构. 因此, 这充分印证了笔者对上述 iPP-0.1-90 试样的猜测.

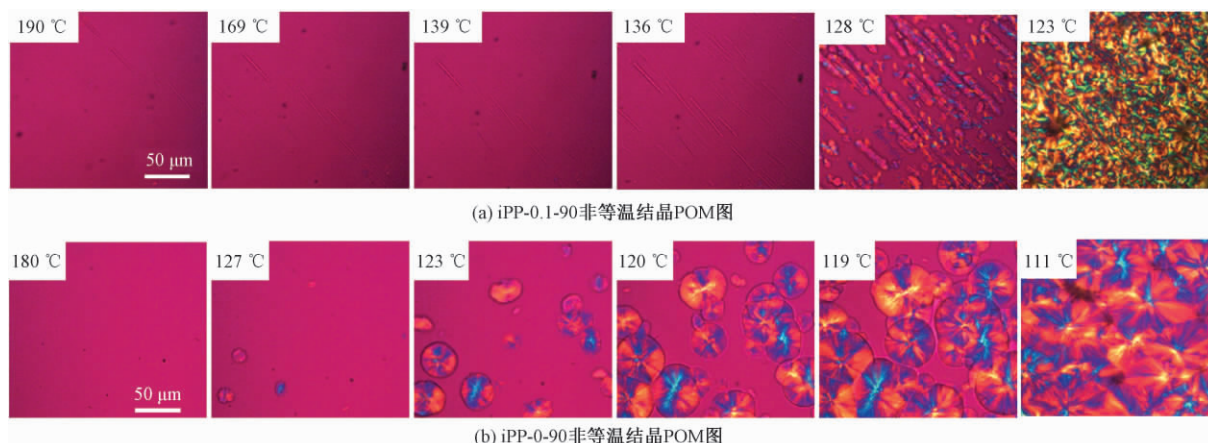


图 4 薄膜分别升温至 190 $^{\circ}\text{C}$ 和 180 $^{\circ}\text{C}$ 后的非等温结晶 POM 图

Fig. 4 The POM of film during non-isothermal crystallization for various temperatures after melting at 190 $^{\circ}\text{C}$ and 180 $^{\circ}\text{C}$

2.3 有序结构对 β -iPP 薄膜等温结晶行为的影响

图 5 为部分熔融和完全熔融的 β -iPP 等温结晶 1 h 后的二次升温熔融曲线. 从图 5 可以发现, 熔融峰温度变化最为明显的温度区间发生在 T_m 为 165 ~ 172 $^{\circ}\text{C}$. 当 T_m 为 165、166 $^{\circ}\text{C}$ 时, 在 167 $^{\circ}\text{C}$ 左右和 175 $^{\circ}\text{C}$ 附近出现两个熔融峰, 其中, 167 $^{\circ}\text{C}$ 左右的峰为熔融再结晶形成 α 晶体所对应的二次熔融峰, 而 175 $^{\circ}\text{C}$ 附近的峰为未完全熔融的晶体发生退火之后所形成晶体的熔融峰. 当 T_m 为 167 $^{\circ}\text{C}$ 时, 只在 167 $^{\circ}\text{C}$ 附近存在一个熔融峰, 这说明此时样品内的晶体均为熔融再结晶而形成的 α 晶体. 同时, 在上述 3 个 T_m 时, 没有出现 β 晶的熔融

峰, 这说明在等温结晶过程中试样内部的 β 晶完全转变为 α 晶^[6]. 当 T_m 为 169 $^{\circ}\text{C}$ 时, 分别出现一微弱的 β 晶熔融峰和一较强的 α 晶熔融峰. 随着 T_m 增大, β 晶熔融峰的强度逐渐增大, 而 α 晶强度减小, 这说明在等温结晶过程中试样中的 α 晶逐渐向 β 晶转变. 但是, 随着 T_m 的持续增大($T_m \geq 175$ $^{\circ}\text{C}$), 两者的熔融峰强度几乎不再发生变化.

3 结论

首先通过熔体挤出-拉伸法制备了稀土类 β 成核剂改性 iPP 薄膜, 然后采用 DSC 和 POM 实验详细考察了有序熔体结构对 β -iPP 薄膜非等温和等温结晶行为的影响. 主要结论如下:

(1) 在非等温结晶过程中, 随结晶温度的降低, 部分熔融的 β -iPP 熔体诱导形成了更多的成核位点, 能够促进结晶过程, 使其在较高的温度下发生结晶. 同时, 由于 β 成核剂自组装成为针状结构, 而 iPP 分子链又包覆在其表面形成取向的成核点, 随着温度的降低, 该取向成核点诱导形成密集的柱晶结构.

(2) 在等温结晶过程中, T_m 介于 165 ~ 172 $^{\circ}\text{C}$ 时, 二次熔融曲线呈现出各异的熔融特性. 当 165 $^{\circ}\text{C} \leq T_m < 169$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 在等温结晶过程中试样内部 β 晶转变为 α 晶; 而 169 $^{\circ}\text{C} \leq T_m \leq 172$ $^{\circ}\text{C}$ 时, 在等温结晶过程中试样中的 α 晶逐渐向 β 晶转变.

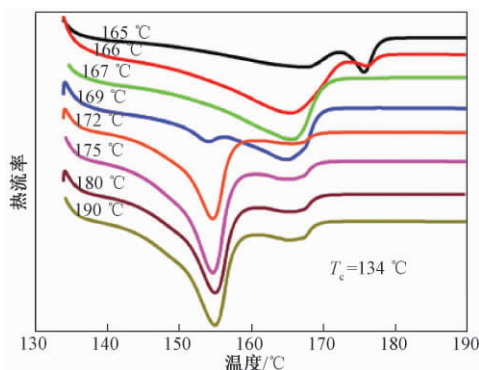


图 5 β -iPP 薄膜升温至不同设定温度后快速降温至 134 $^{\circ}\text{C}$ 等温结晶 1 h 后二次熔融的曲线

Fig. 5 The secondary heating curves of β -iPP film after heating to different melting temperature and then quickly cooled to 134 $^{\circ}\text{C}$ for isothermal crystallization 1 h

参考文献:

- [1] 潘亚敏, 石素宇, 常宝宝, 等. 退火对等规聚丙烯微注射制品性能及结构的影响[J]. 郑州大学学报(工学版) 2013, 34(6): 59–62.
- [2] ZHANG P Y, LIU X X, LI Y Q. Influence of β -nucleating agent on the mechanics and crystallization characteristics of polypropylene [J]. Materials science and engineering: A, 2006, 434(1/2): 310–313.
- [3] VARGA J, MENYHARD A. Effect of solubility and nucleating duality of N, N'-dicyclohexyl-2, 6-naphthalenedicarboxamide on the supermolecular structure of isotactic polypropylene [J]. Macromolecules, 2007, 40(7): 2422–2431.
- [4] LORENZO A T, MULLER A J. Estimation of the nucleation and crystal growth contributions to the overall crystallization energy barrier[J]. Journal of polymer science, part B: Polymer physics, 2008, 46(14): 1478–1487.
- [5] LORENZO A T, ARNAL M L, SANCHEZ J J, et al. Effect of annealing time on the self-nucleation behavior of semicrystalline polymers[J]. Journal of polymer science part B: polymer physics, 2006, 44(12): 1738–1750.
- [6] KANG J, ZHANG J Y, CHEN Z F, et al. Isothermal crystallization behavior of β -nucleated isotactic polypropylene with different melt structures [J]. Journal of polymer research, 2014, 21(1): 506–515.
- [7] LIU Z Z, LIU X H, ZHENG G Q, et al. Mechanical enhancement of melt-stretched β -nucleated isotactic polypropylene: the role of lamellar branching of β -crystal [J]. Polymer, 2016, 107: 227–235.
- [8] LIU Z Z, ZHENG G Q, ZHENG H L, et al. Microstructure and mechanical properties of isotactic polypropylene films fabricated via melt-extrusion and uniaxial-stretching [J]. Journal of macromolecular science, Part B: Physics, 2016, 55(2): 158–174.
- [9] 刘忠柱, 李广森, 付艳芹, 等. 退火温度对 β 成核 iPP 薄膜微观结构和力学性能的影响 [J]. 现代塑料加工应用 2015, 27(4): 10–12.
- [10] LIU Z Z, LIU X H, ZHENG G Q, et al. New insight into lamellar branching of β -nucleated isotactic polypropylene upon melt-stretching: WAXD and SAXS study [J]. Journal of materials science, 2015, 50(2): 599–604.
- [11] YANG S G, CHEN Y H, DENG B W, et al. Window of pressure and flow to produce β -crystals in isotactic polypropylene mixed with β -nucleating agent [J]. Macromolecules, 2017, 50(12): 4807–4816.
- [12] CHO K, SAHEB D N, YANG H, et al. Memory effect of locally ordered α -phase in the melting and phase transformation behavior of β -isotactic polypropylene [J]. Polymer, 2003, 44(14): 4053–4059.
- [13] GOOSSENS H, JAIN S, DUIN M V, et al. Effect of in situ prepared silica nano-particles on non-isothermal crystallization of polypropylene [J]. Polymer, 2005, 46(20): 8805–8818.
- [14] SABINO M A, RONCA G, MÜLLER A J. Heterogeneous nucleation and self-nucleation of poly (pdioxanone) [J]. Journal of materials science, 2000, 35(20): 5071–5084.

The Crystallization Behavior of β -iPP Film with Different Ordered Melt Structures

LIU Zhongzhu¹, QIN Qi¹, LI Suishui², ZHENG Guoqiang², MI Liwei¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering Zhongyuan University of Technology Zhengzhou 450007, China; 2. School of Material Science and Engineering Zhengzhou University Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The rare earth β -nucleating agent modified isotactic polypropylene (iPP) films were prepared by melt extrusion-stretching method. Subsequently, the films were heated to different melting temperatures. The influence of ordered melt structures on non-isothermal and isothermal crystallization behavior of β -iPP films were investigated by DSC and POM experiments. The results indicated that, during the non-isothermal crystallization process, the partially melted β -iPP could induce the formation of more nucleation sites with decreasing crystallization temperature; and then inducing the crystallization at higher temperature. Meanwhile, the dense cylindrite was formed in samples. During the isothermal crystallization process, when the $165\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_m < 169\text{ }^{\circ}\text{C}$, the β crystal was transformed into α crystal in the sample; however, when the $169\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_m \leq 172\text{ }^{\circ}\text{C}$, the α crystal in the sample gradually changed into the β crystal.

Key words: melt extrusion-stretching; isotactic polypropylene; β -nucleating agent; ordered melt structures; crystallization behavior

陕西省连续箱梁桥底板实测竖向温度梯度研究

邬晓光, 贺攀, 何启龙, 冯宇

(长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要:为建立陕西省不同地区连续箱梁桥实测温度梯度场,选取陕北、关中和陕南地区具有代表性的三座连续箱梁桥进行了连续一年的观测,通过对实测数据的拟合,建立了三个地区实测温度梯度模型。研究表明,陕西省三个地区连续刚构箱梁实测竖向最大温差各不相同,按规范中计集混凝土铺装层后计算得到,陕北地区 18.6°C 、关中地区 21.2°C 、陕南地区 22.9°C ,但均小于规范值 25°C ;与规范规定不同,实测数据显示:箱梁底板存在竖向温差,三个地区底板实测正(负)最大温差分别为 3.5°C (-3.1°C)、 2.8°C (-2.9°C)、 1.5°C (-1.5°C)。基于实测温度梯度,建立箱梁合龙段有限元模型,进行实测温度效应分析,结果表明:在负温度梯度中,不考虑底板竖向温度梯度的作用,对于底板的受力将产生不利的影响,偏不安全。建议在进行连续(刚构)箱梁桥设计验算时应综合考虑底板竖向温度梯度的影响。

关键词:桥梁工程;连续箱梁桥;有限元模型;底板温度梯度;温度效应

中图分类号:U443

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.006

0 引言

通过对陕西省运营的86座连续刚构桥调研看出,47座桥底板出现纵向裂缝,其中,14座位于陕北,24座位于关中,9座位于陕南,分别占该地区在役连续刚构桥总数的82.35%、72.73%、37.5%。可见,陕西省连续刚构桥梁底板纵向开裂普遍程度呈现地域分化的特征。

尽管很多学者^[1-4]认为底板钢束张拉形成的径向力是导致连续刚构桥底板纵向开裂的主要原因,但不同地区环境差异较大,温度梯度作用对箱梁底板的影响不可忽视,对比各国规范可以发现,英国^[5]、新西兰^[6]等国规范对竖向温度梯度规定时,都考虑了底板竖向温度梯度;而《中国铁路桥涵设计基本规范》^[7]以及《公路桥涵设计通用规范》(2015)^[8]都未计入底板竖向温度梯度。因此,忽略底板温度梯度的考虑方式是否合理值得探讨。人们往往认为,底板基本不受太阳辐射的作用,故不需考虑底板温度梯度。但通过调研发现,连续刚构桥箱梁底板纵向开裂情况呈现出地域差异的特点,同时文献^[9-11]也都通过大量实测数据证明,箱梁底板存在竖向温差,虽然数值不大,但不容忽视。

因此,有必要通过实测来分析陕西省不同地区混凝土箱梁的温度梯度模式以及底板温度梯度作用对底板受力产生的影响。故分别选取陕北、关中和陕南地区具有代表性的三座连续箱梁桥,研究混凝土箱梁在日照作用下的温度梯度分布规律,分析实测温度梯度下箱梁底板受力。

1 依托工程特点

依托工程分别位于陕北(桥A)、关中(桥B)及陕南(桥C):(1)桥A为 $88+4\times 160+88\text{ m}$ 预应力混凝土连续刚构,根部梁高 9.5 m ,跨中梁高 3.5 m ,梁高按1.8次抛物线变化。(2)桥B为 $47+5\times 80+47\text{ m}$ 预应力混凝土连续箱梁桥,根部梁高 5.2 m ,跨中梁高 2.4 m ,梁高按照1.6次抛物线变化。(3)桥C为 $72+120+72\text{ m}$ 预应力混凝土连续刚构,根部梁高 6.5 m ,跨中梁高 2.8 m ,梁高按1.8次抛物线变化。

对照规范[8]中的全国气温分布图可知:桥A位于寒冷地区,靠近寒冷-严寒地区分界线;桥B位于寒冷地区;桥C靠近温寒分界线,位于温热地区,可见依托工程桥梁的地理位置分布极具代表性。

收稿日期:2018-02-07;修订日期:2018-06-10

基金项目:陕西省交通运输厅科技项目(13-25K)

作者简介:邬晓光(1961—),男,湖北英山人,长安大学教授,博士,博士生导师,主要从事大跨径桥梁结构分析、桥梁维修与加固、桥梁施工安全控制等方向的研究,E-mail:wxgwst.cn@126.com.

2 箱梁温度传感器布设

根据文献[12-14]的结论: 平行设置的上下幅箱梁桥, 混凝土温度分布可按单幅箱梁考虑; 沿桥梁纵向, 日照作用下不同截面处的温度分布基本相同, 这为三座桥梁测试断面的选择提供了理论依据. 综合考虑各种影响因素选定桥 A 的 8#断面(距最大悬臂 43 m)、桥 B 的 6#断面(距最大悬臂 32 m)以及桥 C 的 12#断面(距最大悬臂 55 m)为测试截面, 温度测量采用 JMT-36C 智能型温度传感器, 传感器编号如图 1~3 所示.

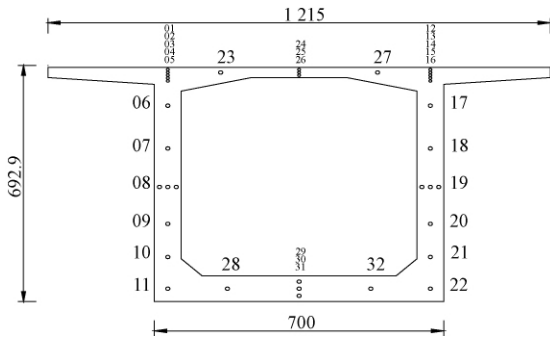


图 1 桥 A 传感器布设图 (cm)

Fig. 1 Sensor layout of bridge A (cm)

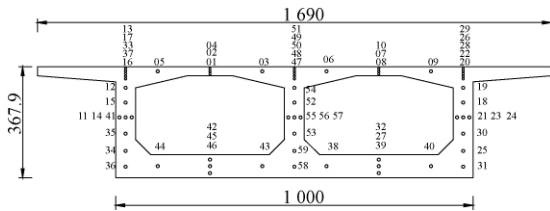


图 2 桥 B 传感器布设图 (cm)

Fig. 2 Sensor layout of bridge B (cm)

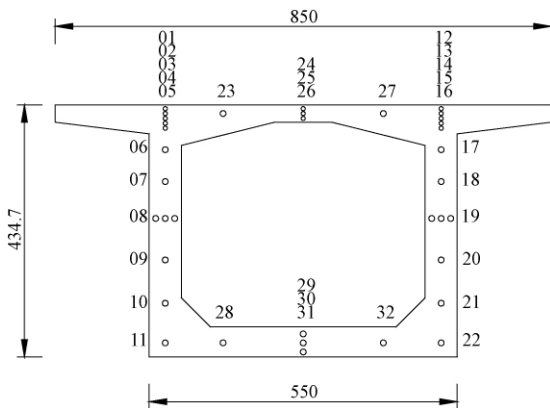


图 3 桥 C 传感器布设图 (cm)

Fig. 3 Sensor layout of bridge C (cm)

采用自动综合测试系统进行数据采集. 根据文献[14]可知, 箱梁顶板、底板、腹板和箱内综合大气温度和换热系数每 2 h 变化一次, 故设定测试系统测试频率为 2 h/次.

3 箱梁实测温度场的建立

3.1 箱梁实测正温度梯度

笔者重点对夏季(7—10月)和冬季时段(12月—次年2月)温度传感器传回的数据进行处理, 以研究在升温 and 降温作用下的正、负温差对底板受力的影响. 由于温度样本数据繁多, 故本文只对桥 A 部分试验数据进行展示.

图 4 是桥 A 箱梁 8#截面 8 月 16 日—8 月 22 日腹板实测温度变化曲线(每 2 h 采集一次).

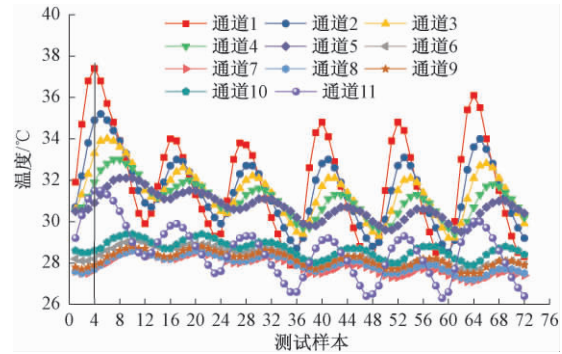


图 4 桥 A 箱梁 8#截面右腹板竖向实测温度变化曲线

Fig. 4 Vertical measured temperature variation curve of the right web of bridge A

根据相关数据绘制裸梁左、右侧腹板最不利竖向温度梯度分布曲线. 以左腹板竖向温度梯度为例, 如图 5. 结合图 4 分析发现, 这段时间内桥 A 沿左、右腹板竖向最大温差出现在 16 日 14 时左右, 分别为 9.3、9.0 °C; 桥 B 沿左、中、右腹板竖向最大温差分别为 10.4、5.7、8.4 °C; 桥 C 沿左、右腹板竖向最大温差分别为 11.8、12.8 °C.

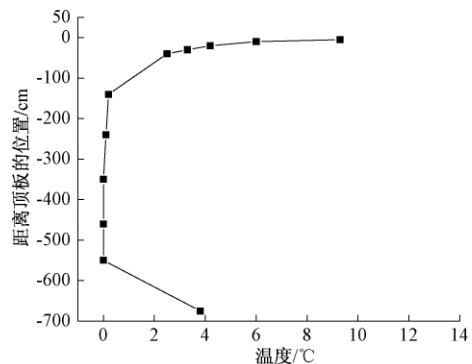


图 5 桥 A 左腹板实测竖向温度梯度曲线

Fig. 5 Left web measured vertical temperature gradient of bridge A

实测数据显示: 距离顶板 0~40 cm 温度梯度模式与我国现行桥梁设计规范基本一致, 计集混凝土铺装层后, 最大温差分别为 14、16、18 °C, 不及规范值. 与规范不同, 现场实测值显示在腹板与底板角隅位置, 存在接近 2.5~4 °C 的温差.

为研究底板范围内是否也存在竖向温差,对埋设在箱梁底板上 28~32 通道温度传感器上的数据进行分析,图 6 是 8 月 9 日—8 月 13 日(每 2 h 采集一次)测试到的其温度变化曲线。

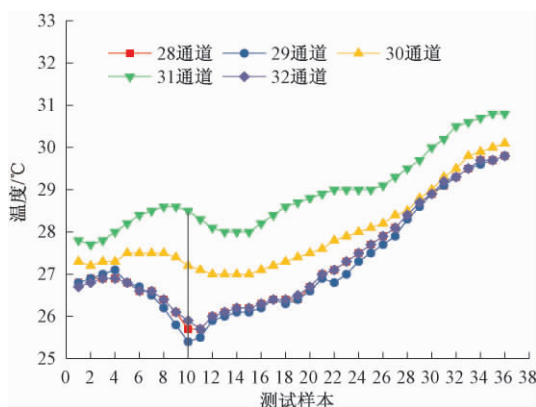


图 6 实测底板温度变化曲线(夏季)

Fig. 6 Measure temperature curve of bottom plate (in summer)

分析发现,这段时间内沿底板厚度范围竖向最大正温差出现在 8 月 11 日 16 时左右。从图 6 看出,28、29 和 32 测点的数据受环境温度影响变化趋势基本一致,表明底板沿横向上温度变化很小,而 29、30、31 通道在竖向呈现出明显的温度梯度,最大正温差为 3.5 °C。同理分析得到,桥 B、桥 C 底板竖向最大正温差分别是 2.8、1.5 °C。

3.2 箱梁实测负温度梯度

根据规范,混凝土上部结构的竖向日照负温差按正温差的 -0.5 倍取值。通过上文分析可知,三座桥顶板位置竖向正温差小于规范规定值,又因本文主要讨论温度梯度作用下箱梁底板受力的问题,故对于竖向负温度梯度,只分析底板位置上的数据,而顶板 0~40 cm 位置处的竖向负温差参考规范取值。因此,选择冬季(11 月—次年 2 月)寒流期间,又对埋设在桥 A 箱梁底板上 28~32 通道温度传感器数据进行了对比,图 7 是测试到的其温度变化曲线。

分析发现:这段时间内沿底板厚度范围竖向最大竖向负温差出现在 1 月 16 日 2 时左右。从图 7 可看出,当外界气温降幅较大时,底板外侧的 31 通道测点温度变化最敏感,导致底板厚度范围内呈现明显的负温差,最大温差为 -3.1 °C。同理,分析得到,桥 B、桥 C 底板竖向最大负温差分别是 -2.9、-1.5 °C。

3.3 箱梁截面温度梯度修正取值

本研究在对陕西不同地区箱梁顶板位置处竖向温度模型修正时,采用与现行规范相同的

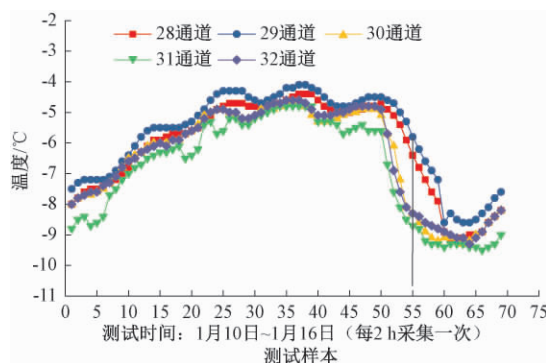


图 7 实测底板温度变化曲线(冬季)

Fig. 7 Measure temperature curve of bottom plate (in winter)

温度梯度模型,除此之外,增加实测底板竖向温差,修正后的竖向温度梯度模型如图 8 所示。

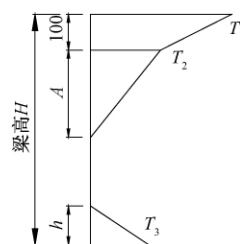


图 8 修正的竖向温度梯度模型

Fig. 8 Corrected vertical temperature gradient model

对于 T_1 和 T_2 的取值,根据拟合后的三个地区竖向温度分布曲线发现,三个地区实测温度梯度模型基本一致,只是温差取值不同,最大温差 T_1 从陕南到陕北约 2~3 °C 逐级递减,内部温差 T_2 从按 1 °C 左右递减。

对于 T_3 和 h 的取值,通过对比新西兰(NZBM—2003)、英国(BS5400)、美国(AASHTO—2004)等规范关于温度梯度的规定,发现新西兰、美国等两国规范中底板竖向温度梯度的取值均为 200 mm,英国规范的取值较为麻烦,适用性不强。故取 $h = 200$ mm, T_3 取三座桥梁底板厚度范围的温差实测值。由于测试时未出现极端天气情况,故在实测竖向温度基础上,考虑极端天气对其修正,在原 T_1 基础上增加 5 °C,得到采用混凝土铺装层箱梁顶面温差 T_1 和内部温差 T_2 、 T_3 ,各参数取值见表 1。

4 实测温度场箱梁温度效应分析

对比我国现行设计规范,对于使用混凝土铺装层的箱梁桥, T_1 为 25 °C,大于实测温差,使用规范设计时偏安全。又因研究重点是箱梁底板,故在进行底板受力分析时,温差 T_1 和 T_2 采用规范值, T_3 采用实测值。选择桥 A 合龙段进行温度

表 1 桥梁底板竖向温差取值

Tab. 1 The value of vertical temperature difference

区域	$T_1 / ^\circ\text{C}$		$T_2 / ^\circ\text{C}$		$T_3 / ^\circ\text{C}$	
	正温差	负温差	正温差	负温差	正温差	负温差
陕北地区	18.6	-9.3	5.1	-2.6	3.5	-3.1
关中地区	21.2	-10.6	5.7	-2.9	2.8	-2.9
陕南地区	22.9	-11.5	6.5	-3.3	1.5	-1.5

荷载作用下的受力研究,应用有限元软件 ANSYS 建立有限元模型.

桥 A 跨中梁高 3.5 m,箱梁顶板宽度为 12.15 m,底板宽 7 m,顶板厚 0.3 m,底板厚 0.32 m,腹板厚 0.65 m. 取合龙段纵向 1 m 的长度,选用 20 节点热单元 SOLID279 和与此对应的结构单元 SOLID186 进行分析,先将实际测得的温度梯度荷载施加在热单元 SOLID279 之上,进行温度场分析,之后提取温度场荷载分析文件,将热单元转化至结构单元 SOLID186,进行结构受力分析. 划分实体单元 3 983 个,受力分析如图 9 所示.

为研究底板在不同温度梯度作用下的受力情况,设置下列工况. 工况 1: 正温度梯度中,不考虑底板竖向温度梯度; 工况 2: 正温度梯度中,考虑

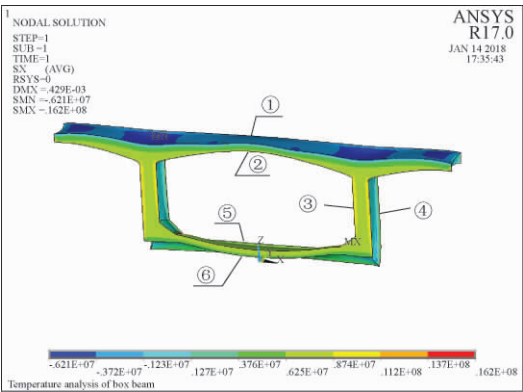


图 9 混凝土箱梁实体温度场分析

Fig. 9 Analysis of physical temperature field of concrete box girder bridge

底板竖向温差 T_3 分别为 1.5、2.5、3.0、3.5 $^\circ\text{C}$; 工况 3: 负温度梯度中,不考虑底板竖向温度梯度; 工况 4: 负温度梯度中,考虑底板竖向温差 (T_3) 分别为 -1.5、-2.5、-3.0、-3.5 $^\circ\text{C}$;

计算点主要是箱梁顶板上下缘、腹板内外侧以及底板上下缘,对应计算点位置如图 9 所示.

表 2 中为 4 种工况下箱梁不同计算点处温度应力值.

表 2 不同竖向温度梯度作用下底板横向温度应力

Tab. 2 Lateral temperature stress of the bottom plate under different temperature gradients MPa

工况类型	底板竖向温度/ $^\circ\text{C}$	位置①	位置②	位置③	位置④	位置⑤	位置⑥
工况 1	—	-5.218	3.776	0.083	-0.041	-0.416	0.253
	1.5	-5.219	3.770	0.085	-0.043	-0.303	-0.106
	2.5	-5.218	3.765	0.085	-0.045	-0.193	-0.275
	3.0	-5.222	3.763	0.086	-0.047	-0.153	-0.349
工况 2	3.5	-5.225	3.758	0.086	-0.047	-0.079	-0.408
	—	3.195	-2.018	0.022	-0.019	0.125	-0.108
	-1.5	3.194	-2.013	0.025	-0.021	0.098	0.147
	-2.5	3.192	-2.008	0.030	-0.030	-0.054	0.398
工况 3	-3.0	3.191	-2.005	0.031	-0.039	-0.088	0.503
	-3.5	3.191	-2.005	0.032	-0.043	-0.094	0.529

从表 2 可知: 在正温度梯度作用下,顶板上缘出现横向压应力,下缘出现横向拉应力;腹板处应力较小;底板上缘出现横向压应力,下缘出现横向拉应力;是否考虑底板竖向温度梯度主要影响集中在底板上,当考虑底板竖向温度梯度作用, T_3 的值由 1.5 ~ 3.5 $^\circ\text{C}$ 变化时,底板上缘横向压应力逐渐减小,底板上缘由横向拉应力逐渐变化为压应力. 故设计时,不考虑底板竖向温度梯度,对底板的受力是偏安全的.

同样可以发现,当考虑底板竖向温度梯度作用, T_3 的值由 -1.5 ~ -3.5 $^\circ\text{C}$ 变化时,底板上缘横向拉应力逐渐减小,并变为压应力,而下缘则由横向压应力变化为拉应力. 当底板负温度梯度 T_3

的值为 -3.5 $^\circ\text{C}$ 时,最大横向拉应力增量为 0.637 MPa,可知,底板负温度梯度对底板受力的影响是不可忽略的. 故不考虑底板竖向负温度梯度的作用,对底板的受力偏不安全.

5 结论

(1) 实测数据显示: 箱梁顶板 0 到 40 cm 范围内实测最大温差均小于规范值. 与规范规定不同,现场实测值显示沿底板竖向存在竖向温度梯度.

(2) 通过对比各国规范的温度梯度模型,采用“三折线”形式建立陕西省三个地区的温度梯度模型,各参数见表 1,顶面最大负温差的取值,可参考规范 [8] 中取实测值的 -0.5 倍.

(3) 进行连续箱梁桥设计时,不考虑底板竖向负温度梯度的作用,偏不安全;但不考虑底板竖向正温度梯度的作用,对于底板受力则是偏安全。

(4) 底板竖向温度梯度对箱梁底板纵向裂缝的“贡献”不容忽视。我国现有规范未对底板竖向温度梯度进行规定,为保证结构温度应力计算结果准确可靠,建议对陕西省连续(箱梁)刚构桥进行设计时,综合考虑底板竖向温度梯度的影响。

参考文献:

- [1] MOON D Y, SIM J, OH H. Practical crack control during the construction of precast segmental box girder bridges [J]. Computers & structures, 2005, 83(31/32): 2584–2593.
- [2] 项贻强,唐国斌,朱汉华,等. 预应力混凝土箱梁桥施工过程中底板崩裂破坏机理分析[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 70–75.
- [3] 杨俊,曹一山. 大跨连续刚构桥底板纵向裂缝成因分析与处治措施[J]. 公路, 2017, 62(8): 156–157.
- [4] 钟新谷,林小雄,舒小娟. 预应力混凝土变截面箱梁桥底板预应力束的等效径向力研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 103–109.
- [5] British Standards Institute. Steel, Concrete and Composite Bridge (Part 2): Specification for Loads: BS5400 [S]. London: British Standards Institute, 1990.
- [6] Transit New Zealand. Bridge Manual. 2nd Ed. Section 3: Design Loading: NZB M—2003 [S]. Wellington: Transit New Zealand, 2003.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 铁路桥涵设计基本规范: TB 10002.1—2005 [S]. 天津: 铁道第三勘察设计院, 2005.
- [8] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [9] 叶见曙,贾琳,钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(5): 788–793.
- [10] 聂利英,刘明坡,朱倩,等. 基于实测的混凝土箱梁底板温度梯度研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(10): 8–14.
- [11] 顾斌,陈志坚,陈欣迪. 大尺寸混凝土箱梁日照温度场的实测与仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1252–1261.
- [12] 方志,汪剑. 大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 62–67.
- [13] 刘兴法. 混凝土结构的温度应力分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1991.
- [14] 王永宝,赵人达. 混凝土箱梁温度梯度取值研究[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 43–47.
- [15] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

Study on Bottom Plate Measured Vertical Temperature Gradient of Continuous Box Beam Bridge in Shaanxi Province

WU Xiaoguang, HE Pan, HE Qilong, FENG Yu

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to establish the measured temperature gradient field of continuous box girder bridges in different areas of Shaanxi Province, three representative continuous girder bridges in northern Shaanxi, central Shaanxi and southern Shaanxi were selected for one year continuous observation. By fitting the measured temperature data, three temperature gradient models were established. The results showed that the vertical maximum temperature difference of continuous box girder bridge in three areas in Shaanxi Province was different. According to the specifications set concrete pavement, the maximum temperature of northern region was 18.6 °C; the maximum temperature of central Shaanxi was 21.2 °C; the maximum temperature of southern Shaanxi was 22.9 °C, but were less than the standard value of 25 °C. Different from the normative provisions, the measured data show that there was vertical temperature difference in the bottom plate of the box girder, the maximum positive and negative temperature differences of the bottom plate in the three regions were 3.5 °C (–3.1 °C), 2.8 °C (–2.9 °C) and 1.5 °C (–1.5 °C). Based on the measured temperature gradient, the finite element model of the box girder closure section was established, and the measured temperature effect was analysed. The results showed that in the negative temperature gradient, not taking into account the effect of vertical temperature gradient of the bottom plate, the force would have a negative impact for bottom plate, impartial security. It was suggested that the vertical temperature gradient of the bottom plate should be considered comprehensively in the design checking of continuous (rigid frame) box girder bridge.

Key words: bridge engineering; continuous box girder bridge; finite element model; bottom plate temperature gradient; temperature effect

信号交叉口第一辆车到达分布及影响因素分析

张惠玲, 杨林玉, 敖谷昌

(重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

摘要: 信号交叉口延误是进行交叉口的设计及服务水平评价等的重要参数依据,而红灯期间第一辆车的到达影响因素有助于更好地分析信号交叉口延误。首先提取了红灯期间第一辆车的到达时间与红灯启亮时间的差值,分析了第一辆车的到达特征。综合各种可能影响车辆到达的因素,使用正交试验进行了组合方案设计优化;以标定后的重庆市学府大道某信号交叉口进口道的一条直行车道作为平台,使用 VISSIM 软件对各试验进行了仿真分析,得出了信号交叉口影响红灯期间第一辆车到达的因素程度依次为饱和度、车辆到达类型、交叉口间距、绿信比、饱和流量、大车率。最后考虑到饱和流量和饱和度存在交互影响,对饱和流量和饱和度使用交互分析,得到结果为:在饱和流量为 $1650 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$,且饱和度小于 0.25 时,对车辆到达的影响程度最高。

关键词: 交通工程; 第一辆车到达; 正交试验; 信号交叉口; 微观仿真

中图分类号: U491.2+64

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.03.009

0 引言

交叉口是道路交通的咽喉,据统计,车辆通过信号控制交叉口时受信号灯影响被耽误的时间约占总行程时间的 31%^[1]。而交叉口延误可以作为交叉口设施设置与信号配时改善的评价参数,也可以反映驾驶员在交叉口的受阻、耗费等情况。但由于各种因素限制,至今无法实时直接地获取信号交叉口的延误值。因此,国内外研究者对信号交叉口延误参数的获取展开了一系列研究。前期主要对延误推导的模型进行了分析^[2-3],目前,国内外一些学者开始对交叉口的延误分布展开探索,Noroozi 等^[4]对延误分布与高峰小时流量以及 HCM 计算式的关系进行了分析,Chen 等^[5]分析了单个车辆以及车均控制延误的分布情况,并定义了延误不确定性系数,对 600 s 间隔下的参数情况进行了分析。

然而,由于延误参数影响因素的随机性和交叉口环境的复杂性,模型获取的方法对随机性的因素考虑不足,而实时的人工观测则存在不连续性等特点,设置先进的检测设施一方面存在设备设置费用较高的特点,另一方面设施设置的要求也较高。

信号交叉口摄像头的普遍设置为信号交叉口提取前几辆车的延误提供了契机。本文研究以信号交叉口红灯期间第一辆车到达分布特性为分析对象,以建立的仿真平台为基础,以正交试验设计为实验优化方法,对各种影响因素下的车辆到达特征进行了研究,本文研究成果为实时准确地获取红灯期间第一辆车的到达-离去时间差值及相关研究提供了基础,进一步为分析交叉口进口道的延误提供了一种思路,对实现信号交叉口配时方案设计与优化及交叉口服务水平评价等提供了一种更可靠的方案。

1 数据采集

本研究以安装有摄像头的信号交叉口为研究背景,由前期以及其他学者的研究可知,车辆进入进口道后,可以得到前几辆车的到达及离开时间^[6]。考虑到第一辆车的停车及启动时间与进口道延误有较紧密的关系,结合摄像头安装背景下的车辆信息获取情况,笔者以每个信号周期第一辆停止在停车线前的车为研究对象,以信号交叉口红灯启亮时刻作为信号周期开始的时间,则第一辆车到达时间界定为红灯

收稿日期:2017-10-11; 修订日期:2017-12-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51508061);重庆市交通运输工程重点实验室开放基金(2016CQJY005)

作者简介:张惠玲(1980—),女,宁夏中宁人,重庆交通大学教授,博士,主要从事交通信息工程及控制方面的科研和教学,E-mail: huilingz@126.com.

启亮与第一辆车进入进口道并在停车线前停止的时间差值。

综合考虑可观测地点的选取和可用的观测方法,笔者对于数据的获取通过人工提取的方式得到,即通过现场设置摄像机拍摄视频,视频同时拍摄到车辆到达及信号灯的灯色情况,后期通过人工对视频进行逐帧观测提取了车辆到达及信号灯转变时间等需要的参数。考虑到架设的摄像机需要同时拍摄到红灯启亮的时间以及第一辆车的停车时间等信息,通过筛选初步选定地点后,最终通过现场核实选择了重庆市南岸区学府大道与重庆交通大学三号门前的信号交叉口(称为第1信号交叉口)以及重庆市南岸区渝南分流道与民主新街交叉口(称为第2信号交叉口)作为视频拍摄及参数提取的观测地点。

所调查的第1信号交叉口的进口道与上游交叉口的间距接近1000 m,观测时段所涉及的进口道饱和度范围为0.43~0.8,大车率为8%~13%;而观测的第2信号交叉口与上游交叉口的间距也超过了1000 m,所调查的进口道饱和度范围为0.27~0.85,大车率为11%~25%。

后期通过人工观测对第一辆车的到达时间进行了提取。得到第1信号交叉口的第一辆车到达时间的有效周期为260个。第2信号交叉口的第一辆车到达时间的有效周期为45个。第1信号交叉口观测相位的红灯时长为30 s,经统计,该交叉口红灯期间第一辆车到达的时间分布均值为14.17 s,到达时间最大值为30 s,最小值为0 s,即平均到达时间为接近红灯一半的时间,最大到达时间为红灯即将结束的时间车辆刚好到达停车线并停车,而最小的时间对应的场景为红灯启亮的瞬间。第2信号交叉口观测相位的红灯时长为70 s,经统计,该交叉口红灯期间第一辆车到达时间的均值为11.89 s,到达时间最大值为37 s,最小值为1 s。

2 车辆到达分布拟合

对第一辆车到达的时间情况进行了拟合,拟合效果图如图1和图2所示。

由图1和图2可以看出,每个周期的第一辆车到达时间分布服从泊松分布,且分布模型可以拟合为:

$$f(x) = 1 - \exp(-x/b). \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 指红灯启亮与第一辆车到达时间的差

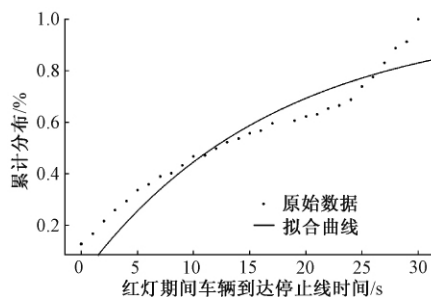


图1 第1信号交叉口第一辆车到达时间拟合结果
Fig.1 Fitting result of the time difference between red time and the first vehicle's arriving time at the No. 1 intersection

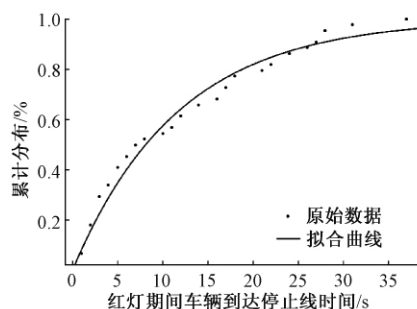


图2 第2信号交叉口第一辆车到达时间拟合结果
Fig.2 Fitting result of the time difference between red time and the first vehicle's arriving time at the No. 2 intersection

值小于等于 x 的概率; b 为待估参数。

由上述提取的数据进行拟合,得到第1信号交叉口系数 b 的拟合结果为16.89,95%置信区间(15.39,18.38),拟合优度结果为0.07272, R^2 为0.8917,表明拟合效果好。第2信号交叉口系数 b 拟合结果为12.14,95%置信区间(11.36,12.91),拟合优度结果为0.04285, R^2 为0.9722。

3 正交试验设计

通过对调查的两个交叉口车辆到达时间进行分析,得到在饱和度较低的情况下,第一辆车的到达时间相对较长,而在饱和度相对较高的情况下,第一辆车的到达时间相对较短。结合现场的观测及车辆在上下游交叉口间行驶特征的分析,参考相关指南文献[7]等,信号交叉口与上游交叉口是否采用协调控制以及上下游交叉口间车辆行驶的速度主要对信号交叉口不同信号期间的车辆到达类型等产生影响;而上下游交叉口的形式等其他因素的影响可以化解为下游进口道的饱和度、车辆到达类型等因素。考虑到上游及其他方向大车混入情况、交叉口距离等

均可能会对第一辆车的到达时间产生影响,因此本部分对可能影响第一辆车到达的因素进行分析,并对试验进行了设计。综合上述分析,论文主要考虑了车辆到达类型、交叉口间距、进口道饱和度、饱和流量、绿信比以及大车比例等因素对第一辆车到达分布的影响。具体因素的设置情况为:

(1) 车辆到达类型。对于车辆到达类型,参考文献[7],车辆的到达类型可以分为五类,分别为:超过80%的车辆在红灯期间到达;有40%~80%的车辆在红灯期间到达;随机到达,即该交叉口受其他交叉口影响较小;有40%~80%的车辆在绿灯期间到达;有超过80%的车辆在绿灯期间到达^[8]。本次分析也选取这5类作为车辆到达类型的分析水平。

(2) 交叉口间距。交叉口间距对上游车辆行驶的离散型有较大的影响,如车辆成队列到达或者随机到达。参考相关的研究成果^[9],研究中对于交叉口间距的选择区段分别为<150~≤300 m、<300~≤450 m、<450~≤600 m、<600~≤800 m、大于800 m等5个等级。

(3) 进口道饱和度。进口道饱和度与交叉口延误之间有着较紧密的关系,且可能会影响第一辆车到达的情况。结合交通场景中的低饱和度、中等饱和、接近饱和以及过饱和,考虑水平的分析情况。研究中将进口道饱和度分为5级,分别为:饱和度小于0.25, [0.25, 0.5), [0.5, 0.75), [0.75, 1), ≥1等情况。

(4) 饱和流量。饱和流量能够反映道路的通行能力,将直接影响饱和度的大小,进而会对第一辆车的到达情况产生影响。参考相关文献[9-11],将饱和流量分为以下5级:1 500、1 600、1 650、1 750、1 800 pcu·h⁻¹。

(5) 绿信比。绿信比决定车辆的通行权,也会对第一辆车的到达情况产生影响。参考Piotr等的研究结果^[12-13],将绿信比分为以下5级:0.2、0.3、0.4、0.5、0.6。

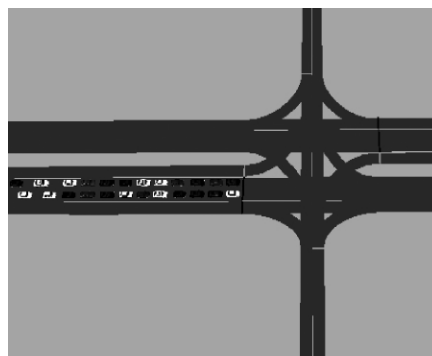
(6) 大车比例。由于大车的体积较大,在行驶中所占用的空间也较大,而且大车的启动时间较长,行驶速度也较慢,所以大车对道路交通的影响较大,对第一辆车的到达情况也可能产生影响。结合目前城市道路的实际情况,对于大车率分为≤5%、<5%~≤10%、10%~≤25%、25%~≤40%、>40%。

上述6个因素均为5个水平,如果逐个情况

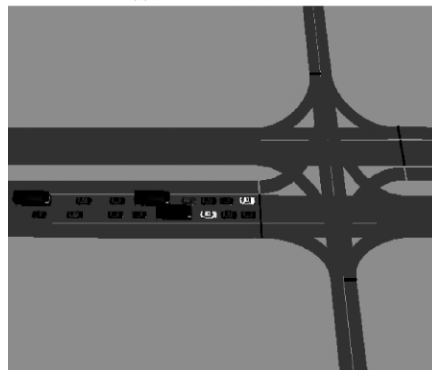
考虑,需要15 625次试验,试验次数太大。另外,所考虑的各因素之间可能存在交互影响的情况,且上述6个因素中,影响车辆到达的程度也不能确定。实验优化设计可以在较少的试验场景下获取较佳的效果。正交试验的试验方案是有代表性的,且能够比较全面地反映各因素水平指标影响的大致情况。因此,对各种情况下的第一辆车的到达时间进行分析,使用正交试验来优化实验方案的设置,此次共设置25种试验方案,详细方案设置如表1所示。

4 仿真分析

为了对各种因素影响下的第一辆车到达时间分布进行分析,鉴于实际数据获取的场景较难实现,研究中通过构筑仿真平台对第一辆车的到达分布影响因素进行了分析。研究以实际调查的第1信号交叉口调查得到的大车及小车辆速度作为标定数据,在微观仿真软件VIS-SIM中构筑了上述25种实验场景。构建的部分仿真场景如图3。



(a) 正交设计的仿真实验4



(b) 正交设计的仿真实验13

图3 部分仿真试验场景构筑界面

Fig. 3 Parts of the simulation scenar of building interface

如图3所示,通过构筑的仿真场景,提取车辆的运行轨迹和信号控制周期,即可得出所要分析

的第一辆车的到达情况.

表1 正交试验场景下的时间差值及直观分析

Tab.1 time difference and intuitive analysis of the orthogonal experiment simulation

因素	大车率/%	饱和流量/ (pcu·h ⁻¹)	车辆到达 类型	交叉口间 距/m	饱和度	绿信比	正交试验 的结果/s
实验 1	≤5	1 500	1	<150 ~ ≤300	<0.25	0.2	15.533
实验 2	≤5	1 600	2	<300 ~ ≤450	≤0.25 ~ <0.5	0.3	10.313
实验 3	≤5	1 650	3	<450 ~ ≤600	≤0.5 ~ <0.75	0.4	5.973
实验 4	≤5	1 750	4	<600 ~ ≤800	≤0.75 ~ <1	0.5	7.171
实验 5	≤5	1 800	5	>800	≥1	0.6	8.300
实验 6	<5 ~ ≤10	1 500	2	<450 ~ ≤600	≤0.75 ~ <1	0.6	6.421
实验 7	<5 ~ ≤10	1 600	3	<600 ~ ≤800	≥1	0.2	4.200
实验 8	<5 ~ ≤10	1 650	4	>800	<0.25	0.3	21.333
实验 9	<5 ~ ≤10	1 750	5	<150 ~ ≤300	≤0.25 ~ <0.5	0.4	14.761
实验 10	<5 ~ ≤10	1 800	1	<300 ~ ≤450	≤0.5 ~ <0.75	0.5	6.386
实验 11	<10 ~ ≤25	1 500	3	>800	≤0.25 ~ <0.5	0.5	9.665
实验 12	<10 ~ ≤25	1 600	4	<150 ~ ≤300	≤0.5 ~ <0.75	0.6	6.931
实验 13	<10 ~ ≤25	1 650	5	<300 ~ ≤450	≤0.75 ~ 1	0.2	8.417
实验 14	<10 ~ ≤25	1 750	1	<450 ~ ≤600	≥1	0.3	7.160
实验 15	<10 ~ ≤25	1 800	2	<600 ~ ≤800	<0.25	0.4	15.407
实验 16	<25 ~ ≤40	1 500	4	<300 ~ ≤450	≥1	0.4	5.692
实验 17	<25 ~ ≤40	1 600	5	<450 ~ ≤600	<0.25	0.5	18.637
实验 18	<25 ~ ≤40	1 650	1	<600 ~ ≤800	≤0.25 ~ <0.5	0.6	8.027
实验 19	<25 ~ ≤40	1 750	2	>800	≤0.5 ~ <0.75	0.2	8.567
实验 20	<25 ~ ≤40	1 800	3	<150 ~ ≤300	≤0.75 ~ <1	0.4	6.979
实验 21	>40	1 500	5	<600 ~ ≤800	≤0.5 ~ <0.75	0.3	6.089
实验 22	>40	1 600	1	>800	≤0.75 ~ <1	0.4	10.320
实验 23	>40	1 650	2	<150 ~ ≤300	≥1	0.5	6.917
实验 24	>40	1 750	3	<300 ~ ≤450	<0.25	0.6	11.469
实验 25	>40	1 800	4	<450 ~ ≤600	≤0.25 ~ 0.5	0.2	19.860
均值 1/s	9.458	8.680	9.485	10.224	16.476	11.315	—
均值 2/s	10.620	10.080	9.525	8.455	12.525	11.224	—
均值 3/s	9.516	10.133	7.657	11.610	6.789	9.855	—
均值 4/s	9.580	9.826	12.197	8.179	7.862	9.755	—
均值 5/s	10.931	11.386	11.241	11.637	6.454	8.230	—
极差/s	1.473	2.706	4.540	3.485	10.022	3.085	—

将仿真场景得到的各种试验下的第一辆车平均到达时间使用正交试验的方法进行分析,得出各试验场景下的分布参数.

正交试验分析过程如下:假设 K_{ij} 为第 j 列因素第 i 水平下所有试验结果之和,如 $K_{12} = Y_1 + Y_5 + Y_9 + Y_{13}$ (Y_i 表示试验号为 i 的试验结果, $i = 1, 2, \dots, 16$); ω_{ij} 为第 j 列因素第 i 水平的试验指标的平均值,即 $\omega_{ij} = K_{ij}/4$; R_j 为极差,即 ω_{ij} 中的最大值减去最小值 $R_j = (\omega_{ij})_{\max} - (\omega_{ij})_{\min}^{[14]}$.

所得到的 25 种试验场景下红灯期间到达信号交叉口第一辆车的到达时间及不同影响因素在各水平下的第一辆车的到达时间的结果分析如表 1 所示.

由表 1 最后一行可以看出,各因素中极值大小的分布为: $R_{\text{饱和度}} > R_{\text{车辆到达类型}} > R_{\text{交叉口间距}} > R_{\text{绿信比}} > R_{\text{饱和流量}} > R_{\text{大车率}}$,表明饱和度对交叉口车辆到达的影响最大,大车率对交叉口车辆到达的影响最小.各因素对交叉口车辆到达的影响程度由大到小依次为:饱和度 > 车辆到达类型 > 交叉口间距 > 绿信比 > 饱和流量 > 大车率.

图 4 的曲线表示各影响因素在上述五个水平下的试验指标第一辆车的到达时间的平均值.由图 4 中各曲线的上升及转折情况可以看出,大车率从 5% 增加到 <5% ~ ≤10% 的时候时间差有所增加;从 <5% ~ ≤10% 增加到 <10% ~ ≤25% 的时候时间差减少;从 <10% ~ ≤25% 到 <25%

~ $\leq 40\%$ 时,时间差基本一致;从 $<25\% \sim \leq 40\%$ 增加到 40% 以上时,时间差减少;饱和流量从 $1\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 增加至 $1\,600\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,时间差有所增加,在 $<1\,600 \sim \leq 1\,750\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 处,时间差基本一致;车辆到达类型为随机到达时时间差最小,车辆到达类型为 $40\% \sim 80\%$ 的车辆在绿灯期间到达交叉口时,时间差最大;交叉口间距对时间差影

响较为显著,但是没有一定规律;饱和度从 $\leq 0.25 \sim <0.5$ 时,时间差明显减少,从 $\leq 0.5 \sim <0.75$ 时,时间差稍稍增加,从 $\leq 0.75 \sim <1$ 增加到1及以上时,时间差减少,可以看出饱和度对车辆到达类型有显著影响;绿信比从0.2增加到0.6时,时间差呈递减状。

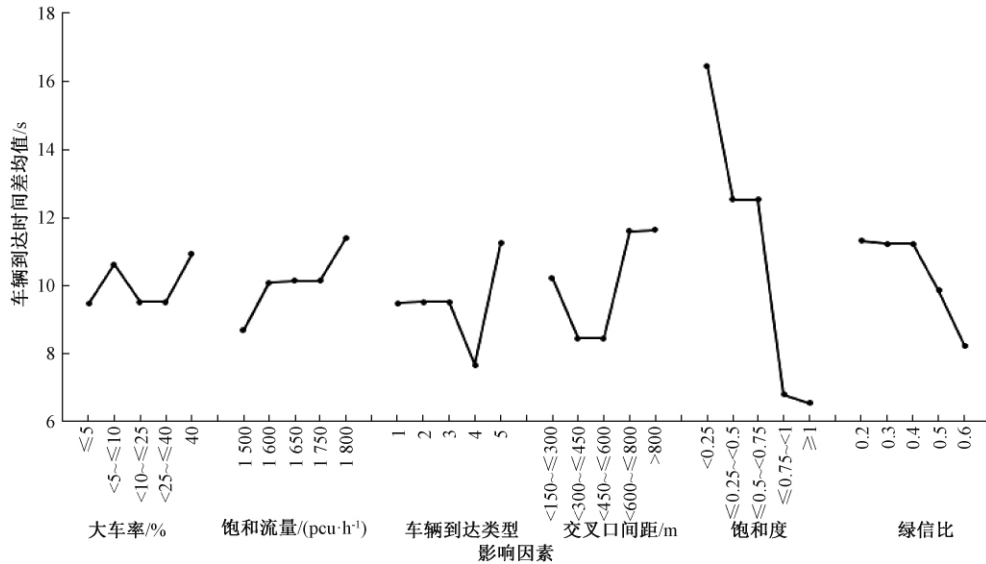


图4 正交试验效应曲线

Fig.4 The response curve of the orthogonal experiment simulation

由于饱和流量和饱和度会对时间差产生交互作用,使用交互作用表进行分析,交互作用的数值根据表1对应的饱和流量和饱和度下的第一辆车到达时间的正交试验结果得到。如当饱和度和 <0.25 、饱和流量为 $1\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,表1对应的第一辆车到达时间的正交试验结果为 15.333 s ,即为表2中饱和度 <0.25 、饱和流量为 $1\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的交互作用数值。详细交互作用如表2所示。

表2 饱和流量和饱和度交互作用

Tab.2 The interactive table of the saturation and saturated flow

饱和度	饱和流量/($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)				
	1 500	1 600	1 650	1 750	1 800
<0.25	15.533	18.637	21.333	11.469	15.407
$\leq 0.25 \sim <0.5$	9.665	10.313	8.027	14.761	19.860
$\leq 0.5 \sim <0.75$	6.089	6.931	5.973	8.567	6.386
$\leq 0.75 \sim <1$	6.421	10.320	8.417	7.171	6.979
≥ 1	5.692	4.200	6.917	7.160	8.300

由表2可以看出,在饱和流量为 $1\,650\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,且饱和度 <0.25 时,该交互作用的值达到最大,为 21.333 s ,说明在该交互作用下,对车辆到

达的影响程度最高。

5 结论

第一辆车的到达情况与延误参数之间有紧密的关联关系,主要对红灯期间第一辆车的相关特征进行了分析。研究结论主要有:

(1) 通过2个信号交叉口的信号转换以及车辆到达进行提取和分析,拟合了第一辆车到达交叉口的函数。

(2) 对可能影响车辆到达的因素进行了选取,最终选择车辆到达类型、交叉口间距、进口道饱和度、饱和流量、绿信比、大车率等作为可能影响车辆到达的因素,并通过正交试验设置了优化试验方案。

(3) 通过微观仿真平台,对正交试验构筑的场景进行了分析,最终得到了影响车辆到达的因素排序依次为饱和度、车辆到达类型、交叉口间距、绿信比、饱和流量、大车率。在饱和流量为 $1\,650\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,且饱和度 <0.25 时,对车辆到达的影响程度最高。

(4) 对第一辆车到达特征与其他参数的关联分析将是本项目后续研究的主要方向。

参考文献:

- [1] 马天宇. 信号交叉口倒计时显示屏对驾驶员行为影响分析[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2008.
- [2] WEBSTER F V. Traffic signal settings [R]. Road Research Technical Paper No. 39, Road Research Laboratory. Her Majesty Stationary Office, London, UK, 1958.
- [3] AKCFLIK I, ROUPHAIL N. Overflow of queues and delays with random and platooned arrivals at signalized intersections [J]. Journal of advanced transportation, 1994, 28(3): 227–251.
- [4] NOROOZI R, HELLINGA B. Distribution of delay in signalized intersections: day-to-day variability in peak-hour volumes [J]. Journal of transportation engineering, 2012, 138(9): 1123–1132.
- [5] CHEN P, ZHENG F F, LU G Q, et al. Comparison of variability of individual vehicle delay and average control delay at signalized intersections [J]. Transportation research record, 2016, 2553: 128–137.
- [6] 张惠玲, 李克平, 敖谷昌. 监控环境下信号交叉口控制延误的获取方法[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(6): 40–45.
- [7] Transportation Research Board. Highway capacity manual 2010 [R]. Washington D C: National Research Council, 2010.
- [8] 李志. 平面交叉口间距对道路交通的影响[J]. 山西建筑, 2014, 40(26): 157–159.
- [9] 吴兵, 李晔. 交通管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [10] 陈锦秀, 陈小鸿, 林航飞. 《城市道路平面交叉口规划与设计规程》基本饱和流量与大车校正系数检验研究[J]. 城市交通, 2004, 2(3): 17–20.
- [11] 沈家军, 王群. 基于通行效率最优的交叉口控制方式优选[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 60–63.
- [12] OLSZEWSKI P S. Modeling probability distribution of delay at signalized intersections [J]. Journal of advanced transportation, 1994, 28(3): 253–274.
- [13] 董海龙, 汤旻安, 程海鹏. 非均衡交通流五岔路口交通信号智能控制研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(1): 68–73.
- [14] ADESOLA O I. Orthogonal experiments in the development of carbon-resin for chloride removal from solutions [J]. Statistical methodology, 2009, 6(2): 109–119.

Analysis on the Arrival Distribution and Influencing Factors of the First Car Arrival at the Signalized Intersection

ZHANG Huiling, YANG Linyu, AO Guchang

(School of Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Signalized intersection delay was one of the core parameters in intersection design and evaluation of service level, and analyzing the first vehicle's arriving could help to analyze the intersection delay. Firstly, the features of the first vehicle were probed based on time difference between arriving time of the first vehicle and the start of the red time. Considering the factors that could impact the vehicle's arriving, the orthogonal experiment was used to optimize the experiments' combination. Using the validated through lane of the signalized intersection to simulate the orthogonal experiments, it was proved that the order of the factors impacting the first vehicle arrival during red indication was the saturation, types of vehicles arrival, intersection spacing, the split, the saturated flow, and the bus ratio. Finally, for the interaction phenomenon of saturated flow and saturation, using transactional analysis to analyze, the results was: when the saturated flow was 1650 Passenger Car Unit/Hour ($\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$), and the saturation was under 0.25, there was the highest level of impact on the first vehicle's arriving.

Key words: traffic engineering; the first vehicle arrival; signalized intersection; orthogonal experiment; micro-simulation

基于 EDEM 的沥青混合料搅拌机叶片参数匹配

赵利军¹, 申 岩¹, 邓 欣¹, 刘本学², 董 武¹, 李 耀¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室 陕西 西安 710064; 2. 郑州大学 机械工程学院 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了提高搅拌均匀性,在普遍使用的双卧轴搅拌机上,采用离散元 EDEM 软件模拟了不同搅拌叶片参数下的沥青混合料搅拌过程,通过对 8 mm 集料含量变异系数达到目标均匀度所需搅拌时间的正交分析,得到了单轴叶片总数量、单轴叶片布置、叶片轴向安装角和返回叶片数量的合理匹配,并进行了试验验证。结果表明:所有叶片参数下搅拌的 8 mm 集料含量变异系数,都随着搅拌时间的延长而呈负幂函数递减;当给定目标均匀度的变异系数为 0.1 时,对所需搅拌时间显著性影响的强弱顺序依次是:单轴叶片总数量、单轴叶片布置、返回叶片数量和叶片安装角;各叶片参数的合理匹配关系是:满足拌缸长宽比小于 1 的单轴叶片总数量,单轴叶片对置 2 对返回叶片 45°轴向安装角。

关键词: 搅拌叶片; 离散元仿真; 沥青混合料; 搅拌均匀性; 双卧轴搅拌机

中图分类号: U415.5 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.06.005

0 引言

搅拌机作为沥青混合料搅拌设备的核心装置,决定着混合料的生产质量和效率,影响着公路的施工质量和速度。目前,沥青混合料搅拌机的文献主要集中在间歇强制式和连续滚筒式等搅拌方法^[1],沥青和矿粉等原材料的投料位置与方式^[2],以及搅拌时间和充盈率等生产参数对搅拌质量与效率的影响^[3-4],而关于工作装置的研究并不多见。众所周知,搅拌目的是使混合料达到规定的均匀度,其过程的发展速度必然取决于混合料在机内的运动。搅拌叶片作为直接与混合料相互作用的机械单元,直接决定着混合料在搅拌过程中经受的各种强制效果和运动形式。因此,搅拌叶片结构与参数是沥青混合料搅拌机工作装置的主要结构和参数之一。

实际上,由于搅拌过程的动态复杂性,长期以来难以量化,无法准确地进行数学建模和采用机械工程的常用方法来优化,在选定叶片参数时一直采用经验值,缺乏严格的理论依据和试验数据。近年来,离散元法(discrete element method, DEM)因其能够有效表征颗粒材料的力学行为而越来越

广泛地应用到沥青混合料研究中。利用 DEM 方法,混合料更复杂的物理性质如集料形状、级配、空间排列、表面纹理等,都能够非常接近实际地进行表述,在分析混合料力学性能以及变形和破坏机制等方面都取得了一定成果^[5-6]。对于机械与混合料的相互作用研究,基于 DEM 的压实过程、筛分过程和烘干过程也都吸引了大量研究人员^[7-9]。而关于强制搅拌过程的研究,目前主要针对粒状的固体材料,采用 DEM 方法开展了搅拌方式、搅拌速度、搅拌时间等参数对搅拌均匀性的影响,对机器设计和性能优化起到了指导作用^[10-12]。沥青混合料作为一种颗粒性的黏弹材料^[13],材料间的黏聚力和内摩擦力是搅拌阻力的主要来源,使混合料各组分均匀分散的搅拌过程变得十分困难。虽然搅拌时材料的结构与状态有量变也有一定的质变,但沥青混合料的搅拌过程以物理混合为主,主要通过搅拌叶片推动不同颗粒群以不同的速度和轨迹运动,从而在相互交叉和碰撞的过程中实现均匀。因此,笔者采用 EDEM 软件,对目前沥青混合料搅拌设备上普遍使用的双卧轴搅拌机,开展搅拌过程的离散元模拟,通过正交设计的方法研究不同搅拌叶片参数下混合料

收稿日期:2018-01-16; 修订日期:2018-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51705029); 陕西省自然科学基金面上项目(2017JM5118)

作者简介:赵利军(1976—),男,河北张家口人,长安大学副教授,博士,主要从事工程机械作业质量研究, E-mail: zhaolj@chd.edu.cn.

搅拌均匀性的变化,以获得合理匹配的叶片参数,提高沥青混合料的搅拌质量。

1 搅拌叶片参数

1.1 双卧轴搅拌叶片参数

在双卧轴搅拌机中,搅拌叶片是以一定的数量和角度布置在两根同步反向旋转的搅拌轴上,主要叶片参数如图 1 所示。目前国内外双卧轴搅拌机的叶片排列方式和运动参数基本一致。搅拌机工作时,以 $2.5 \sim 3.0 \text{ m/s}$ 线速度转动的叶片,推动混合料在拌缸内形成水平和垂直两种大范围运动^[14]。水平运动是通过叶片的轴向安装角将混合料沿着轴向水平推移。由于两轴上的叶片布置方向相反,从而形成了水平循环料流。垂直运动是叶片将拌缸底部混合料向上抛掷的过程中,混合料在两轴间互换并重力下落,从而形成垂直循环料流。由于搅拌过程的发展速度主要取决于料流运动,因此,能够改变混合料运动效果的叶片参数都会影响搅拌性能。

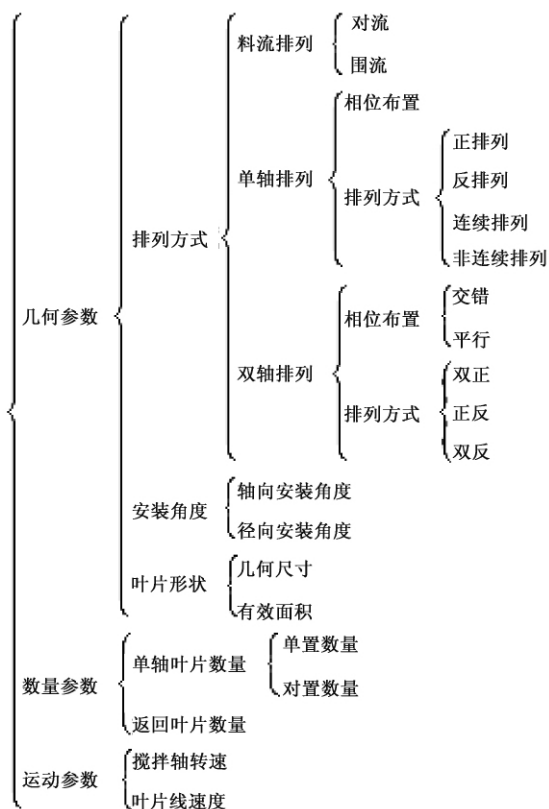


Fig. 1 Parameters of mixing blades

显然,加快混合料的循环运动频次和强度,能够增加混合料与搅拌叶片直接接触并发生强制作用的机会,对消除初始投料的不均匀性以及进一步的快速拌匀都极为有利,这也是合理选择叶片

参数的主要依据。在常用的叶片排列和速度下,本文重点研究单轴叶片总数量、单轴布置形式、返回叶片数量以及轴向安装角度的合理选取与匹配。

1.2 主要参数的分析

单轴叶片总数量为单搅拌轴上叶片的个数或者对数。在搅拌机容量和叶片几何尺寸一定时,单轴叶片总数量越多,搅拌轴向尺寸也就越大,从而形成不同的拌缸长度与宽度比值(长宽比)。现有双卧轴搅拌机的叶片数量变化较大,从单轴 6 个(对)到 12 个(对)不等,相应的拌缸长宽比在 $0.7 \sim 1.3$ ^[15]。单轴叶片布置为单搅拌轴上同一序号处的叶片布置。只有一个叶片为单置,两个以 180° 布置的叶片为对置。返回叶片布置在每根搅拌轴混合料推动方向的末端,用来避免端部积料,并横推混合料以形成轴向循环,目前大多为 1 或 2 个(对)。叶片的轴向安装角为搅拌叶片斜面与搅拌轴之间所夹的锐角,一般在 $35^\circ \sim 55^\circ$ ^[16]。

不难看出,减少单轴叶片总数量能够缩短轴向总尺寸,对置叶片能够使相邻叶片的轴向推料频次翻倍,增加返回叶片能够减少轴向推进距离,增大轴向安装角能够提高轴向推料量,从而都有助于增强混合料的水平循环。但从缸内运动来看,还需要兼顾混合料的垂直循环,而且应同时考虑参数间的匹配问题。过少的单轴叶片总数量,会增大拌缸的半径尺寸以保证缸内容量;对置叶片会造成缸内有效容积的降低,从而减小拌缸上部空间,减弱混合料的垂直运动。增加返回叶片数量,加大轴向安装角度,似乎都与较多的单轴叶片总数量更匹配。因此,即使采用相同的叶片排列,但随着单轴叶片总数量、单置布置形式、返回叶片数量以及轴向安装角度的变化,搅拌机内的水平和垂直循环运动都随之不同程度的改变,这必然对给定搅拌时间内的混合料搅拌均匀性产生显著影响。

2 仿真研究

2.1 模型与参数

在额定容量 $4\,000 \text{ kg}$ 双卧轴搅拌机的基础上,采用 Pro/E 软件,建立搅拌机的三维模型。为提高仿真速度,搅拌机按比例缩小至 400 kg 。在现有叶片参数的常用范围内,采用正交表 $L_9(3^4)$ 来设计仿真方案,如表 1 所示。为了对比所研究的叶片参数,模型中的其他叶片参数都相同。其中,料流采用围流排列,单轴叶片为 90° 的连续排列,双轴叶片为交错布置的双正排列,如图 2 所示。单轴

叶片总数量为 6、8、10 个(对)时,对应的拌缸长宽比分别为 0.7、0.95 和 1.2.

表 1 仿真方案的正交设计

Tab.1 Orthogonal design of simulation schemes

仿真方案	单轴叶片总数量/个(对)	单轴叶片布置	叶片安装角/(°)	返回叶片数量/个(对)
1	6	单置	35	1
2	8	单置	45	1
3	10	单置	55	2
4	8	单置	55	1
5	10	单置	35	1
6	6	单置	45	2
7	10* 2	对置	45	1* 2
8	6* 2	对置	55	1* 2
9	8* 2	对置	35	2* 2

注:对置叶片时,叶片的数量为对,表中采用“* 2”表示.

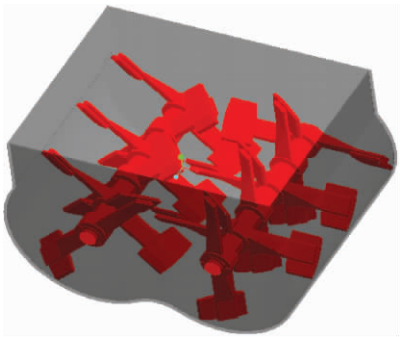


图 2 搅拌机模型(仿真方案 8)

Fig.2 Mixer model (simulation scheme 8)

由于计算机处理能力的限制,只仿真混合料中粒径大于某一尺寸的集料,粉料和沥青以胶泥的形式通过集料颗粒间的接触关系表示^[17].笔者采用 5 种简化的球形颗粒来模拟粒径的集料,并选择最小颗粒为 8 mm,同时根据搅拌设备实际生产时的筛网配置,确定集料 1~5 的球径分别为 32、26、20、14、8 mm.根据生产级配,设定 $m(\text{集料 } 1):m(\text{集料 } 2):m(\text{集料 } 3):m(\text{集料 } 4):m(\text{集料 } 5)=30:28:22:16:4$.根据工地实验室的数据,得到集料的密度,并参考文献[17–18],确定仿真材料的物理属性和接触属性,如表 2 和表 3.

由于 EDEM 中无法加入粉料和沥青,仿真过程的前 5 s 采用 Hertz-Mindlin (no slip) 模型,6 s 之后采用 Hertz-Mindlin with JKR 模型来增加材料间的粘结力,并设定 JKR 表面能为 60 J/m²^[19],搅拌总时间为 26 s,搅拌轴转速为 45 r/min,拌缸

表 2 材料物理属性

Tab.2 Physical properties of materials

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)
钢	0.30	70	7 850
集料 1~3	0.25	23	2 692
集料 4	0.25	23	2 679
集料 5	0.25	12	2 759

表 3 材料接触属性

Tab.3 Contact properties of materials

材料 1	材料 2	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
	钢	0.10	0.60	0.24
集料	集料 1~3	0.06	0.80	0.32
1~3	集料 4	0.06	0.70	0.28
	集料 5	0.04	0.75	0.30
	钢	0.10	0.50	0.20
集料 4	集料 4	0.06	0.70	0.28
	集料 5	0.04	0.65	0.26
集料 5	钢	0.05	0.40	0.20
	集料 5	0.02	0.60	0.28

充盈率(投料体积与拌缸有效容积之比)为 45%.

2.2 仿真结果与分析

采用拌缸内不同位置混合料中某种成份含量的变异系数,来评价搅拌均匀性.考虑到颗粒数量越多,越有利于统计的准确性,因此,采用最小粒径的集料 5 进行分析.对搅拌机模型划分大小相同的网格,得到不同的取样位置.根据 GB/T 17808—2010 规定^[20],评价成品料搅拌均匀性的每份取样质量应为 2 kg 左右.因此,以网格内能够容纳 2 kg 混合料来确定网格大小,得到网格边长约为 100 mm.网格划分如图 3.从全部集料投入拌缸开始,按照间隔 2 s,统计每个网格内的集料总数量和集料 5 数量,得到每个网格内的集料 5 的百分含量.计算所有的网格,得到该时刻集料 5 含量的变异系数.

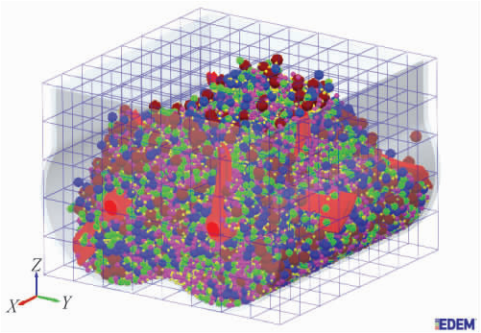


图 3 搅拌机的网格划分

Fig.3 Meshing of the mixer

由于 EDEM 网格是针对整个模型空间,实

际材料颗粒不可能遍及所有位置,因此必须选定合理的统计网格以保证结果准确.以表1的仿真方案8为例,按照仿真后网格内的颗粒总数,分别统计总网格数量的30%~80%,得到8 mm 粒径集料(集料5)含量变异系数随搅拌时间的变化曲线如图4.统计的网格数量超过80%时,会出现部分网格内颗粒数为0而计算出错.由图4可见,统计的网格数量越少,数据的相关性越好,但数据间的差异性降低,表现为变异系数随搅拌时间的变化越来越平缓,从而不利于分析搅拌时间的影响.选择网格统计数量为60%,不同仿真方案的结果如图5.此时相关系数为0.80~0.89,显著性良好.

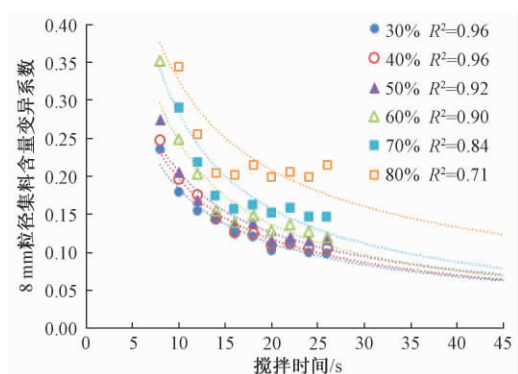


图4 不同统计网格数量时的仿真方案8结果

Fig. 4 Result of simulation scheme 8 from different amount of mesh

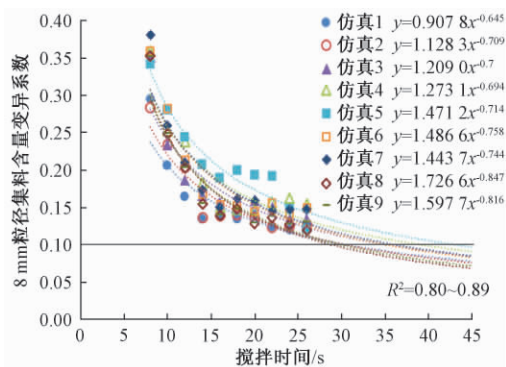


图5 8 mm 粒径集料含量变异系数与搅拌时间的关系

Fig. 5 Relationship between variation coefficient of 8 mm-diameter aggregate content and mixing time

由图5不难看出,随着搅拌时间延长,所有仿真方案的变异系数下降,并且呈负幂函数关系.搅拌开始时,变异系数下降迅速,均匀性提高很快;搅拌后期的曲线则较为平缓,表明均匀性趋于稳定.根据仿真趋势,选取8 mm 粒径集料含量变异系数0.1为搅拌均匀性的目标值,并由拟合公式得到仿真方案1~9所需的搅拌时间分别为29.61、30.51、35.18、39.09、43.19、35.19、36.18、

28.89、29.85 s,系数 R^2 分别为0.80、0.86、0.85、0.80、0.89、0.84、0.84、0.89、0.87.相应的极差分析见表4.表4中 K_i 为影响因素水平为 i 的搅拌时间之和; k_i 为影响因素水平为 i 的搅拌时间均值.

表4 均匀搅拌时间的正交极差分析

Tab. 4 Orthogonal range analysis of mixing time

分析参数	单轴叶片总数量/个(对)	单轴叶片布置	叶片安装角/(°)	返回叶片数量/个(对)
K_1	93.69	212.77	102.65	207.47
K_2	99.45	94.92	101.88	100.22
K_3	114.55	—	103.16	—
k_1	31.23	35.46	34.22	34.58
k_2	33.15	31.64	33.96	33.41
k_3	38.18	—	34.39	—
极差	6.95	3.82	0.43	1.17

由仿真结果可知,对于不同的叶片参数,集料5达到要求均匀度所需的搅拌时间不一样.虽然叶片参数都在常见的范围内,但搅拌时间在29~43 s间变化,最大时间相差33%,这也表明叶片参数合理匹配的重要性.从表4的极差来看,单轴叶片总数量的影响最大,其次是单轴叶片布置和返回叶片数量,叶片安装角的影响最小.从均值 k_i 来看,不同参数的取值规律有所不同.其中,单轴叶片总数量的取值越小,达到目标均匀性所需的搅拌时间越短,表明在搅拌机容量和叶片几何尺寸不变的条件下,通过减少单轴叶片总数量,使拌缸长宽比小于1时,改善搅拌均匀性的效果最显著.在此基础上,与之相匹配的其他参数为:叶片对置、轴向安装角45°、返回叶片数量2对.

3 试验验证

选择3个厂家的4000型搅拌机进行试验验证.搅拌机的叶片结构如图6所示,叶片参数见表5.其中A搅拌机完全采用了仿真结果.试验采用相同的搅拌时间,拌缸充盈率和投料顺序.根据实际生产条件,选取32 s和37 s两种搅拌时间.充盈率采用额定值,即每批次搅拌4 000 kg.投料顺序依次为粗、细集料;粉料和沥青. A、B和C搅拌机生产的混合料分别为ATB-25、SUP-25和AC-20,对应的沥青含量分别为3.47%、3.75%和4.12%.

搅拌完成后,由人工从接料装载机铲斗内料堆的不同位置处取样12个,分别计算不同试样间的沥青含量变异系数和0.075 mm 粉料筛分通过率变异系数,如表6所示.由表6不难看出,A搅

表 5 不同搅拌机的叶片参数
Tab. 5 Blades parameters of different mixers

叶片参数		A 搅拌机	B 搅拌机	C 搅拌机
几何参数	排列方式	90°相位 连续双正排列	90°相位 连续双正排列	135°相位 非连续双正排列
	轴向安装角/(°)	45	45	45
数量参数	单轴叶片	对置 7 对	单置 10 个	单置 11 个
	拌缸长宽比	0.9	1.0	1.2
	返回叶片	2 对	1 个	1 对
运动参数	叶片线速度/(m·s ⁻¹)	2.67	2.86	2.54

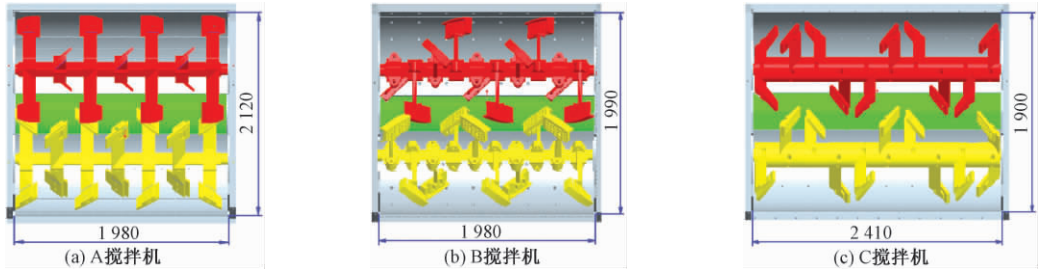


图 6 搅拌机叶片结构示意图 (单位:mm)

Fig. 6 Blades sturcture of different mixers (units:mm)

表 6 不同搅拌机的对比试验结果
Tab. 6 Test results of different mixers

搅拌机	搅拌时间/s	沥青含量 均值/%	变异 系数 1	0.075 mm 粉料筛分 通过率/%	变异 系数 2
A	32	3.50	0.059	3.96	0.064
	37	3.39	0.049	3.28	0.051
B	32	3.57	0.086	3.51	0.097
	37	3.68	0.064	3.62	0.080
C	32	4.15	0.105	4.38	0.102
	37	4.04	0.073	4.48	0.082

拌机采用数量最少的对置式单轴叶片,拌缸长宽比小于 1,使得相同搅拌时间内的混合料均匀性最好,表现为沥青含量和粉料筛分通过率的变异系数都最小,并且搅拌时间越短差距越明显。虽然 B、C 搅拌机都采用单置叶片,但 C 搅拌机的均匀性却最差。主要原因在于其单轴叶片总数量最多,致使拌缸长宽比达到了 1.2,从而减弱了混合料的轴向循环。此外,单轴相邻叶片相位偏大(135°),搅拌线速度偏低(2.54 m/s),也都不利于机内混合料的循环运动,导致搅拌质量的下降。

4 结论

- (1) 尽可能地加快混合料在搅拌机拌缸内大范围循环运动的强度和频次,有利于提高搅拌均匀性,这是合理选择与匹配搅拌叶片参数的主要依据。
- (2) 随着搅拌时间的延长,不同叶片参数匹

配下的 8 mm 粒径集料含量变异系数都下降,并且符合负幂函数规律。当以变异系数 0.1 为目标均匀度时,各叶片参数所需要的搅拌时间约为 29 ~ 43 s,时间最大相差 33%。

(3) 不同叶片参数对搅拌均匀性的影响程度:单轴叶片总数量 > 单轴叶片布置 > 返回叶片数量 > 叶片安装角。在搅拌机容量和叶片几何尺寸不变的条件下,通过减少单轴叶片总数量,使拌缸长宽比小于 1,对改善搅拌均匀性的效果最显著;在此基础上,与之相匹配的其他参数为:叶片对置,轴向安装角 45°,返回叶片数量 2 对。

参考文献:

[1] 陈启宗. 连续式搅拌设备与间歇式搅拌设备的性能比较 [J]. 同济大学学报, 2001, 29 (9): 1101 - 1104.

[2] 谢立扬, 赵利军, 姚运仕, 等. 搅拌过程中沥青混合料的离析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2009, 29 (5): 116 - 121.

[3] 刘洪海, 徐中富. 影响沥青混合料质量的因素及其控制措施 [J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16: 27 - 29.

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials, Federal Aviation Administration, Federal Highway Administration, et al. Hot-mix asphalt paving handbook 2000 [M]. Washington D C: Transportation, 2000.

[5] 陈渊召, 李振霞. 基于离散元法的橡胶颗粒沥青混合料细观结构分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报,

- 2013 4(4): 116–121.
- [6] 石立万,王瑞宜,徐驰,等. 基于离散元法的沥青混合料骨架细观性能研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015 43(10): 50–56.
- [7] 苏沛. 基于离散元法的沥青混合料真空压实特性研究[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2015.
- [8] 杨龙飞. 基于 DEM 的沥青混合料振动筛分效率估算与试验研究[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2015.
- [9] 张晨光,焦生杰,谢立扬,等. 沥青搅拌设备烘干筒料帘密度建模及仿真[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017 45(5): 55–60.
- [10] SIMONS T A H, BENSMANN S, ZIGAN S, et al. Characterization of granular mixing in a helical ribbon blade blender[J]. Powder technology, 2016, 293: 15–25.
- [11] SAKAI M, SHIGETO Y, BASINSKAS G, et al. Discrete element simulation for the evaluation of solid mixing in an industrial blender[J]. Chemical engineering journal, 2015 279: 821–839.
- [12] 纪云,刘送永. 混凝土搅拌机搅拌性能的离散元分析[J]. 施工技术, 2016 45(1/2): 144–146.
- [13] 栗培龙,饶文宇,冯振刚,等. 沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016 37(5): 1–5.
- [14] KEMMANN C. What twin-shaft mixing can do for you[J]. Concrete producer, 2004 22(10): 47–50.
- [15] 冯忠绪,姚运仕,赵利军,等. 搅拌机长宽比的确定方法[J]. 中国工程机械学报, 2004 2(3): 300–303.
- [16] 赵利军,冯忠绪,姚运仕,等. 搅拌机叶片安装角的确定方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(5): 99–102.
- [17] CHEN J S. Discrete element method (DEM) analyses for hot-mix asphalt (HMA) mixture compaction[D]. Knoxville, Tennessee, USA: Department of civil and environmental engineering, University of Tennessee, 2011.
- [18] 孙学增,李士斌,张立刚. 岩石力学基础与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [19] 张新勇. 基于 EDEM 方法的稳定土搅拌器搅拌过程模拟[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2015.
- [20] 中国机械工业联合会. 道路施工与养护机械设备沥青混合料搅拌设备: GB/T 17808—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

Parameters Matching of Mixing Blades for Asphalt Mixture Mixer Based on EDEM

ZHAO Lijun¹, SHEN Yan¹, DENG Xin¹, LIU Benxue², DONG Wu¹, LI Yao¹

(1. Key Laboratory of Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to improve mixing uniformity of twin-shaft mixer, the EDEM software based on discrete element method was used to simulate the mixing process of asphalt mixture with different mixing blade parameters. The matching relationship of total number of single shaft blades, blade arrangement on single shaft, shaft angle of the blade, and the number of reversing blade were determined by orthogonal analysis of the mixing time required to reach given uniformity of variation coefficient of 8 mm-diameter aggregate content from different location in the same batch. The test verification was conducted. The results showed that the variation coefficient of 8mm-diameter aggregate content with different mixing parameters was decreased with increase of mixing time, and the relationship between them was a negative power function. When the variation coefficient of given uniformity was 0.1, the effect of total number of single shaft blades on mixing time required was the most significant, blade arrangement on the single shaft and number of reversing blade were the second, the shaft angle of blade was the least. The reasonable matching of these parameters were, the total number of single shaft blades that could meet the condition of the mixer's length-width ratio less than 1, the blades arranged symmetrically on both sides of one shaft, the shaft angle is 45°, the reversing blade number is 2.

Key words: mixing blades; discrete element simulation; asphalt mixture; mixing uniformity; twin-shaft mixer

基于双侧非对称破坏模式的临坡地基极限承载力分析

蒋 洋^{1,2}, 郭建坤¹, 王晓谋², 侯超群³

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 3. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 在工程建设领域, 经常需要把条形基础设置在临坡地基上, 但在现行成果中, 对临坡地基极限承载力的确定没有给出具体计算方法. 建立双侧非对称滑移破坏模型, 将坡后土体强度进行折减, 用发挥系数 m 来表征其强度. 基于极限平衡法和叠加原理, 求得三个承载力系数的表达式. 基于极限分析法原理, 推导出临坡地基极限承载力上限解. 采用离心模型试验对理论分析结果进行验证, 并就条形基础作用下的临坡地基变形破坏特征以及基底接触条件、基础位置、边坡高度等诸多因素对临坡地基极限承载力的影响开展研究. 研究表明: 发挥系数 m 随相对坡顶距呈规律性变化; 其他条件均相同时, 基础宽度越大, 临坡地基极限承载力越高; 基底接触条件对于临坡地基极限承载力具有显著影响; 离心模型试验结果与理论计算结果较为吻合, 总体误差在 10% 以内.

关键词: 临坡地基; 极限承载力; 双侧非对称破坏模式; 离心模型试验; 影响因素

中图分类号: TU470

文献标志码: A

doi:10.13705/j.j.issn.1671-6833.2018.06.016

0 引言

在诸多建设工程中, 建筑物基础经常被设置在靠近一定斜坡的地基上(简称临坡地基). 在现行成果中, 对临坡地基的破坏模式没有给出明确阐述, 对临坡地基极限承载力的确定也没有给出具体计算方法. 对于临坡地基, 基础两侧土体埋深不同, 因此并不能按传统的地基极限承载理论进行求解^[1-2]. Meyerhof^[3]最早研究了临坡地基极限承载力问题, 提出当地基距离斜坡较近时, 其最终承载力将明显降低, 同时其极限承载力将受到斜坡高度的显著影响, 斜坡高度越大其承载力越低; Narita 等^[4]认为斜坡地基沿对数螺线面破坏, 但没有进行深入研究; Saran 等^[5]针对临坡地基的破坏形态开展了相关研究, 认为其基础底部的三角形弹性区并非呈左右对称分布; 徐守国^[6]、王晓谋^[7]认为, 条形基础荷载作用下的临坡地基, 基础下两侧土体将按直线+螺旋线+直线的模式滑动; 尉学勇等^[8]推导出一个临坡地基极限承载力上限解公

式, 但结果缺少实验验证; 杨峰等^[9]、胡卫东等^[10]等进行了临坡地基滑移破坏模式及极限承载力分析, 但均没有考虑坡后土体的贡献. 笔者基于双侧滑移破坏模型, 采用解析及实验方法对临坡地基极限承载力进行研究, 以期完善临坡地基极限承载力分析理论与方法.

1 极限平衡法计算

假设地基破坏时, 基础下方为三角形弹性密实区, 临坡一侧整体产生向外侧滑动, 在坡后一侧土体则按虚拟滑移面方向产生滑动, 滑动破坏模式如图 1 所示.

1.1 基本假定

①将浅埋条形基础的基底以上土重折算为超载进行计算; ②基础底面按粗糙条件考虑, 三角形弹性区的坡前、坡后侧底角分别为 φ 、 φ_m ; ③土体采用理想弹塑性本构模型, 服从摩尔-库仑屈服准则; ④土体按直线+螺旋线+直线的模式滑动.

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi, \quad (1)$$

收稿日期:2018-01-04; 修订日期:2018-05-03

基金项目:淮南市应用研究与科技攻关计划(工业)项目(HAG2015026); 江苏省住房和城乡建设厅指导项目(2015ZD50)

作者简介:蒋洋(1976—),男,江苏淮安人,淮阴工学院副教授,博士,主要从事岩土工程研究, E-mail: jy_12345678@163.com.

式中: φ 为地基土内摩擦角; c 为地基土黏聚力; σ 为剪切滑动面上的法向应力; τ 为剪切滑动面上的剪应力.

1.2 临坡地基计算模型

基于假想滑动面的分布形态, 临坡地基土体由 5 个区块组成(如图 1 所示), 滑动螺旋线 AEK 的中心点位置通过编程计算获取, 该点处于直线 EA 的延长线上. 坡后一侧土体存在 $DEFG$ 假想滑动面, 并用强度发挥系数 m 来对坡后土体强度进行折减, 即在临坡地基达到极限承载状态时, 坡后土体强度只是得到部分发挥, 相应的坡后土体强度参数表示为: 抗剪强度 τ_m 、黏聚力 c_m 、内摩擦角

φ_m . 而三角形弹性区的坡后侧底角表示为 φ_m , 坡后螺旋滑动面 EF 的中心处于 ED 延长线方向或位于 D 点.

1.3 极限平衡法计算原理

临坡地基的极限承载力由三部分组成, 其抗力效用 3 个承载力系数来表达, 即 N_r 、 N_q 、 N_c . 则地基承载力为:

$$Q_u = B \left(\frac{1}{2} \gamma B N_r + \gamma D_f N_q + c N_c \right). \quad (2)$$

根据静力平衡条件, 具体判断基底三角形弹性土楔 ADE (如图 2 所示) 的受力状态, 建立平衡方程, 通过编程计算得到 m 系数的取值.

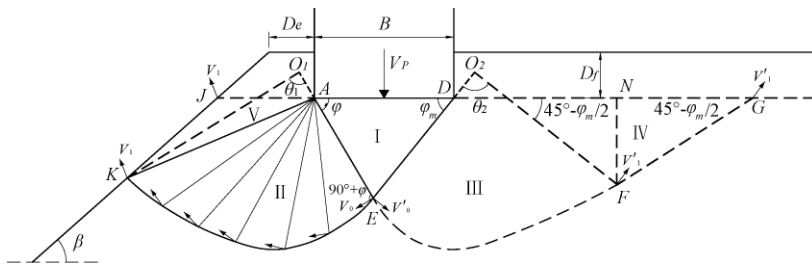


图 1 临坡地基计算模型

Fig. 1 Calculation model for ground foundation adjacent to slope

坡前及坡后土体被动土压力均由三部分构成, 则三个承载力系数可表示为:

$$N_r = \frac{2P_{pr} + 2P_{pmr}}{\gamma B^2}. \quad (3)$$

$$N_q = \frac{P_{pq} + P_{pmq}}{\gamma D_f B}. \quad (4)$$

$$N_c = \frac{P_{pc} + P_{pmc}}{cB} + \frac{(1+m) \sin \varphi_m \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_m)}. \quad (5)$$

式中: P_{pr} 、 P_{pq} 、 P_{pc} 可根据土体 $AEKJ$ 的平衡条件求得, 如图 1、图 3 所示; P_{pmr} 、 P_{pmq} 、 P_{pmc} 可根据土体 $DEFN$ 的平衡条件求得, 如图 1、图 4 所示.

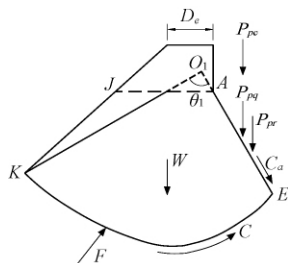


图 3 $AEKJ$ 上的力系

Fig. 3 Forces on soil mass $AEKJ$

P_{pr} 、 P_{pq} 、 P_{pc} 及 P_{pmr} 、 P_{pmq} 、 P_{pmc} 为地基土物理力学参数、几何尺寸及发挥系数 m 的函数. 根据三角形土楔 ADE 的力矩平衡条件可通过试算法计算出 $c = q = 0$ 、 $c = \gamma = 0$ 、 $q = \gamma = 0$ 时的发

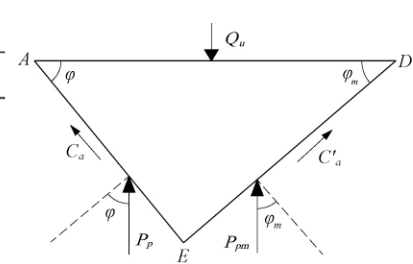


图 2 基底弹性土楔 ADE 的受力示意图

Fig. 2 Forces on elastic wedge ADE

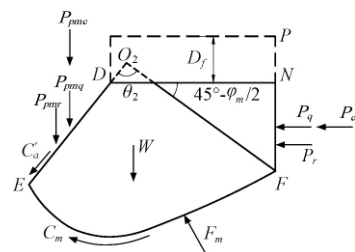


图 4 $DEFN$ 上的力系

Fig. 4 Forces on soil mass $DEFN$

挥系数 m , 进而求出 P_{pr} 、 P_{pq} 、 P_{pc} 及 P_{pmr} 、 P_{pmq} 、 P_{pmc} 值.

1.4 典型 m 值计算结果

在表 1 中列出了典型 m 值计算结果, 可以看出: 边坡坡度一定时 m 随相对坡顶距增大而增大; 相对坡顶距一定时 m 随边坡坡度的增大而减小; 边坡坡度及相对坡顶距均一定时 m 随相对埋深的增大而增大.

2 极限分析法求解

基于假想的临坡地基双侧非对称破坏模型(图 1), 通过极限分析上限定理, 求得满足运动许可速度场的临坡地基极限承载力上限解^[11]. 在此基础上, 进一步对比极限平衡法计算结果, 寻求临坡地基极限承载力的真实解答, 并有效验证

表1 典型 m 值计算结果 ($\varphi = 40^\circ$)
Tab.1 Computed results for representative values of m

N_r			N_q				N_c		
β	D_e/B	m	β	D_e/B	D_f/B	m	β	D_e/B	m
30	0	0.714	30	1	0.0	0.535	30	0	0.881
30	1	0.805	30	1	0.5	0.660	30	1	0.939
30	2	0.875	30	1	1.0	0.762	30	2	0.987
30	3	0.929	20	0	0.5	0.465	70	1	0.763
30	0.5	0.761	20	1	0.5	0.722	70	2	0.870
20	0.5	0.846	—	—	—	—	90	1	0.681
10	0.5	0.923	—	—	—	—	90	2	0.811
5	0.5	0.973	—	—	—	—	—	—	—

不同计算方法的合理性与可靠性。

2.1 基本假定

①采用理想弹塑性本构模型,服从摩尔-库仑屈服准则;②在极限分析中,运用相关联流动法则,基于塑性理论计算土体应力应变特征;③运用虚功原理,忽略土体破坏时的瞬时变形。

极限分析法取用与极限平衡法相同的假想滑动面,如图1所示。

2.2 地基极限承载力公式

应用上限定理,建立虚功方程:

$$\sum D = \sum W + \sum P, \quad (6)$$

式中: $\sum D$ 为地基土内部能量耗损率; $\sum W$ 为地基土自重所作功; $\sum P$ 为外荷载所作功。

基于图1所示的假想破坏机构,求解 $\sum D$ 、 $\sum P$ 及 $\sum W$,并代入虚功方程,令 $V_p = V_0 \cos \varphi$, $V'_0 = V_0 \cos \varphi \sec \varphi_m$, $f_m = m \cdot c$,可得到地基极限承载力 Q_u 表达式:

$$Q_u = -\frac{1}{2} \gamma B^2 \frac{\sin \varphi \sin \varphi_m}{\sin(\varphi + \varphi_m)} - \frac{1}{2} \gamma r_0^2 \cdot \sec \varphi \frac{1}{1 + 9 \tan^2 \varphi} \{ e^{3\theta_1 \tan \varphi} [\sin(\theta_1 + \varphi) + 3 \tan \varphi \cos(\theta_1 + \varphi)] - 4 \sin \varphi \} - \frac{1}{2} \gamma r_0^2 \sec \varphi_m \frac{1}{1 + 9 \tan^2 \varphi_m} \{ e^{3(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} \cdot \left[\sin\left(135^\circ + \frac{\varphi_m}{2}\right) + 3 \tan \varphi_m \cos\left(135^\circ + \frac{\varphi_m}{2}\right) \right] - 4 \sin \varphi_m \} - \frac{1}{2} \gamma \sec \varphi (D_e + D_f \cot \beta)^2 \cdot \frac{\sin(\theta_1 + \varphi) \sin \beta \cos(\theta_1 + \varphi)}{\sin(\beta + \theta_1 + \varphi - 180^\circ)} \cdot e^{\theta_1 \tan \varphi} + \gamma r_0^2 \sec \varphi_m \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\varphi_m}{2}\right) \cos^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_m}{2}\right) \cdot e^{3(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} + 2 \gamma D_f r_0' \sec \varphi_m \cdot$$

$$\cos^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_m}{2}\right) e^{2(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} -$$

$$\gamma D_f \left(D_e + \frac{1}{2} D_f \cot \beta \right) \cdot e^{\theta_1 \tan \varphi} \cos(\theta_1 + \varphi) \sec \varphi + c \cdot r_0 \cdot \cot \varphi \sec \varphi (e^{2\theta_1 \tan \varphi} - 1) + c \cdot r_0 \cdot \sin \varphi + m \cdot c \cdot r_0' \cot \varphi_m (e^{2\theta_2 \tan \varphi_m} - 1) \sec \varphi_m + m \cdot c \cdot r_0' \cdot \sin \varphi_m + m \cdot c \cdot r_0' \cdot e^{2\theta_2 \tan \varphi_m}. \quad (7)$$

$$\text{将 } r_0 = B \cdot \frac{\sin \varphi_m}{\sin(\varphi + \varphi_m)}, r_0' = B \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_m)}$$

$$\text{代入式(7),并令 } Q_u = B \left(\frac{1}{2} \gamma B N_r + \gamma D_f N_q + c N_c \right),$$

进一步整理可得承载力系数表达式:

$$N_r = -\frac{\sin \varphi \sin \varphi_m}{\sin(\varphi + \varphi_m)} - \frac{\sin^2 \varphi_m}{\sin^2(\varphi + \varphi_m) \cos \varphi} \cdot \frac{1}{1 + 9 \tan^2 \varphi} \{ e^{3\theta_1 \tan \varphi} [\sin(\theta_1 + \varphi) + 3 \tan \varphi \cos(\theta_1 + \varphi)] - 4 \sin \varphi \} - \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2(\varphi + \varphi_m) \cos \varphi_m} \cdot \frac{1}{1 + 9 \tan^2 \varphi_m} \cdot \{ e^{3(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} \cdot \left[\sin\left(135^\circ + \frac{\varphi_m}{2}\right) + 3 \tan \varphi_m \cos\left(135^\circ + \frac{\varphi_m}{2}\right) \right] - 4 \sin \varphi_m \} - \left(\frac{D_e + D_f \cot \beta}{B} \right)^2 \cdot \frac{\sin(\theta_1 + \varphi) \sin \beta \cos(\theta_1 + \varphi)}{\sin(\beta + \theta_1 + \varphi - 180^\circ) \cos \varphi} \cdot e^{\theta_1 \tan \varphi} + \frac{2 \sin^2 \varphi \sec \varphi_m}{\sin^2(\varphi + \varphi_m)} \cdot \sin\left(45^\circ - \frac{\varphi_m}{2}\right) \cdot \cos^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_m}{2}\right) \cdot e^{3(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m}. \quad (8)$$

$$N_q = \frac{2 \sin \varphi \sec \varphi_m}{\sin(\varphi + \varphi_m)} \cos^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_m}{2}\right) \cdot e^{2(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} - \left(\frac{D_e}{B} + \frac{1}{2B} D_f \cot \beta \right) \cdot \cos(\theta_1 + \varphi) \sec \varphi \cdot e^{\theta_1 \tan \varphi}. \quad (9)$$

$$N_c = \frac{\sin \varphi_m \csc \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_m)} \cdot (e^{2\theta_1 \tan \varphi} - 1) + \frac{m \cdot \sin \varphi \csc \varphi_m}{\sin(\varphi + \varphi_m)} \cdot [e^{2(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} - 1] + \frac{(m + 1) \cdot \sin \varphi \sin \varphi_m}{\sin(\varphi + \varphi_m)} + \frac{m \cdot \sin \varphi}{\sin(\varphi + \varphi_m)} \cdot e^{2(135^\circ - \frac{\varphi_m}{2}) \tan \varphi_m} \quad (10)$$

2.3 计算结果比较

两种方法的计算结果如表 2 所示. 从表 2 可以看出, 承载力系数 N_r 、 N_q 、 N_c 随影响因素 D_e/B 、 D_f/B 、 φ 、 β 的变化趋势基本一致.

表 2 极限分析法与极限平衡法结果对比

Tab.2 Comparison of results obtained by limit equilibrium and limit analysis approaches

D_e/B	$\varphi = 40^\circ \quad \beta = 30^\circ, D_f/B = 1$					
	极限分析法			极限平衡法		
	N_r	N_q	N_c	N_r	N_q	N_c
0.0	95.951	15.470	73.571	93.947	13.504	72.221
1.0	126.342	31.183	82.443	124.502	28.783	80.643
2.0	150.945	52.052	82.974	148.781	50.049	81.214

3 离心模型试验

制作部分典型工况的临坡地基模型, 利用土工离心机开展相关离心模型试验研究. 有效揭示临坡地基在极限承载状态下的滑移破坏特征, 并定量分析诸多影响因素(如基础尺寸、地基模型几何尺寸、荷载条件等)对于临坡地基极限承载力的具体影响.

3.1 试验设备及方法

3.1.1 土工离心机

土工离心机的组成如图 5 所示, 主要由挂斗、转臂、支座、联轴器、减速器、传动轴、调速电动机及其控制器等组成, 其主要参数如表 3 所示.



图 5 50gt 土工离心机

Fig.5 50gt geotechnique centrifuge

3.1.2 模型箱

试验中固壁式模型箱内部尺寸长 \times 宽 \times 高为

表 3 TH-50gt 土工离心机参数

Tab.3 Parameters of 50gt geotechnique centrifuge

有效半径/ m	最大加速度	最大荷载/ (g·t)	电机功率/ kW
2	250 g	50	55

500 mm \times 200 mm \times 350 mm, 在模型箱内壁粘贴减震塑料板, 以减少反射波的影响. 在模型箱一侧装有透明的有机玻璃, 厚 40 mm, 用于观察试验过程中模型的变形破坏过程.

3.1.3 加载系统

离心场坡表加载系统通过加载板对基础的顶面施加荷载, 该系统主要由加速器、涡轮蜗杆以及直流永磁电机组成. 整个加载以恒定位移速率进行.

3.1.4 非接触位移测量系统

位移测量系统及高质量离心场图像采集系统能够对试验过程中土体的变形进行测量和记录, 即通过固定的摄像头对土体侧面进行拍摄, 再通过远程计算机系统进行记录, 并加以分析和处理, 从而得到试验中土体位移的完整数据.

3.2 试验方案与试验模型

3.2.1 试验方案

受模型箱尺寸的限制, 将需研究的斜坡地基按照一定的比例缩小, 制作成试验模型. 根据研究目标, 设计 3 组试验模型, 每组设计 3 种工况, 具体如表 4 所示.

表 4 模型制作方案一览表

Tab.4 Make scheme of test model

模型 编号	坡顶距 D_e/mm	基础宽度 B/mm	基底接触 条件	备注
M1	0	50	光滑	水平地基
M2	100	50	光滑	
M3	225	50	光滑	
M4	0	30	光滑	
M5	60	30	光滑	
M6	120	30	光滑	
M7	0	30	粗糙	
M8	60	30	粗糙	
M9	120	30	粗糙	

若基底接触条件为光滑, 则在基础上设置专门的滑块来实现基础与地基之间的光滑接触; 若基底接触条件为粗糙, 则去掉滑块, 同时在基础底面贴上砂纸来实现粗糙接触.

3.2.2 试验模型

采用黏性土制作离心试验模型. 对制备好的

土样进行分层击实,并严格控制土样的干密度指标。再削去多余土样,制作成临坡地基土体模型,土样高度为20 cm。为降低基座对试验结果的影响,模型土体下半部分的水平土层应保留10 cm的厚度。此外,在模型箱的两侧均涂抹硅油,以降低模型土体与模型箱侧壁之间的摩擦力,并在模型箱外侧粘贴聚四氟乙烯膜。同时,为了保证在试验中土坡可以向临空面方向自由变形,模型的坡脚与模型箱侧壁之间保留一定距离。

3.3 试验结果分析

试验表明,试验模型的实际破坏形态与前述假定破裂面相似。

3.3.1 不同条件下的临坡地基极限承载力

(1) 不同地基类型。从图6可见,在地基土参数相同条件下,水平地基的极限承载力明显高于斜坡地基。临坡地基与水平地基的 $q-s$ 曲线形态存在差异,在开始阶段,临坡地基的承载力增长较快,后期逐步趋于平缓;而水平地基的承载力增长较为平缓,更为均匀。

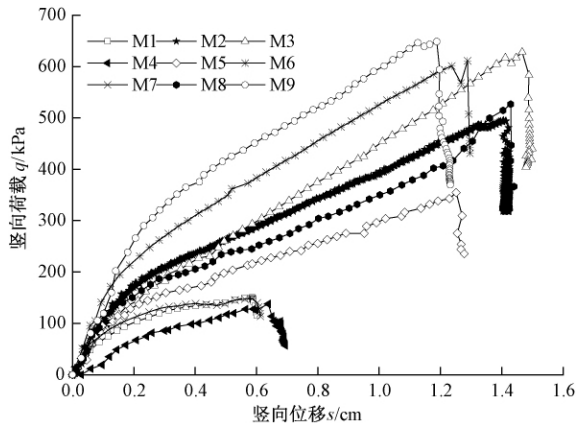


图6 地基类型对极限承载力的影响

Fig. 6 Influence of ground foundation type on bearing capacity

(2) 不同基础宽度。试验表明,M5与M2模型相比,同样坡顶距为两倍基础宽,但破坏形态有所差异:M5模型地基变形更快,破坏事件更短;M5模型的地基土变形扩展范围更小,坡顶拉裂缝分布更为集中;M5模型斜坡上土体溢出位置更靠近坡顶。从图6可见,条形基础宽度对临坡地基的极限承载力有一定的影响^[12]。其他条件均相同时,基础宽度越大,临坡地基极限承载力越高,如M1模型的极限承载力高于M4模型,M2模型的极限承载力高于M5模型, $q-s$ 曲线形态基本一致。

(3) 不同坡顶距。从图6可见,坡顶距对于临坡地基极限承载力具有显著影响,坡顶距越大,地

基极限承载力越高;坡顶距越大,地基破坏时,基础达到的位移越大,而坡顶距较小时,滑坡土体范围较小,地基很快形成连贯滑移面;另外,坡顶距较大时,地基存在明显渐进破坏过程;再者,坡顶距越大,在加载稳定阶段 $q-s$ 曲线斜率越大,即随着基础的下沉,地基土强度发挥更加充分^[13]。

(4) 不同基底接触条件。试验表明,基底接触条件对于临坡地基极限承载力具有显著影响。基底粗糙相对于基底光滑条件,承载力的提高主要体现在加载初期。在加载初期,基底粗糙时,基础底面与地基顶面的摩擦作用约束了土体的侧向位移,在基础下方形成弹性核。相对于光滑基础,粗糙基础下的土体压缩时间持续更长,地基深处土体发生侧向滑移时间相对延后,在图6中表现为,加载初期(如 $s < 0.4$ cm),基底粗糙条件下的 $q-s$ 曲线斜率更大。在加载后期,两种基底接触条件下的地基承载力增长速度相差不大,即 $q-s$ 曲线斜率基本相等。

3.3.2 试验结果与理论计算结果的比较

在本次离心模型试验方案中,基底接触条件为粗糙的有M7、M8、M9号模型,在此对上述模型计算结果进行对比。

由式(2)可知,临坡地基的极限承载力计算公式为:

$$q_u = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + \gamma D_f N_q + c N_c. \quad (11)$$

式中: N_γ 、 N_q 、 N_c 为承载力系数,在极限平衡方法中分别按式(3)、式(4)、式(5)计算,在极限分析法中分别按式(8)、式(9)、式(10)计算; γ 为地基材料的重度,根据前述试验用土的干密度、含水量,可换算得到地基土的自然重度为16.45 kN/m³;B为条形基础宽度,根据离心模型试验的相似比,可确定原型中的基础宽为1.2 m; c 为地基材料黏聚力,与离心模型试验中相同,取为22 kPa; D_f 为基础埋深,无埋深,取为0。

将上述参数代入式(11),可得

$$q_u = 9.87 N_\gamma + 22 N_c. \quad (12)$$

根据地基土的物理力学参数及基础相对位置等几何尺寸参数,按前述极限平衡法和极限分析法进行计算,可得到承载力系数,代入式(12)可求得相应结果,如表5所示。

结果表明,理论计算结果与离心模型试验结果较为吻合,总体误差在10%以内。另外,试验

表 5 试验结果与理论计算结果比较一览表

Tab. 5 Comparison of results by test and theoretical calculation

模型 编号	离心模型 试验 $q_{ul} /$		极限平衡法			极限分析法		
	kPa	N_r	N_c	q_{u2} / kPa	N_r	N_c	q_{u3} / kPa	
M7	147.83	3.81	4.82	143.64	3.94	5.06	150.21	
M8	526.73	5.41	19.20	475.80	6.42	21.28	531.53	
M9	648.83	6.25	25.45	621.59	7.16	27.02	665.11	

值介于极限平衡法和极限分析法计算结果之间, 极限平衡法相对较低, 而极限分析法相对较高, 主要原因在于极限平衡及极限分析法计算中, 计算模型及假想滑动面的选择与实际存在一定的误差。

4 结论

笔者引入坡后土体强度发挥系数的概念, 考虑坡后土体强度的折减, 从而建立双侧非对称破坏模式的临坡地基极限承载力计算模型。通过编程计算, 获得极限平衡条件下的坡后土体强度折减值, 以 m 值表征。计算结果表明: 边坡坡度一定时 m 随相对坡顶距增大而增大; 相对坡顶距一定时 m 随边坡坡度的增大而减小; 边坡坡度及相对坡顶距均一定时 m 随相对埋深的增大而增大。进而, 基于极限平衡法和叠加原理, 可求得承载力系数 N_r 、 N_q 、 N_c 的表达式。

基于假定临坡地基极限承载力计算模型, 构建运动许可速度场, 进行极限分析计算, 得到地基极限承载力上限解。3 个承载力系数的计算结果显示, 极限平衡法计算结果略小于极限分析法计算结果, 但 3 个承载力系数随影响因素 D_c/B 、 D_f/B 、 φ 、 β 的变化规律基本一致。

利用离心模型试验定性分析了临坡地基在极限承载状态下的变形破坏特征, 定量分析了诸多影响因素对于其极限承载力的具体影响。

试验结果表明: ①临坡地基与水平地基的 $q-s$ 曲线形态存在差异, 在开始阶段, 斜坡地基的承载力增长较快, 后期逐步趋于平缓; 而水平地基的承载力增长较为平缓, 更为均匀。②其他条件均相同时, 基础宽度越大, 临坡地基极限承载力越高。③坡顶距较小时, 滑移土体范围较小, 地基很快形成连贯滑移面; 而坡顶距较大时, 地基存在明显渐进破坏过程。④基底接触条件对于临坡地基极限承

载力具有显著影响。在加载初期, 粗糙基础下方局部土体压缩时间更加持久, $q-s$ 曲线斜率更大; 在加载后期, 两种基底接触条件下的地基承载力增长速度相差不大。

离心模型试验结果与理论计算结果较为吻合, 总体误差在 10% 以内, 文中所述理论方法可为实际工程计算提供借鉴。

参考文献:

- [1] 徐洋, 谢康和, 刘干斌, 等. 复合双层地基的极限承载力计算[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 82 - 86.
- [2] 马强, 朱健, 邢文文, 等. 具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 70 - 74.
- [3] MEYERHOF G G. The ultimate bearing capacity of foundations on slopes-lafore portante des foundation sur talus [C]//The Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation engineering. London: Routledg, 1957: 384 - 386.
- [4] NARITA K, YAMOGUCHI H. Bearing capacity analysis of foundations on slopes by use of log-spiral sliding surfaces [J]. Soils and foundations, 1990, 30(3): 144 - 152.
- [5] SARAN S, SUD V K, HANDA S C. Bearing capacity of footings adjacent to slopes [J]. Journal of geotechnical engineering, 1989, 115(4): 553 - 573.
- [6] 徐守国. 斜坡上地基承载力的研究[D]. 西安: 西安公路学院, 1992.
- [7] 王晓谋, 徐守国. 斜坡上的地基承载力的有限元分析[J]. 西安公路学院学报, 1993, 13(3): 13 - 17.
- [8] 尉学勇, 王晓谋, 怀超. 斜坡地基极限承载力上限解计算与分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 381 - 387.
- [9] 杨峰, 阳军生, 张学民, 等. 斜坡地基单侧滑移破坏模式及承载力上限解[J]. 工程力学, 2010, 27(6): 162 - 168.
- [10] 胡卫东, 曹文贵. 基于 Meyerhof 理论的临坡地基极限承载力简化分析方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 81 - 89.
- [11] CHEN W F. Limit analysis and soil plasticity [M]. New York: Elsevier, 1975.
- [12] 杨光华, 王恩麒. 基础宽度对地基承载力影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 383 - 392.
- [13] 余新才, 李剑, 尚义敏, 等. 斜坡地基承载力及其影响因素的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(35): 9753 - 9759.

Analysis on Ultimate Bearing Capacity of Ground Foundation Adjacent to Slope Based on Bilateral Asymmetry Failure Mode

JIANG Yang^{1,2}, GUO Jiankun¹, WANG Xiaomou², HOU Chaoqun³

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Traffic and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the field of engineering construction, foundations were often placed adjacent to slopes. In the present research work, the evaluation of the maximum bearing capacity of slope foundations lacked a sufficiently accurate method. A bilateral asymmetry slip failure model for ground foundation adjacent to slope was developed, the strength of soil on the side of flat ground was reduced and this is characterized by a mobilization factor. Based on limit equilibrium method and superposition principle, three bearing capacity factors were expressed. The upper bound bearing capacity for ground foundation adjacent to slope was deduced based on limit analysis approach. Centrifugal model tests were used to verify the theoretical analysis results; and the deformation and failure characteristics of these foundations were studied. In addition, the influence of various factors such as the contact conditions of the foundation, the location of the foundation, and the height of slope on the maximum bearing capacity of these foundations was also studied. Research showed that, (1) The value of mobilization factor m varied regularly with the relative distance from the edge of slope. (2) As other conditions were constant, the larger value of foundation width, the higher value of the ultimate bearing capacity of these foundations. (3) Roughness of foundation had a significant impact on the ultimate bearing capacity of ground foundation adjacent to slope. (4) Results from centrifugal model test were almost consistent with which from theoretical calculation, the overall error was within 10%.

Key words: ground foundation adjacent to slope; the ultimate bearing capacity; bilateral asymmetry failure mode; centrifugal model test; influencing factors

连续刚构桥单肢空心薄壁墩实心段计算长度分析

李艺林, 黄叙钦, 邬晓光

(长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 连续刚构桥的高墩大部分是采用空心薄壁墩形式, 墩底宜有适当的实心段以便承台和薄壁墩刚度过渡, 目前尚未有文献对实心段的设计长度选取进行研究, 设计时都是依据工程经验来选取, 具有很大的局限性. 本文首次通过推导单肢薄壁墩空心段和实心段的顺桥向抗推刚度来对实心段过渡长度进行分析, 分析时将空心段和实心段连接处用平动约束、转动约束和平转动耦合约束弹簧来模拟相互之间约束作用, 最后以工程实例验证了文章分析思路和推导过程的正确性和适用性. 建议将墩底实心段计算长度的取值为 $3 \sim 6$ m 写入规范中来指导高墩的设计和施工.

关键词: 连续刚构桥; 空心薄壁墩; 刚度过渡; 抗推刚度; 计算长度

中图分类号: U443.22 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.031

0 引言

连续刚构桥以其经济良好性和施工方便性在山区高速公路大跨度桥梁中得到快速的发展^[1-2]. 连续刚构桥随着跨径的增长, 桥墩的高度也在逐渐增高, 目前大部分高墩是采用空心单薄壁墩, 在承台和空心墩中间部分是采用实心过渡墩, 《云南省高速公路连续刚构桥梁关键技术指南》规定空心薄壁墩墩底宜有适当的实心段以便承台和薄壁墩刚度过渡, 建议墩底实心段取 $3 \sim 5$ m, 但是目前国内外尚鲜见文献对实心段的设计长度选取进行研究. 国内外对桥墩及承台的刚度分析已经开展了较为系统的研究^[3-8], 文献[3]分析了承台刚度的影响因素, 并对影响程度进行了研究; 文献[4]分析了桩基础对于柔性墩墩顶抗推刚度的影响, 推导出来墩顶抗推刚度; 文献[5]通过连续刚构桥墩身变形机理分析, 提出了主动变形阶段和被动变形阶段单肢墩的抗推刚度计算方法; 文献[6]对高薄壁墩墩底弹性和墩底固结时的抗推刚度进行了分析, 得出当墩高稍低或地基较柔时, 计算桥墩抗推刚度必须计入弹性地基的影响; 文献[7]以弹性支承的连续梁理论为基础, 建立了任意荷载作用位置和任意布桩形式下承台刚度的计算方法; 文献[8]通过将桩-承台体系简化为弹簧支承的连续梁, 对承台

的刚度进行了分析. 目前工程中墩底实心段计算长度的选取都是依据设计经验来选取的, 文献[4-9]只是对桥墩和承台的刚度进行了研究, 并未对墩底实心段的刚度过渡进行分析, 因此笔者将基于上述文献的分析, 通过推导空心单薄壁墩空心段和实心段的顺桥向抗推刚度来对实心段过渡长度进行分析, 并以工程实例验证了文章分析思路和推导过程的正确性和适用性.

1 桥墩抗推刚度计算

1.1 实心段墩身抗推刚度

连续刚构桥空心单薄壁墩在墩底与承台相接处一般都会采用实心段进行过渡, 假设实心墩墩高为 h_1 , 空心段墩高为 h_2 , 空心薄壁墩实心段受到墩底承台的约束作用, 墩底边界条件可以模拟成固结模式; 墩顶受到墩高为 h_2 的空心段的约束, 可将空心段的自重转化为作用在墩顶的竖向荷载 $P_1 = A_2 h_2 \rho_2$, 其中 A_2 为空心段墩横截面面积, ρ_2 为空心墩材料容重. 实心段墩身荷载集度为 $q_1 = A_1 \rho_1$, 实心段抗推刚度计算模式如图1所示.

假设墩身的近似变形曲线为:

$$y_1 = \mu_1 \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2h_1} \right). \quad (1)$$

总势能 Π_1 为:

收稿日期:2018-01-28; 修订日期:2018-02-20

通信作者: 邬晓光(1961—), 男, 湖北英山人, 长安大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事桥梁结构分析、检测与加固方面的研究, E-mail: wxgwst.cn@126.com.

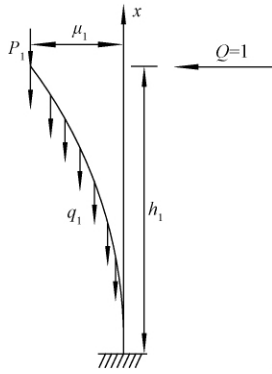


图1 实心段抗推刚度计算模式示意图

Fig.1 Calculation model schematic diagram of solid sections' anti - pushing rigidity

$$\Pi_1 = \frac{E_1 I_1}{2} \int_0^{h_1} (y_1'')^2 dx - P_1 \Delta_{\max} - q_1 \int_0^{h_1} \Delta(x) dx - Q \mu_1, \quad (2)$$

式中, Δ_{\max} 为弯曲变形后墩顶的最大竖向位移; $\Delta(x)$ 是以 Δ_{\max} 为幅值按二次抛物线变化的竖向位移函数; E_1 为实心段墩身弹性模量; I_1 为实心段墩身截面惯性矩。

将公式(1)代入总势能公式(2),再由最小势能原理 $\frac{\partial \Pi_1}{\partial \mu_1} = 0$ 解得:

$$\mu_1 = \frac{Q}{\frac{h_1}{8} \left[\frac{E_1 I_1}{4} \left(\frac{\pi}{h_1} \right)^4 - \left(P_1 + \frac{q_1 h_1}{3} \right) \left(\frac{\pi}{h_1} \right)^2 \right]} = \frac{Q h_1^3}{3.038 E_1 I_1 - \left(1.23 \frac{P_1}{h_1} + 0.410 8 q_1 \right) h_1^3}.$$

令 $Q = 1$, 即可得实心段墩身的顺桥向抗推刚度:

$$k_1 = \frac{3.038 E_1 I_1}{h_1^3} - \left(1.23 \frac{P_1}{h_1} + 0.410 8 q_1 \right). \quad (3)$$

1.2 空心段墩身抗推刚度

空心段的墩底和实心段的上部相连接,在连接部位两者有相同的水平位移和转角位移.分析空心段墩身抗推刚度时,可以将连接处的约束作用用弹簧约束刚度来表示,如图2所示,其中 K_H 表示平动约束弹簧; K_M 表示转动约束弹簧; K_{HM} 表示平转动耦合约束弹簧^[10-11].

假设在图2计算模式下,当空心段顶部作用单位水平力 $H = 1$,弯矩 $M = 0$ 时,在空心段墩底产生的转角为 δ_{MH} ,水平位移为 δ_H ;当空心段顶部作用单位弯矩 $M = 1$,水平力 $H = 0$ 时,在空心段墩底产生的转角为 δ_M ,水平位移为 δ_{HM} ,则可得此模式下约束的柔度系数矩阵,即

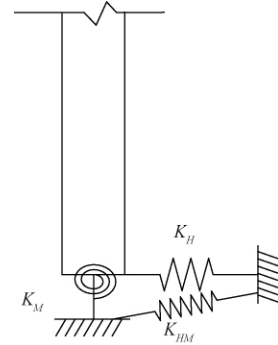


图2 连接处约束作用示意图

Fig.2 Schematic diagram of the constraint effect at the junction

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_H & \delta_{MH} \\ \delta_{HM} & \delta_M \end{bmatrix} \text{ 其中 } \delta_{HM} = \delta_{MH}.$$

求柔度系数矩阵的逆矩阵,可得刚度系数矩阵:

$$[K] = [\delta]^{-1} = \begin{bmatrix} K_H & K_{MH} \\ K_{HM} & K_M \end{bmatrix} = \frac{1}{\delta_M \delta_H - \delta_{MH} \delta_{HM}} \begin{bmatrix} \delta_M & -\delta_{HM} \\ -\delta_{MH} & \delta_H \end{bmatrix}.$$

高度为 h_2 的空心段桥墩所承受的荷载主要有墩身自重 q_2 ,桥面及挂篮自重及挂篮施工时悬臂端不平衡竖向力和弯矩,将其简化为施加于桥墩墩顶形心处竖向集中力 P_2 和水平推力 F ,如图3所示.

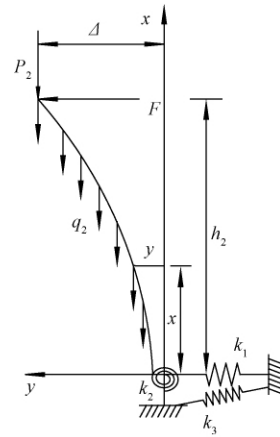


图3 空心段抗推刚度计算模式示意图

Fig.3 Calculation model schematic diagram of hollow sections' anti-pushing rigidity

假设墩身变形函数为 y_2 ,则墩身自重引起的势能:

$$V_1 = -\frac{1}{2} \int_0^{h_2} q_2 (h_2 - x) (y_2')^2 dx.$$

墩顶竖向集中力引起的势能为:

$$V_2 = -\frac{1}{2} \int_0^{h_2} P_2 (y_2')^2 dx;$$

墩顶水平集中力引起的势能为:

$$V_3 = -F y_2(h_2);$$

结构的应变能为: $U_1 = \frac{1}{2} \int_0^{h_2} E_2 I_2 (y_2'')^2 dx$,

式中, E_2 为空心段墩身弹性模量; I_2 为空心段墩身截面惯性矩.

墩底的约束弹簧产生的弹簧势能为:

$$U_2 = \begin{Bmatrix} y_2(0) & y_2'(0) \end{Bmatrix} \begin{bmatrix} K_H & K_{MH} \\ K_{HM} & K_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_2(0) \\ y_2'(0) \end{Bmatrix}.$$

则墩的总势能为:

$$\Pi_2 = U_1 + U_2 + V_1 + V_2 + V_3. \quad (4)$$

在弹簧 K_H 、 K_M 、 K_{HM} 约束下, 墩身将产生弹性弯曲变形、刚体转动和刚体平移三部分挠度. 文献[11]指出墩身的形函数应取墩底固结时的弹性变形与由转动弹簧所产生的刚体转动位移及刚体平动位移之和. 此处通过相应的等效, 对墩本身的变形函数采用三次多项式表示, 而刚体位移则用线函数表示, 则墩身变形函数可取:

$$y_2 = \left[\frac{3y_{21}}{h_2^3} \left(\frac{h_2 x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + y_{22} \frac{x}{h_2} + y_{23} \right] \mu_2, \quad (5)$$

其中, $y_{2i} (i = 1, 2, 3)$ 分别表示墩顶在单位水平推力下, 墩身弹性弯曲变形、刚体转动和刚体平移所引起的墩顶位移.

$$y_{21} = \frac{h_2^3}{3E_2 I_2} y_{22} = h_2^2 \delta_M + h_2 (-\delta_{HM}),$$

$$y_{23} = \delta_H + h_2 (-\delta_{MH}).$$

当 $x = h_2$ 时, 墩顶在单位水平推力下产生的位移 $y_2(h_2) = (y_{21} + y_{22} + y_{23}) \mu_2$ [12].

将公式(5)代入总势能公式(4), 得

$$\begin{aligned} \Pi_2 = & \frac{1}{2} (y_{21} + y_{22} + y_{23}) \mu_2^2 - \\ & \frac{P_2}{2h_2} \left(\frac{6}{5} y_{21}^2 + 2y_{21}y_{22} + y_{22}^2 \right) \mu_2^2 - \\ & \frac{q_2}{4} \left(\frac{3}{4} y_{21}^2 + \frac{3}{2} y_{21}y_{22} + y_{22}^2 \right) \mu_2^2 - \\ & F(y_{21} + y_{22} + y_{23}) \mu_2. \end{aligned}$$

由最小势能原理 $\frac{\partial \Pi_2}{\partial \mu_2} = 0$, 可得:

$$\mu_2 = [F(y_{21} + y_{22} + y_{23})] / \left[(y_{21} + y_{22} + y_{23}) - \frac{P_2}{h_2} \left(\frac{6}{5} y_{21}^2 + 2y_{21}y_{22} + y_{22}^2 \right) - \frac{q_2}{2} \left(\frac{3}{4} y_{21}^2 + \frac{3}{2} y_{21}y_{22} + y_{22}^2 \right) \right]$$

墩顶在单位水平推力下产生的位移为:

$y_2(h_2) = (y_{21} + y_{22} + y_{23}) \mu_2$, 再令 $F = 1$, 即可得空心段墩身的顺桥向抗推刚度:

$$k_2 = \left[(y_{21} + y_{22} + y_{23}) - \frac{P_2}{h_2} \left(\frac{6}{5} y_{21}^2 + 2y_{21}y_{22} + y_{22}^2 \right) - \frac{q_2}{2} \left(\frac{3}{4} y_{21}^2 + \frac{3}{2} y_{21}y_{22} + y_{22}^2 \right) \right] / (y_{21} + y_{22} + y_{23})^2.$$

笔者在分析空心段墩身的顺桥向抗推刚度时, 令 $P_2 = 0$, 则

$$k_2 = \frac{3E_2 I_2}{h_2^3 + 3E_2 I_2 (h_2^2 \delta_M - 2h_2 \delta_{HM} + \delta_H)} + \frac{q_2 (3y_{21}^2 + 6y_{21}y_{22} + 8y_{22}^2)}{8 (y_{21} + y_{22} + y_{23})^2}. \quad (6)$$

根据式(3)和式(6), 将桥梁计算参数代入公式, 使其在空心段和实心段交界处的抗推刚度基本保持相等, 就可以计算出实心段墩身的高度 h_1 .

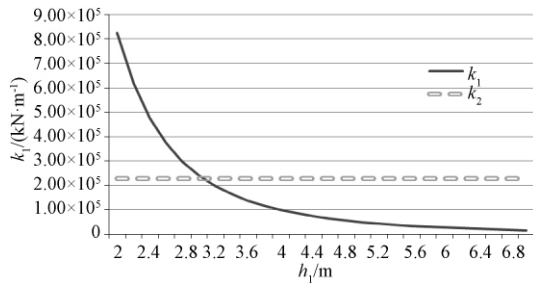
2 算例分析

为验证本文关于空心段墩和实心段墩顺桥向抗推刚度计算公式和本文分析思路的正确性和适用性, 下面以两个连续刚构桥梁为例, 两个算例为汨罗特大桥和柳沟大桥, 桥墩类型均为单肢空心薄壁墩. 通过式(3)和式(6)来计算实心过渡段的长度, 并和工程实例进行对比, 各桥计算参数如下. $E_{1,2} = 3.25 \times 10^4$ MPa, $\rho_{1,2} = 25$ kN/m³, 算例1: $A_1 = 32.5$ m², $A_2 = 12.54$ m², $h_1 = 5$ m, $h_2 = 52$ m, $I_1 = 67.71$ m⁴, $I_2 = 44.06$ m⁴; 算例2: $A_1 = 34$ m², $A_2 = 11.6$ m², $h_1 = 6$ m, $h_2 = 72$ m, $I_1 = 70.83$ m⁴, $I_2 = 35.35$ m⁴.

下面以算例1进行实心过渡段墩身长度的计算分析: 将算例1的计算参数代入式(3), 可得 k_1 和 h_1 的关系如图4实线所示.

由式(3)可知, 当 $h_1 = 0$ 时, k_1 趋于无穷, 可以认为墩底的抗推刚度为无穷大, 本文分析时认为承台刚度也为无穷大, 这样就可以认为承台和实心段墩底在连接处刚度实现了过渡. 从图4可以看出随着 h_1 的增大, k_1 在逐渐减小, 减小幅度越来越小. 根据算例1的实桥数据, 当 $h_1 = 5$ m 时, $k_1 = 4.91 \times 10^4$ kN/m.

文献[13]规定: 当墩顶承受单位横向作用力 $H = 1$ 和单位力矩 $M = 1$ 时, 该处水平位移 δ_H 和 δ_{HM} 及转角 δ_M 和 δ_{MH} 可按下列公式计算[14]:

图4 h_1 与 k_1 的关系示意图Fig. 4 Schematic diagram of the relationship between h_1 and k_1

$$\begin{cases} \delta_H = \frac{1}{\alpha^3 EI} \times \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2}, \\ \delta_{HM} = \delta_{MH} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \times \frac{A_2 D_1 - A_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2}, \\ \delta_M = \frac{1}{\alpha EI} \times \frac{A_2 C_1 - A_1 C_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中, A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 为系数, 在计算 δ_H 、 δ_M 、 δ_{HM} 和 δ_{MH} 时, 根据文献[13]第 P. 0. 8 条查取: α 为变形系数, 经计算 $\alpha = 0.188$ 。

文献[13]的系数取值是针对当桩基嵌固在基岩中, 而文中的 K_H 、 K_M 、 K_{HM} 是将空心段的墩底和实心段的上部连接部位进行了弹簧转变模拟。根据文献[13]的规定和边界模拟可得系数的取值如下: $A_1 = 0.999\ 74$, $A_2 = -0.002\ 6$, $B_1 = 0.499\ 96$, $B_2 = 0.999\ 48$, $C_1 = 0.125$, $C_2 = 0.499\ 94$, $D_1 = 0.020\ 83$, $D_2 = 0.124\ 99$ 。将数据代入式(7), 可得: $\delta_H = 4.38 \times 10^{-9}$, $\delta_{HM} = \delta_{MH} = 1.86 \times 10^{-9}$, $\delta_M = 2.47 \times 10^{-9}$, 然后令 $h_2 = 0$ 时, $k_2 = 2.28 \times 10^5$ kN/m, 为了保证实心段和空心段的刚度实现过渡, 令 $k_1 = k_2$, 如图4中虚线所示, 交点对应的横坐标为 $h_1 = 3.05$ m。

同理对算例2分析, 并将最后的分析结果和实桥数据进行对比, 对比结果见表1。

表1 实心段长度分析结果对比

Tab. 1 Comparison of the analytical results

算例	计算长度/m	实桥长度/m	误差/%
算例1	3.05	5.00	39
算例2	4.12	6.00	31

注: 误差 = 本文计算值和实桥数据差的绝对值/实桥数据。

由表1对比结果可知, 依据本文计算原理推导出来的实心段计算长度和实桥数据的误差分别为39%和31%, 误差较大的原因是工程实际中一般都是将实心段过渡长度选取的稍微偏大以方便施工及施工存在一定的偏差; 同时结果也满足

《云南省高速公路连续刚构桥梁关键技术指南》的取值范围规定, 这说明本文计算原理和分析过程的正确性。

为了得出单肢空心薄壁墩墩底实心段计算长度的取值范围, 通过 Midas Civil 软件对上述两个算例进行有限元分析。分析时保持桥墩高度不变, 改变实心段的长度来验算空心段墩和实心段墩交接处的应力, 计算对比结果见表2。

表2 交接部位应力对比结果

Tab. 2 Transition section stress comparison results

实心段长度/m	交接处应力比值		实心段长度/m	交接处应力比值	
	算例1	算例2		算例1	算例2
2.0	0.86	0.87	5.0	1.00	0.97
2.5	0.89	0.87	5.5	0.99	0.98
3.0	0.93	0.87	6.0	0.96	1.00
3.5	0.93	0.93	6.5	0.95	0.98
4.0	0.95	0.95	7.0	0.92	0.94
4.5	0.97	0.95	7.5	0.89	0.91

注: 表中数据为不同实心段取值长度与实桥实心段计算长度在交接处的应力比值。

由表2对比结果可得, 实心段计算长度取不同值时, 空心段和实心段交接部位的应力变化幅度不大, 根据统计整理的国内外近百座连续刚构桥的单肢空心薄壁墩的实心段过渡长度数据^[1], 可以得出目前大部分墩底实心段计算长度的取值范围为3~6 m, 因此根据本文的分析统计结果及已有的规定可以建议将墩底实心段计算长度取值范围3~6 m写入规范中, 具体设计参考时可以上下稍微浮动。同时分析结果也证明了在空心段的墩底和实心段的上部相连接处采用平动约束、转动约束和平转动耦合约束弹簧来模拟连接处的约束作用是可行的。综上所述, 笔者推导出的墩底实心段计算长度可以指导大跨连续刚构桥的设计及施工。

3 结论

(1) 本文的计算原理和单肢空心薄壁墩墩底实心段计算长度的公式是正确的, 对大跨连续刚构桥的设计及施工具有指导意义;

(2) 在计算墩底实心段计算长度时, 将空心段和实心段连接处用平动约束、转动约束和平转动耦合约束弹簧来模拟相互之间约束作用是可行的;

(3) 建议将单肢空心薄壁墩墩底实心段计算长度取值范围3~6 m写入规范中来指导高墩的设计, 具体设计参考时可以上下稍微浮动。

参考文献:

- [1] 李艺林,杨秀荣,刘英. 连续刚构桥高跨比参数线性关系分析[J]. 河南城建学院学报, 2016, 25(6): 26-30.
- [2] 李杰,陈彬. 连续刚构桥顶推力计算与优化分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 85-89.
- [3] KHODAIR A, HASSIOTI S. Rigidity of abutments in integral abutment bridges [J]. Structure and infrastructure engineering, 2013, 9(2): 151-160.
- [4] 孙立刚. 柔性墩墩顶抗推刚度的计算[J]. 北方交通, 2012(2): 82-84.
- [5] 张永水,曹淑上. 连续刚构桥薄壁墩抗推刚度计算方法研究[J]. 中外公路, 2006, 26(3): 144-147.
- [6] 刘志峰,孙学先,杨霞林. 考虑地基变形影响的高墩柱抗推刚度的解析方法[J]. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(4): 63-66.
- [7] 陈竹昌,刘利民,王建华. 承台刚度的研究[J]. 同济大学学报, 1999, 27(1): 29-33.
- [8] 卢建峰,蒋永生,梁书亭. 依据刚性要求确定承台厚度[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊): 375-377.
- [9] 王新玲,杜琳,黄伟东. 混合配筋预应力混凝土管桩抗弯刚度模型研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(6): 80-84.
- [10] 邬晓光,李艺林,贺攀,等. 基于能量法分析大跨连续刚构桥高墩稳定性[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(2): 290-295.
- [11] 邬晓光,李艺林,何启龙,等. 基于频率合成法分析大跨连续刚构桥高墩横向振动基频[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 213-218.
- [12] 白青侠,宋一凡. 高桥墩几何非线性能量法[J]. 西安公路交通大学学报, 2001, 21(2): 50-52.
- [13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG/D 63—2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [14] 宁明哲,李德建,邹振兴. 变截面双肢薄壁高墩基础约束刚度动力识别方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(6): 74-78.

Solid Sections' Calculation Length Analysis of Continuous Rigid Frame Bridge Hollow Single Thin-walled Pier

LI Yilin, HUANG Xuqin, WU Xiaoguang

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Hollow thin-walled piers were widely used in continuous rigid frame bridges with high piers mostly use, and the bottom of the piers should have appropriate solid sections in order to ensure the stiffness transition of the cap and thin-wall pier. At present, there was no literature on the design length of solid section, and the design was based on engineering experiences to select, which had great limitations. In this paper, the transfer length of the solid section was firstly analyzed by calculating the anti-push rigidity of bridge in axial direction of the single thin-wall pier in the hollow section; The solid section, and the constraint effect at the connection point between the hollow section and the solid section was simulated by exerting the translational constraint, the rotational constraint and the flat rotation coupling constraint springs. Finally, engineering examples were given to verify the correctness and applicability of the analysis thought and derivation process. The findings suggested that the solid section at the bottom of the piers' calculation length range could take 3-6 m, and could be written into the specification to guide the design and construction of the high piers.

Key words: continuous rigid frame bridge; hollow thin walled pier; stiffness transition; anti push rigidity; calculation length

《郑州大学学报(工学版)》征稿简则

1. 刊登内容

本刊主要刊登机械、电气、信息、水利、化工、土木、交通、材料、环境工程等学科领域的学术论文。

2. 投稿要求

(1) 原创性论文,有创新性,主题明确、结构完整、论据可靠、论证合理、层次分明、逻辑严密、文字精炼、可读性强。

(2) 投稿具有合法性,不存在抄袭、剽窃、侵权等不良行为;来稿未在任何正式出版物上公开发表过,不允许一稿多投。

(3) 请严格遵守国家有关保密规定,不泄漏国家机密。

(4) 稿件请用 Word 编辑排版,若系基金资助课题,请在首页地脚处注明(包括项目编号)。

(5) 文稿格式要求规范、项目齐全,按顺序给出:题目(一般不超过 20 字),作者(包括工作单位含二级机构、邮编),摘要(包括研究的目的、方法、结果和结论四要素,200~300 字,内容应具体、准确,切忌空洞和主观评价),关键词(3~8 个),中图分类号,正文(包括图、表,6000 字左右为宜),参考文献,英文信息(摘要与中文摘要一一对应,包括英文题目、作者姓名、单位、地址、邮编及关键词),并在首页地脚处注明第一作者和/或通信作者简介(包括出生年、性别、籍贯、职称、学位、研究方向、电子邮箱和电话)。

(6) 物理量的符号和法定计量单位必须符合国家标准、国际标准。例如,物理量的符号用斜体,单位要用正体;矩阵、向量、矢量、张量等,用黑斜体表示。

(7) 文中图、表只附必要的,图、表应有中、英文图题和表题,小图、表宽度不超过 75 mm,大图、表宽度 120~150 mm;插图的纵、横坐标的标目(物理量的符号和单位)要齐全;表格采用三线表。应按标准方式标注,如:时间的标注方式应为 t/s 或 t/min 或 t/h ,速度的标注方式应为 $v/(m \cdot s^{-1})$ 。

(8) 参考文献须在文中标引,并按在文中引用的次序排序;按照 GB/T 7714—2015 著录:

期 刊 [序号] 作者. 题名[J]. 刊名,年,卷(期):起止页码.

专 著 [序号] 作者. 题名[M]. 出版地:出版社,出版年:起止页码.

学位论文 [序号] 作者. 题名[D]. 保存地:保存单位(包括二级学院/系),年份.

论文集 [序号] 作者. 题名[C]. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

析出文献 [序号] 作者. 题名[C]//源文献. 出版地:出版者,出版年:起止页码.

标 准 [序号] 起草单位. 标准编号 标准名称[S]. 出版地:出版社,出版年.

专 利 [序号] 专利所有者. 题名:专利号[P]. 日期.

电子文献 [序号] 作者. 电子文献题名[J/OL]. 刊名,年,卷(期):起止页码. 发表或更新日期/引用日期(任选). 电子文献的出版或可获得地址.

3. 投稿方法

请登录《郑州大学学报(工学版)》网站(<http://gxb.zzu.edu.cn/>)进行在线投稿(需要先注册)。同一篇稿件只需投稿一次,以免系统给出多个编号,如果要修改请登录按照提示提交修改稿。若需查询稿件处理状况,请通过“作者登录”进行查询。

4. 作者须知

本刊实行三审制,双盲式同行评议。一般审稿周期为 6 周左右,论文刊发以后给作者赠送当期样刊。本刊已经加入“中国知网”、“万方数据——数字化期刊群”等数据库和检索机构,所付作者稿酬中已包含其著作权使用费,不再另付。如作者不同意,请在来稿时说明,本刊将做适当处理。本刊编辑部使用“科技期刊学术不端文件检测系统”,请作者规范投稿,维护自身及期刊的良好声誉,如果造成“重复发表”,将择期发出撤消论文通告,并在今后 5 年内拒收来稿,通报作者单位,取消论文效用。

5. 联系地址

通信地址:(450001) 郑州市高新区科学大道 100 号郑州大学学报(工学版)编辑部

联系电话:0371—67781276 / 67781277, E-mail: gxb@zzu.edu.cn

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 (Gongxueban)
双月刊 (1980年创刊)
第40卷 第3期 总第165期 2019年5月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)
Bimonthly (Started in 1980)
Vol.40 No.3 Sum No.165 May10, 2019

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 李燕燕
副 主 编 梁 静
印刷单位 山西同方知网印刷有限公司
发行范围 国内外公开发行
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 LI Yanyan
Executive Chief Editor LIANG Jing
Printed by Shanxi Tongfang Knowledge Network 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: 20.00元

邮发代号: 36-232