

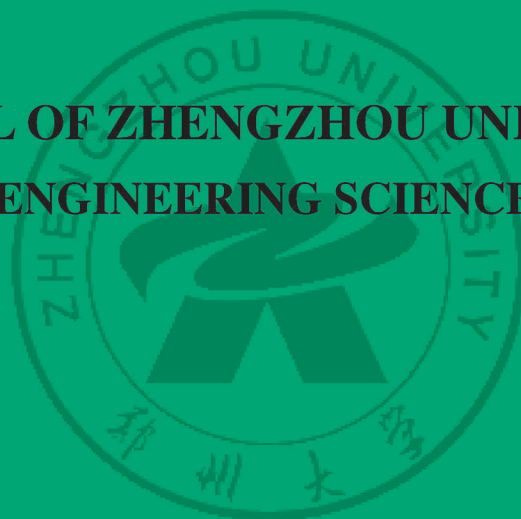
- 全国中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

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

# 郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY  
ENGINEERING SCIENCE



## 2020.3

第41卷 第3期  
Vo1.41 No.3  
2020年5月出版

ISSN 1671-6833



# 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)

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)

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)

## 目 次

### 智能信息工程

- 基于格兰杰因果的效应性连接分析方法综述 ..... 尚志刚, 沈晓阳, 李蒙蒙, 万 红( 1 )
- 基于双维度中文语义分析的食品领域知识库问答 ..... 左 敏, 徐泽龙, 张青川, 毕铭文( 8 )
- 基于自适应差分演化算法的光伏模型参数提取 ..... 李水佳, 龚文引( 14 )
- MKFCM 算法在遥感影像分类中的应用研究 ..... 张成才, 李 飞, 王艳梅, 罗蔚然( 20 )
- 具有双边丢包和混合时延的 Delta 算子系统  $H_\infty$  滤波 ..... 张端金, 郭 璐( 26 )
- 基于改进核相关滤波的长时目标跟踪算法 ..... 陈丽萍, 王铭羽, 杨文柱, 王思乐, 陈向阳( 32 )

### 机电工程

- 基于热仿真的动力电池箱结构紧凑化参数优化 ..... 张三川, 苗帅宾( 37 )
- 基于 ADAMS 的平底从动件凸轮轮廓曲线设计 ..... 徐一村, 张 磊( 42 )
- GW46-126 高压隔离开关耐温性试验研究 .....  
..... 邱正新, 刘本学, 张赛鹏, 李付永, 敖 明, 冯世涛, 张 任( 47 )
- 齿面残余应力对齿轮轮齿弯曲疲劳寿命的影响分析 ..... 刘竹丽, 陈 赞, 王祝新( 53 )
- 轴与齿轮过盈配合参数对齿形的影响研究 ..... 周 洋, 徐改姣, 李大磊( 57 )

### 水利与环境工程

- 基于 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大桥人工岛建设风险分析 .....  
..... 李宗坤, 王 特, 葛 巍, 宋子元( 62 )
- 母岩变形特性差异对堆石料力学性质的影响 ..... 韩华强, 陈生水, 王占军, 郑澄锋, 傅 华( 67 )
- 基于拉丁超立方抽样的改进型多链 DRAM 算法求解地下水污染反问题 .....  
..... 张双圣, 强 静, 刘汉湖, 刘喜坤, 孙韶华( 72 )

### 土木与交通工程

- 含水率及应变速率对冻结粉质黏土强度特性影响 ..... 张雅琴, 杨 平, 江汪洋, 张 婷, 陈 亮( 79 )
- 高压变电站构架避雷针结构承载力分析与加固研究 ..... 王朝华, 赵桂峰, 刘 冉, 陈怡文( 85 )
- 基于累积前景理论的组合出行交通分配模型 ..... 张雪妍, 贺 锋( 91 )

**CONTENTS**

**【Intelligent Information Engineering】**

- Review of the Analysis Methods of Effective Connectivity Based on Granger Causality .....  
..... **SHANG Zhigang , SHEN Xiaoyang , LI Mengmeng , WAN Hong ( 1 )**
- A Question Answering Model of Food Domain Knowledge Bases with Two-Dimension Chinese Semantic Analysis .....  
..... **ZUO Min , XU Zelong , ZHANG Qingchuan , BI Mingwen ( 8 )**
- Parameter Extraction of Photovoltaic Models Based on Adaptive Differential Evolution Algorithm .....  
..... **LI Shuijia , GONG Wenying ( 14 )**
- Remote Sensing Image Classification Based on Multi-core Fuzzy C-means Clustering .....  
..... **ZHANG Chengcai , LI Fei , WANG Yanmei , LUO Weiran ( 20 )**
- $H_{\infty}$  Filtering for Delta Operator Systems with Two-channel Packet Dropouts and Mixed Delays .....  
..... **ZHANG Duanjin , GUO Lu ( 26 )**
- An Improved Kernelized Correlation Filter for Long-term Target Tracking .....  
..... **CHEN Liping , WANG Mingyu , YANG Wenzhu , WANG Sile , CHEN Xiangyang ( 32 )**

**【Mechanical and Electrical Engineering】**

- Compact Design Parameters Optimization of Power Battery Box Structure in Electric Vehicle Based on Thermal Simulation ...  
..... **ZHANG Sanchuan , MIAO Shuaibin ( 37 )**
- Design of Cam Profile Curve of Flat Bottom Follower Based on ADAMS ..... **XU Yicun , ZHANG Lei ( 42 )**
- Experimental Study on Temperature Resistance of GW46-126 High Voltage Isolation Switch .....  
..... **QIU Zhengxin , LIU Benxue , ZHANG Saipeng , LI Fuyong , AO Ming , FENG Shitao , ZHANG Ren ( 47 )**
- The Influence of Residual Stress of Tooth Surface on Bending Fatigue Life of Gear Tooth .....  
..... **LIU Zhuli , CHEN Yun , WANG Zhuxin ( 53 )**
- Research on the Influence of Interference Fit Parameters of Shaft and Gear on Tooth Profile .....  
..... **ZHOU Yang , XU Gaijiao , LI Dalei ( 57 )**

**【Water Conservancy Engineering and Environmental Engineering】**

- Risk Analysis of Artificial Island Construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Based on WBS-RBS and AHP Methods ...  
..... **LI Zongkun , WANG Te , GE Wei , SONG Ziyuan ( 62 )**
- Influence of Deformation Characteristics of Mother Rock on Mechanical Properties of Rockfill Materials .....  
..... **HAN Huaqiang , Chen Shengshui , WANG Zhanjun , ZHENG Chengfeng , FU Hua ( 67 )**
- Improved Multi-chain DRAM Algorithm Based on Latin Hypercube Sampling for Inverse Problems of Underground Water Pollution  
..... **ZHANG Shuangsheng , QIANG Jing , LIU Hanhu , LIU Xikun , SUN Shaohua ( 72 )**

**【Civil Engineering and Traffic Engineering】**

- Effect of Water Content and Strain Rate on the Strength Characteristics of Frozen Silty Clay .....  
..... **ZHANG Yaqin , YANG Ping , JIANG Wangyang , ZHANG Ting , CHEN Liang ( 79 )**
- Bearing Capacity and Reinforcement Analysis of a High Voltage Substation Framework with Lightning Rods .....  
..... **WANG Chaohua , ZHAO Guifeng , LIU Ran , CHEN Yiwen ( 85 )**
- Traffic Assignment Model with Combined Modes Based on Cumulative Prospect Theory .....  
..... **ZHANG Xueyan , HE Feng ( 91 )**

文章编号:1671-6833(2020)03-0001-07

# 基于格兰杰因果的效应性连接分析方法综述

尚志刚<sup>1,2</sup>, 沈晓阳<sup>1,2</sup>, 李蒙蒙<sup>1,2</sup>, 万红<sup>1,2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 河南省脑科学与脑机接口技术重点实验室 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 基于格兰杰因果关系的效应性连接分析方法目前在多脑区神经信号分析中得到了越来越多的应用。首先系统介绍了此类方法中常用代表性算法的计算原理与功能特点, 然后对实际应用该方法时应注意的要点进行了总结, 最后以广义偏定向相干的改进算法为例, 展示了在实际脑电数据集上的应用效果。

**关键词:** 格兰杰因果; 效应性连接; 神经信号; 信息流

中图分类号: R318 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.014

## 0 引言

生物的感知与认知普遍依赖不同脑区间的相互作用, 深入了解多个脑区间的作用关系有助于阐明正常或病理状态下特定脑功能的神经机制<sup>[1]</sup>。目前对大脑不同脑区间交互性连接关系研究主要有3类分析视角: 结构连接、功能性连接和效应性连接。结构连接一般指解剖连接的网络, 研究不同的大脑结构之间如何通过直接或间接的神经纤维通路产生相互影响, 常采用体内侵入性同位素标记示踪技术或无创的磁共振扩散加权成像方法; 功能性连接是指大脑信息处理过程中各区域间的神经活动存在时间上的相关性, 通过相关性度量来探究脑区间的功能联系, 常用的方法有时域相关、谱相干、锁相值等<sup>[2]</sup>; 效应性连接被定义为一个神经系统对另一个神经系统施加的直接或间接影响, 侧重描述大脑各区域间的动态定向相互作用与因果关系<sup>[3]</sup>。考虑到不同脑区间的交互作用是定向的, 效应性连接分析越来越受到研究者的关注, 出现了多种典型算法, 在使用时应对其原理与特点有所了解, 才能合理选择和有效使用。

效应性连接可直接基于指定因果关系的模

型估计, 也可从数据驱动的角度直接从信号本身估计, 其中基于格兰杰因果关系(Granger causality, GC)派生出的一类效应性连接分析的方法得到了广泛应用。代表性算法包括: 定向传递函数(directed transfer function, DTF)、直接定向传递函数(direct DTF, dDTF)、偏定向相干(partial directed coherence, PDC)、广义偏定向相干(generalized PDC, GPDC)。在对包括脑电图(electroencephalogram, EEG)、脑磁图(magnetoencephalography, MEG)、局部场电位(local field potential, LFP)、锋电位(spike)、功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)等不同模态与尺度的神经数据分析中取得了良好效果<sup>[4-8]</sup>。首先对此类常用算法的基本原理及其特点进行了系统介绍, 接着对实际应用中的模型拟合、非平稳数据处理、阈值估计等注意事项进行总结, 最后以较具代表性的广义正交化的偏定向相干(generalized orthogonalized PDC, GOPDC)算法为例, 展示了此类方法的应用效果。

## 1 方法原理及功能特性

### 1.1 二元因果连接分析

格兰杰因果的基本思想可追溯到维纳提出

收稿日期: 2019-06-10; 修订日期: 2020-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61673353, U1304602)

作者简介: 尚志刚(1975—), 男, 甘肃兰州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事生物医学信号分析与模式识别研究。

通信作者: 万红(1964—), 女, 辽宁沈阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事生物医学信号分析与模式识别研究,

E-mail: wanhong@zzu.edu.cn.

的概念<sup>[9]</sup>:若对时间序列  $x(t)$  的预测可以通过纳入时间序列  $y(t)$  的信息而得到改进,则表明  $y(t)$  会对  $x(t)$  产生因果影响。然而维纳的概念缺乏能够实际执行的机制,格兰杰后来在线性回归模型的背景下将该预测思想进行了形式化表示:

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{k=1}^p A_{11}(k) x(t-k) + \sum_{k=1}^p A_{12}(k) y(t-k) + \varepsilon_1(t); \\ y(t) = \sum_{k=1}^p A_{21}(k) x(t-k) + \sum_{k=1}^p A_{22}(k) y(t-k) + \varepsilon_2(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{k=1}^p \tilde{A}_{11}(k) x(t-k) + \tilde{\varepsilon}_1(t); \\ y(t) = \sum_{k=1}^p \tilde{A}_{22}(k) y(t-k) + \tilde{\varepsilon}_2(t), \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p$  为模型阶数;  $A_{11}$ 、 $A_{12}$ 、 $A_{21}$ 、 $A_{22}$  和  $\tilde{A}_{11}$ 、 $\tilde{A}_{22}$  分别为回归模型式(1)与自回归模型式(2)两种情形下模型中的系数;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\tilde{\varepsilon}_1$ 、 $\tilde{\varepsilon}_2$  为这两种情形下模型中各个时间序列对应的预测误差。

与自回归模型(2)中  $x(t)$  的误差项相比,若回归模型(1)中  $x(t)$  的预测误差项  $\varepsilon_1$  的方差显著减小,则认为时间序列  $y(t)$  对  $x(t)$  有因果影响。结合式(1)和(2)中误差项的方差可对因果影响进行量化,量化后的值称为格兰杰因果指数 GCI(Granger causality index),可表示为<sup>[10]</sup>:

$$GCI_{y \rightarrow x} = \ln \frac{\text{var}(\tilde{\varepsilon}_1(t))}{\text{var}(\varepsilon_1(t))}, \quad (3)$$

同理也可判断是否存在反方向因果影响的问题。

GCI 直接在时域度量因果关系,Geweke 首次提出二元情况下的频域格兰杰因果关系。对式(1)两端进行傅里叶变换(Fourier transform, FT):

$$\begin{bmatrix} x(w) \\ y(w) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(w) & H_{12}(w) \\ H_{21}(w) & H_{22}(w) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1(w) \\ \varepsilon_2(w) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

依据式(4)可将两通道间的谱矩阵分解为:

$$S(w) = H(w) \Sigma H^*(w), \quad (5)$$

式中:  $\Sigma$  为式(1)中二者残差项的协方差矩阵;  $*$  表示该矩阵的复共轭转置。

结合式(4)与式(5)将不同频率  $w$  下序列  $y(t)$  对  $x(t)$  产生的因果影响度量定义为<sup>[11]</sup>:

$$GC_{y \rightarrow x}(w) =$$

$$\ln \left( \frac{S_{xx}(w)}{S_{xx}(w) - (\Sigma_{yy} - (\Sigma_{xy}^2 / \Sigma_{xx})) |H_{12}(w)|^2} \right), \quad (6)$$

式中:  $S_{xx}$  为序列  $x(t)$  自身的功率谱;  $\Sigma_{xx} = \text{var}(\varepsilon_1(t))$ ,  $\Sigma_{yy} = \text{var}(\varepsilon_2(t))$ ,二者之间的协方差为  $\Sigma_{xy} = \text{cov}(\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t))$ 。

在特定频率  $w$  下,若序列  $y(t)$  对  $x(t)$  无因果影响,则对应序列  $x(t)$  自谱成分分解中不包含序列  $y(t)$  的影响  $GC_{y \rightarrow x}(w)$  为 0。反之,  $GC_{y \rightarrow x}(w)$  值越大,表明在此频率成分序列  $y(t)$  对  $x(t)$  的影响越大。同理,可定义序列  $x(t)$  对  $y(t)$  在不同频率  $w$  下产生的因果影响<sup>[12]</sup>。

## 1.2 多元因果连接分析

格兰杰因果关系最初只涉及二元概念,格兰杰本人在后续研究中也指出<sup>[13]</sup>:只有在没有其他变量影响这一二元判定过程的情况下,因果关系原则才成立。然而多通道神经信号之间通常存在复杂的相互作用,对信号进行两两分析无法有效区分直接和间接效应而可能导致错误的结论<sup>[14]</sup>。为分析多通道神经信号中的整体多元结构,主要采用多变量自回归模型(multivariate autoregressive, MVAR) 解决这一问题。

用  $p$  阶 MVAR 模型表示一组  $n$  通道同步记录的信号  $X(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$ :

$$X(t) = \sum_{r=1}^p C(r) X(t-r) + E(t), \quad (7)$$

式中:  $C(r)$  为滞后  $r$  时的系数矩阵,大小为  $n \times n$ ;  $E(t) \in \mathbf{R}^n$  为一个均值为零的多变量高斯白噪声序列。

系数矩阵  $C$  包含的因果耦合信息可以采用时域或频域分析提取,鉴于大脑中普遍存在的节律与振荡活动,以下重点介绍所涉及的频域分析方法。对 MVAR 模型两端同时进行 FT 可得到对应关系:

$$C(w) = I - \sum_{r=1}^p C(r) e^{-iwr}, \quad (8)$$

$$E(w) = C(w) X(w), \quad (9)$$

$$X(w) = C^{-1}(w) E(w) = H(w) E(w), \quad (10)$$

式中:  $I$  为单位矩阵;  $H(w)$  为系统转移矩阵。

基于  $C(w)$  或  $H(w)$ ,国外学者提出了多种具有不同功能特点的多元因果连接分析方法。

### 1.2.1 DTF

基于 MVAR 模型中转移矩阵  $H(w)$  的性质, Kaminski 等<sup>[15]</sup>在 1991 年提出了 DTF 的分析方法:

$$DTF_{j \rightarrow i}^2(w) = \frac{|H_{ij}(w)|^2}{\sum_{m=1}^n |H_{im}(w)|^2}, \quad (11)$$

式(11)为广泛应用的归一化形式的  $DTF(w)$  取值范围为  $[0, 1]$ 。它描述了在频率为  $w$  时通道  $j$  对通道  $i$  产生的影响,从信息传递角度可理解为通道  $j$  流入通道  $i$  的信息量占所有通道流入通道  $i$  信息量的比例。 $DTF$  无法区分两通道信号间所有直接与间接因果连接的关系。

### 1.2.2 dDTF

为区分直接和间接的交互影响, Korzeniewska 等<sup>[16]</sup>在2003年将重新定义的全频定向传递函数(full-frequency DTF, fDTF)与偏相干(partial coherence, pCOH)相结合提出了 dDTF,用于刻画多通道情形下通道间的直接因果连接关系:

$$dDTF_{j \rightarrow i}(w) = fDTF_{j \rightarrow i}(w) pCOH_{ij}(w). \quad (12)$$

fDTF 侧重在全频段分析确定通道  $j$  对  $i$  在不同频带上施加的因果作用,而 pCOH 在多通道情况下分析两通道间的无向耦合,排除了其他通道的影响。

### 1.2.3 PDC

对以上基于 DTF 及其改进方法的计算过程都需对矩阵求逆,带来的计算精度问题会对结果造成一定影响。2001年 Baccala 等基于系数矩阵  $C(w)$  的角度对 pCOH 进行因式分解,将 pCOH 的思想进行扩展提出了 PDC 分析方法<sup>[17]</sup>:

$$PDC_{j \rightarrow i}^2(w) = \frac{|C_{ij}(w)|^2}{\sum_{m=1}^n |C_{mj}(w)|^2}. \quad (13)$$

PDC 度量了通道情形下两两通道之间的直接因果连接关系,从信息传递角度可理解为从通道  $j$  流出到通道  $i$  的信息量占通道  $j$  所有流出信息量的比例。

### 1.2.4 GPDC

考虑到不同通道间数据幅度量级不同,或由信噪比不同造成模型拟合后各通道误差项处于幅度量级不同时, PDC 值会受到较大影响。Baccalá 等<sup>[18]</sup>为改善该问题在2007年提出了 GPDC 分析方法:

$$GPDC_{j \rightarrow i}^2(w) = \frac{\sum_{ii} \frac{1}{2} |C_{ij}(w)|^2}{\sum_{m=1}^n \sum_{ii} \frac{1}{2} |C_{mj}(w)|^2}. \quad (14)$$

GPDC 通过引入目标通道对应的误差方差项

进行量级的规范,大大改善了 PDC 的性能,成为多元因果连接分析方法中的代表。

### 1.2.5 GOPDC

当采用以上方法对神经信号分析时,不可避免会受到容积传导效应的影响,多个潜在的信号源因距离或传导介质差异会导致各通道不同程度的混叠, MVAR 模型参数对这种潜在的涂抹效应较敏感,可能导致电极间出现虚假连接<sup>[19]</sup>。研究表明:这种虚假连接能通过正交化信号功率进行消除,而且谱相干方法中虚部不受容积传导伪迹的影响<sup>[20]</sup>。Omidvarnia 等<sup>[21]</sup>结合这两种处理方式在2014年对 PDC 作出了进一步改进,提出正交化的偏定向相干(orthogonalized PDC, OPDC),并借鉴 GPDC 推导,进一步提出了 GOPDC。

$$GOPDC_{j \rightarrow i}(w) = \frac{1}{\sum_{ii}^2} \cdot \frac{|Real(C_{ij}(w))|}{\sqrt{\sum_{m=1}^n \frac{1}{\sum_{ii}^2} |C_{mj}(w)|^2}} \cdot \frac{|Imag(C_{ij}(w))|}{\sqrt{\sum_{m=1}^n \frac{1}{\sum_{ii}^2} |C_{mj}(w)|^2}}. \quad (15)$$

该方法是在 MVAR 模型参数水平上进行正交化, Omidvarnia 通过模型仿真进行方法对比,结果表明, GOPDC 在减轻容积传导效应伪迹影响的同时,仍能抑制由通道误差项幅度量级不同而产生的影响。

## 2 实际应用需考虑的问题

实际应用中,模型拟合、非平稳数据的分析和非零值对应阈值的估计是需要注意的问题。

### 2.1 模型拟合

#### 2.1.1 数据平稳性判断

以上因果连接分析方法均要求数据为“弱平稳”或协方差平稳<sup>[22]</sup>,对数据平稳性一般采取单位根检验。但由于最终目的是用数据拟合对应的模型,因此数据拟合的角度更适用,首先要求 MVAR 模型中系数矩阵  $C$  平方可和<sup>[23]</sup>:

$$\sum_{r=1}^p \|C(r)\|^2 < \infty, \quad (16)$$

若 MVAR 模型系数矩阵  $C$  进一步满足<sup>[24]</sup>:

$$\det(I - \sum_{r=1}^p C(r)z^r) \neq 0, \quad (17)$$

将此条件进一步简化可表示为:

$$M = \begin{bmatrix} C(1) & C(2) & \cdots & C(p) \\ I_{n \times n} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & I_{n \times n} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式(18)中矩阵  $M$  为系数矩阵  $C$  的增广矩阵。

若矩阵  $M$  所有特征值的模均小于 1, 则认为模型系数表征了协方差平稳的过程。在  $M$  的构造过程中涉及模型系数矩阵  $C$  的求取, 目前对 MVAR 模型系数矩阵  $C$  及误差协方差  $\Sigma$  的估计算法较多, 其中 Nuttall-Strand 方法在不同数据集上均表现更好<sup>[25]</sup>。

### 2.1.2 模型阶数选择

MVAR 模型阶数  $p$  的选取非常重要, 若  $p$  过小, 模型不足以包含原数据的信息, 反之会增加计算量, 同时也易造成过拟合。最优阶数的选取常常依据一些常用的准则, 包括 Akaike 信息准则 (Akaike information criterion, AIC) 与贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC)。已有研究表明, BIC 准则比 AIC 准则更适合时间序列分析<sup>[22]</sup>。此外, 估计理论要求已知样本数量大于待估计未知参数数量<sup>[26]</sup>, 因此  $p$  也存在上限, 假设所分析数据的长度为  $L$ , 则要求  $nL \geq n^2 p$ ; 否则 MVAR 模型参数估计误差将增大, 导致模型合理性检验不能通过。

### 2.1.3 模型合理性检验

模型合理性检验是为确定选定阶数后的模型是否对原数据进行充分地拟合, 一般从一致性、稳定性和残差白噪声性三方面进行检验。

模型一致性检验描述了原数据中所存在的相关结构能被模型表征的程度<sup>[27]</sup>, 对原始数据和模型产生的数据的所有通道分别做自相关与互相关处理, 用  $R_r$  和  $R_s$  分别表示真实数据和模型产生数据得出的相关性向量, 则一致性百分比可表示为:

$$PC = \left( 1 - \frac{|R_s - R_r|}{|R_r|} \right) \times 100\%。 \quad (19)$$

当  $PC$  值大于 80% 时, 表示模型充分体现了原始数据的相关结构<sup>[23]</sup>。

模型稳定性与数据平稳性判断中所要求的条件相同, 若系数矩阵  $C$  构成的增广矩阵  $M$  所有特征值的绝对值均小于 1, 则认为拟合模型稳定。

模型残差白噪声检验的目的是为了判断模型残差中是否仍存在一些未被描述的相关结构, 若模型充分拟合了原始数据, 则残差项近似于白噪声。一般采用 Durbin-Watson 统计检验<sup>[28]</sup>对模型的残差  $E(t)$  进行相关性判断。

以上三方面的检验均满足的情况下, 由数据所拟合的 MVAR 模型才可用于下一步的因果分析。

## 2.2 非平稳数据处理

实际应用中 EEG、LFP 等神经数据多是高度非平稳的, 且与脑区间因果连接关系的变化有关<sup>[22]</sup>, 而对数据进行“平稳化”操作的方式往往会破坏其中所蕴含的结构, 得出的结果往往与所采取的处理方式有关, 具有一定的虚假性。为研究非平稳数据中所蕴含的时变因果连接变化, 目前时变 MVAR 模型已成为主流, 其中应用较广泛的两种方式包括<sup>[29]</sup>: 数据截段滑窗法和状态空间法。

数据截段滑窗法最早由 Ding 等<sup>[27]</sup>在 2000 年提出, 主要策略是认为原数据在足够小的时间窗口内近似平稳, 从而对原数据进行高度重叠的窗口截段, 可从这些高度重叠的数据段内得到随时间变化的系数矩阵  $C$  等其他参数, 进而得到随时间变化的因果连接关系的度量。该方法需要考虑数据窗口大小的选择, 一般依据以下 4 个原则进行折中<sup>[30]</sup>:

- (1) 数据截段的同时保证窗口内数据局部平稳;
- (2) 数据截段重叠滑窗本质上为时域平滑操作, 窗口大小选择应在考虑平滑性的同时保留原数据中动态变化的特征;
- (3) 保证已知数据的数量大于模型中所需估计未知参数的数量;
- (4) 数据段对应的时间间隔需大于生理意义下该过程动态变化所预期的最大时间间隔。

状态空间法从参数自适应估计角度出发, 对数据是否平稳并无要求, 其实质是将时变 MVAR 模型参数用状态空间形式进行表示, 然后结合数据采用卡尔曼滤波算法进行参数自适应估计。Wan 等<sup>[31]</sup>在 2003 年提出的对偶扩展卡尔曼滤波 (dual extended Kalman filter, DEKF) 算法实现了上述过程, 该方法采用了两个相互交错的状态空间方程, 分别用于系统状态估计和参数估计, 详细推导过程可见 Omidvarnia 等<sup>[32]</sup>2011 年发表的论文。采用状态空间方法可估计出时变 MVAR 模型中不同时刻的系数矩阵  $C$  等参数, 由此推导出的多种时变因果连接关系度量更能体现连接关系的瞬时变化。

### 2.3 阈值估计问题

实际应用中的干扰因素会导致不存在真正相互作用的通道间的因果连接度量在某些频率上出现非



零情况 因此估计不同频率下因果连接关系度量阈值具有十分重要的现实意义。

阈值估计一般通过统计检验方法来解决,首先,基于无相互因果作用的零假设,计算通道间不同频率下的因果连接关系值的经验分布,然后根据得出的置信区间上限确定出所需阈值,其中基于原数据生成替代数据来确定阈值是国内外学者广泛采用的方式。由于不同通道间因果连接关系的存在与其相位有关,生成替代数据的基本思想是将原数据对应的相位随机化,即破坏原数据间相位的依赖关系<sup>[33]</sup>。替代数据的生成步骤主要包括:①将原数据 FT 转换到频域;②对各频率对应的相频部分施加随机扰动;③通过傅里叶逆变换得到替代数据。替代数据产生方式因牵涉到傅里叶变换也被称为 FT surrogate,其产生的替代数据仅打乱了原数据间的相位信息,但同时保留了时域和幅频特征,十分适合因果连接阈值估计。

考虑到非任务态与任务态脑活动中存在因果连接模式的区别,利用两种状态下通道间因果连接关系在统计意义上的差异性程度也可达到去阈值的效果<sup>[21]</sup>。该方式比 FT surrogate 所需的计算

量少,且可以消除因大脑自发活动产生的因果连接关系的影响,并突出差异部分,去阈值效果更好,但该方式的应用受限于实验范式中对照组的设置,其通用性不如 FT surrogate 方法。

### 3 实际数据集应用

算法示例选择来自于 Delorme 等<sup>[34]</sup> 2002 年研究视觉处理过程中脑电动力学变化的 EEG 数据。随机抽选 5 位受试者看到图像中包含动物并作出正确反应时的脑电数据,依据文中确定的偶极子空间位置及生理视觉通路相关信息,选取 F3、C3、T5、O1、F4、C4、T6、O2 共 8 个通道来研究图片刺激后脑区间的信息交互关系。对数据进行去基线漂移、去工频干扰等操作并剔除眼动干扰试次,选择受试者各自反应时间相对集中的试次(反应时间为 0.3 ~ 0.4 s,每位受试者平均约 85 个试次),分别截取刺激前后各 0.3 s 的数据进行分析,其中前 0.3 s 数据作为对照组用于阈值的估计。采用 GOPDC 方法进行数据分析,其中时变 MVAR 模型中参数的估计采用 DEKF 算法,模型阶数依据 BIC 准则进行确定。5 位受试者所有试次的平均结果如图 1 所示。

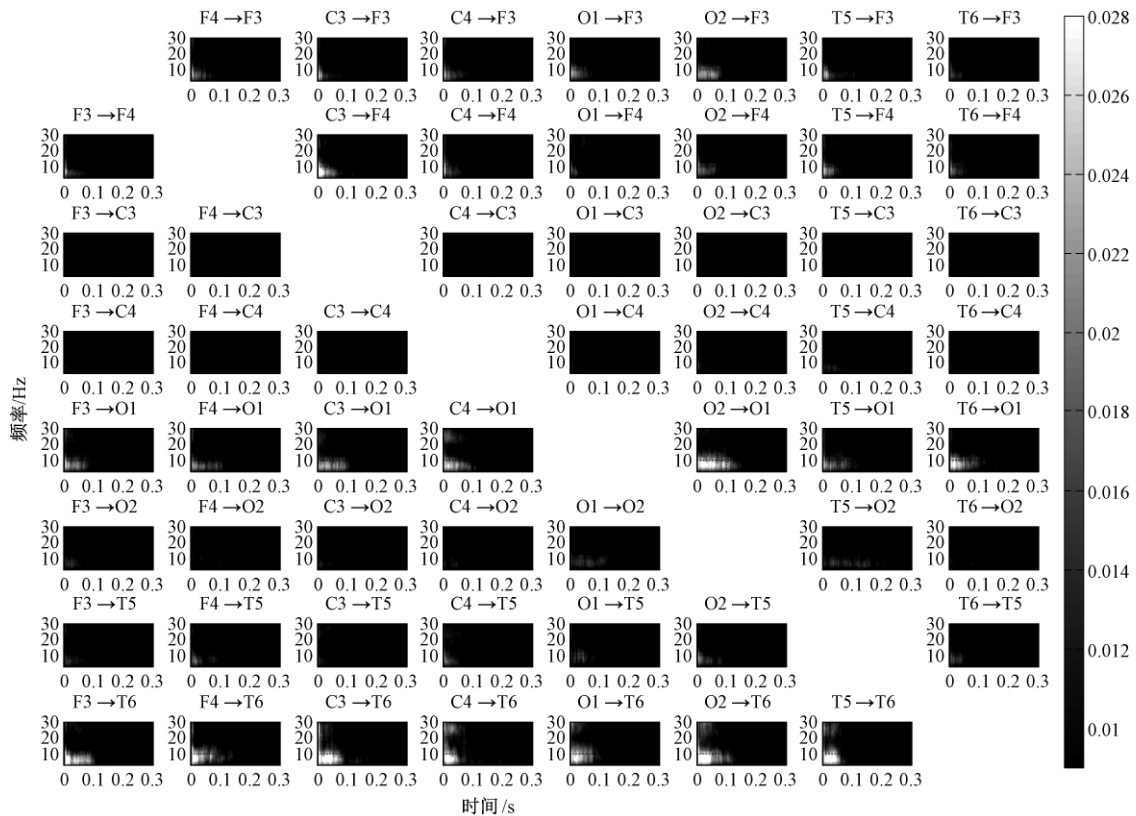


图1 基于 GOPDC 的 5 位受试者的平均结果

Figure 1 Average results for 5 subjects based on GOPDC

从图 1 的结果中可看出,基于 DEKF 方式的时变 GOPDC 能够捕获非平稳脑电信号间的动态交互变化,并具有良好的时频分辨率。可以看到,在图像呈现后,主要是额叶与顶叶对颞叶和枕区产生因果影响,这与生理上视觉通路信息的传递机制相符。此外容积传导所产生的影响一般在 3 Hz 以下<sup>[26]</sup>,从图中可以看到 3 Hz 以下部分均未产生容积传导中伪迹的影响。结果表明:采用 GOPDC 方法能够有效地削弱这种影响,且所确定的交互频段集中在  $\theta$  频段,与 Delorme 等采用信号独立成分建立的等价偶极子模型确定的频段相符。

#### 4 结束语

对格兰杰因果关系引申出的常用效应性连接分析方法进行了概述,分别阐明了这些常用方法的优缺点及其在因果连接关系度量中的意义。

对于实际应用中 MVAR 模型拟合的相关问题,分别从数据平稳性的判断、模型阶数的选择、拟合后模型合理性验证 3 个互相联系的方面对需注意的要点进行概述,并建议从模型拟合的角度进行数据平稳性的判断。一般选用 BIC 准则进行模型阶数的选择,分别从模型一致性、平稳性和残差白噪声性等 3 个方面进行模型合理性验证。针对非平稳数据的处理,建议采用时变 MVAR 模型分析非平稳数据中所蕴含的因果连接关系。针对数据截段滑窗法和状态空间法这两种常用的时变 MVAR 模型参数估计方式,给出数据截段滑窗法中窗长的选择原则,并指出状态空间法在数据处理和时域解析度上的优势。最后,关于因果连接分析中必须解决的阈值估计问题,对于无对照组的实验建议采用国内外学者广泛使用的 FT surrogate 方式,而在有对照组的实验中建议根据任务态与非任务态的差异进行阈值估计。

在实际 EEG 数据的应用示例中,采用基于 DEKF 方式的时变 GOPDC 方法进行分析,结果证实了该方法能减轻容积传导效应中伪迹的影响。

#### 参考文献:

- [1] HÖLLER Y, BUTZ K, THOMSCHEWSKI A, et al. Reliability of EEG interactions differs between measures and is specific for neurological diseases [J]. *Frontiers in human neuroscience*, 2017, 11: 350.
- [2] DUFF E P, MAKIN T, COTTAAR M, et al. Disambiguating brain functional connectivity [J]. *Neuroimage*, 2018, 173: 540–550.
- [3] NAKAGAWA T, DECO G. *Multiscale brain connectivity* [M]. New York: Springer, 2015.
- [4] 张立伟,周前祥,柳忠起,等.基于因果关系的步枪射击 pre-shot 阶段脑网络分析[J]. *生物医学工程学杂志*, 2018, 35(4): 518–523.
- [5] GRAÑA M, OZAETA L, CHYZHYK D. Resting state effective connectivity allows auditory hallucination discrimination [J]. *International journal of neural systems*, 2017, 27(5): 1750019.
- [6] XU X, ZHANG Q, TIAN X, et al. Sevoflurane anesthesia induces neither contextual fear memory impairment nor alterations in local population connectivity of medial prefrontal cortex local field potentials networks in aged rats [J]. *Fundamental & clinical pharmacology*, 2016, 30(4): 338–346.
- [7] HU M, LI W, LIANG H. A copula-based Granger causality measure for the analysis of neural spike train data [J]. *IEEE/ACM transactions on computational biology & bioinformatics*, 2018, 15(2): 562–569.
- [8] SOHRABPOUR A, YE S, WORRELL G A, et al. Noninvasive electromagnetic source imaging and Granger causality analysis: an electrophysiological connectome (eConnectome) approach [J]. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2016, 63(12): 2474–2487.
- [9] WU X Q, WANG W H, ZHENG W X. Inferring topologies of complex networks with hidden variables [J]. *Physical review E: statistical nonlinear & soft matter physics*, 2012, 86(4): 046106.
- [10] HESSE W, MOLLER E, ARNOLD M, et al. The use of time-variant EEG Granger causality for inspecting directed interdependencies of neural assemblies [J]. *Journal of neuroscience methods*, 2003, 124(1): 27–44.
- [11] BASTOS A M, SCHOFFELEEN J M. A tutorial review of functional connectivity analysis methods and their interpretational pitfalls [J]. *Frontiers in systems neuroscience*, 2016, 9: 175.
- [12] DING M, CHEN Y, BRESSLER S L. Granger causality: basic theory and application to neuroscience [EB/OL]. (2006–08–23) [2019–05–20]. <https://arxiv.org/abs/q-bio/0608035>.
- [13] BLINOWSKA K J. Review of the methods of determination of directed connectivity from multichannel data [J]. *Medical & biological engineering & computing*, 2011, 49(5): 521–529.
- [14] KUS R, KAMINSKI M, BLINOWSKA K J. Determining

- nation of EEG activity propagation: pair-wise versus multichannel estimate [J]. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 2004, 51(9): 1501–1510.
- [15] KAMINSKI M J, BLINOWSKA K J. A new method of the description of the information flow in the brain structures [J]. *Biological cybernetics*, 1991, 65(3): 203–210.
- [16] KORZENIEWSKA A, MAŃCZAK M, KAMIŃSKI M, et al. Determination of information flow direction among brain structures by a modified directed transfer function (dDTF) method [J]. *Journal of neuroscience methods*, 2003, 125(1/2): 195–207.
- [17] BACCALÁ L A, SAMESHIMA K. Partial directed coherence: a new concept in neural structure determination [J]. *Biological cybernetics*, 2001, 84(6): 463–474.
- [18] BACCALÁ L A, SAMESHIMA K, TAKAHASHI D Y. Generalized partial directed coherence [C]//*Proceedings of the 2007 15th International Conference on Digital Signal Processing*. Cardiff, Wales, UK: IEEE, 2007: 163–166.
- [19] ANZOLIN A, PRESTI P, VAN DE STEEN F, et al. Effect of head volume conduction on directed connectivity estimated between reconstructed EEG sources [EB/OL]. (2018-01-22) [2019-05-20]. <https://www.biorxiv.org/content/biorxiv/early/2018/01/22/251223.1.full.pdf>.
- [20] HIPPE J F, HAWELLEK D J, CORBETTA M, et al. Large-scale cortical correlation structure of spontaneous oscillatory activity [J]. *Nature neuroscience*, 2012, 15(6): 884.
- [21] OMIDVARNIA A, AZEMI G, BOASHASH B, et al. Measuring time-varying information flow in scalp EEG signals: orthogonalized partial directed coherence [J]. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2014, 61(3): 680–693.
- [22] SETH A K. A MATLAB toolbox for Granger causal connectivity analysis [J]. *Journal of neuroscience methods*, 2010, 186(2): 262–273.
- [23] BARNETT L, SETH A K. The MVGC multivariate Granger causality toolbox: a new approach to Granger-causal inference [J]. *Journal of neuroscience methods*, 2014, 223: 50–68.
- [24] SCHELTER B, TIMMER J, EICHLER M. Assessing the strength of directed influences among neural signals using renormalized partial directed coherence [J]. *Journal of neuroscience methods*, 2009, 179(1): 121–130.
- [25] SCHLÖGL A. A comparison of multivariate autoregressive estimators [J]. *Signal processing*, 2006, 86(9): 2426–2429.
- [26] SHAW L, MISHRA S, ROUTHAY A. Generalised orthogonal partial directed coherence as a measure of neural information flow during meditation [C]//GUP-TA S, BAG S, GANGULY K, et al. *Advancements of Medical Electronics: Proceedings of the First International Conference, ICAME*, Berlin: Springer, 2015: 137–148.
- [27] DING M Z, BRESSLER S L, YANG W M, et al. Short-window spectral analysis of cortical event-related potentials by adaptive multivariate autoregressive modeling: data preprocessing, model validation, and variability assessment [J]. *Biological cybernetics*, 2000, 83(1): 35–45.
- [28] SETH A K, CHORLEY P, BARNETT L C. Granger causality analysis of fMRI BOLD signals is invariant to hemodynamic convolution but not downsampling [J]. *Neuroimage*, 2013, 65: 540–555.
- [29] CEKIC S, GRANDJEAN D, RENAUD O. Time, frequency, and time-varying granger-causality measures in neuroscience [J]. *Statistics in medicine*, 2018, 37(11): 1910–1931.
- [30] DARVISHI M J, NASRABADI A M, CURRAN T. Effective connectivity measuring of ERP signals in recognition memory process by generalized partial directed coherence [C]//*Proceedings of the 2016 23rd Iranian Conference on Biomedical Engineering and 2016 1st International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME)*. Tehran, Iran: IEEE, 2017: 64–68.
- [31] WAN E A, NELSON A T. Dual extended Kalman filter methods [M]//HAYKIN S. *Kalman Filtering and Neural Networks*. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [32] OMIDVARNIA A H, MESBAH M, KHLIF M S, et al. Kalman filter-based time-varying cortical connectivity analysis of newborn EEG [C]//*Proceedings of the 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. Boston, MA: IEEE, 2011: 1423–1426.
- [33] FAES L, PORTA A, NOLLO G. Testing frequency-domain causality in multivariate time series [J]. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2010, 57(8): 1897–1906.
- [34] DELORME A, MAKEIG S, FABRE-THORPE M, et al. From single-trial EEG to brain area dynamics [J]. *Neurocomputing*, 2002, 44/45/46: 1057–1064.

# 基于双维度中文语义分析的食品领域知识库问答

左 敏,徐泽龙,张青川,毕铭文

(北京工商大学 农产品食品安全追溯技术及应用国家工程实验室,北京 100048)

**摘 要:** 基于知识库的简单问答是自然语言处理中的一个研究热点,也是实际生活中应用最广泛的一种情况。然而在研究中文方面基于知识库问答的过程中,存在诸如不同处理过程间的错误传播、难以从关系名称表达不明确的问句中抽取关系等问题。在自主构建的食品领域知识库以及食品领域问答语料库的基础上,从中文词义和中文字义两个语义角度出发,利用两个维度进行实体链接,并采用长短时记忆网络进行语义向量建模来抽取关系,提出一种基于双维度的中文语义分析的食品领域知识库问答模型。实验结果表明:所提出的模型在中文食品领域知识库问答上准确率比常用的端到端模型和语义解析模型均高出 5.83%~13.07%,验证了所提出模型的有效性。

**关键词:** 自然语言处理; 知识库; 问答系统; 实体识别; 关系抽取

中图分类号: TP391.1

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.003

## 0 引言

问答系统能够自动、准确回答由自然语言组成的问题,在各大知识问答网站以及网络搜索问句中,比例最多的是基于事实的具有单一关系的简单问题,这类问题可以通过查询知识库准确回答。知识库由大量的知识三元组组成,三元组包含实体、属性以及属性值。目前大规模的知识库包括英文的 Freebase、DBpedia 等,以及中文的 OpenKG、CN 和 CN-DBpedia 等。在利用知识库回答简单问题时,可以将知识三元组理解为由实体-关系-答案组成,问答的目的在于通过对问句的语义分析得到知识库中所包含的实体和关系,然后通过知识库进行实体关系匹配,直接获取该实体关系所对应的答案。但在现实中,由于表达方式的原因,存在着两个关键问题:一是如何准确地抽取关系;二是如何将实体映射到知识库中。

针对上述两个问题开展研究,利用课题来源构建了一定规模的食品领域知识库,作为知识问答系统的底层支撑,并在此基础上利用双维度中文语义分析模型搭建问答系统。模型的核心在于两点:①实体链接阶段,通过字级的相似度以及语义关系将更多识别出的实体名称映射到知识库

中;②关系抽取阶段,利用 LSTM 网络对实体关系名称和问句在词级的维度上进行向量建模。在人工构建的食品领域问答语料集上的测试表明,笔者提出的模型获得了 85.66%的准确率。

## 1 相关工作

对基于知识库的简单问答的研究主要有两个方向:一个是语义解析的方法<sup>[1-2]</sup>,语义解析是将自然语言问句转化为逻辑表达形式,进而可以通过程序执行,从知识库中查询获得答案,但是语义解析的方法往往伴随着大量的人工提取特征,难以在大规模的开放领域上应用;另一个是向量建模的方法<sup>[3-4]</sup>,向量建模将问句和候选知识映射为同一向量空间表示的向量,在向量空间内距离问句最近的候选知识即为正确答案。

在知识库问答中最重要的是将实体映射到知识库中,可以将此过程看作是消除本体异构性的过程。陈淑鑫等<sup>[5]</sup>利用 WordNet 语义词典库来对本体的不同表达形式进行相似度计算,将实体映射到目标本体之中。张凌宇等<sup>[6]</sup>利用不同本体之间的多种类型表达进行相似度计算,如名称、内容、属性等,并根据计算结果对本体进行映射。

近些年来,随着深度学习的发展,研究者开始

收稿日期:2019-10-27; 修订日期:2019-12-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0401205);北京市自然科学基金资助项目(4202014)

作者简介:左敏(1973—),男,安徽铜陵人,北京工商大学教授,博士,主要从事食品安全大数据研究,E-mail:zuomin1234@163.com。

将传统的方法与神经网络相结合进行试验。Yih 等<sup>[7]</sup>提出了一个新型的语义解析框架,框架通过阶段性生成查询图,并且采用卷积神经网络寻找关系来提升问答系统的准确率。为了更好地提升问答的准确率,使得字母级的编码能更好地处理字词不在词典中出现的情况<sup>[8]</sup>,Lukovnikov 等<sup>[9]</sup>通过将英文中的字级向量与字母级向量进行结合,提高了词向量质量,并且使用端到端的模型直接从问句中抽取出实体-关系对,不再使用分开的流水线任务来处理问题,减轻了自然语言处理流水线中的错误传播问题的程度。Hao 等<sup>[10]</sup>先对问句进行模式抽取和实体链接,然后采用模式修订来减轻错误传播问题的程度。

基于知识库的中文问答研究起步较晚,Lai 等<sup>[11]</sup>提出了 SPE (subject predicate extraction) 算法,从问句中自动抽取实体-谓词对,然后在知识库中查询获取答案,该算法在 NLPCC-ICCPOL 2016 竞赛中的开放领域知识问答任务中获得了最好成绩。周博通等<sup>[12]</sup>利用长短时记忆(long short term memory, LSTM)网络在相同的数据集上进行试验,利用注意力机制从关系候选集中选出最相似的关系名称,也取得了不错的结果。

## 2 食品领域知识库构建

笔者采用独立构建的食品领域知识库(FD-KB),其中实体来自国家食品抽检检测数据,包括食品名称、风险因子以及食品添加剂等食品名称实体,共计 0.7 M。以该实体库为种子,利用网络爬虫从各大权威百科网站获取知识,并以三元组的形式存储于 FD-KB 中。由于实体与关系名称的表达方式多样,不同平台获取的知识无法直接融合,利用关系重合率对知识三元组进行校正和整合。

要重点说明的是,所使用的实体库来自国家食品抽检检测数据,是面向专业领域的实体库,所包含的实体名称大都为专业名称。下面将详细介绍如何利用关系重合率对知识进行校正和整合。

食品领域实体库中的实体是从知识平台获得的关系字典,以键值对的方式表示。当从不同平台获得不同的关系字典时,利用式(1)计算关系重合率:

$$p_r = \frac{n((R_s \cdot keys) \cap (R_b \cdot keys)) + n((R_s \cdot values) \cap (R_b \cdot values))}{2 \max\{n(R_s), n(R_b)\}} \quad (1)$$

式中:  $R \cdot keys$  为所有键的集合;  $R \cdot values$  为所有

值的集合;  $n(\cdot)$  为计数函数;  $\max(\cdot)$  为最大取值函数;  $R_s$  和  $R_b$  表示两个不同的关系字典。

在这里规定:当  $p_r \leq 0.5$  时,两个关系字典属于不同的实体(实体名称可能相同);否则,两个关系字典所提到的是同一个实体,需要对关系字典进行整合。在整合时,利用词袋模型对实体的关系名称进行编码,并计算编码之间的余弦相似度。根据计算结果,对实体的知识三元组进行整合或补充。

获取知识三元组时,对实体进行了清洗,包括去除关系名称中的空白符等无关符号(即非中文、英文和数字的符号),将英文字母统一为小写格式,最终得到包含 6 M 知识三元组的 FD-KB。

## 3 双维度中文语义分析模型

提出的模型使用了中文字符级和词语级两个语义维度,主要包含 3 个步骤:实体识别、实体链接和关系抽取。图 1 展示了模型的执行过程。

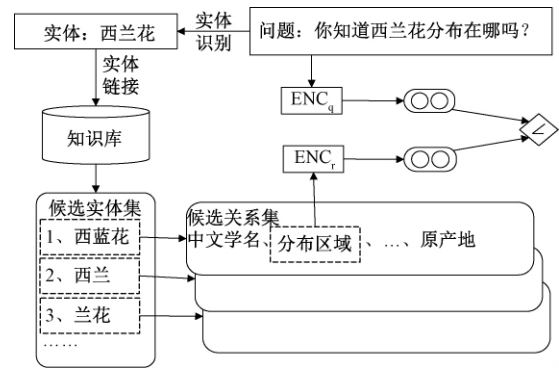


图 1 双维度中文语义分析模型图

Figure 1 The model of two-dimensional Chinese semantic analysis

步骤 1 通过实体识别得到问句中的实体信息。在实体识别阶段利用中文字符级的语义向量编码,字级语义编码能够不受问句中错别字的影响从而能正确标注出实体在问句中的位置。

步骤 2 实体链接阶段利用字、词两个维度的语义相似度获得实体候选集,通过对实体识别结果校正,将更多的识别结果映射到知识库中。

步骤 3 通过实体候选集获得关系候选集,使用 LSTM 网络对问句与关系名称进行词级的语义向量编码,计算得到更接近的关系。

在模型中,错误传播始于实体识别,其他两个步骤的运行依赖于实体识别的结果。实体链接是一个有承上启下作用的关键步骤,通过优化实体链接的算法,能有效减轻错误传播问题的程度。接下来将详细介绍模型的各个阶段。

### 3.1 实体识别

长短时记忆网络在自然语言处理中发挥了重要的作用,它的记忆单元由 3 个门构成:输入门、遗忘门和输出门,这种结构能够帮助网络有效控制信息的记忆与遗忘,使其能够比循环神经网络识别更长距离的上下文信息。

使用双向 LSTM 网络和条件随机场模型 (conditional random field, CRF)<sup>[13]</sup> 来识别问句中的实体,这样做的优势在于:①双向 LSTM 网络可以充分利用句子的正反序列信息;②条件随机场模型可以避免最终结果产生不合理的标签序列。由于模型对词向量的质量好坏依赖较小,并且考虑到问句中的词语可能会出现错别字或者超出词典范畴的情况,从而导致分词错误,进而影响实体识别的结果,因此在训练时采用字级编码作为输入。具体模型如图 2 所示。

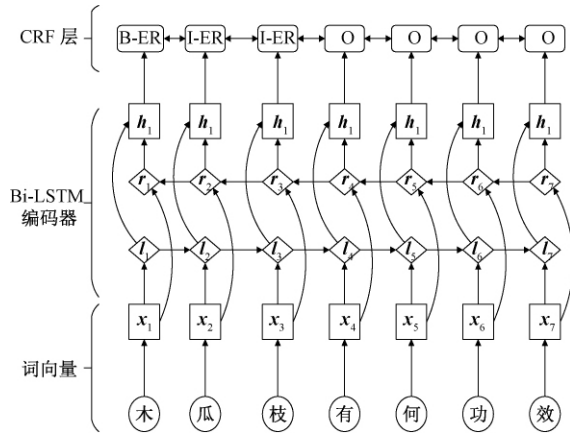


图 2 Bi-LSTM-CRF 网络模型图

Figure 2 The structure of Bi-LSTM-CRF

**Bi-LSTM 层:** 对于一个输入长度为  $n$  的问句  $Q(w_1 w_2 \dots w_n)$ , 利用 one-hot 编码得到每个字的向量  $X(x_1 x_2 \dots x_n)$ , 之后将  $X$  分别以正序和倒序输入到两个不同的 LSTM 网络中, 最终在时长  $t$  获得的状态  $h_t$  包含此刻的上下文信息。

**CRF 层:** Bi-LSTM 层的输出是每一个中文字符  $w_i$  被标记为每一个标签的概率, 最终的概率矩阵作为 CRF 层的输入来计算不同标签序列的得分, 这种方式能够有效避免不合理的标签序列, 例如 B-ER O I-ER 等。

### 3.2 实体链接

如果将 FD-KB 中的知识三元组看作由实体-关系-答案组成, 那么实体链接阶段的目的就是将第一步的识别结果映射到 FD-KB 中的实体上, 将更多的结果映射到相应的实体上对模型准确率的

提升至至关重要。

使用中文字符级与词语级语义相结合的链接方法, 用  $C'$  表示识别结果的中文字符集合,  $C$  表示 FD-KB 中实体名称的中文字符集合。在计算词语级语义时, 利用预训练好的中文 Word2Vec 词向量对词语进行表示<sup>[14]</sup>。  $W'$  为识别结果的矩阵向量,  $W$  为候选实体的矩阵向量。中文字符的语义相似度得分通过计算集合中的重复字符得到, 词语级语义相似度则通过计算矩阵的余弦相似度得到, 总得分由式 (2) 计算得到:

$$s = \alpha \cdot \frac{n(C' \cap C)}{n(C)} + (1 - \alpha) \cdot \cos(W', W), \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为权重系数。当  $\alpha = 1$  时, 表示只依赖中文字符级语义; 当  $\alpha = 0$  时, 表示只使用词语级语义相似度。

### 3.3 关系抽取

关系抽取更精确地说是关系匹配, 即根据问句的描述计算得到最相似的关系名称。实际上, 对于中文的简单问句来说, 很多关系名称直接包含在问句中, 因此可以直接从候选关系集中得到关系名称。统计显示, 大约有 52.17% 的训练语料符合上述情况。

根据上述情况, 首先, 在关系抽取中利用正则表达式获取直接包含的关系名称。值得强调的是, 通过这种方法得到的关系名称长度必须大于 1, 否则会出现包含多个关系的情况。其次, 对于无法直接抽出关系的情况, 则利用不同的 LSTM 网络来获得候选关系名称和问句的向量表示, 然后计算它们的余弦相似度得到最优结果, 如图 3 所示。

**步骤 1** 利用问句编码器  $ENC_q$  对去除实体后的问句进行编码。首先对问句进行分词, 然后得到词语的向量编码作为 LSTM 网络的输入, 最后获得神经网络的最终状态为问句的向量表示, 计算得到:

$$r_q = ENC_q(q_{w1} q_{w2} \dots q_{wn}) \circ \quad (3)$$

**步骤 2** 关系编码器  $ENC_r$  与  $ENC_q$  结构相似, 关系名称的向量表示计算方法如式 (4) 所示:

$$r_r = ENC_r(r_{w1} r_{w2} \dots r_{wn}) \circ \quad (4)$$

**步骤 3** 利用式 (5) 计算  $r_q$  与  $r_r$  的余弦相似度:

$$Score = \cos(r_q, r_r) = \frac{r_q \cdot r_r}{|r_q| \cdot |r_r|} \circ \quad (5)$$

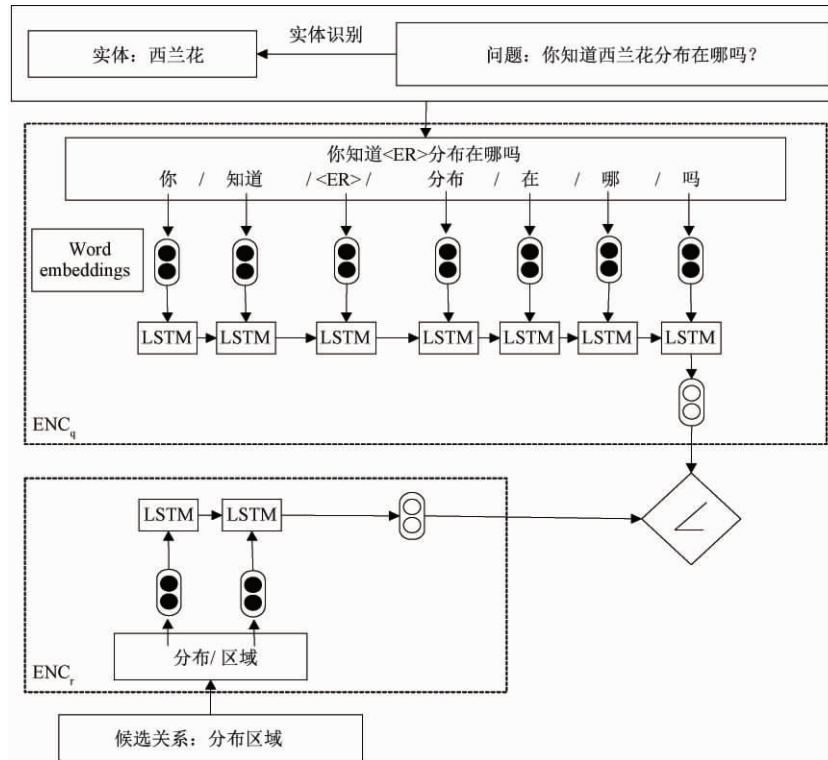


图3 关系抽取模型图

Figure 3 The model of relation extraction

## 4 实验

### 4.1 语料以及评估方法

所使用的问答语料是通过人工的方法利用FD-KB构造而成,问句的模式符合实际生活中的用户问句,共有23 000条。在构建语料的同时也标注了问句所依赖的知识三元组,语料被随机分为14 000条训练语料以及9 000条测试语料。

利用准确率来评估模型的效果,准确率的计算方法如式(6)所示:

$$Accuracy = \frac{n_{correct}}{N} \times 100\%, \quad (6)$$

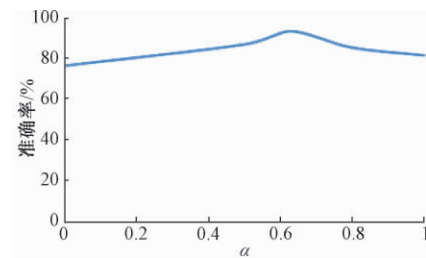
式中:  $N$  代表所有的样本总数;  $n_{correct}$  表示得到正确结果的样本数。

### 4.2 实验步骤

实体识别步骤所使用的语料是依据问答语料标注而成,同样也分为14 000条训练语料以及9 000条测试语料。实体识别的目的是在问句中标注出最有可能是实体的位置,因此对于一些打印错误的情况,也将其标注为实体。通过上述的标注策略,一些实体的关键信息将不会被遗漏。实体识别的最终准确率为92.78%。

在实体链接阶段,通过调整 $\alpha$ 的取值进行调

优,得到字级语义和词级语义的最佳结合点。通过训练,当 $\alpha=0.63$ 时,能得到最好的实体链接效果,找到实体的准确率提升至93.38%,如图4所示。

图4  $\alpha$ 与准确率的关系Figure 4 Accuracy when  $\alpha$  takes different values

关系抽取时,训练LSTM神经网络的主要目的是为了最小化损失函数,损失函数的计算方法如式(7)所示:

$$Loss_{q,p,p'} = \max\{0, Score(q, p') - Score(q, p) + \gamma\}, \quad (7)$$

式中:  $Score(q, p')$  表示负样本的得分;  $Score(q, p)$  表示正样本的得分;  $\gamma$  表示正样本的得分必须高于负样本得分 $\gamma$ 分,在本文中 $\gamma=0.3$ 。

为了进一步评估模型,利用其他两种常用的知识库问答模型来做对比实验,分别是语义解析模型和端到端模型,实验结果如表1所示。对比实验结果显示,提出的模型能够更好地解决中文食品领域内的知识库问答。

表 1 对比实验结果

Table 1 The results of the contrast experiments

模型名称	准确率/%
语义解析模型	79.83
端到端模型	72.59
双维度语义模型	85.66

### 4.3 实验结果分析

根据实验结果可以发现,笔者提出的模型问答准确率高于语义解析模型及端到端模型。在问答模型中,实体识别是影响整个模型准确率的关键,通过对识别错误的实体进行分析能够减轻错误传播问题的程度。

识别错误的情况大致分为 3 种: ①正确的实体名称与问句中的实体名称不一致; ②少识别了一些中文字符; ③关系名称包含在了识别结果中。针对前两种情况,笔者提出的模型利用字级与词级两个维度的语义信息进行计算,将实体正确地映射到知识库中,而第 3 种情况会严重影响之后的关系识别结果,该问题仍有待解决。

## 5 结论

分别从中文问答的字义与词义两个语义维度出发,将中文单词所蕴含的词义表达与字义相结合,有效地提升了问句中实体映射的准确率,提出了一种基于字词双维度中文语义分析的食品领域知识库问答模型。该模型能够有效减轻处理过程中的错误传播问题的程度,并能够提高问句中语义关系提取的准确率。实验中所采用的 FD-KB 以及问答语料具有中文问答的特点,也符合实际的网络搜索情况,如果将本方法应用到大规模开放领域知识库也会取得不错的效果。

### 参考文献:

- [1] CAI Q Q, YATES A. Large-scale semantic parsing via schema matching and lexicon extension[C]//Proceedings of the Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Sofia, Bulgaria: ACL, 2013: 423-433.
- [2] FADER A, ZETTLEMOYER L, ETZIONI O. Open question answering over curated and extracted knowledge bases[C]//Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2014: 1156-1165.
- [3] BORDES A, WESTON J, USUNIER N. Open question answering with weakly supervised embedding models[C]//The European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases. Nancy, France: ECML/PKDD, 2014: 165-180.
- [4] YANG M C, DUAN N, ZHOU M, et al. Joint relational embeddings for knowledge-based question answering[C]//Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Doha: EMNLP, 2014: 645-650.
- [5] 陈淑鑫, 张凌宇. 基于 WordNet 的个体查询方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 16-21.
- [6] 张凌宇, 马志晟, 陈淑鑫. 一种基于多种类型匹配器的个体映射方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 106-109.
- [7] YIH W T, CHANG M W, HE X D, et al. Semantic parsing via staged query graph generation: question answering with knowledge base[C]//The 53rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics & the 7th International Joint Conference on Natural Language Processing of the Asian Federation of Natural Language Processing. Beijing: ACL, 2015: 1321-1331.
- [8] GOLUB D, HE X D. Character-level question answering with attention[C]//Proceedings of the 2016 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Austin, Texas: EMNLP, 2016: 1598-1607.
- [9] LUKOVNIKOV D, FISCHER A, LEHMANN J, et al. Neural network-based question answering over knowledge graphs on word and character level[C]//International World Wide Web Conference Committee. Perth: ACM, 2017: 1211-1220.
- [10] HAO Y C, LIU H, HE S Z, et al. Pattern-revising enhanced simple question answering over knowledge bases[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Computational Linguistics. Santa Fe: ACM, 2017: 3272-3282.
- [11] LAI Y X, LIN Y, CHEN J H, et al. Open domain question answering system based on knowledge base[C]//The 5th Conference on Natural Language Processing and Chinese Computing & The 24th International Conference on Computer Processing of Oriental Languages. Kunming: CCF, 2016: 722-733.
- [12] 周博通, 孙承杰, 林磊, 等. 基于 LSTM 的大规模知识库自动问答[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 286-292.
- [13] HUANG Z H, XU W, YU K. Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging [EB/OL]. (2015-08-09) [2019-09-30]. <http://arxiv.org/abs/>



1508.01991.

[14] LI S, ZHAO Z, HU R F, et al. Analogical reasoning on chinese morphological and semantic relations [C]//

The 56th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Melbourne: ACL, 2018: 138-143.

## A Question Answering Model of Food Domain Knowledge Bases with Two-Dimension Chinese Semantic Analysis

ZUO Min, XU Zelong, ZHANG Qingchuan, BI Mingwen

(National Engineering Laboratory for Agri-product Quality Traceability, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Simple Question Answering over Knowledge Bases (KB-QA) was a hot topic in the field of Natural Language Processing (NLP), and it was also the most widely used case in real life. However, in the field of Chinese KB-QA, there were still many technical challenges such as extracting relations from questions which relation names were ambiguous, and problems such as error propagation between different processes. Based on the self-built food domain knowledge base (FD-KB) and the food field corpus, this paper proposed a new perspective based on two semantic dimensions of Chinese characters and Chinese words to extract relations and mitigate the error propagation. Contrasting experimental results showed that the model of two-dimensional Chinese semantic analysis that proposed here was 5.83%~13.07% higher than the end-to-end model and the semantic parsing model, and verified its rationality and validity.

**Key words:** natural language processing; knowledge base; question answering; entity recognition; relation extraction

(上接第7页)

## Review of the Analysis Methods of Effective Connectivity Based on Granger Causality

SHANG Zhigang<sup>1,2</sup>, SHEN Xiaoyang<sup>1,2</sup>, LI Mengmeng<sup>1,2</sup>, WAN Hong<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of Brain Science and Brain-Computer Interface Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** At present, the effective connectivity analysis methods based on Granger causality was widely used in neural signals analysis of multiple brain regions. First of all, the calculation principle and functional characteristics of representative algorithms commonly used in this kind of method were systematically introduced. Then the key points that should be paid attention to in practical application of this kind of methods were summarized. Finally, the improved algorithm for Generalized Partial Directed Coherence was taken as examples to show the application effect on the actual electroencephalogram data set.

**Key words:** Granger causality; effective connectivity; neural signals; information flow

# 基于自适应差分演化算法的光伏模型参数提取

李水佳, 龚文引

(中国地质大学(武汉) 计算机学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**快速准确地提取光伏(PV)模型的参数对于光伏系统的模拟、评估和控制是至关重要的。近些年来,使用智能优化方法对PV模型进行参数提取得到了极大的关注。然而,这些智能优化方法往往消耗了大量的计算资源。为了准确快速地提取光伏模型的参数,提出了一种新型的自适应差分演化算法。在该算法中,提出了一种新的变异策略。为了验证算法的性能,选择单二极管模型、双二极管模型和PV模型作为测试模型。实验结果表明:提出的算法可以快速准确地提取到不同PV模型的参数。因此,提出的算法可以作为一种有效的PV模型参数提取方法。

**关键词:**光伏模型; 参数提取; 差分演化

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.020

## 0 引言

由于能源危机、环境污染和气候变化,替代可再生能源的需求显著增加<sup>[1]</sup>。太阳能作为一种安全和清洁的可再生能源,近来得到了广泛关注<sup>[2]</sup>。太阳能主要应用于光伏发电,由于光伏发电系统能够直接将太阳能转换为电能,因此已在全球范围内应用。然而,由于对天气和环境因素的依赖性,特别是受温度和光辐射的影响,使得采用太阳能光伏系统发电成为了一项重要的挑战<sup>[3-4]</sup>。为了提高光伏发电的效率,需要根据测量的电压-电流数据来提取出准确的光伏模型参数。因此,高效提取PV模型参数的方法就变得尤为重要。目前,解决PV模型参数提取的方法主要是一些分析方法和确定性方法。分析方法实现起来很简单并且能够快速得到问题的解决方案,但需要做出某些假设,这可能会导致提取的参数不一定准确。对于确定性方法,如Newton-Raphson方法<sup>[5]</sup>等,它们对初始值非常敏感。更重要的是,确定性方法对目标函数有着严格的要求:连续、可微和凸函数。

近些年来,智能优化算法引起了越来越多的关注。许多研究者尝试用智能优化算法去提取PV模型的参数,如模式搜索(PS)<sup>[6]</sup>、模拟退火

(SA)<sup>[7]</sup>、差分进化(DE)<sup>[8]</sup>、粒子群优化(PSO)<sup>[9]</sup>、基于教学优化(TLBO)<sup>[10]</sup>等。PS简单易实现,但对于不可导问题求解时比较困难;SA局部搜索能力强,而全局搜索能力差,容易受参数的影响;DE简单有效但受控制参数影响较大;PSO有着很强的局部搜索能力,却容易陷入局部最优<sup>[11]</sup>;TLBO简单高效却收敛较慢。另外,这些智能优化算法在提取PV模型参数时,通常需要消耗大量的计算资源。因此,提出了一种基于自适应的差分演化算法,对不同的PV模型进行了参数提取,并且与已有智能优化算法的结果进行了比较。实验结果表明,提出的算法在PV模型参数提取中有着很大的优越性。

## 1 PV模型及目标函数

在实际应用中主要有两种广泛使用的模型来描述PV系统的V-I特性:单二极管模型和双二极管模型。

### 1.1 单二极管模型

根据单二极管模型的等效电路<sup>[8]</sup>,其输出电流I满足式(1):

$$I = I_{ph} - I_{sd} \left[ \exp \left( \frac{V + IR_s}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (1)$$

式中:  $I_{ph}$  为可用于实际供电的光照产生的电流,

收稿日期: 2019-11-12; 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573324)

通信作者: 龚文引(1979—),男,湖南永顺人,中国地质大学(武汉)教授,博士,博士生导师,主要研究方向为智能优化及其应用, E-mail: wygong@cug.edu.cn。

A;  $I_{sd}$  为二极管反向饱和电流  $\mu\text{A}$ ;  $R_s$  和  $R_{sh}$  分别为光伏电池板的等效串联和并联电阻  $\Omega$ ;  $n$  为二极管理想因子;  $V_t = kT/q$ ;  $k$  为玻尔兹曼常量 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ );  $q$  为电子电量 ( $1.6 \times 10^{-18} \text{ C}$ );  $T$  为环境温度  $\text{K}$ 。

### 1.2 双二极管模型

根据双二极管模型的等效电路<sup>[8]</sup>, 其输出电流  $I$  满足式(2):

$$I = I_{ph} - I_{sd1} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_1 V_t}\right) - 1 \right] - I_{sd2} \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{n_2 V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

式中:  $I_{sd1}$  和  $I_{sd2}$  分别为两个二极管反向饱和电流  $\mu\text{A}$ ;  $n_1$  和  $n_2$  分别为两个二极管理想因子。

### 1.3 目标函数

从上述两种模型可以看出, 单二极管模型有 5 个参数待提取:  $I_{ph}$ 、 $I_{sd}$ 、 $R_s$ 、 $R_{sh}$  和  $n$ ; 而双二极管模型则有  $I_{ph}$ 、 $I_{sd1}$ 、 $I_{sd2}$ 、 $R_s$ 、 $R_{sh}$ 、 $n_1$  和  $n_2$  7 个参数待提取。直接求解 PV 模型各个参数十分困难, 文献[8]中将参数提取问题转化为非线性最优化问题, 可建立优化目标函数如式(3)所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f(V_k, I_k, X)^2}, \quad (3)$$

式中:  $X$  包含各个模型待提取的参数;  $N$  为  $V-I$  数据集的个数;  $f(V_k, I_k, X) = I_{sim} - I_k$ , 即为仿真电流  $I_{sim}$  与实验电流  $I_k$  的差值; 采用均方根误差  $RMSE$  作为评价目标, 即  $RMSE$  表示所有的仿真电流和实验电流的误差的平方和, 这意味着  $RMSE$  越小, 所提取到的参数越准确。

## 2 差分演化算法

差分演化算法(differential evolution, DE)<sup>[12]</sup>最初由 Storn 和 Price 在 1997 年提出, 主要用于求解数值优化问题。在差分演化算法中, 主要包含 4 种操作: 初始化、变异、交叉和选择。

初始化: 一般种群中有  $NP$  个个体(每个个体  $X_i$  表示一组解向量), 初始化则是将每个个体在边界范围内随机产生一组值, 如式(4)所示:

$$X_{i,j} = LB_j + \text{rand}(UB_j - LB_j), \quad (4)$$

式中:  $LB_j$  和  $UB_j$  分别表示第  $j$  维的上下边界;  $j$  为 1 到  $D$  (维数) 之间的整数;  $\text{rand}$  为 0 到 1 之间的随机数。

变异: 变异操作是差分演化的核心部分, 主要用于产生新的个体, 常用的变异策略为 DE/rand/1、DE/best/1、DE/current-to-best/1 等, 其中 DE/

rand/1 策略如式(5)所示:

$$V_i = X_{r1} + F \cdot (X_{r2} - X_{r3}), \quad (5)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  个个体的变异向量;  $r1$ 、 $r2$ 、 $r3$  为 3 个不同的 1 到  $NP$  之间的随机整数, 且不等于  $i$ 。

交叉: 为了保持种群的多样性, DE 算法在突变之后, 采用交叉操作。通过将目标向量与突变向量进行交叉, 得到试验向量。常用的有二项交叉和指数交叉, 其中二项交叉如式(6)所示:

$$U_{ij} = \begin{cases} V_{ij}, & \text{if } \text{rand} < CR \text{ or } j = j_{\text{rand}}; \\ X_{ij}, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $CR$  为交叉率;  $j_{\text{rand}}$  为 1 到  $D$  之间的随机整数。

选择: 采用贪婪的思想, 在试验向量和目标向量之间, 选择更好的作为下一代的个体, 如式(7)所示:

$$X_i = \begin{cases} U_i, & \text{if } f(U_i) \leq f(X_i); \\ X_i, & \text{otherwise}, \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $f(X_i)$  为  $X_i$  对应的目标函数值。

## 3 自适应差分演化算法

传统的 DE 算法有 3 个参数: 缩放因子  $F$ 、交叉因子  $CR$  和种群大小  $NP$ 。其中  $F$  和  $CR$  的取值对算法有非常大的影响, 所以自适应差分演化算法有着广阔的前景。为了准确快速地提取 PV 模型参数, 提出了一种新型变异策略自适应 DE 算法(SADE)。

### 3.1 新型变异策略

DE/rand/1 策略, 这种策略从随机群体中选择 3 个向量进行突变, 然后在 3 个向量中随机选择基本向量, 再将其他两个矢量的差向量添加到基向量上。虽然这种策略能够保持种群多样性和全局搜索能力, 但是没有任何确定的搜索方向, 导致收敛速度慢。DE/best/1 策略, 这种策略虽然收敛快, 但是总是朝着最优个体的方向搜索, 容易陷入到局部最优。之后, 为了更充分地利用贪婪思想, JADE<sup>[13]</sup> 引入了一种新的变异策略: DE/current-to-pbest/1, 这种策略在解决各种问题上被证明是一种非常成功的策略。DE/current-to-best/1 策略, 它在全局搜索和局部搜索中有着一定的平衡能力, 是一种成功的策略。笔者提出的新突变策略可以显著提高 DE 算法的搜索能力, 并增加在复杂和大规模优化问题中实现有希望和成功结果的可能性, 这是差分演化算法研究中的一个重要的开放挑战。因此, 笔者采用新的变异

策略,引导个体朝着有希望的且远离希望较小的区域搜索,以提高算法的收敛速度。提出的变异策略如式(8)所示:

$$V_i = X_i + F_i(X_{pbest} - X_i) - \omega_i(X_i - X_{pworst}), \quad (8)$$

式中:  $X_{pbest}$  和  $X_{pworst}$  分别为种群中个体适应值由小到大排序后的前  $p\%$  和后  $p\%$  个体;  $F_i$  为第  $i$  个个体朝着有希望方向的缩放因子;  $\omega_i$  为第  $i$  个个体远离希望较小的区域搜索的缩放因子。

笔者提出的新型变异策略采用  $p\%$  的贪婪原则,能够使得种群中的个体朝着希望较大的区域但又不总是同一个有希望的区域搜索;能够远离一些没有希望的搜索区域,但又不总是同一个没有希望的区域,这对提高 DE 算法的收敛速度是非常有效的。

### 3.2 参数自适应

综合上述,提出的 DE 算法主要有  $F$ 、 $CR$ 、 $\omega$ 、 $NP$  和  $p$  5 个参数,其中  $NP$  保持 20 固定不变,而  $p$  根据 JADE 中给出的比较好的取值范围,保持 0.2 不变。

对于  $F$  和  $\omega$  采用 JADE 中自适应方式如下:

$$F_i = \text{randc}(\mu_F, 0.1), \quad (9)$$

$$\omega_i = \text{randc}(\mu_\omega, 0.1), \quad (10)$$

$$\mu_F = (1 - c)\mu_F + c \cdot \text{mean}_L(S_F), \quad (11)$$

$$\mu_\omega = (1 - c)\mu_\omega + c \cdot \text{mean}_L(S_\omega), \quad (12)$$

式中:  $\text{randc}$  为柯西分布;  $\mu_F$  和  $\mu_\omega$  的初值均为 0.5;  $c$  为 0.1;  $S_F$  和  $S_\omega$  为成功缩放因子的集合;  $\text{mean}_L$  为赖默均值,详细描述见 JADE<sup>[13]</sup>。

对于  $CR$  自适应,每个个体的交叉率  $CR_i$  的产生方式如下:

$$CR_i = \text{randn}(\mu_{CR}, 0.1), \quad (13)$$

式中:  $\text{randn}$  为正态分布;  $\mu_{CR}$  初始值为 0.5,一代结束后  $\mu_{CR}$  采用式(14)更新:

$$\mu_{CR} = (1 - c) \cdot \mu_{CR} + c \cdot \text{mean}_A(S_{CR}), \quad (14)$$

式中:  $\text{mean}_A$  为算术平均值;  $S_{CR}$  为成功交叉率的集合。

### 3.3 SADE 算法及其应用

新型变异策略的自适应 DE 算法(SADE)用来提取 PV 模型的参数的计算流程如图 1 所示。初始化时,使待提取的 PV 参数在规定的范围内均匀产生,经过新型的变异策略进行变异,得到变异向量,再经过交叉和选择操作得到下一代个体。如果给定的最大函数评价次数没用完则采用自适应的方式去更新控制参数  $\mu_F$ 、 $\mu_\omega$  和  $\mu_{CR}$ ,直至最大函数评价次数耗尽,输出提取的参数。

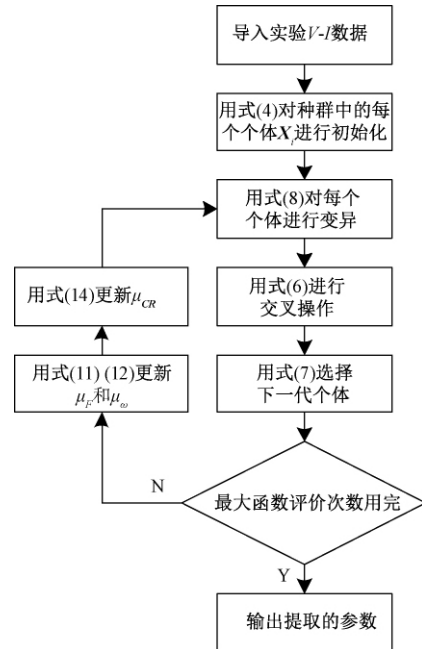


图1 SADE 算法流程图

Figure 1 Flowchart of SADE algorithm

## 4 实验结果

为了验证 SADE 的性能,它被用于提取单二极管模型、双二极管模型和 PV 组件模型的参数。其中,单、双二极管的数据均来自于 33 °C 57 mm 直径的商业硅 R. T. C. 法国太阳能电池<sup>[5]</sup>,PV 组件模型的数据来自于 45 °C 的多晶 Photowatt-PWP201 电池<sup>[5]</sup>,所有待提取的参数范围如表 1 所示。所有模型的 SADE 的实验结果都是在 Win7 操作系统 MATLAB2016b 下独立运行 30 次获得的结果。

表1 待提取的参数范围

Table 1 Range of parameters to be extracted				
参数	单/双二极管		Photowatt-PWP201	
	LB	UB	LB	UB
$I_{ph}/A$	0	1	0	2
$I_{sd1}, I_{sd2}/\mu A$	0	1	0	50
$R_s/\Omega$	0	0.5	0	2
$R_{sh}/\Omega$	0	100	0	2 000
$n, n_1, n_2$	1	2	1	50

将 SADE 算法的实验结果与一些效果比较好的算法进行了比较,比较结果如表 2、3 和 4 所示。

对于单二极管模型,从表 2 中可以看出,虽然 SADE 和 MLBSA 算法取得了最小的  $RMSE$  值,但是笔者提出的 SADE 只消耗了 10 000 次函数评价次数( $NFEs$ ),MLBSA 却消耗了 50 000 次。其次是 IJAYA、JADE、GOTLBO、ABSO、IGHs 和 CPSO。

表 2 单二极管模型不同参数提取方法的比较

Table 2 Comparison of different parameter extraction methods for single diode model

算法	$I_{ph}/A$	$I_{sd}/\mu A$	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$n$	$RMSE$	$NFEs$
CPSO <sup>[9]</sup>	0.760 7	0.400 0	0.035 4	59.012 0	1.503 3	1.390 0E-03	45 000
IGHS <sup>[14]</sup>	0.760 8	0.343 5	0.036 1	53.284 5	1.487 4	9.930 6E-04	150 000
ABSO <sup>[15]</sup>	0.760 8	0.306 2	0.036 6	52.290 3	1.475 8	9.912 4E-04	150 000
IJAYA <sup>[16]</sup>	0.760 8	0.328 1	0.036 4	53.759 5	1.481 1	9.860 3E-03	50 000
MLBSA <sup>[17]</sup>	0.760 8	0.323 0	0.036 4	53.718 5	1.481 2	<b>9.860 2E-04</b>	50 000
GOTLBO <sup>[10]</sup>	0.760 8	0.331 6	0.036 3	54.154 3	1.483 8	9.874 4E-04	10 000
JADE <sup>[13]</sup>	0.760 8	0.324 4	0.036 4	53.700 8	1.481 6	9.861 8E-04	10 000
SADE	0.760 8	0.323 0	0.036 4	53.718 5	1.481 2	<b>9.860 2E-04</b>	<b>10 000</b>

表 3 双二极管模型不同参数提取方法的比较

Table 3 Comparison of different parameter extraction methods for double diode model

算法	$I_{ph}/A$	$I_{sd1}/\mu A$	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$n_1$	$I_{sd2}/\mu A$	$n_2$	$RMSE$	$NFEs$
IGHS	0.760 8	0.976 1	0.036 9	56.836 8	1.921 3	0.167 9	1.428 1	9.863 5E-04	150 000
ABSO	0.760 8	0.267 1	0.036 6	54.621 9	1.465 1	0.381 9	1.981 5	9.834 4E-04	150 000
BMO <sup>[18]</sup>	0.760 8	0.211 1	0.036 8	55.808 1	1.445 3	0.876 9	2.000 0	9.826 2E-04	150 000
CWOA <sup>[19]</sup>	0.760 8	0.241 5	0.036 7	55.201 6	1.456 5	0.600 0	1.989 9	9.827 2E-04	150 000
IJAYA	0.760 1	0.005 0	0.037 6	77.851 9	1.218 6	0.750 9	1.624 7	9.829 3E-04	50 000
GOTLBO	0.760 8	0.271 7	0.036 6	53.618 7	1.466 8	0.259 5	1.916 1	9.954 4E-04	20 000
JADE	0.760 8	0.321 9	0.036 4	53.711 7	1.481 0	0.002 4	1.691 3	9.860 1E-04	20 000
SADE	0.760 8	0.226 0	0.036 7	55.485 4	1.451 0	0.749 3	2.000 0	<b>9.824 8E-04</b>	<b>20 000</b>

表 4 Photowatt-PWP201 模型不同参数提取方法的比较

Table 4 Comparison of different parameter extraction methods for Photowatt-PWP201

算法	$I_{ph}/A$	$I_{sd}/\mu A$	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$n$	$RMSE$	$NFEs$
PS <sup>[6]</sup>	1.031 3	3.175 6	1.205 3	714.285 7	48.288 9	1.180 0E-02	NA
SA <sup>[7]</sup>	1.033 1	3.664 2	1.198 9	833.333 3	48.821 1	2.700 0E-03	NA
CPSO	1.028 6	8.301 0	1.075 5	1 850.100 0	52.243 0	3.500 0E-03	45 000
IJAYA	1.030 2	3.470 3	1.201 6	977.375 2	48.629 8	<b>2.425 1E-03</b>	50 000
MLBSA	1.030 5	3.482 3	1.201 3	981.982 3	48.642 8	<b>2.425 1E-03</b>	50 000
GOTLBO	1.030 5	3.499 1	1.200 8	989.688 9	48.661 1	<b>2.425 1E-03</b>	<b>10 000</b>
JADE	1.030 5	3.481 0	1.201 3	981.157 2	48.641 4	<b>2.425 1E-03</b>	<b>10 000</b>
SADE	1.030 5	3.482 3	1.201 3	981.982 4	48.642 8	<b>2.425 1E-03</b>	<b>10 000</b>

另外,利用提取到的参数进行仿真电流的计算,将得到的仿真电流与测量电流曲线进行对比,如图 2 所示,可以看出,测量电流与仿真电流有着非常好的拟合性。

对于双二极管,有 7 个参数待提取。由表 3 的比较结果可知,SADE 取得了最好的  $RMSE$  值 (9.824 8E-04),并且使用的函数评价次数最少。BMO、CWOA 和 IJAYA 的结果虽然很接近最优值的结果,但是消耗了大量的函数评价次数,也就是消耗了大量的计算资源。其余的几种参数提取方法也消耗了大量的计算资源,且提取的参数不够准确。图 3 的测量数据与仿真数据高度拟合也证明了笔者提出的 SADE 方法能够提供更准确的参数值。

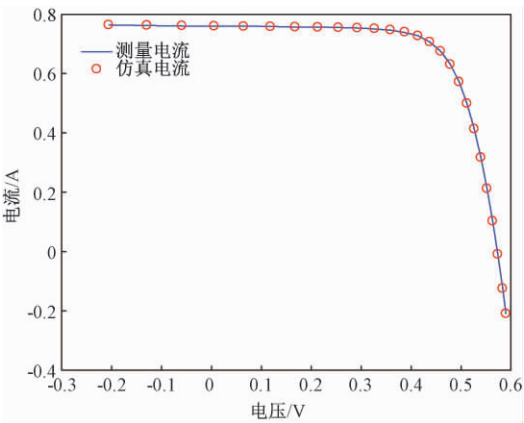


图 2 单二极管模型测量数据与仿真数据比较

Figure 2 Comparison of single diode model measured data and simulated data

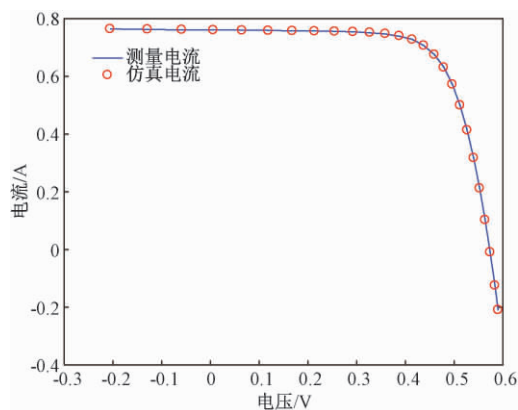


图3 双二极管模型测量数据与仿真数据比较

Figure 3 Comparison of double diode model measured data and simulated data

对于 Photowatt-PWP201 模型,从表 4 中可知,SADE、JADE 和 GOTLBO 取得了最好的  $RMSE$  值( $2.425 \times 10^{-3}$ )以及消耗最少的函数评价次数(10 000);IJAYA 和 MLBSA 虽然取得了同样的  $RMSE$  值,却消耗了 50 000 次函数评价次数;其次是 CPSO、SA 和 PS,其中 SA 和 PS 所用的函数评价次数在原文中无法获取(NA)。像前面两种模型一样,将 SADE 利用提取到的参数得到的仿真数据与测量数据进行了拟合对比,如图 4 所示。可以看出,仿真数据与测量数据仍然有着良好的拟合性。

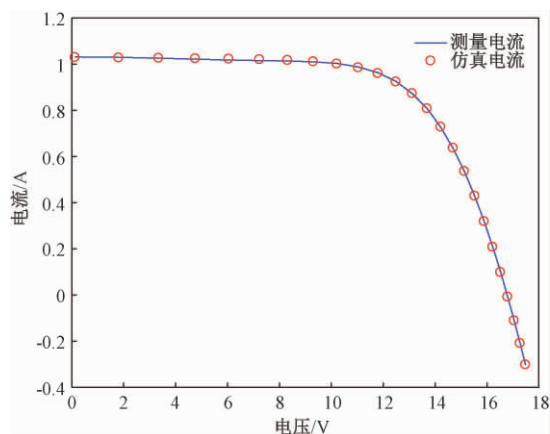


图4 Photowatt-PWP201 模型测量数据与仿真数据比较

Figure 4 Comparison of Photowatt-PWP201 measured data and simulated data

## 5 结论

提出了一种新型的自适应差分演化算法,可以准确快速地提取不同光伏模型的未知参数。在 SADE 算法中,笔者提出了一种新型的变异策略,能够有效地促使种群中的个体朝着有希望的区域搜索,以提高算法的收敛速度。SADE 算法的有

效性可以通过单二极管模型、双二极管模型以及 PV 组件模型的参数提取问题来评估,并且将 SADE 的结果与一些最近提出的成熟算法进行了比较。结果表明,笔者提出的 SADE 算法能够提供更准确、更可靠的参数值。因此,SADE 算法可以作为一种有效的 PV 模型参数提取的选择方法。

## 参考文献:

- [1] MUHSEN D H, GHAZALI A B, KHATIB T, et al. Parameters extraction of double diode photovoltaic module's model based on hybrid evolutionary algorithm [J]. Energy conversion and management, 2015, 105: 552-561.
- [2] 梁亮, 詹智民, 邓小磊, 等. 基于电导增量法的太阳能光伏阵列 MPPT 仿真 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(6): 88-92.
- [3] 孙园园, 肖华锋, 谢少军, 等. 太阳能电池工程简化模型的参数求取和验证 [J]. 电力电子技术, 2009, 43(6): 44-46.
- [4] 许天, 陈晓强. 并联式支路光伏发电系统的研究与仿真 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 25-28.
- [5] EASWARAKHANTHAN T, BOTTIN J, BOUHOUGH I, et al. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers [J]. International journal of solar energy, 1986, 4(1): 1-12.
- [6] ALHAJRI M F, EL-NAGGAR K M, ALRASHIDI M R, et al. Optimal extraction of solar cell parameters using pattern search [J]. Renewable energy, 2012, 44: 238-245.
- [7] EL-NAGGAR K M, ALRASHIDI M R, ALHAJRI M F, et al. Simulated annealing algorithm for photovoltaic parameters identification [J]. Solar energy, 2012, 86(1): 266-274.
- [8] JIANG L L, MASKELL D L, PATRA J C. Parameter estimation of solar cells and modules using an improved adaptive differential evolution algorithm [J]. Applied energy, 2013, 112: 185-193.
- [9] JIANG C, XUE L Y, SONG D Y, et al. Solar cells performance testing and modeling based on particle swarm algorithm [C]//International Conference on Computer Science and Information Processing. Xi'an: IEEE, 2012: 562-566.
- [10] CHEN X, YU K J, DU W L, et al. Parameters identification of solar cell models using generalized oppositional teaching learning based optimization [J]. Ener-

- gy, 2016, 99: 170–180.
- [11] 徐霜, 万强, 余琍. 基于学习理论的改进粒子群优化算法[J]. 郑州大学学报(工学版) 2019, 40(2): 29–34.
- [12] STORN R, PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of global optimization, 1997, 11(4): 341–359.
- [13] ZHANG J Q, SANDERSON A C. JADE: adaptive differential evolution with optional external archive [J]. IEEE transactions on evolution computation, 2009, 13(5): 945–958.
- [14] ASKARZADEH A, REZAZADEH A. Parameter identification for solar cell models using harmony search-based algorithms [J]. Solar energy, 2012, 86(11): 3241–3249.
- [15] ASKARZADEH A, REZAZADEH A. Artificial bee swarm optimization algorithm for parameters identification of solar cell models [J]. Applied energy, 2013, 102: 943–949.
- [16] YU K J, LIANG J J, QU B Y, et al. Parameters identification of photovoltaic models using an improved jaya optimization algorithm [J]. Energy conversion and management, 2017, 150: 742–753.
- [17] YU K J, LIANG J J, QU B Y, et al. Multiple learning backtracking search algorithm for estimating parameters of photovoltaic models [J]. Applied energy, 2018, 226: 408–422.
- [18] ASKARZADEH A, REZAZADEH A. Extraction of maximum power point in solar cells using bird mating optimizer-based parameters identification approach [J]. Solar energy, 2013, 90: 123–133.
- [19] OLIVA D, AZIZ M A E, HASSANIEN A E. Parameter estimation of photovoltaic cells using an improved chaotic whale optimization algorithm [J]. Applied energy, 2017, 200: 141–154.

## Parameter Extraction of Photovoltaic Models Based on Adaptive Differential Evolution Algorithm

LI Shuijia, GONG Wenyin

(School of Computer Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** It was vital to fast and accurately extract the parameters of the photovoltaic (PV) models for the simulation, evaluation, and control of PV systems. Recently, the use of the intelligent optimization methods for parameter extraction of PV models attracted increasing attention. However, these methods tended to consume large computational resources. In order to extract the parameters of the PV models fast and accurately, a novel adaptive differential evolution algorithm was developed, in which a new mutation strategy was proposed. To verify the performance of proposed algorithm, the single diode model, the double diode model, and the PV module are selected as test models. The experimental results showed that proposed algorithm could extract the parameters of different PV models fast and accurately. Thus, the proposed algorithm could be an efficient alternative for parameter extraction of PV models.

**Key words:** photovoltaic models; parameter extraction; differential evolution

# MKFCM 算法在遥感影像分类中的应用研究

张成才, 李 飞, 王艳梅, 罗蔚然

( 郑州大学 水利与环境学院 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 模糊  $C$  均值聚类(FCM)算法对遥感影像进行分类时,没有考虑像元间相关性的问题,为增加像元间相关性信息,提出了多核模糊  $C$  均值聚类(MKFCM)算法,即将多个核函数引入到 FCM 算法中,依据像元在特征空间中的分布特点,自动筛选出核函数间的最佳权重组合,并以中分辨率 Landsat8 影像和高分辨率 Pleiades 影像为研究数据。通过对 FCM、KFCM 和 MKFCM 算法分类结果的精度分析可知,对于不同分辨率的遥感影像, MKFCM 都能更好地区分具有相似光谱信息的像元,而且无论是单个类别的精度还是整体的分类精度都高于 FCM 和 KFCM 算法,这为精确提取区域土地覆盖信息提供了有效途径。

**关键词:** 遥感影像; 多核; 模糊  $C$  均值; 核函数

**中图分类号:** TP79

**文献标志码:** A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.024

## 0 引言

遥感影像分类是提取地物信息的重要手段,被广泛应用在专题制图、专题信息提取、动态变化监测和地理空间数据库建设中<sup>[1-3]</sup>。其中,分类算法是遥感影像研究的重要内容,选择合适的分类算法能够有效地提高分类精度。模糊聚类算法是聚类分析研究的主要算法之一,其中模糊  $C$  均值聚类(fuzzy  $C$ -means, FCM)算法的应用最为广泛<sup>[4-5]</sup>。传统的 FCM 算法存在很多不足,为此研究学者对其进行改进使其适用于遥感影像分类。郝玉等<sup>[6]</sup>利用直方图选取聚类中心和聚类数并使用叉熵距离代替欧式距离,克服了传统 FCM 算法选样时的随机性和依赖球状分布的缺点,从而提高了遥感影像分类的精度。谢福鼎等<sup>[7]</sup>通过改进 FCM 算法的目标函数和迭代过程,充分发挥了有标签样本点在迭代过程中的作用,实验结果表明,样本点越多,分类精度也越高。但这些改进的 FCM 算法在对遥感影像进行分类时并没有体现像元间具有相关性、相邻像元间具有相似特征值的依赖关系,只是简单地依据像元特征向量的维数构成特征空间进而对影像进行分类<sup>[8]</sup>。在这样的特征空间中,像元间的空间特性使得表示

不同地物的像元通常是线性不可分的,从而降低了遥感影像的分类精度。为了弥补 FCM 算法在这方面的不足,史云松等<sup>[9]</sup>将单个核函数引入到 FCM 算法对遥感影像进行分类。该算法通过非线性变化关系将像元的特征向量映射到高维空间中,提高了异物像元在特征空间中的线性可分性,从而改善了影像的分类精度。但当遥感数据特征含有异构信息并且在高维特征空间中分布不平坦时,使用单个核函数进行映射处理就不合理了<sup>[10-12]</sup>。

综上所述,多光谱遥感影像中的像元记录了不同波段的波谱响应强度,在分类时这些波段值组成了像元的特征向量。由于相邻像元间具有相关性,使得相邻异物像元的特征向量在特征空间中常常是线性不可分的。FCM 算法进行分类时仅考虑了像元的特征向量,忽略了相邻像元间具有空间关系的特性。引入单个核函数时增加了数据的线性可分性,但单个核函数并不能很好地对具有多个特征的数据进行映射。为了使 FCM 算法更加适合遥感影像的分类,笔者将多个核函数与 FCM 算法融合,构建多核模糊  $C$  均值算法(multiple kernel fuzzy  $C$ -mean, MKFCM)。为了检验 MKFCM 算法对不同分辨率影像的分类结果,

收稿日期:2019-06-10; 修订日期:2020-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51739009); 河南省科技攻关项目(182102210017)

作者简介:张成才(1964—),男,河南郸城人,郑州大学教授,博士,主要从事水利信息技术方面的研究,E-mail: zhangcc2000@163.com。



选取郑州市区中高分辨率 Landsat8 OLI 影像和郑州大学新校区的高分辨率的 Pleiades 卫星影像对地物进行分类,并与 FCM 算法、KFCM 算法的分类结果进行了对比分析。

## 1 MKFCM 算法原理

FCM 算法被研究人员广泛地应用在遥感影像分类中<sup>[13-14]</sup>,它把  $n$  个向量  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 分为  $c$  个模糊组,分别计算出每个模糊组的聚类中心,然后利用迭代法使得非相似性指标的价值函数达到最小。代价函数的表达式为:

$$\min J_m(U, V) = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^n u_{ij}^m d_{ij}^2, \quad (1)$$

式中:  $u_{ij}$  为隶属度矩阵;指数  $m$  为平滑因子,间接影响着聚类的效果;  $d_{ij} = \|x_j - v_i\|$  为向量  $x_j$  与聚类中心  $v_i$  的距离<sup>[15]</sup>。

利用拉格朗日乘子法对方程(1)进行求解,得到更新公式为:

$$U_j(X_i) = \|X_i - M_j\|^{-2/(b-1)} / \sum_{j=1}^c \|X_i - M_j\|^{-2/(b-1)}; \quad (2)$$

$$M_j = \sum_{i=1}^n [U_j(X_i)]^b X_i / \sum_{i=1}^n [U_j(X_i)]^b. \quad (3)$$

目前大多数改进的 FCM 算法在对遥感影像进行分类时并没有考虑到异物相邻像元间具有特殊的空间相关性关系。因此,笔者在 FCM 算法基础上引入多个核函数建立 MKFCM 算法,其优点是多个核函数通过非线性映射关系将原始数据映射到新的特征空间中。这样不仅可以增强数据的线性可分性,而且也可以将数据的多种特征用不同的核函数进行描述,并能根据数据的分布特点,自动选取最佳权重进行核函数间的组合。本文 MKFCM 的目标函数为:

$$J(\omega, U, V) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c u_{ij}^m (\varphi(x_i) - V_j)^T \cdot (\varphi(x_i) - V_j); \quad (4)$$

$$\varphi(x) = \omega_1 \varphi_1(x) + \omega_2 \varphi_2(x) + \dots + \omega_M \varphi_M(x), \quad (5)$$

式中:  $\varphi_M$  为第  $M$  个特征映射;  $M$  为特征映射的个数及核函数的个数;  $\omega_M$  为第  $M$  个核函数的权重值;  $U$  为隶属度矩阵;  $V$  为聚类中心矩阵。使用拉格朗日乘子法对方程进行求解,得到更新公式为:

$$U_{ji} = 1 / \left( \sum_{j=1}^c (d_{ij}^2 / d_{ij}^{2*})^{\frac{1}{m-1}} \right); \quad (6)$$

$$\omega_k = \frac{1}{\beta_k} / \left( \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \dots + \frac{1}{\beta_M} \right). \quad (7)$$

其中,

$$d_{ij}^2 = \|\varphi(x_i) - V_j\|^2 = \sum_{k=1}^f \omega_k^2 K_k(x_i, x_i) - 2 \sum_{c=1}^n \sum_{k=1}^f U_{cj} \omega_k^2 K_k(x_i, x_c) +$$

$$\sum_{c=1}^n \sum_{c'=1}^n \sum_{k=1}^f U_{cj} U_{c'j} \omega_k^2 K_k(x_c, x_{c'}); \quad (8)$$

$$\alpha_{ijk} = K_k(x_i, x_i) - 2 \sum_{c=1}^n U_{cj} \omega_k^2 K_k(x_i, x_c) +$$

$$\sum_{c=1}^n \sum_{c'=1}^n U_{cj} U_{c'j} \omega_k^2 K_k(x_c, x_{c'}), \quad (9)$$

式中:  $f$  为核函数个数;  $K$  为核函数;  $U_{cj}$  为标准化隶属度;  $\omega$  为核函数之间的权重值。

在核函数的选择方面,笔者使用高斯函数进行实验,该函数属于鲁棒径向基核。该径向基核对数据有很好的抗噪作用,并且高斯核函数的取值是 0~1,有效地简化了计算过程<sup>[16]</sup>。

## 2 MKFCM 算法应用

### 2.1 研究区概况

以郑州市区和郑州大学新校区作为研究区域,郑州包括郑州市区和登封、巩义、新密、荥阳、新郑 5 市和中牟县,总面积达 7 446 km<sup>2</sup>,其中郑州市区面积占 1 010.3 km<sup>2</sup>。郑州大学新校区位于郑州市,校区南北长约 2.1 km,东西宽约 1.1 km,占地面积约 2.31 km<sup>2</sup>。选取郑州市区 2017 年 12 月 8 日的 Landsat8 OLI 影像作为地物分类的数据源,如图 1(a) 所示。为对比不同影像的分类结果,又选取郑州大学新校区 2014 年 5 月 15 日的 Pleiades 影像融合产品作为地物分类的数据源,如图 1(b) 所示。

### 2.2 研究数据概况

对于 Landsat8 OLI 影像数据源,选择影像的前 6 个波段进行实验,分别为蓝波段(0.450~0.515 μm)、绿波段(0.525~0.600 μm)、红波段(0.630~0.680 μm)、近红外波段(0.845~0.885 μm)、短波红外 1 波段(1.560~1.660 μm)和短波红外 2 波段(2.100~2.300 μm),空间分辨率 30 m×30 m。为了提高影像的质量,需要对研究区的影像进行预处理,主要操作包括辐射定标和大气校正。辐射定标使用 ENVI 中的 Radiometric Calibration 工具,大气校正使用 Flash 工具。由于 Landsat8 数据在发布前做过基于地形数据的几何校正,因此本研究中不再对研究区域的 Landsat8 数据进行几何校正操作。Pleiades 影像数据源属于 SPOT 卫星家族的后续卫星,由两颗完全相同的卫星 Pleiades 1 和 Pleiades 2 组成,具有 0.5 m 的超高分辨率,幅宽可达 20 km×20 km<sup>[17]</sup>。选择 Pleiades 融合影像的 3 个波段进行实验,分别为蓝波段(0.430~0.550 μm)、绿波段(0.500~0.620 μm)、红波段(0.590~0.710 μm)。

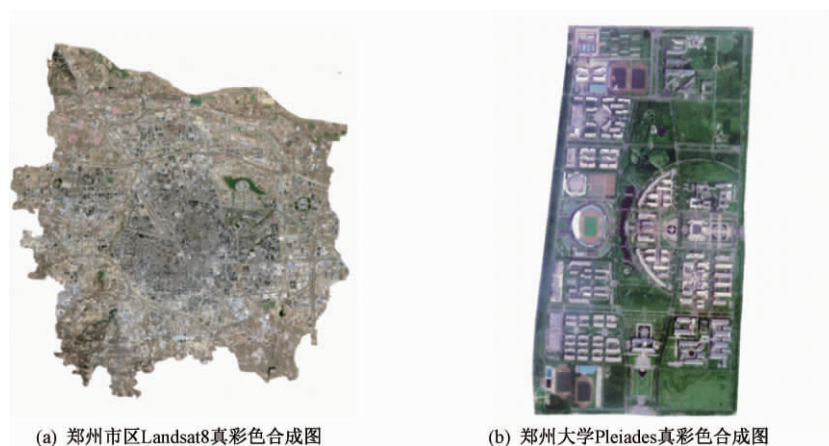


图1 研究区影像图

Figure 1 Image of study area

### 2.3 MKFCM 分类结果

采用 MATLAB 对 MKFCM 算法进行模型构建。首先,提取待分类遥感影像中的像元特征值,构建特征值矩阵,对于 Landsat8 影像使用的是 band2~band7 6 个波段作为特征值, Pleiades 影像使用的是红绿蓝 3 个波段作为特征值。其次,根据实际地物分布状况确定分类类别,郑州市区划分为建筑、植被、水体、裸地、道路 5 类地物,郑州大学新校区划分为建筑、植被、水体、道路 4 类地物。再次,对

MKCM 模型中核函数进行最优化组合,采用梯度下降法进行参数迭代,判断  $\max(\max(\|U'_t - U'_{t+1}\|))$  是否小于停止阈值  $\varepsilon$  或者迭代次数是否大于最大限制,若符合两条件之一,则停止迭代,最终权值即为核函数之间的最优组合权重。最后,使用组合的最优 MKFCM 算法对影像进行分类。

使用 FCM、KFCM 与 MKFCM 3 种算法分别对 Landsat8 影像和 Pleiades 影像进行分类,分类结果如图 2、3 所示。

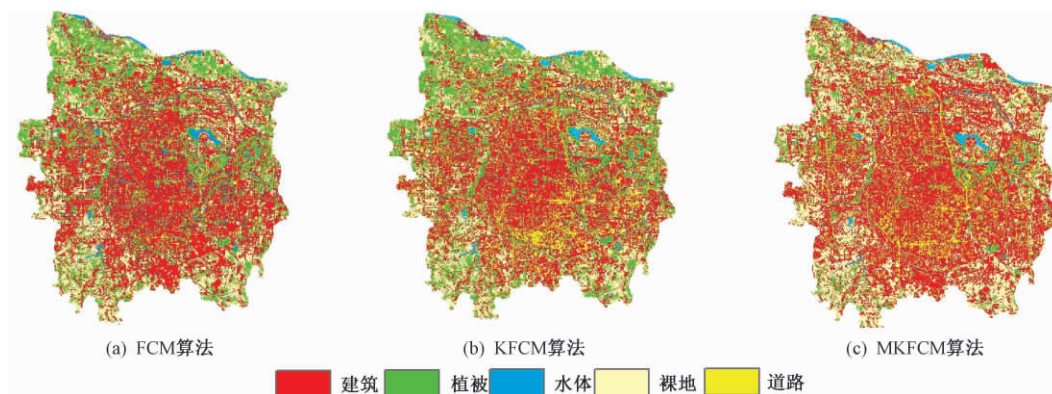


图2 Landsat8 影像分类结果

Figure 2 Landsat8 image classification results

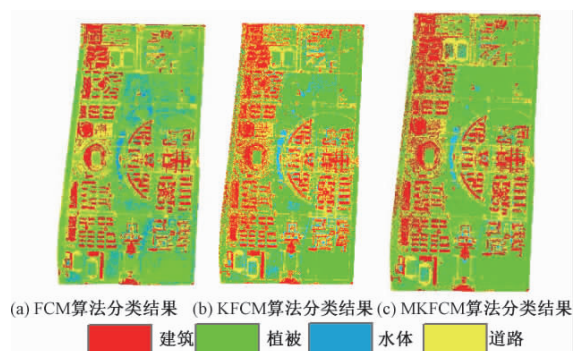


图3 Pleiades 影像分类结果

Figure 3 Pleiades image classification results

### 3 精度分析

通过对精度的分析可以有效地评价分类结果的好坏,所以精度评价是遥感分类过程中必不可少的一部分。在验证 Landsat8 影像的分类结果时,利用高分辨率影像验证低分辨遥感数据的方法<sup>[18]</sup>,选用谷歌高分辨率遥感数据作为验证影像。谷歌影像是目前全球最大的免费影像数据库,可以方便快捷地获取不同时期各个地区的影像数据,在一定程度上给遥感、地信工作者带来许多便利<sup>[19]</sup>。本研究选取 2018 年 2 月 22 日第 18

级的影像作为验证影像,该级影像分辨率为 0.5 m×0.5 m。该影像包括 0~19 级,共 20 级,共选取 1 629 个验证像元,其中道路 323 个像元,建筑用地 352 个像元,水体 620 个像元,植被 127 个像元,裸地 207 个像元。对 Pleiades 影像分类结果的验证则通过实地勘察测量的方式,在郑州大学新校区中选取 2 515 个验证像元进行精度检验,其中建筑用地 628 个像元,水体 770 个像元,植被 644 个像元,道路 473 个像元。

混淆矩阵能够直观展示出每类地物的分类正确率以及该类地物错分为其他地物的情况。对采用不同算法处理不同影像数据得到的分类结果建立混淆矩阵,如表 1 和表 2 所示。由于遥感影像上水体与建筑阴影和植被阴影有着相似的光谱特征,道路与建筑用地也有着相似的光谱特征,因此相互之间错分的可能性较高。通过表 1 的混淆矩阵可知,FCM 和 KFCM 算法对建筑、植被、水体、

裸地和道路错分比较严重,特别是与水体光谱特征相似的建筑物的阴影存在大量的错分;MKFCM 算法能清晰地将道路、建筑和水体提取出来,并能够正确地区分建筑物的阴影区域,分类效果明显优于 FCM 算法。而对于表 2 的混淆矩阵可知,3 种算法都能将建筑用地比较明显地提取出来,但 FCM 与 KFCM 算法对与水体光谱特征相似的阴面植被存在严重错分的现象,MKFCM 算法能将二者正确地区分开来。

为了对分类结果进行精度评价,采用用户精度、生产者精度、总体分类精度和 Kappa 系数 4 个评价指标<sup>[20]</sup>。用户精度和生产者精度评价特定类别的分类精度如图 4 和图 5 所示,其中同比增长是指与 FCM 相比,KFCM、MKFCM 分类精度的增长值。采用总体分类精度和 Kappa 系数评价整体分类结果的精度,如图 6 所示。

表 1 郑州市区 Landsat8 OLI 影像分类的混淆矩阵

Table 1 Confusion matrix of Landsat8 OLI image classification in Zhengzhou urban area																
地物 类型	道路			建筑			裸地			水体			植被			总和
	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	
道路	200	216	266	21	20	20	11	15	18	19	17	15	7	6	4	323
建筑	74	52	32	244	260	320	20	14	16	16	13	11	18	14	4	352
裸地	0	1	1	20	15	9	153	162	173	15	9	0	20	18	8	207
水体	23	7	0	41	38	1	3	1	0	560	571	594	0	3	1	620
植被	2	23	0	26	19	2	20	15	0	10	10	0	82	86	110	127
总和	299			352			207			620			127			—

表 2 郑州大学新校区 Pleiades 影像分类的混淆矩阵

Table 2 Confusion matrix of Pleiades image classification in new campus of Zhengzhou university													
地物 类型	道路			建筑			水体			植被			总和
	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	FCM	KFCM	MKFCM	
道路	320	350	392	63	48	32	21	17	11	11	12	2	473
建筑	96	62	23	532	553	598	0	0	0	18	15	7	628
水体	12	15	15	53	48	23	601	623	640	156	113	92	770
植被	22	23	20	31	30	26	45	27	16	498	543	582	644
总和	450			679			667			683			—

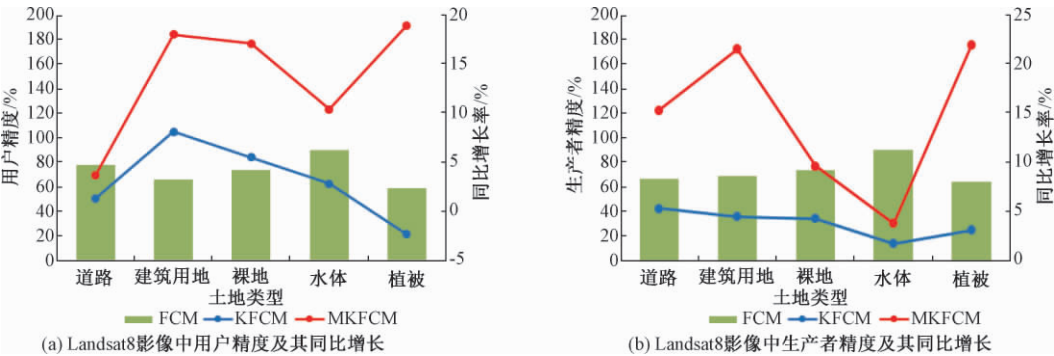


图 4 Landsat8 影像中 MKFCM 的用户精度、生产者精度及其同比增长

Figure 4 User accuracy, producer accuracy and growth rate of MKFCM in Landsat8 images



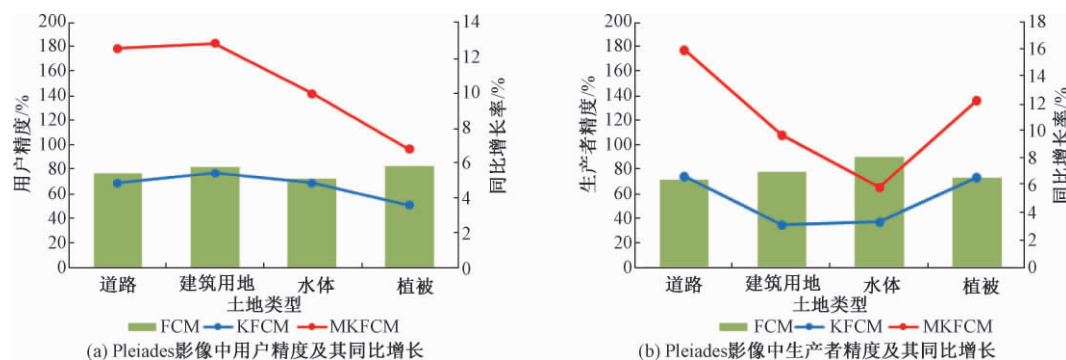


图5 Pleiades影像中MKFCM的用户精度、生产者精度及其同比增长

Figure 5 User accuracy, producer accuracy and growth rate of MKFCM in Pleiades images

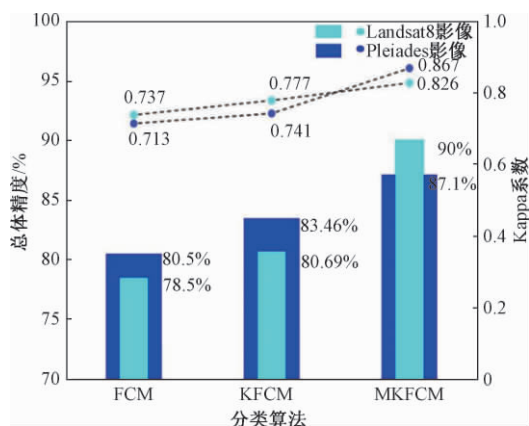


图6 总体分类精度及Kappa系数对比图

Figure 6 Comparison chart of overall classification accuracy and Kappa coefficient

由图4和图5可知,MKFCM算法对两种影像单个地物的分类,无论用户精度还是生产者精度其百分比都很高,且与FCM与KFCM算法的分类结果相比有明显提升。在Landsat8影像中,与其他两种算法相比,MKFCM算法对建筑的分类精度同比增长最多;Pleiades影像中对建筑和道路的分类精度同比增长的最多。这是因为建筑中存在的建筑阴影与水体有着相似的像元特征值,而建筑又与道路有着类似的像元特征值。FCM算法并不能很好地区分具有相似特征值的异物像元,KFCM中只有单个核函数不能对具有多个特征值的像元进行区分,而MKFCM算法不仅能将像元的特征向量通过核函数映射到高维空间中,还能依据多个核函数对不同的特征值进行映射,从而提高了异物像元间的可分性。

由图6可知,在对Landsat8影像分类时,MKFCM比FCM算法总体分类精度提高了11.5%,Kappa系数提高了0.089;与KFCM算法相比,MKFCM算法在总体精度上提高了9.31%,Kappa系数提高了0.049。在对Pleiades影像进行分类时,MKFCM比FCM算法总体精度提高了

6.6%,Kappa系数提高了0.15;与KFCM算法相比,MKFCM算法在总体精度上提高了3.64%,Kappa系数提高了0.13。相比之下,MKFCM算法在两种影像的分类上无论是总体分类精度还是Kappa系数都是最佳的。

综上所述,MKFCM算法能通过核函数将原始特征向量映射到高维特征空间中,并根据特征向量在空间中的分布特点自动对核函数进行最优组合,提高不同类型数据间的线性可分性,从而能区分相似光谱特征的异类地物,尤其是对道路、建筑和植被的分类精度明显提高。

## 4 结论

将多个核函数与FCM算法融合构建MKFCM算法,不仅能提高遥感影像在特征空间中的线性可分性,而且还能将像元具有的不同特征分量分别输入到对应的核函数进行映射,使像元在组合的特征空间中得到更好地表达,进而提高遥感影像的分类精度。笔者采用FCM、KFCM和MKFCM算法分别对中高分辨率(Landsat8)和高分辨率(Pleiades)遥感影像进行分类,并使用混淆矩阵和4个评价指标对分类精度进行评价。结果表明,MKFCM算法对两种影像的分类结果,无论是单个类别的精度还是整体的分类精度都高于FCM与KFCM算法,尤其对具有相似光谱的像元具有很好的区分效果,提高了土地覆盖信息提取的准确度。

## 参考文献:

- [1] LUNETTA R S, JOHNSON D M, LYON J G, et al. Impacts of imagery temporal frequency on land-cover change detection monitoring [J]. Remote sensing of environment, 2004, 89(4): 444-454.
- [2] 李爱民, 刘杉, 吕安民. 基于卫星遥感影像的郑州市建成区扩展变化研究 [J]. 郑州大学学报(工学

- 版) 2011, 32(2): 125-128.
- [3] 张琪曼. 遥感图像分类方法的研究[J]. 环球人文地理, 2017(2): 271.
- [4] SPRAGINS J. Learning without a teacher[J]. IEEE transactions on information theory, 1966, 12(2): 223-230.
- [5] 毛晓波, 张勇杰, 陈铁军. 基于蚁群及空间邻域信息的 FCM 图像分割方法[J]. 郑州大学学报(工学版) 2014, 35(1): 1-4.
- [6] 郝玉, 徐建华, 周坚华. 一种模糊 C 均值聚类的影像分类方法[J]. 遥感信息, 2017, 32(3): 86-92.
- [7] 谢福鼎, 李壮. 基于改进的半监督 FCM 算法的高光谱遥感影像分类[J]. 测绘通报, 2016(9): 60-62.
- [8] DHANALAKSHMI L, RANJITHA S, SURESH H N. Image processing using modified multiple kernel fuzzy C-means clustering (MMKFCM) technique[C]// International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology. Bangalore, India: IEEE, 2016: 641-646.
- [9] 史云松, 史玉峰. 基于核模糊聚类的遥感影像分类[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010, 34(6): 164-166.
- [10] 汪洪桥, 孙富春, 蔡艳宁, 等. 多核学习方法[J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1037-1050.
- [11] 何妮蔓. 多核学习算法研究及其在图像分类中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [12] 胡湘萍. 基于多核学习的多特征融合图像分类研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(5): 194-198.
- [13] KIVINEN J, SMOLA A J, WILLIAMSON R C. Online learning with kernels[J]. IEEE transactions on signal processing, 2004, 52(8): 2165-2176.
- [14] 张子石, 潘聪, 陈红顺. 基于有监督模糊 C-均值算法的混合像元分解[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(6): 813-817.
- [15] WU Z D, XIE W X, YU J P. Fuzzy C-means clustering algorithm based on kernel method[C]// International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, 2003. Xi'an, China: IEEE, 2003: 49-54.
- [16] 焦亚召. 基于多核函数 FCM 算法在数据挖掘聚类中的应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [17] PINFIELD D J, HODGKIN S T, JAMESON R F, et al. A six-square-degree survey for Pleiades low-mass stars and brown dwarfs[J]. Monthly notices of the royal astronomical society, 2000, 313(2): 347-363.
- [18] 黄婷, 师庆三, 师庆东, 等. 利用高分辨率影像验证低分辨率遥感数据的分类精度研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2013, 30(2): 238-242.
- [19] 李朝奎, 张多才, 陶建军, 等. 基于 Google 影像的城市道路网提取及其应用[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 100-105.
- [20] 裴欢, 孙天娇, 王晓妍. 基于 Landsat 8 OLI 影像纹理特征的面向对象土地利用/覆盖分类[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 248-255.

## Remote Sensing Image Classification Based on Multi-core Fuzzy C-means Clustering

ZHANG Chengcai, LI Fei, WANG Yanmei, LUO Weiran

(College of Environment & Water Conservancy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Fuzzy C-Means clustering (FCM) algorithm could not consider the correlation between pixels when classifying remote sensing images. In order to increase the correlation information between pixels, a multi-core fuzzy C-means clustering (MKFCM) algorithm was proposed, in which multiple kernel functions were introduced into FCM algorithm. According to the distribution characteristics of pixels in feature space, MKFCM algorithm automatically filtered out the optimal weight combination among kernel functions. The medium-high resolution Landsat8 images and high resolution Pleiades images were selected as research data, and by analyzing the accuracy of classification results of FCM, KFCM and MKFCM algorithm, the results showed that MKCM algorithm could do better in distinguish pixels with similar spectral information for different resolution remote sensing images. Whether the accuracy of the single category or the overall, classification accuracy with MKCM algorithm was higher than that with FCM or KFCM algorithm, which provided an effective way to extract the regional land cover information accurately.

**Key words:** remote sensing image; multi core; fuzzy C-means; kernel function

# 具有双边丢包和混合时延的 Delta 算子系统 $H_\infty$ 滤波

张端金, 郭璐

(郑州大学 信息与工程学院 河南 郑州 450001)

**摘要:** 研究网络控制系统中存在双边丢包和混合随机时延的滤波问题, 基于 Delta 算子方法设计了一类  $H_\infty$  滤波器。假定传感器至控制器、控制器至执行器两个信道存在数据包丢失, 由两个独立伯努利分布的白色序列表示。混合随机时延由网络诱导时延和离散无限分布时延组成。利用马尔科夫随机过程构造李雅普诺夫泛函, 由线性矩阵不等式得到了具有  $H_\infty$  性能的滤波误差系统随机稳定的充分条件, 给出  $H_\infty$  滤波器参数。数值算例证明了该方法的有效性。

**关键词:** 网络控制系统;  $H_\infty$  滤波; 数据包丢失; 混合随机时延; Delta 算子

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.026

## 0 引言

网络控制系统 (networked control system, NCS) 由通信技术、网络技术和计算机技术等组成<sup>[1]</sup>。NCS 具有低耗、安装简便和高可靠性的优点, 是研究复杂系统的重要工具<sup>[2]</sup>。NCS 的应用很多, 例如深度神经网络<sup>[3]</sup>、内视镜检查<sup>[4]</sup>以及无线传感网络<sup>[5]</sup>。在数据传输的过程中不可避免会产生时变时延和丢包, 给系统带来不利影响, 甚至破坏其稳定性<sup>[6-7]</sup>。与 Kalman 滤波相比,  $H_\infty$  滤波器具有较好的鲁棒性, 引起人们的广泛关注<sup>[8]</sup>。

在控制系统中, 时延经常出现会导致系统的性能降低<sup>[9]</sup>。数据包丢失也会影响系统性能。文献[10-11]讨论了带有数据包丢失的网络控制系统  $H_\infty$  滤波问题。在鲁棒滤波的早期研究中, 基于二次稳定性引入李雅普诺夫方程, 以保证该未知系统的鲁棒性能<sup>[12]</sup>。文献[13]利用伯努利变量描述丢包问题, 并建立带丢包的 NCS 模型, 设计了  $H_\infty$  滤波器。文献[14]利用变采样周期的方式, 建立网络控制系统, 并证明其满足均方指数稳定性。

此外, Middleton 等<sup>[15]</sup>建立了 Delta 算子方法。Delta 算子具有如下优势: Delta 算子方法将连续与离散系统进行统一处理, 在快速采样下 Delta 算子具有更好的数字特性, 运用 Delta 算子离散

化模型便于观察和分析不同采样周期下的系统性能<sup>[16]</sup>。

## 1 问题描述

笔者研究了具有双边丢包和混合随机时延的 Delta 算子描述网络控制系统的  $H_\infty$  滤波问题。使用马尔科夫链建立滤波误差系统, 通过李雅普诺夫泛函证明系统的渐近稳定性和  $H_\infty$  性能。

Delta 算子定义<sup>[15]</sup>如下:

$$\delta x(t) = \begin{cases} \frac{dx(t)}{dt}, & h = 0; \\ \frac{x(t+h) - x(t)}{h}, & h \neq 0, \end{cases}$$

式中:  $h$  为采样周期。

考虑下面的 Delta 算子系统:

$$\begin{cases} \delta x(k) = A_\delta x(k) + B_\delta w(k) + \\ \alpha(k) C_\delta g(x(k - \tau(k))) + \\ \beta(k) D_\delta \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)); \\ y(k) = \theta(k) E x(k) + F w(k); \\ z(k) = L x(k), \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x(k) \in \mathbb{R}^n$  表示系统状态向量;  $\tau(k)$  为有界时变时延且是正整数, 满足  $\tau_m \leq \tau(k) \leq \tau_M$ ,  $\tau_m, \tau_M$  分别为时延下界和上界;  $y(k) \in \mathbb{R}^r$  为系统输出;  $z(k) \in \mathbb{R}^p$  为要估计的信号;  $w(k) \in \mathbb{R}^s$ ,

收稿日期:2019-06-28; 修订日期:2019-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61471323)

作者简介:张端金(1966—),男,湖北荆州人,郑州大学教授,博士,主要从事故障检测与滤波的研究, E-mail: djzhang@zzu.edu.cn。

为外部扰动,且属于 $L_2[0, \infty)$ ;  $g(x(k)) = [g_1(x(k)), \dots, g_n(x(k))]^T$ ,  $f(x(k)) = [f_1(x(k)), \dots, f_n(x(k))]^T$ , 为具有适当维数的非线性矩阵。

假设 $\tau(k)$ 取值于有限集合,发生概率如下:

$$\text{Prob}\{\tau_k = j\} = \lambda_j, j = 1, 2, \dots, q, \quad (2)$$

式中: $\lambda_j$ 是一个正的标量,且 $\sum_{j=1}^q \lambda_j = 1$ 。

注1:网络控制系统由网络将传感器、控制器和执行器连接,形成分散式闭环反馈控制系统,用于远程操控。网络传输可能受到外部非线性因素的影响。

注2:系统(1)包含无限分布时滞项 $\sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m \cdot f(x(k-m))$ ,它可看成 $\int_{-\infty}^t k(t-s)f(x(s))ds$ 的离散化形式<sup>[9]</sup>。

式(1)中随机变量 $\alpha(k)$ 、 $\beta(k)$ 、 $\theta(k)$ 相互独立,并符合Bernoulli分布,满足:

$$\text{Prob}\{\alpha(k) = 1\} = \alpha_0;$$

$$\text{Prob}\{\beta(k) = 1\} = \beta_0;$$

$$\text{Prob}\{\theta(k) = 1\} = \theta_0,$$

其中, $\theta(k) = 1$ 代表传感器至控制器的数据传输正常; $\theta(k) = 0$ 代表数据包丢失。

考虑如下形式的滤波器:

$$\begin{cases} \delta x_f(k) = A_f x_f(k) + B_f \hat{y}(k); \\ z_f(k) = L_f x_f(k), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x_f(k) \in R^n$ 为滤波器状态; $\hat{y}(k) \in R^q$ 为滤波器输入 $\hat{y}(k) = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_q]^T$ ;  $z_f(k) \in R^l$ 为信号 $z(k)$ 的估计; $A_f, B_f, L_f$ 为待定的滤波器矩阵。

存在通信序列矩阵:

$$\Pi_i = \text{diag}\{g(i-1), g(i-2), \dots, g(i-q)\}, \quad i \in \{1, 2, \dots, q\}, \quad (4)$$

式中: $g(k) = \begin{cases} 0 & k \neq 0 \\ 1 & k = 0 \end{cases}$   $\Pi_i$ 表示 $k$ 时刻控制器到执行器进行通信的节点,在 $k$ 时刻成功发送数据, $\hat{y}(k) = y(k)$ 。

存在数据包丢失时,令 $\hat{y}(k) = 0$ 进行处理<sup>[8]</sup>,可得同时含有马尔科夫链和通信序列的滤波器输入:

$$\hat{y}(k) = \Pi_i y(k). \quad (5)$$

定义向量

$$\begin{aligned} \xi(k) &= [x^T(k) \quad x_f^T(k)]^T; \\ e(k) &= z(k) - z_f(k). \end{aligned}$$

由式(1)~(5)可以推出滤波误差系统模型:

$$\begin{cases} \delta \xi(k) = (\bar{A} + \bar{A}) \xi(k) + \bar{B} w(k) + (\bar{C} + \bar{C}) \times g(x(k - \tau(k))) + (\bar{D} + \bar{D}) \times \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k-m)); \\ e(k) = \bar{L} \xi(k), \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \bar{A} &= \begin{bmatrix} A_\delta & 0 \\ \theta_0 B_f \Pi_i E & A_f \end{bmatrix}; \bar{B} = \begin{bmatrix} B_\delta & 0 \\ B_f \Pi_i F & 0 \end{bmatrix}; \hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_f \Pi_i E & 0 \end{bmatrix}; \hat{C} = \begin{bmatrix} C_\delta \\ 0 \end{bmatrix}; \hat{D} = \begin{bmatrix} D_\delta \\ 0 \end{bmatrix}; \bar{L} = [L \quad -L_f]; \\ \bar{C} &= \alpha_0 \hat{C}; \bar{D} = \beta_0 \hat{D}; \bar{A} = \bar{\theta}(k) \hat{A}; \bar{C} = \bar{\alpha}(k) \hat{C}; \bar{D} = \bar{\beta}(k) \hat{D}; \bar{\alpha}(k) = \alpha(k) - \alpha_0; \bar{\beta}(k) = \beta(k) - \beta_0; \bar{\theta}(k) = \theta(k) - \theta_0. \end{aligned}$$

由此笔者考虑的问题转化成在马尔科夫跳跃系统(6)中滤波器的设计问题。

引理1<sup>[9]</sup> 设 $M \in R^{n \times n}$ 是半正定矩阵, $x_i \in R^n$ ,  $\mu_i \geq 0$  ( $i = 1, 2, \dots$ )。若相关序列是收敛的,则以下不等式成立:

$$\left( \sum_{i=0}^{+\infty} a_i x_i \right)^T M \left( \sum_{i=0}^{+\infty} a_i x_i \right) \leq \left( \sum_{i=0}^{+\infty} a_i \right) \sum_{i=0}^{+\infty} a_i x_i^T M x_i. \quad (7)$$

现对非常数 $g(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 进行假设:

假设1  $g(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 向量有界,且

$$g(0) = f(0).$$

假设2 矩阵 $g(\cdot)$ 和 $f(\cdot)$ 是连续的,且对于 $\forall x, y \in R^n$ ,有

$$\begin{cases} [g(x) - g(y) - Y_1(x-y)]^T \times \\ [g(x) - g(y) - Y_2(x-y)] \leq 0; \\ [f(x) - f(y) - V_1(x-y)]^T \times \\ [f(x) - f(y) - V_2(x-y)] \leq 0, \end{cases} \quad (8)$$

式中: $Y_1, Y_2, V_1$ 和 $V_2$ 为常数矩阵。

## 2 主要结果

定义1<sup>[8]</sup> 当 $w(k) = 0$ 时,滤波误差系统是均方渐近稳定的,如果对于任意初始条件,下式成立:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\{\|\xi(k)\|^2\} = 0. \quad (9)$$

定理1 对于离散网络控制系统(1),当 $w(k) = 0$ 时,如果存在正定矩阵 $P, Q_j$ 和 $Z_j$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ ),使得

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & W^T \tilde{Y}_2 & h(hA_\mu^T + I) \Xi \Gamma_1 & h(h\bar{A}^T + I) \bar{P} D \\ * & \varphi_{22} & 0 & 0 \\ * & * & \varphi_{33} & h^2 \Gamma_1^T \Xi D_\mu \\ * & * & * & \varphi_{44} \end{bmatrix} < 0, \quad (10)$$

则滤波误差系统是均方渐近稳定的。式中对称矩

阵中的对称项表示为\*。

$$\begin{aligned}\varphi_{11} &= h^2(\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T) P(\bar{A} + \sigma_\theta \hat{A}) + \\ &h((\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T) P + P(\bar{A} + \sigma_\theta \hat{A})) - \\ &W^T \tilde{Y}_1 W - W^T \tilde{V}_1 W;\end{aligned}$$

$$\varphi_{22} = \sum_{j=1}^q (Q_j + \tau_j Z_j);$$

$$\begin{aligned}\varphi_{33} &= h^2(I_1^T \Xi \Gamma_1 + \sigma_\alpha I_2^T \Xi \Gamma_2) - \\ &\text{diag}\{Q_1, Q_2, \dots, Q_q\};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi_{44} &= h^2(\bar{D}^T P \bar{D} + \sigma_\beta \hat{D}^T P \hat{D}) - \mu^{-1} R; \\ \bar{\mu} &= \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m;\end{aligned}$$

$$W = [I \quad 0]; A_\mu = [\sqrt{\lambda_1} \bar{A}^T, \dots, \sqrt{\lambda_q} \bar{A}^T]^T;$$

$$B_\mu = [\sqrt{\lambda_1} \bar{B}^T, \dots, \sqrt{\lambda_q} \bar{B}^T]^T;$$

$$D_\mu = [\sqrt{\lambda_1} \bar{D}^T, \dots, \sqrt{\lambda_q} \bar{D}^T]^T;$$

$$\Gamma_1 = \text{blockdiag}\{\sqrt{\lambda_1} \bar{C}_0, \dots, \sqrt{\lambda_q} \bar{C}_0\};$$

$$\Gamma_2 = \text{blockdiag}\{\sqrt{\lambda_1} C_0, \dots, \sqrt{\lambda_q} C_0\};$$

$$\Xi = \text{diag}\{P, P, \dots, P\}, \sigma_\alpha = (1 - \alpha_0) \alpha_0;$$

$$\sigma_\theta = (1 - \theta_0) \theta_0, \sigma_\beta = (1 - \beta_0) \beta_0;$$

$$C_0 = [C^T \quad 0]^T, \bar{C}_0 = \alpha_0 C_0.$$

证明:构造 Delta 域 Lyapunov 泛函:

$$\begin{cases} V(k) = V_1 + V_2 + V_3 + V_4; \\ V_1 = \delta \xi^T(k) P \delta \xi(k); \\ V_2 = \sum_{j=1}^q \sum_{i=k-\tau_j}^{k-1} g^T(x(i)) Q_j g(x(i)); \\ V_3 = \sum_{j=1}^q \sum_{i=-\tau_j}^{-1} \sum_{m=k+i}^{k-1} g^T(x(m)) Z_j g(x(m)); \\ V_4 = \sum_{i=1}^{+\infty} \mu_i \sum_{j=k-\tau_j}^{k-1} f^T(x(j)) R f(x(j)). \end{cases} \quad (11)$$

当  $w(k) = 0$  时,

$$\begin{aligned}E\{\Delta V_1\} &= E\{\delta \xi^T(k+1) P \delta \xi(k+1) - \\ &\delta \xi^T(k) P \delta \xi(k)\} = \xi^T(k) (h^2(\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T) \times \\ &P(\bar{A} + \sigma_\theta \hat{A}) + h((\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T) P + \\ &P(\bar{A} + \sigma_\theta \hat{A})) \xi(k) + \xi^T(k) h(h A_\mu^T + I) \times \\ &\Xi \Gamma_1 g(x(k - \tau(k))) + \xi^T(k) h(h \bar{A}^T + I) \times \\ &P \bar{D} \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m))) + \\ &h(\bar{C} g(x(k - \tau(k))))^T P(h A + I) \xi(k) + \\ &h(\bar{D} \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)))^T P(h A + I) \xi(k) + \\ &h^2(g(x(k - \tau(k))))^T (I_1^T \Xi \Gamma_1 + \\ &\sigma_\alpha I_2^T \Xi \Gamma_2) \times g(x(k - \tau(k))) +\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}&h^2(g(x(k - \tau(k))))^T I_1^T \Xi D_\mu \times \\ &(\bar{D} \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)))^T + h^2((\bar{D} + \sigma_\theta \hat{D}) \times \\ &\sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)))^T P \bar{D} \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)) + \\ &h^2((\bar{D} + \sigma_\theta \hat{D}) \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)))^T \times \\ &P \bar{C} g(x(k - \tau(k))). \quad (12)\end{aligned}$$

类似地,

$$\begin{aligned}E\{\Delta V_2\} &= E(\sum_{j=1}^q (g^T(x(k)) Q_j g(x(k)) - \\ &g^T(x(k - \tau_j)) Q_j g(x(k - \tau_j)))) = \\ &g^T(x(k)) (\sum_{j=1}^q Q_j) g(x(k)) - \\ &g^T(x(k - \tau_j)) Q_j g(x(k - \tau_j)), \quad (13)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E\{\Delta V_3\} &= \{E \sum_{j=1}^q \sum_{i=-\tau_j}^{-1} (g^T(x(k)) Z_j g(x(k)) - \\ &g^T(x(k+i)) Z_j g(x(k+i)))\} \leq \\ &g^T(x(k)) (\sum_{j=1}^q \tau_j Z_j) g(x(k)), \quad (14)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}E\{\Delta V_4\} &\leq E\{\bar{\mu} f^T(x(k)) R f(x(k))\} - \\ &\bar{\mu}^{-1} (\sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)))^T \times \\ &R (\sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m))). \quad (15)\end{aligned}$$

由假设 1 和假设 2 可直接得到:

$$\begin{cases} -\xi^T(k) W^T \tilde{Y}_1 W \xi(k) + 2\xi^T(k) W^T \tilde{Y}_2 f(x(k)) - \\ g^T(x(k)) g(x(k)) \geq 0; \\ -\xi^T(k) W^T \tilde{V}_1 W \xi(k) + 2\xi^T(k) W^T \tilde{V}_2 f(x(k)) - \\ f^T(x(k)) f(x(k)) \geq 0, \end{cases} \quad (16)$$

式中:

$$\begin{aligned}\tilde{Y}_1 &= (Y_1^T Y_2 + Y_2^T Y_1) / 2; \tilde{Y}_2 = (Y_1^T + Y_2^T) / 2; \\ \tilde{V}_1 &= (V_1^T V_2 + V_2^T V_1) / 2; \tilde{V}_2 = (V_1^T + V_2^T) / 2. \\ \text{令 } \eta(k) &= [\xi^T(k) \quad g^T(x(k)) \quad g^T(x(k - \tau_k)) \\ &\sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m))]^T,\end{aligned}$$

可以得出:

$$\begin{cases} E\{\Delta V(k)\} \leq \eta^T(k) \varphi \eta(k), \\ E\{\Delta V(k)\} \leq 0. \end{cases} \quad (17)$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知,系统均方稳定。

定义 2<sup>[8]</sup> 给定标量  $\gamma > 0$ , 滤波误差系统是渐近稳定的且满足  $H_\infty$  性能  $\gamma$ , 如果在零初始条件下, 对于一切非零的  $w(k) \in L_2[0, \infty)$ , 系统渐近



稳定,并且滤波误差 $e(k)$ 满足:

$$\sum_{k=0}^{+\infty} E\{\|e(k)\|_2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{+\infty} E\{\|w(k)\|_2\}. \quad (18)$$

定理2 给定参数 $A_f$ 、 $B_f$ 和 $L_f$ ,设 $\gamma$ 是一个正

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & W^T \tilde{Y}_2 & h(hA_\mu^T + I)\Xi\Gamma_1 & h(h\bar{A}^T + I)P\bar{D} & h(h(\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T) + I)P\bar{B} \\ * & \varphi_{22} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \varphi_{33} & h^2 I_1^T \Xi D_\mu & h^2 I_1^T \Xi B_\mu \\ * & * & * & \varphi_{44} & h^2 \bar{D}^T P\bar{B} \\ * & * & * & * & \varphi_{55} \end{bmatrix} < 0, \quad (19)$$

则滤波误差系统渐近稳定并具有 $H_\infty$ 性能。式中:  $\Phi_{11} = \varphi_{11} + \bar{L}^T \bar{L}$ ;  $\varphi_{55} = h^2 \bar{B}^T P\bar{B} - \gamma^2 I$ ;  $\varphi_{22}$ 、 $\varphi_{33}$ 和 $\varphi_{44}$ 由式(10)给出。

证明: 易证明当 $\Phi < 0$ 时 $\varphi < 0$ ,由定理1可知,当 $w(k) = 0$ 时滤波误差系统是均方渐近稳定的。为研究其在零初始条件下的 $H_\infty$ 性能,由此引入性能指标:

$$J(n) = \sum_{k=0}^n E\{e^T(k)e(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k)\}. \quad (20)$$

构造与定理1相同的Lyapunov泛函,进行类似的处理,可得

$$\begin{aligned} E\{\Delta V(k)\} &\leq E\{\eta^T(k)\varphi\eta(k) + h w^T \bar{B}^T P(h(\bar{A} + \sigma_\theta \hat{A}) + I)\xi^T(k) + h^2 w^T(k)\bar{B}^T P\bar{B}w(k) + \\ &h^2 w^T(k)\bar{B}^T P\bar{C}_0 g(x(k - \tau(k))) + h^2 w^T(k)\bar{B}^T P \times \\ &\bar{D} \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m)) + h\xi^T(k)(h(\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T) + I) \times \\ &P\bar{B}w(k) + h^2 g(x(k - \tau(k)))I_1^T \Xi B_\mu w(k) + \\ &h^2 \sum_{m=1}^{+\infty} \mu_m f(x(k - m))\bar{D}^T P\bar{B}w(k)\}. \quad (21) \end{aligned}$$

则由式(20)~(21)可得

$$\begin{aligned} J(n) &= \sum_{k=0}^n E\{e^T(k)e(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k) + \Delta V(k)\} \\ &\leq \sum_{i=1}^n E\{\xi^T(k)\bar{L}^T \bar{L}\xi(k) - \gamma^2 w^T(k)w(k) + \Delta V(k)\} \\ &= \sum_{k=0}^n \eta^T(k)\Phi\eta(k), \end{aligned}$$

式中:  $\eta(k) = [\eta^T(k) \quad w^T(k)]^T$ 。

根据式(19),可推出 $J(n) \leq 0$ 则 $n \rightarrow \infty$ 时可

$$\text{得} \sum_{k=0}^{+\infty} E\{\|e(k)\|_2\} \leq \gamma^2 \sum_{k=0}^{+\infty} E\{\|w(k)\|_2\}.$$

定理3 对于离散网络控制系统,给定常数 $\gamma > 0$ ,如果存在矩阵 $P > 0$ 、 $R > 0$ 、 $Q_j > 0$ 、 $Z_j > 0$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ )、 $X$ 和 $L_f$ 满足:

常数,且当 $w(k) = 0$ 时滤波误差系统是均方稳定的,则在零初始条件下,对于任意非零 $w(k) \in L_2[0, \infty)$ ,如果存在正定矩阵 $P$ 、 $Q_j$ 、 $Z_j$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ )、 $R$ ,使得:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 & \Lambda_3 & \Lambda_5 \\ * & \Lambda_2 & 0 & \Lambda_6 \\ * & * & \Lambda_4 & \Lambda_7 \\ * & * & * & -\Xi \end{bmatrix} < 0, \quad (22)$$

式中:

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & W^T \tilde{Y}_2 \\ * & \Lambda_{22} \end{bmatrix}; \Lambda_3 = \begin{bmatrix} h\sqrt{\sigma_\theta} E_2^T X^T & \bar{L}^T \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\Lambda_5 = \begin{bmatrix} h\Lambda_{510} \\ 0 \end{bmatrix}; \Lambda_6 = \begin{bmatrix} \Xi\Gamma_1 \\ \Xi\bar{D} \end{bmatrix}; \Lambda_7 = \begin{bmatrix} h\Lambda_{710} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\Lambda_2 = \text{diag}\{\Lambda_{33}, \Lambda_{44}\};$$

$$\Lambda_4 = \text{diag}\{-\gamma^2 I, -P, -I\};$$

$$\Lambda_{11} = h\sigma_\theta \bar{A}^T P \hat{A} + h\sigma_\theta \hat{A}^T P \bar{A} + h((\bar{A}^T + \sigma_\theta \hat{A}^T)P + P(\bar{A} + \sigma_\theta \hat{A})) - W^T \tilde{Y}_1 W - W^T \tilde{V}_1 W;$$

$$\Lambda_{22} = \sum_{j=1}^q (Q_j + \tau_j Z_j);$$

$$\Lambda_{33} = h^2 \sigma_\alpha \Pi_2^T \Xi \Pi_2 - \text{diag}\{Q_1, Q_2, \dots, Q_q\};$$

$$\Lambda_{44} = h^2 \sigma_\theta \hat{D}^T P \hat{D} - \mu^{-1} R;$$

$$\Lambda_{510} = [\sqrt{\lambda_1} U_1, \dots, \sqrt{\lambda_q} U_1];$$

$$\Lambda_{710} = [\sqrt{\lambda_1} U_2, \dots, \sqrt{\lambda_q} U_2];$$

$$U_1 = A_0^T P + E_1^T X^T;$$

$$U_2 = B_{10}^T P + F_{10}^T X^T; A_0 = \begin{bmatrix} A_\tau & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$E_1 = \begin{bmatrix} 0 & I \\ \theta_0 E & 0 \end{bmatrix}; E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ E & 0 \end{bmatrix}; B_{10} = \begin{bmatrix} B_\delta \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$F_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix}.$$

若以上条件有可行解,则满足条件的 $H_\infty$ 滤波器参数可由 $X$ 和 $L_f$ 得到:

$$\begin{cases} [A_f \ B_f] = (M^T P M)^{-1} M^T X, \\ \bar{L} = [L \ -L_f]. \end{cases} \quad (23)$$

证明: 令

$$\phi_1 = [h\Xi A_\mu \quad 0 \quad \Xi \Gamma_1 \quad \Xi \bar{D} \quad \Xi \bar{B}];$$

$$\phi_2 = [h\sqrt{\sigma_\theta} PB_f \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0];$$

$$\phi_3 = [\bar{L} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

则式(19)等价于:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & W^T \tilde{Y}_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & A_{22} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & A_{33} & 0 & 0 \\ * & * & * & A_{44} & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \Gamma_1^T \Xi^{-1} \Gamma_1 + \Gamma_2^T P^{-1} \Gamma_2 + \Gamma_3^T \Gamma_3 < 0.$$

应用 Schur 补引理<sup>[16]</sup> 得

$$\begin{bmatrix} A_1 & 0 & \bar{A}_3 & \bar{A}_5 \\ * & A_2 & 0 & A_6 \\ * & * & A_4 & \bar{A}_7 \\ * & * & * & -\Xi \end{bmatrix} < 0.$$

$$\text{其中, } A_3 = \begin{bmatrix} h\sqrt{\sigma_\theta} PB_f & \bar{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \bar{A}_5 = \begin{bmatrix} h\Xi A_\mu \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{A}_7 = \begin{bmatrix} \Xi \bar{B} \\ 0 \end{bmatrix}.$$

定理2中的参数可以写成如下形式:  $\bar{A} = A_0 +$

$$MKE_1 \hat{B}_f = MKE_2 \bar{B} = B_{10} + MKF_{10} M = [0 \quad I]^T K = [A_f \quad B_f] X = PMK. \text{证毕.}$$

### 3 数值仿真

为验证本文方法的可行性, 选取如下参数:

$$A_{\delta 1} = \begin{bmatrix} 0.26 & -0.30 \\ 0.50 & -0.60 \end{bmatrix}; A_{\delta 2} = \begin{bmatrix} -0.36 & -0.55 \\ 0.30 & -0.80 \end{bmatrix};$$

$$A_{\delta 3} = \begin{bmatrix} 0.20 & -0.78 \\ 0.89 & 0.30 \end{bmatrix}; A_{\delta 4} = \begin{bmatrix} 0.03 & -0.42 \\ 0.56 & 0.62 \end{bmatrix};$$

$$B_{\delta 1} = B_{\delta 2} = B_{\delta 3} = B_{\delta 4} = \begin{bmatrix} 0.35 & 0.12 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C_{\delta 1} = C_{\delta 3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; C_{\delta 2} = C_{\delta 4} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$D_{\delta 1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 1 \\ 0.2 & 0.3 \end{bmatrix}; D_{\delta 2} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix};$$

$$D_{\delta 3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 \end{bmatrix}; D_{\delta 4} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0.2 & 0.1 \end{bmatrix};$$

$$E_1 = E_3 = E_4 = [1 \quad 0]; E_2 = [0.6 \quad 0];$$

$$F_1 = [0.5 \quad 1]; F_2 = [0.1 \quad 0.2];$$

$$F_3 = [0 \quad 0.1]; F_4 = [0 \quad 1];$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = [0.3 \quad 0.8].$$

情形1: 随机变量  $\alpha(k)$   $\beta(k)$  和  $\theta(k)$  分别为

$$\alpha_0 = 0.8; \beta_0 = 0.6; \theta_0 = 0.5.$$

利用 MATLAB 的 LMI 工具箱, 通过计算求得

$\gamma = 1.641$ , 滤波器参数为:

$$A_{f1} = \begin{bmatrix} -0.114 & -0.019 \\ -0.024 & -0.123 \end{bmatrix};$$

$$B_{f1} = \begin{bmatrix} -0.644 & 0.325 \\ 0.421 & -0.213 \end{bmatrix};$$

$$L_{f1} = [0.120 \quad -0.923];$$

$$A_{f2} = \begin{bmatrix} -0.127 & 0.156 \\ 0.151 & -0.074 \end{bmatrix};$$

$$B_{f2} = \begin{bmatrix} -0.661 & -0.227 \\ -0.235 & -0.081 \end{bmatrix};$$

$$L_{f2} = [-0.552 \quad 0.420];$$

$$A_{f3} = \begin{bmatrix} -0.863 & -0.047 \\ -0.033 & -0.791 \end{bmatrix};$$

$$B_{f3} = \begin{bmatrix} 0.099 & -0.406 \\ -0.288 & 0.251 \end{bmatrix};$$

$$L_{f3} = [-0.323 \quad -0.955];$$

$$A_{f4} = \begin{bmatrix} -0.234 & 0.627 \\ 0.545 & 0.357 \end{bmatrix};$$

$$B_{f4} = \begin{bmatrix} -0.766 & -0.771 \\ -0.726 & -0.730 \end{bmatrix};$$

$$L_{f4} = [-0.473 \quad -0.233].$$

通过计算得到:

$$\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2 / \|w(k)\|^2} = 1.435 < \gamma.$$

情形2: 随机变量  $\alpha(k)$   $\beta(k)$  和  $\theta(k)$  分别为

$$\alpha_0 = 0.5; \beta_0 = 0.7; \theta_0 = 0.5.$$

利用 MATLAB 的 LMI 工具箱, 通过计算求得

$\gamma = 1.507$ , 滤波器参数为:

$$A_{f1} = \begin{bmatrix} -0.593 & -0.022 \\ -0.020 & -0.349 \end{bmatrix};$$

$$B_{f1} = \begin{bmatrix} 0.477 & -0.650 \\ -0.679 & 0.151 \end{bmatrix};$$

$$L_{f1} = [0.815 \quad -0.062];$$

$$A_{f2} = \begin{bmatrix} -0.383 & 0.139 \\ 0.027 & -0.171 \end{bmatrix};$$

$$B_{f2} = \begin{bmatrix} 0.588 & 0.180 \\ -0.352 & -0.311 \end{bmatrix};$$

$$L_{f2} = [0.146 \quad 0.106];$$

$$A_{f3} = \begin{bmatrix} -0.412 & 0.554 \\ 0.502 & 0.834 \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned}
 B_{f3} &= \begin{bmatrix} 0.112 & 0.292 \\ 0.063 & -0.187 \end{bmatrix}; \\
 L_{f3} &= [0.179 \quad -0.536]; \\
 A_{f4} &= \begin{bmatrix} -0.479 & -0.017 \\ -0.015 & -0.267 \end{bmatrix}; \\
 B_{f4} &= \begin{bmatrix} -0.140 & 0.073 \\ 0.143 & -0.018 \end{bmatrix}; \\
 L_{f4} &= [-0.164 \quad 0.205].
 \end{aligned}$$

通过计算得到:

$$\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2 / \|w(k)\|^2} = 1.395 < \gamma.$$

注3:由情形1、情形2可知,丢包率的改变在一定程度上影响系统的  $H_\infty$  性能。当参数取值  $\alpha_0 = 0$   $\beta_0 = 0$   $\theta_0 = 1$  时,可得文献[8]中的结果。

系统的待估信号、滤波器估计信号和滤波误差状态曲线分别如图1、2所示。由图可以看出,原系统的待估计信号能很好地被滤波器估计,且

因为  $\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \|e(k)\|^2 / \|w(k)\|^2} < \gamma$ , 证明系统具有  $H_\infty$  性能,仿真结果可以表明本文方法的可行性。

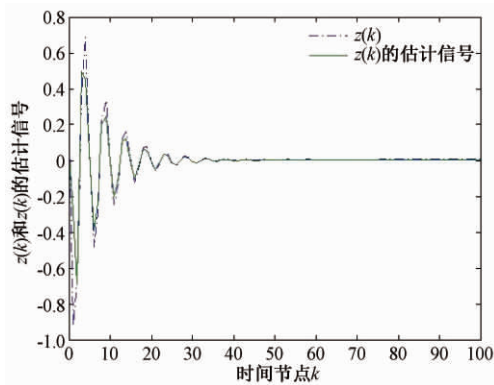


图1  $z(k)$  和  $z(k)$  的估计信号

Figure 1  $z(k)$  and estimated signal of  $z(k)$

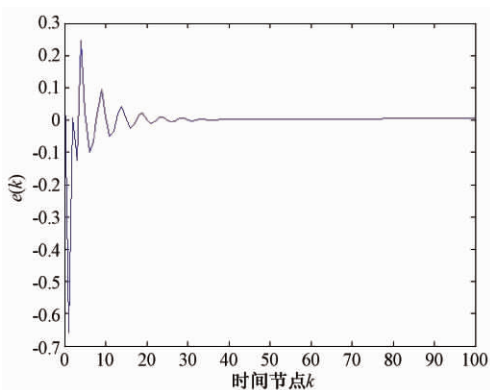


图2 滤波误差  $e(k)$

Figure 2 Filtering error response  $e(k)$

## 4 结论

研究了具有混合随机时延和双边丢包的 Delta 算子网络控制系统的  $H_\infty$  滤波问题。通过马尔科夫随机过程,构造基于 Delta 算子的滤波误差系统,采用 Lyapunov 泛函方法,证明该系统的渐近稳定性,并给出滤波器的设计方法。数值算例表明了所提方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] PAN Y N, YANG G H. Novel event-triggered filter design for nonlinear networked control systems [J]. Journal of the franklin institute, 2018, 355(3): 1259-1277.
- [2] 齐迹,李艳辉. 带宽受限随机网络控制系统的量化  $H_\infty$  滤波[J]. 计算机仿真, 2014, 31(7): 287-290.
- [3] XIN W, WANG J Y, LI X. A feed-forward wavelet neural network adaptive observer-based fault detection technique for spacecraft attitude control systems [J]. Chinese journal of electronics, 2018, 27(1): 102-108.
- [4] CASTRO C A, ALQASSIS A, SMITH S, et al. A wireless robot for networked laparoscopy [J]. IEEE transactions on biomedical engineering, 2013, 40(4): 930-936.
- [5] MA D X, MA J, XU P M. An adaptive clustering protocol using niching particle swarm optimization for wireless sensor networks [J]. Asian journal of control, 2015, 17(4): 1435-1443.
- [6] 张端金,刘雪,范鑫. 基于 Delta 算子时变时延网络控制系统的  $H_\infty$  滤波[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 10-14.
- [7] 刘义才,刘斌,张永,等. 具有双边随机时延和丢包的神经网络系统稳定性分析[J]. 控制与决策, 2017, 32(9): 1565-1573.
- [8] GAO X B, ZHANG D J.  $H_\infty$  filtering for networked control systems with limited communication via delta operator[C]//2016 the 12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). Guilin, China: IEEE, 2016: 339-343.
- [9] MATHIALAGAN K, PARK J H, SAKTHIVEL R, et al. Robust mixed  $H_\infty$  and passive filtering for networked Markov jump systems with impulses [J]. Signal processing, 2014, 101: 162-173.
- [10] SHEN H, WU Z G, PARK J H. Reliable mixed passive and  $H_\infty$  filtering for semi-Markov jump systems with randomly occurring uncertainties and sensor failures [J]. International journal of robust and nonlinear control, 2015, 25(17): 3231-3251.

(下转第46页)

# 基于改进核相关滤波的长时目标跟踪算法

陈丽萍,王铭羽,杨文柱,王思乐,陈向阳

(河北大学 网络空间安全与计算机学院,河北 保定 071002)

**摘要:**长时目标跟踪研究在当前的目标跟踪研究领域占有主导地位。在长时目标跟踪过程中,由于目标快速移动和物体遮挡等造成的模板漂移是研究难点。为解决该问题,提出了一种基于改进核相关滤波的长时目标跟踪算法。该算法采用核相关滤波跟踪框架,联合高置信度的模板更新机制和目标重检机制解决模板漂移问题。实验结果表明,本文算法在长时目标跟踪过程中相对于传统算法更加稳定可靠。

**关键词:**长时目标跟踪;模板漂移;核相关滤波;置信度

**中图分类号:**TP391

**文献标志码:**A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.001

## 0 引言

目标跟踪是计算机视觉领域的重要研究内容,也是计算机视觉领域的难点之一。除了光照变化、障碍物遮挡等环境影响,目标本身的旋转、尺度变化及出视野情况都对进行准确的目标跟踪造成挑战<sup>[1]</sup>。根据观测模型的不同,可将视觉目标跟踪方法分为生成式方法和判别式方法。比较著名的生成式方法有 Meanshift 算法<sup>[2-3]</sup>、粒子滤波算法<sup>[4]</sup>。生成式方法重点关注对目标本身的刻画,不考虑背景的影响,在目标形变剧烈或遮挡严重时容易产生目标漂移;判别式方法同时考虑了目标和背景信息,在现有跟踪方法中具有明显的优势,其中比较经典且性能突出的判别类方法有 FCT 算法(fast compressive tracking)<sup>[5]</sup>和相关滤波算法(correlation filter-based tracking, CFTs)。

相关滤波算法是由 Bolme 最早引入的,该算法通过相关滤波器(minimum output sum of squared error, MOSSE)<sup>[6]</sup>来构造一种自适应的训练策略。由于该算法在实时目标跟踪上的优秀表现,此后基于该算法框架的改进算法被相继提出<sup>[7-10]</sup>,其中最具有影响力的为 Henriques 等<sup>[7]</sup>提出的核相关滤波算法(kernelized correlation filters, KCF)。KCF 不仅能以每秒数百帧的速度运

行,且实现简单,在 VOT(visual object tracking)竞赛测评中展现出明显的高效性和鲁棒性。

传统的相关滤波跟踪算法均是针对短时视频的跟踪研究,而在实际应用中往往需要长时间对目标进行准确跟踪。在进行长时目标跟踪过程中,由于目标的外观变化、周围环境造成的目标遮挡以及光照变化等,传统滤波跟踪算法很容易发生模板漂移现象。

为解决上述问题,提出了一种基于改进核相关滤波的长时目标跟踪算法 LKCF(long-term kernelized correlation filter)。该算法以 KCF 算法为基本跟踪框架,为避免模板漂移,采用了一个高置信度的模板更新机制。另外,通过构造目标重检机制来解决由于遮挡造成的目标丢失问题,以实现鲁棒的目标跟踪。

## 1 LKCF 算法

### 1.1 相关滤波原理

设  $f$  表示输入图像;  $h$  表示相关滤波器;  $g$  表示响应输出,则

$$g = h \otimes f, \quad (1)$$

式中:  $g$  由高斯函数产生;  $h$  为滤波器,在跟踪时,将下一帧的搜索窗口与滤波器进行相关计算,目标的新位置根据响应最大值所对应的位置确定。

收稿日期:2019-06-10; 修订日期:2019-12-12

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(F2015201033, F2017201069)

作者简介:陈丽萍(1974—),女,河北保定人,河北大学讲师,主要从事图像处理和机器视觉研究。

通信作者:杨文柱(1968—),男,河北保定人,河北大学教授,博士,主要从事机器视觉研究与智能系统研究, E-mail: wenzhuayang@163.com。

通过快速傅里叶变换,在频率域计算相关性可加快运算速度。另外,由卷积定理可知:

$$F\{g\} = (F^*(h)) \odot F(f), \quad (2)$$

式中:  $F$  表示傅里叶变换;  $\odot$  表示点乘;  $*$  表示复数共轭,则有

$$H^*(f) = \frac{G(f)}{F(f)}. \quad (3)$$

### 1.2 滤波器训练

LKCF 采用了 KCF 的训练机制。在 KCF 中,对相关滤波器的求解实质是一个岭回归问题,即

$$\min_w \sum_i (\varphi(x_i) - y_i)^2 + \lambda \|w\|^2, \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为正则化参数,用来控制训练的过拟合;  $w$  为权重参数矩阵,用以描述样本  $x$  和评分  $f(x)$  之间的关系。每一个样本  $x_i$  对应一个标记  $y_i \in [0, 1]$ 。通过各种垂直、水平的循环移位来构建训练样本矩阵  $X$  并采用核函数  $K$  将目标  $x$  的低维特征空间映射到高维空间。滤波器  $w$  的求解空间则被转化到对偶空间  $\alpha$  中,核化的岭回归表示为<sup>[11]</sup>:

$$\alpha = (K + \lambda I)^{-1} y, \quad (5)$$

式中:  $I$  为单位矩阵;  $K$  是核矩阵,也是一个循环矩阵,由循环矩阵的性质可以继续化解为:

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{y}}{\hat{k}^{xx} + \lambda}, \quad (6)$$

式中:  $\hat{k}^{xx}$  为  $K$  的第一行元素组成的向量;所求的  $\hat{\alpha}$  即为用于跟踪图像位置的相关滤波器系数。选用高斯函数作为核函数,对于核函数有  $k(x, x') = g(x^T x')$ , 则

$$k^{xx'} = g(F^{-1}(\hat{x}^* \odot \hat{x}')), \quad (7)$$

由高斯核函数的性质可以得到:

$$k^{xx'} = \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2} (\|x\|^2 + \|x'\|^2 - 2F^{-1}(\hat{x}^* \odot \hat{x}'))\right). \quad (8)$$

### 1.3 模板更新机制

传统的相关滤波算法采用的是线性插值方法,该方法能够将最新的特征信息添加到训练模型中,从而简单有效地进行在线跟踪。但是对于实际应用中的复杂环境,相关滤波算法仍存在着很大挑战,如长时跟踪产生的错误累积问题、目标遮挡时的模板漂移问题等。

针对以上问题,通过分析模板更新时对跟踪阶段的影响,提出了对长时目标跟踪的基本解决方案:①设计了最大响应值和响应模式的稳定度两个指标来反映跟踪器的跟踪置信度,以此避免目标在遇到遮挡和严重形变时的跟踪失败;②运用 TLD 算法<sup>[12]</sup>思想将跟踪任务分解为跟踪、学习和检测三部分,以减轻在线模版更

新时的错误累积。检测器负责在检测到跟踪失败时重新初始化跟踪器,把跟丢的目标找回并将产生的误差清零,而跟踪器的结果则提供训练数据来更新检测器。

当新一帧进来时,  $s$  为上一帧目标位置,当前目标位置为  $y = \varphi(s; w)$ 。其中,  $w$  的求解转化到对偶空间  $\alpha$  中,通过式(6)来计算。通过循环采样获得的整个响应图按下式计算<sup>[13]</sup>:

$$F(s; y; w) = F^{-1}(\hat{\psi}_{s0}^* \odot \hat{w}) = F^{-1}(\hat{k}^{\psi_{s0}} \odot \hat{\alpha}), \quad (9)$$

式中:  $\hat{k}$  为岭回归所产生的封闭解的核矩阵;  $\hat{\alpha}$  为回归函数的向量。

为判断跟踪目标位置的精确度,设定了两个基准。第一个基准是响应图  $F(s; y; w)$  中最大响应分数  $F_{\max}$ , 定义为:

$$F_{\max} = \max F(s; y; w), \quad (10)$$

如果当前帧的  $F_{\max}$  小于第一个阈值  $T_a$  (外观阈值),则调用重检测机制,得到新的响应图  $F'$  和相应的  $F'_{\max}$ 。这时如果  $F'_{\max} < 1.5 F_{\max}$ , 则固定目标位置框,提取出历史模版的信息。在接下来的视频流中增加搜索窗口的范围,逐帧查找目标位置,直到历史信息的目标框与当前帧的搜索框之间的目标响应大于  $T_a$  为止。

高置信度更新机制的第二个判断基准为平均峰值相关能量 (average peak-to correlation energy)<sup>[13]</sup>, 即 APCE 为

$$APCE = \frac{|F_{\max} - F_{\min}|^2}{\text{mean}(\sum (F_{ij} - F_{\min})^2)}, \quad (11)$$

式中:  $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$  以及  $F_{ij}$  分别为  $F(s; y; w)$  的最大值、最小值和指定的第  $i$  行第  $j$  列的元素。如果当前帧中的 APCE 大于算法设定的第二个阈值  $T_i$  (运动阈值),则认为当前帧中的跟踪结果是高置信度的。此时,相关滤波模版将会在固定的学习率参数  $\mu$  下进行在线更新,更新方式如下:

$$\hat{x}^t = (1 - \mu) \hat{x}^{t-1} + \mu \hat{x}'; \quad (12)$$

$$\hat{\alpha}^t = (1 - \mu) \hat{\alpha}^{t-1} + \mu \hat{\alpha}', \quad (13)$$

式中:  $t$  为当前帧的索引。

### 1.4 LKCF 算法流程

步骤 1 在首帧中标出欲跟踪目标的位置与尺寸,利用式(6)训练核相关滤波器中的参数;

步骤 2 提取下一帧的图像特征  $f_i$ ,并用式(9)计算响应图  $F(s; y; w)$ ;

步骤 3 通过式(10)和(11)计算两个判断基准  $F_{\max}$  和 APCE;

步骤 4 如果  $F_{\max}$  小于第一个阈值  $T_a$  则调

用检测器  $D_{if}$  实现重检测机制,得到新的响应图  $F'$  和相应的  $F'_{\max}$ 。这时如果  $F'_{\max} < 1.5F_{\max}$ , 则固定目标位置框,调用历史更新中最近的模版信息  $f'_i$ ,加大目标搜索框的 padding 并重复步骤 2、3,计算得  $F'_i$  和相应的  $F'_{\max}$ ,直到  $F'_{\max} > T_a$  时,判断为找回跟踪目标  $f_i = f'_i$ ,其中  $i = \operatorname{argmax}_i f'_i$ ;

步骤 5 保存目标位置信息  $s=f_i$ ;

步骤 6 采用 APCE 基准判断跟踪的置信度,若  $APCE \geq T_i$  则用式(12)和(13)来更新滤波模版  $H_i$ ,否则转到步骤 2;

步骤 7 更新检测器  $D_{if}$ ,转到步骤 2 直到视频结束。

## 2 实验与分析

实验采用 13 个目标跟踪基准数据库 OTB50 和 OTB100 中的具有挑战性的视频序列对提出的算法进行评测,序列涉及了运动模糊(MB)、快速运动(FM)、遮挡(OCC)、背景杂乱(BC)和光照变化(IV)等多种因素。实验结果采用两种度量评估标准:

(1) 成功重叠率(OS),即预测边框与实际边框重叠超过阈值的帧占比,可利用有效帧的重叠率均值来计算;

(2) 距离精度(DP),即跟踪到的位置与目标实际位置的距离小于指定阈值的帧占比。

### 2.1 实验配置

实验用电脑的配置:CPU 为 Intel Core i7,内

存 4 GB,选择 Windows 10 操作系统,使用 MATLAB 7.0 来实现和验证算法。正样本空间  $\alpha$  的窗口大小设置为目标大小的 1.8 倍,搜索窗口的大小设置为目标框空间  $\alpha$  的 1.5 倍。训练过程中的

正则化参数  $\lambda = 10^{-4}$ 。高斯核的  $\sigma = \frac{\sqrt{mn}}{10}$ ,其中  $n$

和  $m$  是指在特征单元中测量目标的宽度和高度。

式(12)和(13)中学习率  $\mu = 0.01$ 。检测阶段中的阈值  $T_a = 0.25$ ,  $T_i = 0.5$ 。

### 2.2 实验比较

在公共基准数据集 OTB100 上将 LKCF 与 7 种典型的跟踪算法进行了对比实验。7 个对比算法包括 Struck(structured output tracking with kernels)<sup>[14]</sup>、TLD(tracking-learn-detection)<sup>[12]</sup>、在线 AdaBoost 方法(OAB)<sup>[10]</sup>、KCF<sup>[7]</sup>以及依据在线分类器分类的跟踪算法 MIL(multiple instance learning)<sup>[15]</sup>、CT(compressive tracking)<sup>[8]</sup>和 ASLA(adaptive structural local sparse appearance model)<sup>[16]</sup>。采用距离精度和重叠成功率评估标准<sup>[17]</sup>,以 0.5 为重叠阈值的重叠率、20 个像素内的精度分数以及平均帧速来定量比较,如表 1 所示。结果显示,LKCF 算法的成功重叠率(OS)为 78.9%、距离精度(DP)为 86.6%,优于其他 7 个对比算法。虽然 KCF 的平均 OS 为 62.2%,DP 为 74.1%,但是 KCF 的帧速率 172 Hz 明显比 LKCF 的 34 Hz 快。这是由于 LKCF 算法的重新检测机制增长了检测时间,但在实际应用中仍可满足工程的实时要求。

表 1 与其他算法的跟踪结果对比

Table 1 Comparison with other algorithms

参数	LKCF	Struck <sup>[14]</sup>	OAB <sup>[10]</sup>	MIL <sup>[15]</sup>	CT <sup>[8]</sup>	ASLA <sup>[16]</sup>	KCF <sup>[7]</sup>	TLD <sup>[12]</sup>
DP/%	86.6	65.6	50.6	47.5	39.4	53.2	74.1	60.8
OS/%	78.9	55.9	39.4	37.3	34.1	51.1	62.2	52.1
帧速率/Hz	34	20	42	38	64	16	172	28

不同环境下目标跟踪效果的分析。将 LKCF 与其他 4 个目前最好的追踪器 KCF、TLD、IVT(incremental visual tracking)和 Struck 在公共数据集 OTB50 上进行了对比,实验效果如图 1 所示。

在图 1(a)中,目标 David 经历光照变化,所有被测试的算法都可以稳定地跟踪目标,原因在于上述算法均使用了基于 PCA 的外观模型,可适应目标的外观变化。在图 1(b)和图 1(c)中,目标对象遭受了重度遮挡,此时只有 TLD 和

LKCF 方法可以完成跟踪,因为它们使用了重新检测机制。在图 1(d)的快速运动场景下,KCF、TLD 和 LKCF 方法表现良好,而 Struck 和 IVT 算法无法在帧#297 之后跟踪目标。在图 1(e)中,目标的运动方向和背景环境发生了很大变化,大多数算法均丢失了目标,只有 LKCF 算法能正确跟踪。在图 1(f)的杂波背景下,KCF 跟踪器由于仅使用了 HOG 特征,使跟踪目标产生了漂移。相比之下,LKCF 和 TLD 跟踪器由于采用了重新检测机制使得跟踪效果更好。





图1 不同场景下的跟踪结果对比

Figure 1 Tracking results in different video scenes

总之,由于采用了重新检测机制和有条件的模板更新机制,笔者提出的 LKCF 算法有效避免了检测中的误差累积和模板漂移问题,完整地完成了跟踪任务。

### 3 结论

通过改进核相关滤波跟踪算法,实现了一种长时核相关滤波目标跟踪算法。①构建了高置信度模版更新机制,使长时目标跟踪中的模板漂移

问题得到较好解决;②构造了目标重检机制,以此解决由于遮挡造成的目标丢失问题。实验结果表明,所提算法在处理长时目标跟踪时,相较于传统算法在效率、准确性和鲁棒性方面表现更好。下一步工作将探索更富表现力的特征来描述目标对象,并扩展尺度变换模块来完善目标跟踪器。

### 参考文献:

[1] 毛晓波,周晓东,刘艳红. 基于 FAST 特征点改进的

- TLD 目标跟踪算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(2): 1-5.
- [2] 毛晓波, 郝向东, 梁静. 基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 1-5.
- [3] HOU Z Q, LIU X, YU W S, et al. Mean-shift tracking algorithm with improved background-weighted histogram [C]//International Conference on Intelligent Systems Design & Engineering Applications. Zhangjiajie, China: IEEE, 2014: 597-602.
- [4] 宋策. 基于粒子滤波的目标跟踪技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2014.
- [5] ZHANG K H, ZHANG L, YANG M H. Fast compressive tracking[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2014, 36(10): 2002-2015.
- [6] 张微, 康宝生. 相关滤波目标跟踪进展综述[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(8): 1017-1033.
- [7] HENRIQUES J F, CASEIRO R, MARTINS P, et al. High-speed tracking with kernelized correlation filters[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2014, 37(3): 583-596.
- [8] ZHANG K H, ZHANG L, YANG M H. Real-time compressive tracking [C]//European Conference on Computer Vision. Florence, Italy: Springer, 2012: 864-877.
- [9] DANELLJAN M, HAGER G, KHAN F S, et al. Discriminative scale space tracking [J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2017, 39(8): 1561-1575.
- [10] GRABNER H, GRABNER M, BISCHOF H. Real-time tracking via on-line boosting [C]//British Machine Vision Conference 2006. Edinburgh, England: British Machine Vision Association, 2006: 47-56.
- [11] 任维雅, 李国辉. 面向监督学习的稀疏平滑岭回归方法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(6): 121-128.
- [12] KALAL Z, MIKOLAJCZYK K, MATAS J. Tracking-learning-detection[J]. IEEE transactions on pattern analysis & machine intelligence, 2012, 34(7): 1409-1422.
- [13] WANG M M, LIU Y, HUANG Z. Large margin object tracking with circulant feature maps [C]//IEEE Conference on Computer Vision. Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2017: 4800-4808.
- [14] HARE S, SAFFARI A, TORR P H S. Struck: Structured output tracking with kernels [C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE, 2011: 263-270.
- [15] BABENKO B, YANG M H, BELONGIE S. Visual tracking with online multiple instance Learning [C]//2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami, Florida, USA: IEEE, 2009: 983-990.
- [16] JIA X, LU H C, YANG M H. Visual tracking via adaptive structural local sparse appearance model [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, USA: IEEE, 2012: 1822-1829.
- [17] VOJIR T, NOSKOVA J, MATAS J. Robust scale-adaptive mean-shift for tracking[J]. Pattern recognition letters, 2014, 49: 250-258.

## An Improved Kernelized Correlation Filter for Long-term Target Tracking

CHEN Liping, WANG Mingyu, YANG Wenzhu, WANG Sile, CHEN Xiangyang

(School of Cyber Security and Computer, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** At present, the research of long-term target tracking played a leading role in the field of target tracking. Due to the target fast moving and object occlusion, the template drift became one of the research issues in this field. To solve the above-mentioned problem, a long-term target tracking algorithm based on the improved Kernelized Correlation Filter was proposed. The kernelized correlation filter algorithm as the tracking framework was used. Furthermore, a highly reliable template update strategy as well as a conditional target re-detection mechanism was constructed to avoid the problem of template drift. Experimental results indicated that the proposed algorithm was more stable and reliable than the traditional algorithm in the long-term target tracking process.

**Key words:** long-term target tracking; template drift; kernelized correlation filter; confidence



文章编号:1671-6833(2020)03-0037-05

# 基于热仿真的动力电池箱结构紧凑化参数优化

张三川, 苗帅宾

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**为解决电动汽车动力电池箱结构的紧凑化设计问题,基于自然冷却风流道面积与流速关系,提出了一种电池模块错位阵列复合凹凸箱体壁的构型,采用热仿真方法研究了电池箱内散热效果随模块间流道几何参数(列距、行距、边距、出入口直径)的演变规律,并通过类比调教函数拟合得到了电池箱布置结构特征尺寸设计式。仿真验证结果表明:对所设计构型结构经局部行距、列距、边距以及内部直角圆角化优化,获得了行距25 mm、列距30 mm、最小边距为15 mm的紧凑化电池箱结构,其电池模块最高温度降为34℃,最大温差降为4.31℃,明显优于电池工作温度设计指标;所建立的紧凑化设计式计算结果与热仿真结果的相对误差小于5%,可用作电池箱结构设计参考。

**关键词:**纯电动汽车;动力电池箱;紧凑化设计;流道参数;热仿真分析

**中图分类号:**U463.1 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.05.020

## 0 引言

动力电池是电动汽车三大核心部件之一,有锂离子电池、氢燃料电池、超级电容和铝空气电池,以及适于特殊车辆的复合电源<sup>[1]</sup>等,其中锂离子电池运用最为广泛。众所周知,锂离子电池充放电过程中会大量发热,其电池特性与环境温度紧密相关<sup>[2]</sup>,因此,基于车辆行驶形成自然风的冷却结构构型就成为了电池箱设计的关键。刘振军等<sup>[3]</sup>对锂离子电池组箱体前后端面增设前大后小的进出风口,增大进风量以降低箱内温度和单体电池温差。吴宏等<sup>[4]</sup>利用狭缝空腔中自然对流换热原理,优化出了一种正面通风口加装风挡板的结构,使冷却空气在电池缝隙的流动更加均匀化。对于电池箱内部模块排列,眭艳辉等<sup>[5]</sup>依据通道面积与风速成反比的关系,采用梯形排列样式平衡了进出口区域电池模块的散热效果,但其形状会明显导致装车空间利用率低下的问题。因此笔者拟采用矩形错位排列与凹凸箱体壁相结合的结构,研究流道参数与电池模块散热的内在关系,探寻电池箱紧凑化设计方法,为高比能量电池箱开发提供理论支持。

## 1 动力电池系统温度场理论

动力电池系统的能量传递采用电化学-热耦合模型,电池内部只考虑导热,并将其简化为一个等效固体,在直角坐标系中方型电池热模型表达为式(1)<sup>[6-8]</sup>:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q, \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为电池密度;  $C_p$  为电池比热容;  $T$  为电池温度;  $Q$  为电池产生的热量;  $\lambda_x$ 、 $\lambda_y$ 、 $\lambda_z$  分别为电池在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的导热系数。

在流动传热过程中,系统除满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律外,还需满足如下湍流方程( $k-\varepsilon$ 模型):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \left( \eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3)$$

式中:  $\eta_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ ;  $k$  为流体传热系数;  $\varepsilon$  为耗散

收稿日期:2019-07-04; 修订日期:2019-11-23

基金项目:郑州市重大科技专项(141PZDZX004, 152PZDZX003)

作者简介:张三川(1962—),男,四川资阳人,郑州大学教授,博士,主要从事汽车轻量化研究, E-mail: sc.zhang@zzu.edu.cn。

率,其系数取值如表 1 所示<sup>[9-10]</sup>。

表 1  $k-\epsilon$  模型的系数取值

Table 1 Values of coefficients in  $k-\epsilon$

$c_\mu$	$c_1$	$c_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_T$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9~1.0

在电池表面与流体对流换热时,表面能量传递满足关系式(4):

$$Q = hA(T_1 - T_0), \quad (4)$$

式中: $Q$  为对流换热能量, W;  $h$  为对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $A$  为换热面积,  $m^2$ ;  $T_0$ 、 $T_1$  为边界两侧温度, K。

## 2 仿真模型与实验设计

### 2.1 热模型

图 1 为电池箱内部模块排列布置结构,初始行距、列距和边距均设为 50 mm,设计的电池箱最大轮廓尺寸 1 070 mm×1 370 mm×150 mm,采用圆形出入风口(入口直径  $D_i$ ,出口直径  $D_o$ ),其中电池模块采用错位排列方式,编号格式为  $x$ (行) $y$ (列),自左向右和自下向上排列,列距  $P_L$ 、行距  $P_T$  和边距  $L_W$  构成冷却空气流道。

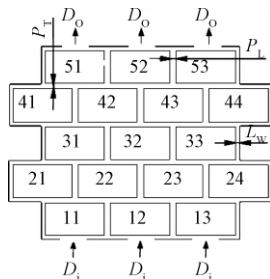


图 1 电池模块阵列方案

Figure 1 Battery module array scheme

假设空气为理想不可压缩流体,流体的边界压力为零,且不考虑其惯性力;单体电池选择磷酸铁锂电池,规格为 20 mm×100 mm×140 mm,型号 3.2 V 22 Ah,质量 0.59 kg;其生热为体热源,且生热速率不受温度影响,不考虑电池组热变形<sup>[11-13]</sup>。

仿真条件设置:入口为自然风,风速 2.5 m/s;电池模块和外部环境初始温度均设为 25 °C;自然对流边界设置为 5 W/(m<sup>2</sup>·K);电池表面与空气接触边界设置为耦合边界;电池采用 1C10A 充电,生热速率为 2 592.86 W/m<sup>3</sup>。

### 2.2 热仿真正交试验

仿真采用 5 因素 4 水平的 16 组正交实验仿真方法,如表 2 所示,其中  $P_L$ 、 $P_T$ 、 $L_W$  均取 20、25、30、35 mm;  $D_i$ 、 $D_o$  均取 90、95、100、105 mm。在此基础上,后续  $L_W$  增加取值 15 mm,  $D_i$  增取 110、120、130 mm。

表 2 5 因素 4 水平正交实验参数

Table 2 L<sup>16</sup>(4<sup>5</sup>) orthogonal experimental parameters

实验号	$P_L$	$P_T$	$L_W$	$D_i$	$D_o$
1	20	20	20	90	90
2	20	25	25	95	95
3	20	30	30	100	100
4	20	35	35	105	105
5	25	20	25	100	105
6	25	25	20	105	100
7	25	30	35	90	95
8	25	35	30	95	90
9	30	20	30	105	95
10	30	25	20	100	90
11	30	30	35	95	105
12	30	35	25	90	100
13	35	20	35	95	100
14	35	25	30	90	105
15	35	30	25	105	90
16	35	35	20	100	95

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 仿真结果

限于篇幅,仅列举第 1、7 组实验结果,温度云图结果如图 2 所示。从图 2 可知,位于冷却风出口端的第 4、第 5 两行中间电池模块有高温分布存在。正交试验仿真结果分析见表 3。由表 3 可知,设计参数按影响散热效果重要性依次递减为:入口直径、列距、边距、行距、出口直径,行距和出口直径对最高温度的影响较小。

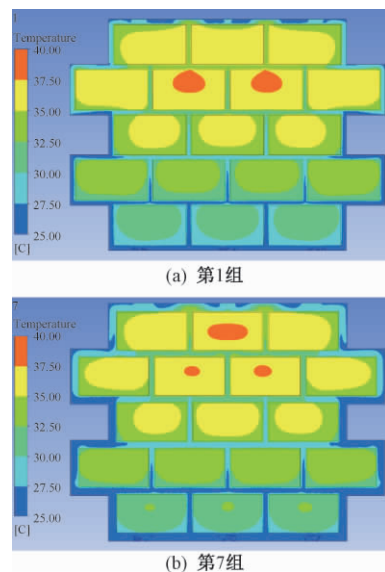


图 2 第 1 组和第 7 组仿真实验温度场云图

Figure 2 Cloud map of temperature field simulation about group 1 and group 7

图 3 为入口直径-最高温度关系图。可以看出,随入口直径增大,最高温度呈不断下降趋势。

显然,入口直径越大,进入电池箱流道的空气量越多,故越利于使电池模块保持较低温升。

表3 仿真结果与极差分析

Table 3 Simulation results and their range analysis

数据	因素				
	列距	行距	边距	入口	出口
统计					
均值	37.06	36.69	36.08	37.30	36.39
	36.51	36.40	36.45	36.88	36.57
	36.30	36.59	36.62	36.08	36.42
	36.09	36.29	36.81	35.70	36.59
极差	0.98	0.40	0.73	1.60	0.21
方差	0.173 0	0.032 7	0.096 3	0.533 5	0.010 4

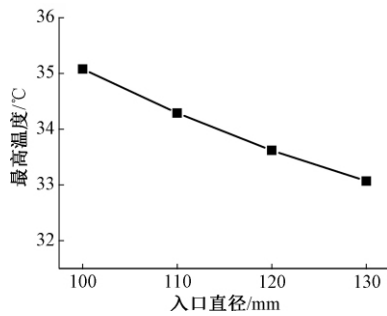


图3 入口直径与最高温度关系

Figure 3 Relationship between inlet diameter and maximum temperature

图4为列距、边距与最高温度关系图。可以看出,随列距增大,最高温度呈现出明显下降趋势,但列距超过30 mm后基本趋于平稳变化;而随边距增大,最高温度呈先减小后增大趋势。得出初步的结构参数优化组合为:边距20 mm,列距30 mm,入口直径120 mm,行距25 mm,出口直径90 mm。

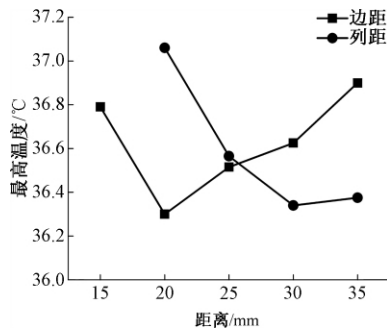


图4 列距、边距与最高温度关系

Figure 4 Relationship between column or side distance and maximum temperature

### 3.2 仿真结果拟合

通过相关性分析,参考相关文献[14],采用类比法,并反复调教函数形式,拟合得到基于最高温度要求的设计式(高温式):

$$T_{\max} = \frac{198.845P_L^{1.4} + 26.586D_i^{1.3}}{P_L D_i} + \lg P_L D_i. \quad (5)$$

图5为高温式计算仿真结果与应用拟合公式计算结果的比较,其最大误差小于5%。

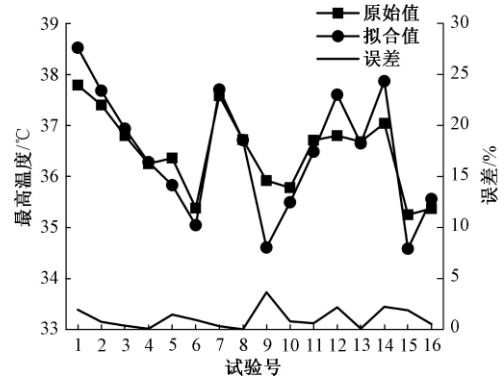


图5 高温式计算与仿真结果比较

Figure 5 Result errors comparison between high temperature formula calculation and simulation

同理,可得基于最大温差的设计式(温差式):

$$\Delta T = \frac{2.899P_L^{1.4} + 10.852L_W^{1.3}}{P_L L_W} + \lg P_L L_W. \quad (6)$$

图6为温差式计算仿真结果与应用拟合公式计算结果的比较,其最大误差也小于5%。

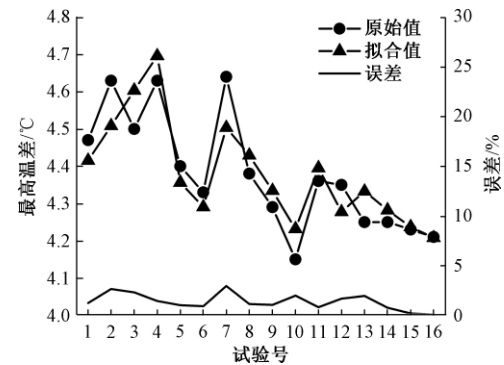


图6 温差式计算与仿真结果比较

Figure 6 Result errors comparison between temperature difference formula calculation and simulation

### 3.3 拟合公式验证

为求解电池箱内部空气流道特征尺寸的最优组合,需优化问题可概括为:

$$\begin{aligned} & \min(k_1 T_{\max} + k_2 \Delta T), \\ & \text{s. t.} \begin{cases} 20 \leq P_L \leq 35; \\ 20 \leq P_T \leq 35; \\ 20 \leq L_W \leq 35; \\ 80 \leq D_i \leq 120. \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

当权重 $k_1$ 、 $k_2$ 不同时( $k_1 + k_2 = 1$ ),求解结果基本一致,主要结构参数圆整结果和初步的结构参数优化组合模型一致,结果如表4所示。

表 4 不同权重系数下的计算结果

Table 4 Calculation results under different weight coefficients

实验	$k_1$	$k_2$	$P_L/\text{mm}$	$D_i/\text{mm}$	$L_w/\text{mm}$
1	0.80	0.20	31.39	120.00	20.00
2	0.70	0.30	31.11	120.00	20.00
3	0.50	0.50	30.36	120.00	20.00
4	0.30	0.70	29.14	120.00	20.00
5	0.20	0.80	28.20	120.00	20.00
圆整	—	—	30.00	120.00	20.00

建立对应的动力电池箱模型,采用 Fluent 仿真得到温度分布云图如图 7 所示( $P_T = 20\text{ mm}$ ,  $D_0 = 90\text{ mm}$ )。

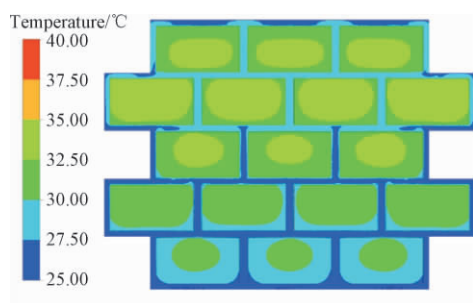


图 7 圆整模型温度场仿真云图

Figure 7 Simulation cloud map of temperature field on the modification model

#### 4 局部尺寸优化

在以上仿真中发现,电池箱内温度较高处主要集中在第 4、5 两排,尤其是第 4 排(Row4)。对 Row4 单独改变边距,电池箱最高温度变化如图 8 所示。

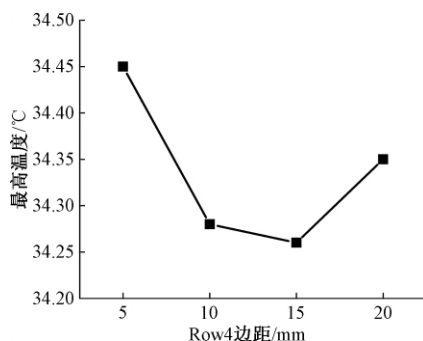


图 8 最高温度与 Row4 边距变化关系

Figure 8 Relationship between maximum temperature and Row 4 sides distance

由图 8 可见,边距  $L_w = 15\text{ mm}$  时,最高温度为  $34.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,极差为  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对最高温度的影响不大,但是高温区面积  $S_{T35}$  首次降为 0,  $S_{T32.5}$  降为  $23.988\text{ dm}^2$ ,  $S_{T30}$  降为  $63.750\text{ dm}^2$ ,温度场均匀性得到较大改善。

位于电池箱左右两侧的箱体圆角半径、数目对最高温度和高温区面积的影响关系结果见图 9。

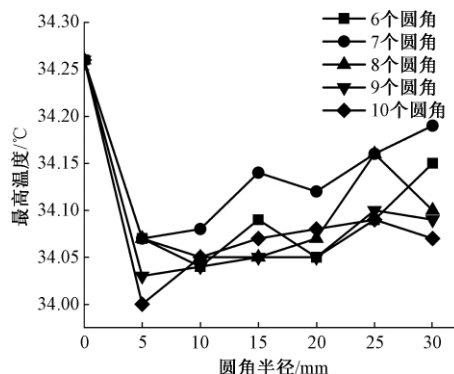


图 9 不同圆角半径、数目与最高温度关系图

Figure 9 Relationship between different fillet radii, number and maximum temperature

由图 9 可见,当电池箱每侧采用 10 个半径  $5\text{ mm}$  圆角时,最高温度为  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,Fluent 计算结果显示高温区面积  $S_{T35}$  为 0,  $S_{T32.5}$  降为  $22.737\text{ dm}^2$ ,  $S_{T30}$  为  $63.806\text{ dm}^2$ 。电池最高温度满足工作范围  $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大温差小于  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的要求<sup>[5]</sup>。将  $D_i = 120\text{ mm}$  模型的各优化历程结果对比见图 10。

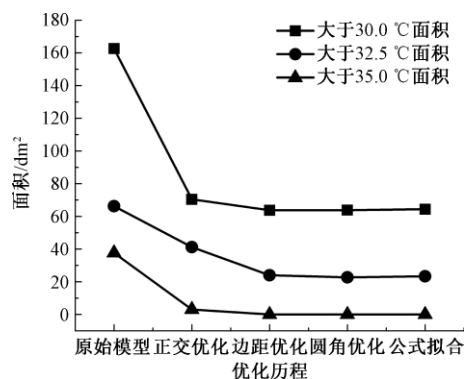


图 10 高温区面积优化历程对比

Figure 10 Comparison of high temperature area in optimization process

此时,电池箱内电池模块的最高温度由  $37.27\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降为  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,下降  $8.77\%$ ;最大温差由  $4.48\text{ }^{\circ}\text{C}$  下降为  $4.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,下降  $3.79\%$ ;高温区面积  $S_{T32.5}$  由  $66.243\text{ dm}^2$  下降为  $22.737\text{ dm}^2$ ,下降  $65.68\%$ ;  $S_{T30}$  由  $162.657\text{ dm}^2$  下降为  $63.806\text{ dm}^2$ ,下降  $60.77\%$ 。与最初设计模型相比,散热效果得到改善的同时,行距由  $50\text{ mm}$  降为  $25\text{ mm}$ ,下降  $50\%$ ;列距由  $50\text{ mm}$  下降为  $30\text{ mm}$ ,下降  $40\%$ ;边距由  $50\text{ mm}$  下降为  $20\text{ mm}$ ,下降  $60\%$ ,Row 4 边距下降  $70\%$ 。

综上优化结果得到紧凑化电池箱结构参数如表 5 所示,可知最终入口直径为  $120\text{ mm}$ 。

表5 紧凑化电池箱结构参数

Table 5 Structural parameters of compact battery box

$P_L$	$P_T$	$L_W$	$D_i$	$D_o$	Row4 边距	圆角 $R$
30	25	20	120	90	15	5

## 5 结论

(1) 提出电池模块矩形错位阵列布置复合凹凸箱体壁的紧凑化构型, 并经行距、列矩和边距等参数, 以及箱体内部直角的圆角半径优化, 最高温度降为  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最大温差降为  $4.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 优于电池工作温度控制在  $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  和模块间温差在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的目标。

(2) 运用正交实验法仿真确认了入口直径、列距和边距等几何特征参数是影响电池箱平衡散热效果的主要因素, 采用类比调教方法建立的紧凑化设计式计算结果与仿真结果的相对误差小于  $5\%$ , 可为高比能量电池箱结构设计计算提供参考。

## 参考文献:

- [1] 贺伊琳, 许世维, 刘瑞, 等. 纯电动赛车复合电源动力系统控制研究[J]. 郑州大学学报(工学版) 2016, 37(1): 40-44.
- [2] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 115-120.
- [3] 刘振军, 林国发, 秦大同, 等. 电动汽车锂电池组温度场研究及其结构优化[J]. 汽车工程, 2012, 34(1): 80-84.
- [4] 吴宏, 李育隆, 杨凯. 电动汽车电池箱通风冷却结构的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 556-560, 565.
- [5] 睦艳辉, 王文, 夏保佳, 等. 混合动力汽车镍氢电池组通风结构优化分析[J]. 汽车工程, 2010, 32(3): 203-208.
- [6] FAN L W, KHODADADI J M, PESARAN A A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of power sources, 2013, 238: 301-312.
- [7] SANTOS I M C, GOWREESUNKER B L, TASSOU S A, et al. Investigations into air and refrigerant side heat transfer coefficients of finned-tube  $\text{CO}_2$  gas coolers[J]. International journal of heat and mass transfer, 2017, 107: 168-180.
- [8] 张新强. 风冷式动力电池热管理系统技术数值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [9] WAGNER M. 热分析应用基础[M]. 陆立明, 译. 上海: 东华大学出版社, 2011.
- [10] FLUENT Inc. FLUENT 6.1.22 user's guide[M]. Lebanon, NH: FLUENT Incorporated, 2003.
- [11] 安治国, 李升东, 张栋省, 等. 动力锂离子电池放电热模拟分析[J]. 电源技术, 2018, 42(2): 188-190.
- [12] 李秋芬. 车用动力电池包的散热仿真分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [13] 罗宗鸿. 电动汽车电池热特性及电池组风冷散热研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [14] 英克鲁佩勒, 德维特, 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 葛新石, 叶宏, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.

## Compact Design Parameters Optimization of Power Battery Box Structure in Electric Vehicle Based on Thermal Simulation

ZHANG Sanchuan, MIAO Shuaibin

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 45001, China)

**Abstract:** In order to solve the compact design problem of power battery box structure in electric vehicle, based on the relationship between channel area and flow speed of natural cooling air, an new configuration scheme that rectangular battery modules were misplaced into arrays and box walls were designed to be concave and convex was proposed. The influence law of channel geometric parameters (column distance, row distance, side distance, entrance diameter) on the cooling effect of battery box was studied by means of thermal simulation method. The simulation results showed that the compact battery box with a column distance of 25 mm and a row distance of 30 mm and a minimum side distance of 15 mm was obtained through the local optimization about column and row and side distance and the internal round angle radius. Its maximum temperature of the battery module dropped to  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the maximum temperature difference dropped to  $4.31\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which was significantly better than the design index of the battery working temperature. The relative error of results between the design formulas calculation and the thermal simulation was less than  $5\%$ , so it could be used as reference for the structure design of battery box.

**Key words:** pure electric vehicle; power battery enclosure; compact design; flow path parameter; thermal simulation analysis

# 基于 ADAMS 的平底从动件凸轮轮廓曲线设计

徐一村, 张磊

(郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 使用 ADAMS 软件反转法设计平底从动件凸轮的轮廓曲线时, 由于推杆与凸轮的接触点位置不固定, 生成的凸轮轮廓线实际为推杆轮廓的包络线, 误差较大。为提高设计精度, 将推杆轮廓离散化, 利用离散后的多个接触点生成多条曲线并取交集运算, 得到了较理想的凸轮轮廓曲线, 为 ADAMS 设计平底从动件凸轮提供新的方法。将生成的凸轮机构进行仿真模拟, 与设计目标作比较, 探讨离散点个数与设计的精度关系。结果表明: 使用离散化方法所设计的凸轮, 从动件位移最大误差约为 0.207 mm, 从动件的推程为 20 mm, 最大误差比例为 1%; 误差大部分在 0.1 mm 范围内, 整体误差比例为 0.5%; 增加离散点个数可以提高凸轮设计的精度。

**关键词:** 平底从动件; 凸轮; 轮廓曲线; ADAMS; 离散化

**中图分类号:** TH112.2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.015

## 0 引言

凸轮设计的基本内容是根据工作要求的凸轮机构形式、推杆的运动规律和有关的基本尺寸, 以及从动件的运动规律设计出凸轮应有的轮廓曲线。凸轮轮廓曲线设计方法有作图法和解析法。作图法难以满足对凸轮精度的要求, 解析法设计的凸轮精度高, 但计算量较大, 过程繁琐。虚拟样机分析软件的应用了解析法设计过程繁琐复杂的问题<sup>[1]</sup>。凸轮机构设计的常用方法为解析法。

目前, 国内外关于凸轮轮廓曲线设计方面的研究主要为基于计算机仿真的凸轮机构运动规律设计, 其中 MATLAB、ADAMS、Solidworks、Pro/E 等软件常作为分析、设计工具应用在凸轮机构的设计研究中<sup>[2-6]</sup>。利用仿真软件设计凸轮轮廓曲线相比传统设计方法, 具有精确度高、设计周期短等优点。

ADAMS 软件可以用于对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析<sup>[7]</sup>, 输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。文献[8-9]利用 ADAMS 软件进行了凸轮机构的解析法设计, 并对从动件的运动规律(位移、速度及加速度)进

行仿真分析, 以实现凸轮轮廓曲线的较高精度设计。

利用 ADAMS 软件, 可以很方便地设计出尖顶从动件凸轮, 现有的文献大多数为设计尖顶从动件凸轮<sup>[10-15]</sup>, 关于设计平底从动件的研究内容较少。尖顶从动件凸轮的设计方法不能应用于平底从动件凸轮, 因为平底从动件凸轮的推杆与凸轮的接触点不固定, 仅靠单一固定的 marker 点生成凸轮轮廓曲线, 误差较大且不合理。笔者利用 ADAMS 设计平底从动件凸轮, 通过将平底从动件离散为多个 marker 点, 生成多条曲线, 取这些曲线的交集即可得到所需的凸轮轮廓曲线。为使用 ADAMS 设计平底从动件凸轮提供了一种新的方法。

## 1 从动件运动规律

在算例 1 中, 凸轮类型为平底直动盘形凸轮, 基本尺寸参数如下: 凸轮基圆半径 50 mm, 从动件推程 20 mm, 推程运动角 120°, 远休止角 30°, 回程运动角 150°, 近休止角 60°。

推程和回程采用简谐运动规律, 在一个运动周期凸轮旋转 360°, 从动件运动方程为:

收稿日期:2019-10-16; 修订日期:2020-01-05

基金项目: 郑州大学线下精品课程建设项目(2019ZZUXXKC013)

作者简介: 徐一村(1979—), 男, 河南平顶山人, 郑州大学讲师, 博士, 主要研究领域为仿生机器人、机械系统动力学, E-mail: xuyicun@zzu.edu.cn。

$$s = \begin{cases} \frac{h}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{\delta_0} \varphi \right), & 0 \leq \varphi < 120^\circ; \\ h, & 120^\circ \leq \varphi < 150^\circ; \\ \frac{h}{2} \left[ 1 + \cos \frac{\pi}{\delta_0'} (\varphi - \delta_0 - \delta_{01}) \right], & 150^\circ \leq \varphi < 300^\circ; \\ 0, & 300^\circ \leq \varphi < 360^\circ, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $s$  代表从动件的位移, mm;  $h$  代表推杆的行程, mm;  $\delta_0$  代表推程运动角 ( $^\circ$ );  $\varphi$  代表转角 ( $^\circ$ );  $\delta_{01}$  代表远休止角 ( $^\circ$ );  $\delta_0'$  代表回程运动角 ( $^\circ$ )。

将以上物理量的数据代入式(1), 得到式(2):

$$s = \begin{cases} 10 \left( 1 - \cos \frac{\pi}{120^\circ} \varphi \right), & 0 \leq \varphi < 120^\circ; \\ 20, & 120^\circ \leq \varphi < 150^\circ; \\ 10 \left[ 1 + \cos \frac{\pi}{150^\circ} (\varphi - 150^\circ) \right], & 150^\circ \leq \varphi < 300^\circ; \\ 0, & 300^\circ \leq \varphi < 360^\circ. \end{cases} \quad (2)$$

凸轮转速为  $30^\circ/\text{s}$ , 所以将上式中“ $\varphi$ ”替换为“ $t \cdot 30$ ”, 得到式(3)。

$$s = \begin{cases} 10 \left( 1 - \cos \frac{\pi}{4} t \right), & 0 \leq t < 4; \\ 20, & 4 \leq t < 5; \\ 10 \left[ 1 + \cos \frac{\pi}{5} (t - 5) \right], & 5 \leq t < 10; \\ 0, & 10 \leq t < 12. \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $t$  为时间。

在 ADAMS 软件中, 时间  $t$  用  $TIME$  表示。因此式(3)在 ADAMS 软件中的函数表达为 “IF (TIME-4: 10\* (1-COS( TIME\* PI/4 ) ), 10\* (1-COS( TIME\* PI/4 ) ), IF (TIME-5: 20, 20, IF (TIME-10: 10\* (1+COS( (TIME-5) \* PI/5 ) ), 10\* (1+COS( (TIME-5) \* PI/5 ) ) ) ) )”。

为了更直观地表达凸轮机构从动件推杆的运动规律, 在 ADAMS 软件中建立凸轮机构模型, 按照式(3)的函数表达式, 仿真模拟生成理想凸轮的推杆位移  $s$  与运动时间  $t$  的曲线图, 如图1所示。

## 2 反转法设计平底从动件凸轮

在 ADAMS 软件中设计平底推杆凸轮的主要步骤: 一是建立从动件模型, 画凸轮基体及建立相关约束; 二是驱动凸轮和从动件按照预定规律运动; 三是建立多个 marker 点生成多条 curve, 将不同 curve 生成的 body 求交, 得到凸轮轮廓。

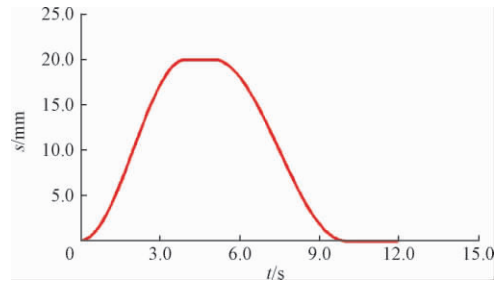


图1 理想凸轮从动件位移曲线图

Figure 1 The displacement curve of the ideal cam follower

### 2.1 建立从动件模型

本次设计的凸轮参照第1部分的算例, 为平底直动盘形凸轮, 并已知凸轮机构的相关参数和从动件运动方程。在 ADAMS 软件中建立从动件模型, 画出凸轮基体。建立圆心坐标为 (0, 0, 0), 半径为 50 mm 的 Sphere, 在 (0, 50, 0) 坐标处建立 Frustum。Sphere 与 ground 建立旋转副约束, Frustum 与 Sphere 建立移动副约束。选择旋转驱动, 速度值设置为  $30^\circ/\text{s}$ , 建立驱动装置 MOTION\_1。选择移动驱动, 参数默认, 在 Function Builder 栏中输入从动件运动方程式(3)的函数表达式, 建立驱动装置 MOTION\_2, 得到从动件模型, 如图2所示。点击仿真按钮, 时间选择 12 s, 步数选择 50。

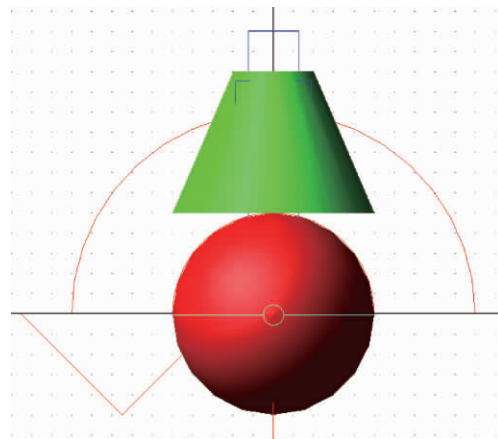


图2 ADAMS 从动件模型

Figure 2 ADAMS follower model

### 2.2 生成 curve

从动件模型运动仿真后, 在从动件上建立 marker 点, 点击 Create Trace Spline 根据从动件的运动规律, 生成 curve。因为平底推杆凸轮在运动过程中推杆与凸轮的接触点不固定, 首先确定平底推杆中心到推杆平底与凸轮廓线的接触距离  $l$ , 其最大距离  $l_{\max}$  为:



$$l_{\max} = \left| \frac{ds}{d\delta} \right|_{\max}, \quad (4)$$

式中:  $s$  为从动件的位移, mm;  $\delta$  为转角, ( $^{\circ}$ );  $\left| ds/d\delta \right|_{\max}$  应根据推程和回程推杆的运动规律分别进行计算, 取其最大值。

代入数据计算  $l_{\max}$  为 15 mm。接触点的取值范围在从动件底部中心位置左右 15 mm, 底部中心位置坐标为 (0, 50, 0), 坐标取值范围为点 (-15, 50, 0) 到点 (15, 50, 0)。

为了提高轮廓曲线的精度, 满足设计预期目标, 在选取 marker 点时, 在取值范围内点的个数尽可能多且分布在不同的区域。在选取点的个数时, 考虑到实际操作和坐标取值范围为 30 mm, 选择 13 个点, 中心位置点 1 个, 左右两侧各 6 个; 在选取点的位置时, 采用均值法, 等间距 (2.5 mm) 取点, 所选取数据具有代表性与合理性。建立 marker 点, 以中心坐标 (0, 50, 0) 为中间点, 左右间隔 2.5 mm 取一个点, 在点 (-15, 50, 0) 到点 (15, 50, 0) 区间内共取 13 个 marker 点, 共生成 13 条 curve。

### 2.3 取多条 curve 交集得到轮廓曲线

取 curve 交集在 CAD 软件中进行处理。将 curve 的坐标提取出来, 导入 CAD 中, 生成多条曲线, 建立多条曲线的面域。利用 INSECT 命令, 可以得到多个面域的交集, 即凸轮轮廓曲线。将 CAD 中的凸轮轮廓曲线坐标导出, 将坐标数据导入 ADAMS 软件中建立凸轮模型, 如图 3 所示。

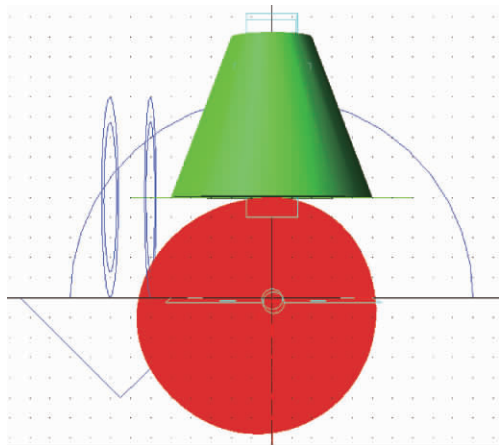


图 3 平底直动盘型凸轮模型

Figure 3 Flat bottom straight disc type cam model

### 2.4 仿真及分析

在 ADAMS 软件中, 对凸轮模型进行相关约束和设置。点击仿真按钮, 时间选择 12 s, 步数选择 50。在 ground 建立 marker 点, 测量从动件在 Y 轴的移动距离, 得到从动件位移曲线图, 如图 4 所示。

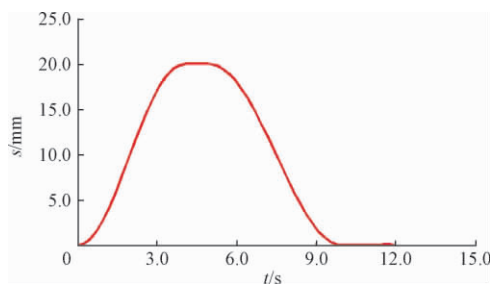


图 4 实际凸轮从动件位移曲线

Figure 4 Actual cam follower displacement curve

为了更加直接地对比分析检测凸轮的设计是否达到预期运动规律, 将两次位移数据和曲线导出进行对比, 查看计算误差是否在理想范围内。实际从动件与理想从动件位移误差如图 5 所示。

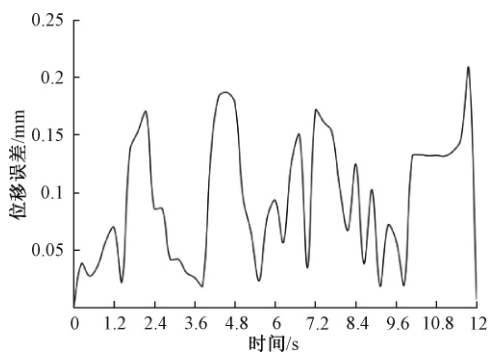


图 5 位移误差分析

Figure 5 Displacement error analysis chart

根据位移误差分析图和导出数据可知, 最大误差约为 0.207 mm, 从动件的推程为 20 mm, 最大误差比例为 1%, 误差大部分在 0.1 mm 范围内, 整体误差比例为 0.5%。在凸轮设计中其误差在理想范围以内, 达到预期目标。

### 2.5 设计位移误差的分析

在 ADAMS 软件中, 在平底推杆与凸轮接触点取值范围内, 建立 marker 点个数分别取 7 个点、3 个点。按照以上的操作步骤, 得到从动件位移误差分析图, 如图 6 所示。

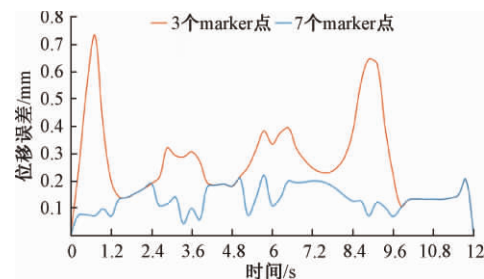


图 6 不同 marker 点位移误差分析

Figure 6 Different marker point displacement error analysis chart

根据图 5、图 6 对比分析可知, 图 5 的 marker 点个数为 13 个, 其位移最大误差为 0.207 mm, 误



差大部分在 0.1 mm 范围内;图 6 中 marker 点个数为 7 个,其位移最大误差为 0.218 mm,误差大部分在 0.1~0.2 mm;图 6 中 marker 点个数为 3 个,其位移最大误差为 0.73 mm,误差大部分在 0.1~0.7 mm。通过 3 次对比分析,在接触点的取值范围内,增加 marker 点个数,从动件位移误差在不断减小,设计出的凸轮轮廓曲线精确度有所提高。在本次算例中,最终设计的凸轮轮廓曲线,其从动件位移最大误差比例为 1%,误差大部分小于 0.1 mm,整体误差比例为 0.5%。

在 ADAMS 软件中设计平底从动件凸轮轮廓曲线,依据传统的反转法原理,生成的凸轮轮廓线实际是推杆轮廓的包络线,误差较大。在本算例中将推杆轮廓离散化,其轮廓被离散为多个点与凸轮接触,不同于尖顶从动件的单点接触,从而在模拟中增加了凸轮与推杆真正接触的概率,仿真的结果更加接近凸轮真实工作的状况。这些离散的 marker 点通过仿真在凸轮基体上生成多条曲线,将这些曲线进行交集运算可以得到较理想的轮廓曲线。

通过分析不同 marker 点的设计位移误差可知,在接触点的取值范围内,通过增加 marker 点个数可以得到更加理想的凸轮轮廓曲线,提高设计精度。

### 3 结论

针对 ADAMS 软件反转法设计平底从动件凸轮轮廓曲线误差较大的问题,提出了一种新的凸轮机构设计方法。对凸轮机构进行仿真分析,主要结论如下:

(1) 利用 ADAMS 软件反转法设计平底从动件凸轮时,使用离散化方法将从动件轮廓离散为多个点,多个 marker 点通过仿真在凸轮基体上生成多条曲线,将这些曲线进行交集运算可以得到更接近理想的轮廓曲线,提高了设计精度,为设计平底从动件凸轮机构提供了新的方法。

(2) 使用离散化方法所设计的凸轮,从动件位移最大误差约为 0.207 mm,从动件的推程为 20 mm,最大误差比例为 1%;误差大部分在 0.1 mm 范围内,整体误差比例为 0.5%,符合设计目标。

(3) 将推杆轮廓离散化,在接触点的取值范围内,增加离散点个数可以提高凸轮轮廓设计的精度。

(4) 利用 ADAMS 软件设计滚子从动件凸轮

采用的离散化方法也可推广应用于从动件与凸轮始终保持相切的凸轮机构设计中。

### 参考文献:

- [1] 刘建波. 一种基于 ADAMS 的凸轮设计方法[J]. 船电技术, 2014, 34(12): 78-80.
- [2] 范志锋, 徐敬青, 崔平. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的凸轮机构仿真设计[J]. 煤矿机械, 2018, 39(1): 141-143.
- [3] 肖思伟, 张晋西, 陈江洪, 等. 基于 SolidWorks 和 Excel 的凸轮设计与运动仿真[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2017, 31(8): 73-75, 92.
- [4] 肖帮东, 黄浩, 徐中. 基于 Matlab 和 Pro/E 的凸轮轮廓曲线设计及从动件运动学仿真[J]. 制造技术与机床, 2016(2): 48-53.
- [5] CHANG Y, LIN R F. Design and analysis of cam mechanisms with a flat-faced follower by the application of support function[C]//Proceedings of 2013 2nd International Conference on Manufacture Engineering, Quality and Production System (ICMEQP 2013). Hong Kong: Information Engineering Research Institute, 2013: 514-520.
- [6] TSUHA N A H, NONATO F, CAVALCA K L. Formulation of a reduced order model for the stiffness on elastohydrodynamic line contacts applied to cam-follower mechanism[J]. Mechanism and machine theory, 2017, 113: 22-39.
- [7] 唐琼. 基于 ADAMS 的凸轮机构分析与动态仿真[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2010, 30(4): 22-24, 30.
- [8] 田涛, 邓双城, 杨朝岚, 等. 基于 ADAMS 软件的偏置直动尖顶推杆盘形凸轮机构设计[J]. 新技术新工艺, 2015(11): 31-33.
- [9] 张志峰, 周力, 杨建辉. 排气门强制开启机构的动态性能研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(2): 108-111, 124.
- [10] 蒋新萍. 基于 ADAMS 凸轮机构的动态分析[J]. 科技通报, 2014, 30(7): 100-103.
- [11] 范云霄, 尤振环. 基于 ADAMS 的凸轮设计[J]. 煤矿机械, 2011, 32(2): 35-37.
- [12] 廖伟隽, 王新海. 基于 ADAMS 的凸轮机构设计及运动学分析[J]. 轻工科技, 2017, 33(11): 42-43, 47.
- [13] 罗卫平, 王珺. 基于 ADAMS/VIEW 凸轮机构的设计及仿真[J]. 机械工程师, 2012(1): 28-29.
- [14] 宫鹏涵. ADAMS2014 虚拟样机从入门到精通[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [15] CHEN X M, PENG B Y, LI Q G, et al. Research on the sliding mode control in cam grinding[C]//Proceedings of 2017 2nd International Conference on Computer, Mechatronics and Electronic Engineering (CMEE 2017). Xiamen: Advanced Science and Industry Research Center, 2017: 458-463.

## Design of Cam Profile Curve of Flat Bottom Follower Based on ADAMS

XU Yicun , ZHANG Lei

( School of Mechanical and Power Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China)

**Abstract:** When design the contour curve of flat-bottomed follower cam through the method of ADAMS software inversion , the error range was always large which resulted from the unfixed place of contact point between the push rod and the cam , as the generated cam contour was actually the envelope of the push rod contour. To improve the accuracy of the design , the discretization method was proposed for the push rod contour. By taking intersection operation of the multiple curves generated from discrete contact points , ideal cam contour curve was obtained , which could provide a new method for designing flat-bottomed follower cam in ADAMS. Here , by doing the analogue simulation and comparing performance with the design target of the cam mechanism , this paper discussed the relationship between the number of discrete points and the accuracy of design. The results showed that the cam mechanism designed by using the discretization method , the follower had a maximum displacement error of about 0.207 mm , the follower's thrust was 20 mm , and the maximum error ratio was 1% ; the error was mostly within the range of 0.1 mm , and the overall error ratio was 0.5% ; and the accuracy of cam design could be improved by increasing the number of discrete points.

**Key words:** flat bottom follower; cam; profile curve; ADAMS; discretization

( 上接第 31 页)

- [11] 周颖 郝凤 何磊. 具有时变时延和丢包的网络控制系统  $H_\infty$  控制 [J]. 计算机技术与发展 2017 27( 5) : 164-169.
- [12] CHANG X H , XIONG J , PARK J H. Resilient  $H_\infty$  filtering for discrete-time systems [J]. Signal processing , 2016 , 127: 71-79.
- [13] 李明扬 张玲 褚东升 , 等. 一类随机不确定网络控制系统的  $H_\infty$  滤波器设计 [J]. 中国海洋大学学报 ( 自然科学版) 2018 48( 4) : 134-139.
- [14] 刘艳红 杨东伟. 基于观测器的网络控制系统均方指数稳定控制器设计 [J]. 郑州大学学报( 工学版) , 2018 , 39( 3) : 10-14.
- [15] MIDDLETON R H , GOODWIN G C. Improved finite word length characteristics in digital control using delta operators [J]. IEEE transaction on automatic control , 1986 , 31( 11) : 1015-1021.
- [16] YANG H J , XIA Y Q , SHI P et al. Analysis and synthesis of delta operator systems [ M ]. Berlin: Springer , 2012.

## $H_\infty$ Filtering for Delta Operator Systems with Two-channel Packet Dropouts and Mixed Delays

ZHANG Duanjin , GUO Lu

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

**Abstract:** In this paper , the problem of  $H_\infty$  filtering for networked control systems using delta operator was investigated , which included two-channel packet dropouts and mixed random delays. Random communication packet dropouts existed in channels both from sensors to controllers and from controllers to actuators. They were represented by two independent Bernoulli distributed white sequences. The mixed random time-delays consisted of network induced time delay and discrete infinite distributed delays. A networked-based model was considered with a Markov stochastic process and the  $H_\infty$  filtering error system was constructed by using Lyapunov-Krasovskii function in delta domain. A sufficient condition for stochastic stability of the filtering error system with an  $H_\infty$  performance was obtained in terms of linear matrix inequalities ( LMI) . The explicit expression of the desired  $H_\infty$  filter was given. A numerical example showed the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** networked control systems;  $H_\infty$  filtering; packet dropouts; random time delays; Delta operator

## GW46-126 高压隔离开关耐温性试验研究

邱正新<sup>1</sup>, 刘本学<sup>2</sup>, 张赛鹏<sup>3</sup>, 李付永<sup>1</sup>, 敖明<sup>3</sup>, 冯世涛<sup>3</sup>, 张任<sup>1</sup>

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 国家电网吉林省电力有限公司 电力科学研究院, 吉林 长春 130021)

**摘要:** 高压隔离开关是电网中广泛使用的开关设备, 其性能的好坏直接决定了用电安全。为评价 GW46-126 型高压隔离开关在不同环境温度下的使用性能, 在气候试验室 $\pm 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度环境范围内, 对隔离开关的触头接触压力、动静触头相对位置、机构操作扭矩、机构输出角等机械参数和电学参数回路电阻随温度变化的规律进行试验研究。通过试验数据采集和分析, 确定环境温度变化对隔离开关机械特性和电学特性的影响, 为进一步优化 GW46-126 型高压隔离开关性能和提高环境温度适用性提供了重要的理论支持。

**关键词:** 高压隔离开关; 超高低温; 触头压力; 相对位置; 耐温性

**中图分类号:** TM564.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.005

### 0 引言

高压隔离开关是电网中使用最广泛、使用量最大的高压开关设备, 其使用量是高压断路器使用数量的 2~4 倍<sup>[1-2]</sup>。其结构包含了多连杆机构、锁死机构、传动机构等, 结构所用材料有普通碳钢、铝合金、铜等不同环境温度差异性材料。当隔离开关在敞开的自然环境中运行时, 由于受到各种恶劣环境对产品的影响, 会出现触头发热、操作卡滞等故障<sup>[3]</sup>。如在我国内蒙古地区, 冬季局部地区气温最低可达到 $-57.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 新疆最高气温可达 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 地表温度最高 $75.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 金属体的温度更高, 因此产品的热胀冷缩变形严重。极端天气下的产品工作与常温下的表现差别巨大。高低温会影响到电力设备零部件材料的物理属性, 直接影响其机械特性, 间接影响其电气特性。但由于现场环境的影响, 事故发生时很难找到根本的原因, 难以作出有效的处理。因此开展超高低温研究对恶劣环境下隔离开关的安全运行具有重要的实用价值和一定的理论意义。

目前对于高压隔离开关的研究主要集中在动

静触头的发热及其在线监测<sup>[4-5]</sup>、机械振动对高压隔离开关变形性能的影响<sup>[6]</sup>、隔离开关故障及诊断<sup>[7]</sup>等方面。关于隔离开关的超高低温研究尚属空白。笔者选择受环境温度影响较明显的剪刀式 GW46-126 隔离开关作为研究对象, 进行超高低温环境对其机械特性和电学特性影响的试验研究。根据试验结果, 笔者分析隔离开关特性与环境温度变化的关系, 总结隔离开关触头可靠性、温升、机构及机械传动等超高低温技术适应性要求, 提供满足超高低温环境的隔离开关研发设计相关的技术支持。

### 1 隔离开关结构

剪刀式 GW46-126 型高压交流隔离开关外形图如图 1 所示, 主要由主刀静触头、主闸刀、绝缘子、底座及操作机构等部分组成。工作原理为: 隔离开关的分、合闸运动是由电动操作机构带动旋转绝缘子旋转, 导电箱体里的空间四连杆通过法兰与旋转绝缘子连接, 电动操作机构工作时, 导电箱体里的空间四连杆带动一侧闸刀运动, 同时与此相连的交叉四连杆带动另一侧闸刀运动, 从而实现隔离开关的分闸与合闸<sup>[8]</sup>。

收稿日期:2019-11-11; 修订日期:2019-12-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51801187); 国家电网有限公司科技项目(5223001600M8); 河南省高等学校重点科研项目(17A460023)

通信作者:刘本学(1977—), 男, 河南上蔡人, 郑州大学高级工程师, 博士, 主要从事结构可靠性分析及优化研究, E-mail: liubenxue@zzu.edu.cn。

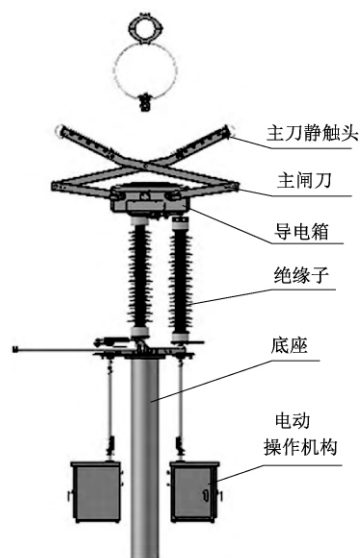


图1 隔离开关

Figure 1 Isolation switch

## 2 试验平台建立

### 2.1 试验原理

为得到该产品的性能,首先将 GW46-126 隔离开关置于具有高低温调节功能的气候试验室内(如图2所示)。在气候试验室模拟产品的环境温度变化,在设定的试验温度下,依照 GB/T 2423.1—2008《电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验 A:低温》与 GB/T 2423.2—2008<sup>[9-10]</sup>《电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验 B:高温》,对 GW46-126 隔离开关进行耐温试验测试(主要进行机械特性测试和部分电学特性测试),并记录 GW46-126 隔离开关机械

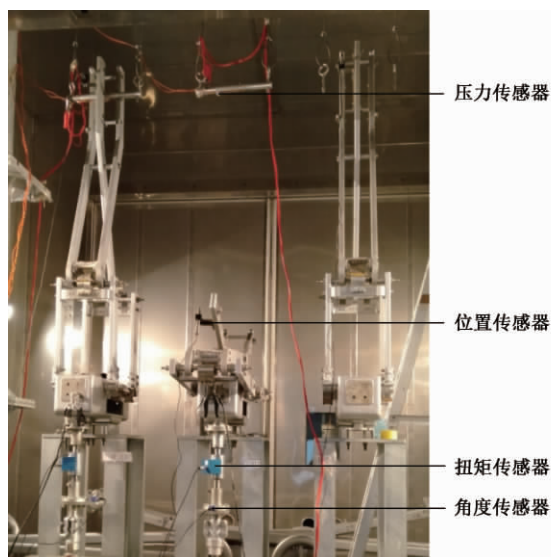


图2 隔离开关室内试验

Figure 2 Laboratory experiment of isolating switch

特性参数与电学参数的试验数据,研究其随温度改变而产生的变化规律,分析环境温度对产品特性的影响。

进行测试时,需要安装接触压力传感器、位置传感器、扭矩传感器和角传感器。气候试验室可调整温度范围为  $-65 \sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 容积为  $6\text{ m}$ (长)  $\times$   $6\text{ m}$ (宽)  $\times$   $5.5\text{ m}$ (高)。

### 2.2 试验方案

隔离开关运行包括长期合闸运行与短时停电维护两种状态。笔者针对该开关的分、合闸状态制定了试验方案,主要包含合闸静态保持状态与电动分合闸操作两种状态。在气候试验室内安放三相 GW46-126 隔离开关试品,一相电路控制合闸静止状态,其余两相电路控制电机驱动操作,在触头上安装位置传感器和压力传感器,机构输出轴位置安装角度传感器和扭矩传感器,隔离开关转动关节涂抹耐低温航空 7007 润滑脂,试验过程中不做任何调整,传感器安装位置及外观如图2所示。

试验温度流程:起始自然环境温度( $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  $\rightarrow$   $60\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$   $20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$   $0\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$   $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$   $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  恢复自然环境温度( $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。设定气候试验室的每个预定温度点,在达到该试验温度点之后,恒温  $8\text{ h}$ ,保证隔离开关试品与试验室温度一致后,隔离开关进行 5 次分、合闸操作,分别检测、记录相应的数值,评估试品的特性变化。试品与传感器同在环境试验室内,试验数据通过数据线传输到试验室外的记录显示装置。

## 3 超高低温对隔离开关耐温性的影响

### 3.1 温度对触头接触压力的影响

触头接触压力是高压隔离开关的重要参数,是保持高压隔离开关传导和不放电的重要保障<sup>[5]</sup>。接触力过小会引起接触电阻增大,出现触头发热、粘连损坏等现象,为此需要进行触头接触压力检测试验<sup>[11-13]</sup>。试验时静触头悬挂在气候试验室顶部,保持位置不变,压力传感器嵌于隔离开关静触杆内(如图2所示),隔离开关动触头钳夹紧触杆产生的接触力就是所检测的接触压力,也就是隔离开关动静触头间的夹紧力。试验前自然环境温度  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,依照 GW46-126 隔离开关设计要求规定的额定接触压力( $(46 \pm 2.5)\text{ kg}$  对应接触压力范围为  $426.3 \sim 475.3\text{ N}$ ) 对其进行调整,满足要求后进行 6 个温度点( $14, 60, 20, 0, -40, -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 环境温度试验。每个温度点进行 5 次接触压力循

环检测,读取检测数值,动静触头间接触压力测试结果如表1所示。

表1 不同温度下动静触头间接触压力测试值

Table 1 Test value of contact pressure of dynamic and static contacts at different temperatures N

序号	接触压力					
	-60 ℃	-40 ℃	0 ℃	14 ℃	20 ℃	60 ℃
1	491.0	470.4	458.4	449.8	429.3	399.2
2	499.6	471.4	454.8	447.8	432.5	397.5
3	513.3	467.9	440.2	449.5	435.0	396.1
4	527.5	464.8	460.1	450.5	439.2	394.4
5	526.8	471.5	474.9	450.2	440.9	399.4
平均值	511.6	469.2	457.6	449.6	435.4	397.3

表1给出了6种温度下触头接触压力的测试值,包括每个温度下5次测试的动静触头间接触压力值及5次测试结果的平均数值。由表1可知,60 ℃时的平均接触压力最小,为397.3 N,小于其设计范围内的最小值426.3 N; -60 ℃时平均接触压力最大,为511.6 N,接触压力相对环境温度为60 ℃时增加了114.3 N,增加28.77%,说明动静触头间的接触压力受环境温度影响较大,同时动静触头间接触压力511.6 N大于其设计要求的最大值475.3 N。利用表1中的测试温度及其所对应接触压力测试结果的平均值绘制隔离开关动静触头间平均接触压力随温度变化曲线,如图3所示。

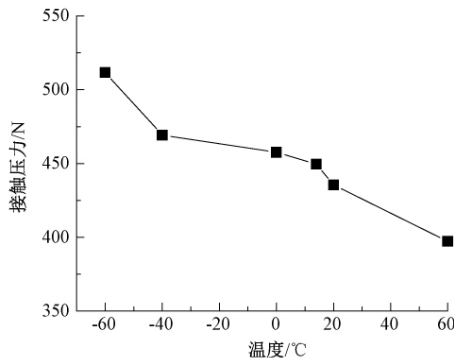


图3 动静触头间接触压力与环境温度的关系

Figure 3 Relationship between contact pressure of dynamic and static contacts and environmental temperature

由图3可知,隔离开关动静触头间接触压力随环境温度的增加而变小。以试验前温度14 ℃时测得的触头接触压力数值为基准,温度升高动静触头接触压力变小,温度下降接触压力增加,因此产品安装时要注意高温环境因接触压力减小带来的电阻升高、触头损坏的问题。

综合考虑图3中动静触头间接触压力与环境温度的曲线关系及表1中的测试数据,可以判断GW46-126型高压隔离开关的合理温度工作范围

为-40~40 ℃,和GW46-126型高压隔离开关的设计工作温度范围(-40~40 ℃)一致。

### 3.2 温度对动静触头相对位置的影响

动静触头相对位置体现在夹持位置的变化和动静触头间接触压力的变化。根据结构相对位置关系,相同情况下,动静触头相对位置越小,位移传感器测得的相对位移量越大,动静触头与高压电缆间接触压力越大。相对位置的测试利用位移传感器实现。位移传感器安装在单相隔离开关动触头的一个动触片上(如图2所示),使位移传感器移动探针能够接触对侧动触片,通过动触片压缩探针检测动触片相对位移量。在自然环境14 ℃下安装调试,设定初始数值,满足检测要求后,分别进行6个温度点的位置检测,相对位置(位移传感器测得的相对位移量)测试结果如表2所示。

表2 不同温度下动静触头相对位置测试值

Table 2 Relative position test value of dynamic and static contacts at different temperatures mm

序号	相对位置					
	-60 ℃	-40 ℃	0 ℃	14 ℃	20 ℃	60 ℃
1	7.226	7.535	7.668	7.902	7.650	7.728
2	7.241	7.49	7.665	7.864	7.726	7.745
3	7.244	7.437	7.721	7.877	7.701	7.801
4	7.298	7.422	7.712	7.907	7.673	7.797
5	7.303	7.448	7.713	7.896	7.675	7.792
平均值	7.262	7.466	7.695	7.889	7.685	7.772

由表2中测试结果平均数值可知,动静触头的接触点相对位置受环境温度变化的影响,其影响曲线如图4所示。

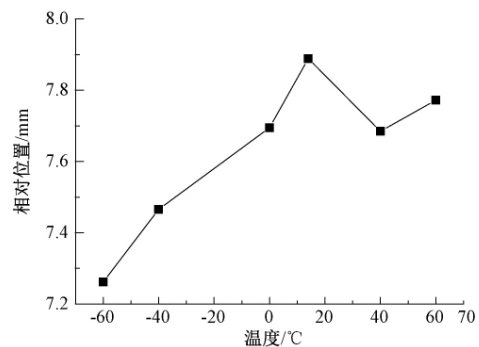


图4 动静触头相对位置与环境温度的关系

Figure 4 Relationship between relative position of dynamic and static contacts and environmental temperature

由表2和图4可知,随着温度升高,动静触头的接触点相对位置(即间隙)总体趋势增大,即位移传感器测得相对位移量变大。当自然环境14 ℃时动静触头接触点相对位置最大,为7.889 mm, -60 ℃时动静触头接触点相对位置最小,为7.262 mm。如果以试验前14 ℃动静触头

相对位置数值为基准,温度下降则动静触头间隙减小,位移传感器测得相对位移量减小;温度上升则动静触头间隙增大,位移传感器测得相对位移量增大。动静触头相对位置变小,其受到的接触压力变大;反之,接触压力变小。因此,在安装调整过程中需要考虑不同温度时的动静触头接触压力,以保证高温时触头能紧密配合,低温时动静触头接触压力不能超过额定接触压力范围。

### 3.3 温度对机构输出扭矩的影响

扭矩传感器安装在机构输出轴上,如图2所示。试验测试前,首先取下隔离开关导电箱体驱

动连杆,空载操作。调整、固定试验装置零部件之间相对位置,保证机构输出扭矩小于 $10\text{ N}\cdot\text{m}$ ,减小预装扭矩值和额外负载,以减小测量误差。然后连接隔离开关驱动连杆,检测自然环境 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下隔离开关基准扭矩,并进行6个温度点环境温度试验。测试数值为合闸与分闸的扭矩最大峰值,测试结果如表3所示。

表3给出了不同温度条件下隔离开关分、合闸时的峰值扭矩测试结果。利用表3中的测试结果绘制隔离开关分、合闸平均操作峰值扭矩随环境温度变化曲线,如图5所示。

表3 不同温度下隔离开关分、合闸操作峰值扭矩

Table 3 Peak torque in opening and closing operation of isolation switch at different temperatures												N·m
序号	峰值扭矩											
	-60 ℃		-40 ℃		0 ℃		14 ℃		20 ℃		60 ℃	
	合	分	合	分	合	分	合	分	合	分	合	分
1	194	214	107	91	75	30	92	47	102	49	132	85
2	188	188	110	93	72	69	87	42	103	57	146	89
3	202	167	109	88	71	43	84	37	108	60	116	89
4	193	193	110	86	71	42	92	47	103	58	123	87
5	197	201	107	83	80	42	82	38	102	60	135	84
平均值	194	192	108	88.2	73.8	45.2	87.4	42.2	103	56.8	130	86.8

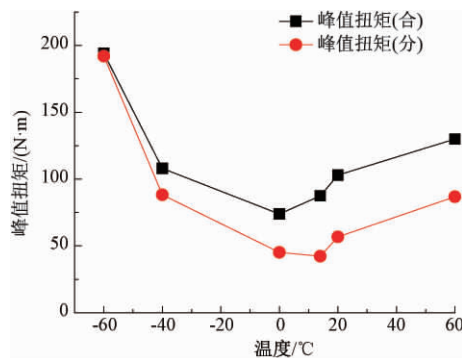


图5 峰值扭矩与环境温度的关系

Figure 5 The relationship between peak torque and environmental temperature

由表3和图5可以看出:①分闸状态, $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下测得分闸机构输出峰值扭矩最小,为 $42.2\text{ N}\cdot\text{m}$ ;  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下测得分闸机构输出峰值扭矩最大,为 $192\text{ N}\cdot\text{m}$ ,是 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下分闸机构输出扭矩的4.5倍; $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分闸机构输出峰值扭矩为 $86.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ,是 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下分闸机构输出扭矩的2.06倍。②合闸状态, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下测得分闸机构输出峰值扭矩最小,为 $73.8\text{ N}\cdot\text{m}$ ;  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下测得分闸机构输出峰值扭矩最大,为 $194\text{ N}\cdot\text{m}$ ,是 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下分闸机构输出扭矩的2.2倍; $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时分闸机构输出峰值扭矩为 $130\text{ N}\cdot\text{m}$ ,是 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下分闸机构输出扭矩的

1.49倍。③相同温度下,隔离开关合闸状态的操作峰值扭矩大于分闸状态时的操作峰值扭矩。④隔离开关分、合闸操作输出峰值扭矩随着温度的升高呈现出先减小再增加的趋势。综上所述,隔离开关分、合闸操作峰值扭矩受外界环境温度的影响较大,且温度对于隔离开关分闸状态操作峰值扭矩的影响大于合闸状态。

### 3.4 温度对机构输出角度影响

隔离开关电动机输出角度允许变化范围为 $(88\pm 2)^{\circ}$ ,空载条件下重复角度误差 $0.1^{\circ}$ 。为检测机构输出角度受环境变化的影响程度,调整机构分合闸限位,自然环境 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下将机构输出角度调整到 $86^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,同时为保证隔离开关能够正常检测操作,在机构箱内安放3个 $100\text{ W}$ 和1个 $30\text{ W}$ 的加热器, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时加热器不工作, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下加热器工作效果如表4所示,机构分合闸操作角度试验测试数据如表5所示。

表4 机构箱体温度

Table 4 Temperature of mechanism box			
序号	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	机构箱内温度/ $^{\circ}\text{C}$	加热器功率/ $\text{W}$
1	0	14.9	130
2	-40	-16.7	200
3	-60	-33.9	300

由表5中检测数据表的数值可得,隔离开关



表5 不同温度下隔离开关分、合闸机构输出角

Table 5 Output angle of opening and closing mechanism of isolation switch at different temperatures (°)

序号	-60 °C		-40 °C		0 °C		14 °C		20 °C		60 °C	
	合	分	合	分	合	分	合	分	合	分	合	分
1	86.45	86.48	87.46	87.48	86.97	87.17	87.89	87.39	88.18	88.2	89.26	89.33
2	86.64	86.57	87.65	87.58	87.26	87.24	88.01	87.18	88.2	88.3	89.2	89.21
3	86.62	86.65	87.6	87.66	87.17	87.27	88.91	87.96	88.4	88.5	88.98	89.17
4	86.5	86.61	87.54	87.59	86.94	87.07	88.63	87.27	88.4	88.47	89.03	88.84
5	86.67	86.61	87.6	87.65	87.03	87.04	88.78	87.36	88.43	88.56	89.11	88.93
平均值	86.58	86.58	87.57	87.59	87.07	87.16	88.44	87.43	88.32	88.41	89.12	89.00

电动机构的输出角受外界环境的变化影响。自然环境 14 °C 温度时分、合闸时机构平均输出角分别为 87.43°、88.44°; -60 °C 温度时分、合闸时机构平均输出角分别为 86.58°、86.58°。相对于检测前(自然环境 14 °C)输出角变化分别为 0.85°、1.86°; 60 °C 温度时分、合闸时机构平均输出角分别为 89°、89.12°, 相对于检测前(自然环境 14 °C)输出角变化分别为 1.57°、0.68°。隔离开关角度的变化一方面受所带负载的影响, 另一方面受温度的变化影响, 隔离开关分、合闸时机构输出角受外界环境温度的影响曲线如图 6 所示。

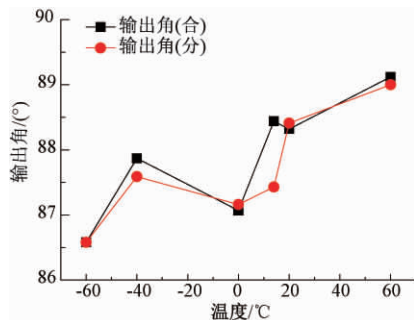


图6 机构输出角与环境温度的关系

Figure 6 Relationship between output angle of mechanism and environmental temperature

由图 6 可以看出, 隔离开关机构输出角随温度的总体变化趋势为随着温度的升高而增加, 变化范围均小于 2°, 满足高压隔离开关机构输出角允许变化范围。

### 3.5 温度对回路电阻的影响

在上述温度下, 应用回路电阻仪检测 100 A 试验电流条件下隔离开关回路电阻, 检测接入点分别为隔离开关的下端接线板和上端静触杆, 结果如表 6 所示。利用表 6 中数据绘制隔离开关回路电阻随环境温度变化曲线, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 隔离开关的回路电阻随环境温度增加而不断增加。60°时电阻比-60°时电阻增加了 103.4  $\mu\Omega$ , 增加了约 41%, 可见高压隔离开关回路电阻受环境温度影响较大。

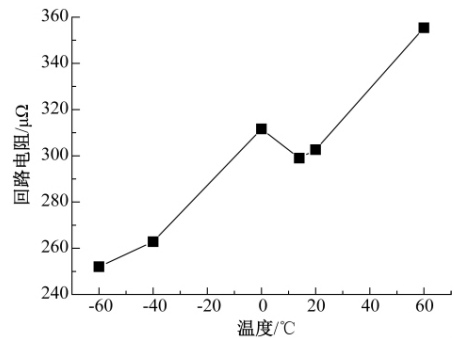


图7 隔离开关回路电阻与环境温度的关系

Figure 7 Relationship between circuit resistance of isolation switch and environmental temperature

表6 不同温度下隔离开关回路电阻

Table 6 Circuit resistance of isolation switch at different temperatures  $\mu\Omega$ 

序号	回路电阻					
	-60 °C	-40 °C	0 °C	14 °C	20 °C	60 °C
1	247	262	311	297	322	347
2	250	272	328	291	297	363
3	255	265	316	299	301	370
4	248	255	307	304	291	342
5	260	260	296	304	302	355
平均值	252	262.8	311.6	299	302.6	355.4

## 4 结论

在气候试验室, 通过测试 GW46-126 型剪刀式高压隔离开关在 60、20、14、0、-40、-60 °C 环境下的触头接触压力、触头相对位移、驱动扭矩、机构输出角度等参数的性能变化, 以及 100 A 电流下温度对隔离开关电阻的影响, 得到以下结论:

(1) 环境温度对于隔离开关动静触头间接触压力、动静触头相对位置、开合闸操作峰值扭矩影响较大, 对机构输出角影响较小。

(2) 随环境温度的增加, 隔离开关动静触头间接触压力变小, 动静触头相对位置数值增大, 分合闸状态扭矩非线性变化, 且环境温度对于隔离开关开闸状态操作峰值扭矩的影响大于合闸状态。

(3) 该项研究结果直接反映 GW46-126 型隔离开关的机械性能参数及电学参数在高低温环境下随温度的变化规律, 可为高压隔离开关的户外应用提供一定的指导。

### 参考文献:

- [1] 江岳文, 钱佳琦. 基于改进蚁群算法的专用输电工程电气设备优化选型[J]. 郑州大学学报(工学版) 2016, 37(4): 15-19.
- [2] PURUSHOTHAMAN S, DE LEON F. Heat-transfer model for toroidal transformers[J]. IEEE transactions on power delivery, 2012, 27(2): 813-820.
- [3] 李宁. 变电站高压隔离开关自动控制技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [4] 滕松, 刘新, 李毅, 等. 电网中高压隔离开关触头接触温升实验测试分析[J]. 电子测量技术, 2019, 42(8): 119-122.
- [5] 黄涛, 冯世涛, 李勣, 等. 高压隔离开关触头温度实时监测技术的研究[J]. 通信电源技术, 2018, 35(3): 241-242.
- [6] 周雨琪. 基于振动分析法的高压隔离开关分合状态振动研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [7] 刘煌煌, 张国灿, 林向宇, 等. 110 kV 高压隔离开关线夹发热故障的分析与研究[J]. 电工技术, 2017, 32(2): 90-91.
- [8] 李竞, 王福亚, 张任, 等. GW46-126 型高压交流隔离开关的研制[J]. 机电工程技术, 2016, 45(2): 93-96.
- [9] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 A: 低温: GB/T 2423.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 B: 高温: GB/T 2423.2—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [11] 吴旭涛, 马波, 李秀广, 等. 基于有限元分析的不同电压等级 GIS 隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(11): 160-164.
- [12] 韩彬, 林集明, 陈维江, 等. 隔离开关操作速度对特快速瞬态过电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 12-17.
- [13] MOMBELLO E E, MOLLER K. New power transformer model for the calculation of electromagnetic resonant transient phenomena including frequency-dependent losses[J]. IEEE transactions on power delivery, 2000, 15(1): 167-174.

## Experimental Study on Temperature Resistance of GW46-126 High Voltage Isolation Switch

QIU Zhengxin<sup>1</sup>, LIU Benxue<sup>2</sup>, ZHANG Saipeng<sup>3</sup>, LI Fuyong<sup>1</sup>, AO Ming<sup>3</sup>, FENG Shitao<sup>3</sup>, ZHANG Ren<sup>1</sup>

(1. State Grid Ping Gao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China)

**Abstract:** High voltage isolation switch was widely used in power grid. Its performance directly determined the safety of electricity consumption. In order to evaluate the performance of GW46-126 high voltage isolation switch at different ambient temperatures, the experimental studies on the contact clamping force, contact relative position, mechanism operating torque, output angle of mechanism, circuit resistance and other parameters of the isolation switch within the temperature range of  $\pm 60^{\circ}\text{C}$  in climate laboratory were conducted to get the relationship between the qualities and temperature. Through experimental data collection and analysis, the impact of environmental temperature change on the mechanical and electrical characteristics of isolation switch was determined, which could provide important theoretical support for further optimizing the performance of GW46-126 high-voltage isolation switch and improving the applicability of environmental temperature.

**Key words:** high voltage isolation switch; ultra high-low temperature; contact pressure; relative position; temperature resistance



# 齿面残余应力对齿轮轮齿弯曲疲劳寿命的影响分析

刘竹丽<sup>1</sup>, 陈 赟<sup>1</sup>, 王祝新<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 中航光电股份有限公司, 河南 洛阳 471000)

**摘 要:** 为了研究残余压应力对齿轮轮齿弯曲强度及疲劳寿命的影响, 以 ANSYS 有限元软件为工具, 分层建立轮齿表层, 对各深度层施加不同预应力来模拟渗碳淬火齿轮的残余压应力, 并对存在和不存在残余压应力的齿轮分别进行了弯曲强度和弯曲疲劳寿命分析, 得到存在及不存在残余压应力的齿轮最大拉应力分别为 567 MPa 和 650 MPa。结果分析表明, 残余压应力可使齿轮抗弯曲疲劳性能得到较大提高。

**关键词:** 齿轮; ANSYS; 弯曲强度; 疲劳寿命

**中图分类号:** TH132.4

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.013

## 0 引言

齿轮在进行机加工以及热处理时, 温度变化不均、材料相变不均以及材料的塑性变形等会使齿轮表面产生残余压应力。在齿轮工作过程中齿面承受弯曲应力和接触应力, 承受弯曲应力时, 齿面一侧受拉, 另一侧受压, 工艺过程中产生的残余压应力可以抵消一部分齿轮轮齿的工作拉应力, 对延长齿轮寿命、避免轮齿疲劳断裂有积极影响。但齿轮轮齿表面层的残余压应力对轮齿疲劳寿命的影响情况定量分析尚不完善<sup>[1-4]</sup>。笔者基于 ANSYS 平台, 对不存在残余压应力的齿轮以及因渗碳淬火存在残余压应力的齿轮, 分别进行了弯曲强度及寿命分析, 得到了残余压应力对齿轮弯曲疲劳寿命的影响规律, 为齿轮的抗疲劳设计提供了参考。

## 1 算例描述

### 1.1 减速器基本参数

以单向运转直齿圆柱齿轮减速器为例, 基本参数如下: 小齿轮齿数为 21, 大齿轮齿数为 75, 大齿轮齿宽为 51 mm, 输入转矩为 905.95 N·m, 齿轮模数为 3, 齿轮材料为 20CrMnTi 渗碳淬火。

### 1.2 齿面残余应力随深度变化情况

通过剥层方法 X 射线应力检测可知,

20CrMnTi 齿轮经过渗碳淬火处理后, 轮齿表面层存在较大的残余压应力。残余应力值随其距表面的深度而变化, 实测残余应力随深度的变化如图 1 所示。其中径向为齿面法线方向, 切向为齿面切向方向, 轴向为齿轮轴线方向。最大残余压应力出现在距表面层 0.4 mm 处。

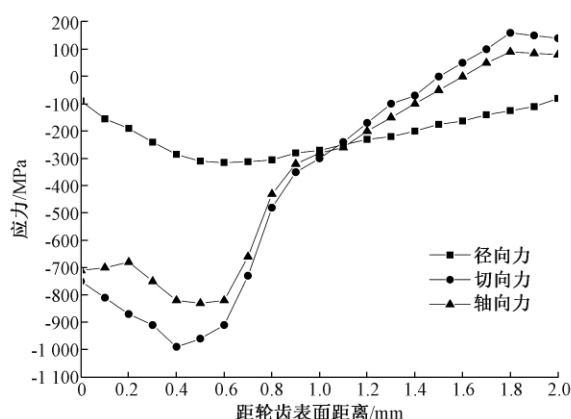


图 1 残余应力值随深度变化情况

Figure 1 The variation of residual stress with depth

## 2 零件的疲劳寿命估计

呈周期性变化的载荷作用于机械零件上, 使得零件内部产生交变应力应变, 导致裂纹产生于零件内部, 随着载荷的不断作用, 裂纹逐渐从内部扩展, 致使零件出现损坏、断裂等现象。

收稿日期: 2019-06-01; 修订日期: 2019-10-07

基金项目: 河南省产学研合作项目(142107000065)

作者简介: 刘竹丽(1968—), 女, 河南灵宝人, 郑州大学副教授, 主要从事机械强度及结构优化设计、虚拟样机技术、CAD/CAE/CAM 集成等研究, E-mail: zhuli\_liu@126.com。

疲劳寿命即为零件从开始工作到疲劳失效时所经历的交变应力循环次数<sup>[5]</sup>。

### 2.1 疲劳寿命分析方法

目前疲劳寿命分析方法有:名义应力法、局部应力应变法和应力场强法。名义应力法根据零件的  $S-N$  曲线,结合参考结构危险部位的名义应力,通过疲劳累积损伤理论分析零件的疲劳寿命,能够估算出弹性范围内的高周疲劳寿命。直齿圆柱齿轮减速器在工作过程中长期承受交变载荷,属于高周疲劳,故选用名义应力法来完成减速器齿轮轮齿疲劳寿命预测<sup>[6-8]</sup>。

线性疲劳累积损伤理论的思想:材料在应力作用下的疲劳损伤是相互独立的;且材料所受损伤是能够线性累加的。该理论未考虑各应力间的相互作用,导致疲劳寿命的计算值偏高,但形式简单,使用方便,在工程中的应用最广<sup>[9]</sup>。笔者采用线性损伤理论的代表——Miner 法则对齿轮疲劳寿命进行研究。

Miner 法则认为,根据线性累积损伤理论和  $S-N$  曲线,材料在应力  $\sigma_1$  作用下循环  $N_1$  次达到破坏,那么经过  $n_1$  循环,材料损伤为  $n_1/N_1$ ,在应力为  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$  时,经受  $n_1, n_2, n_3, \dots, n_n$  次循环,各损伤累积之和等于 1,即:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n} = 1, \quad (1)$$

此时材料发生疲劳破坏。

### 2.2 疲劳寿命理论计算

传动齿轮 20CrMnTi 钢材料特性如表 1 所示。

表 1 20CrMnTi 材料属性

Table 1 Material property of 20CrMnTi

弹性模量/ MPa	泊松比	抗拉强度 $\sigma_b$ /MPa	屈服强度 $\sigma_s$ /MPa	脉动循环疲 劳极限/MPa
$2.07 \times 10^5$	0.3	1 080	850	350

减速器齿轮的  $S-N$  曲线:

$$\lg N = 27.7952 - 8.174014 \lg S, \quad (2)$$

式中:  $S$  为材料所承受的某一应力值;  $N$  为材料在  $S$  应力下循环工作的次数。

## 3 算例分析

### 3.1 几何模型的建立

以 ANSYS 有限元软件为工具,对齿轮进行建模,由于齿轮是轴对称模型,考虑到计算效率,仅建立部分齿模型。齿轮在渗碳淬火处理之后,齿面层残余压应力随轮齿表面深度的变化而变化。为了在分析时更好地模拟残余压应力,得到准确

的齿轮卸载后的应力及位移分布,将齿轮轮齿进行分层建模,每层厚 0.2 mm,将图 1 中残余应力值,以预应力形式施加在每层模型中<sup>[10]</sup>。齿轮轮齿模型如图 2 所示。

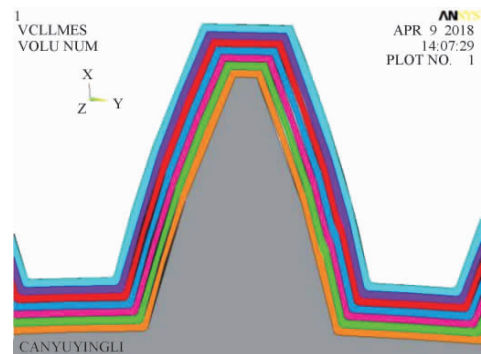


图 2 齿轮轮齿模型

Figure 2 Gear tooth model

### 3.2 网格划分及边界条件的施加

选择 SOLID185 三维单元对模型进行网格划分,对中心孔表面施加全约束<sup>[11]</sup>。本文分析模型为 3 个齿模型,对齿侧断面施加固定约束。

齿轮在双齿啮合状态下,虽然啮合点在齿顶,弯曲力臂大,但此时由两对轮齿分担载荷,齿根处的弯曲应力未达到最大;齿轮在单齿啮合状态下,只有一对轮齿承担载荷,因此在单齿啮合区上界点(图 3 中  $C$  点)<sup>[12]</sup>,齿根处弯曲应力最大,该点为齿轮单齿啮合承载最大点。

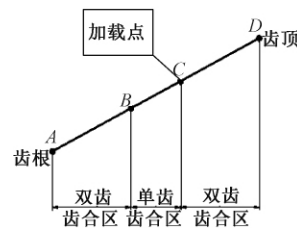


图 3 齿轮轮齿啮合状态

Figure 3 Gear teeth meshing state

通过在单齿啮合承载最大点周围 0.1mm 宽的范围施加均布载荷,来模拟该点实际所承受载荷。

### 3.3 齿轮弯曲强度计算结果及分析

将经过渗碳淬火、存在残余压应力的齿轮称为模型 1,将未经渗碳淬火、不存在残余压应力的齿轮称为模型 2。

对齿轮进行弯曲强度仿真分析计算得到合成应力云图,如图 4、5 所示。图 4 中,模型 1 在啮合力作用下齿根处最大的拉应力为 567 MPa,位于齿根处端面附近,弯曲应力主要集中在载荷作用

点以下到齿根部分的齿面一定深度范围内,其余位置应力较小。图5中,模型2齿根处最大应力为650 MPa,弯曲应力主要集中在近齿根处齿面及齿底一定深度范围,应力随深度增加而减小,其余位置应力较小。

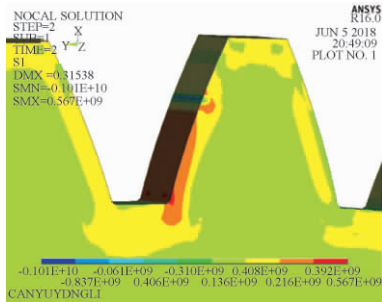


图4 模型1的弯曲应力云图

Figure 4 The bending stress cloud of model 1

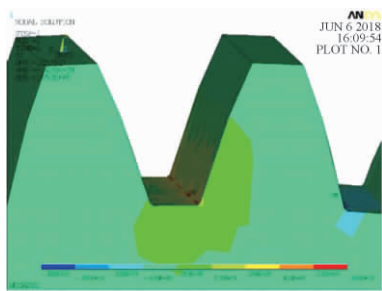


图5 模型2的弯曲应力云图

Figure 5 The bending stress cloud of model 2

为了对残余压应力在轮齿受载后的应力分布有更加深入的了解,在齿宽中心剖面处做应力云图,如图6、7所示。图6中,模型1应力主要集中在齿面中下部一定深度范围内,应力随齿面深度的增加由450 MPa迅速减小,然后又稍稍增大。图7中,模型2应力主要集中在齿底部及齿面中下部一定深度,应力由650 MPa逐渐减小。

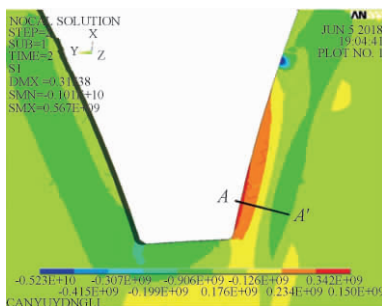


图6 模型1的剖面应力云图

Figure 6 The profile stress cloud of model 1

图8为模型1齿宽中心剖面AA'处应力随深度变化曲线图。由图8可知,径向应力由351 MPa减小到-30.9 MPa;切向应力由10.8 MPa减小到-51.2 MPa;轴向应力由-244.4 MPa先减小后增大到-77.2 MPa;合成应力由364 MPa减小到

-20.4 MPa。图9为最大应力处应力随深度变化曲线图。由图9可知,径向应力由471 MPa减小到-55.2 MPa;切向应力由64.2 MPa减小到-156.4 MPa;轴向应力在0 MPa附近波动;合成应力由508 MPa减小到-10 MPa。

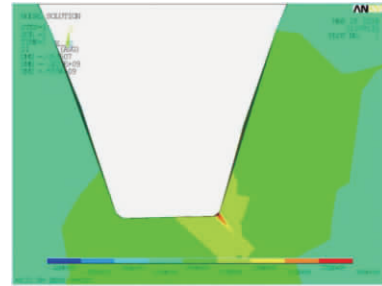


图7 模型2的剖面应力云图

Figure 7 The profile stress cloud of model 2

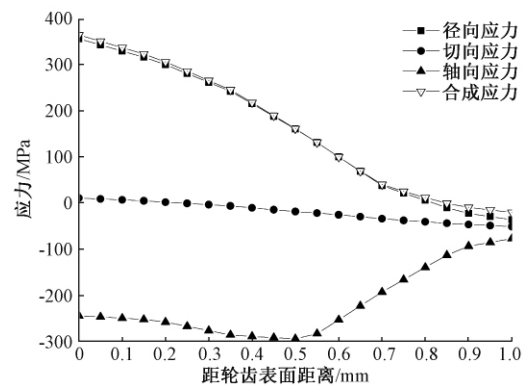


图8 模型1齿宽中心剖面AA'处应力随深度变化曲线

Figure 8 Curve of stress -depth at AA' in the profile of the tooth width center of model 1

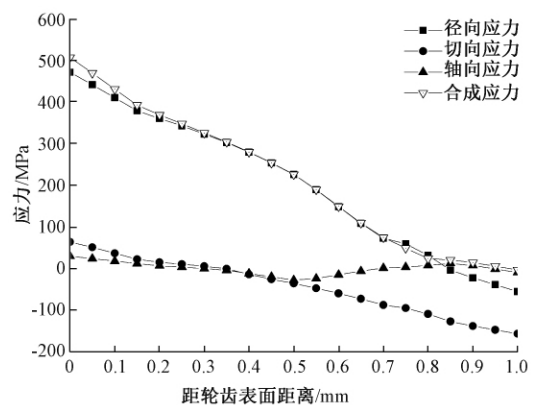


图9 模型1最大应力处应力随深度变化曲线

Figure 9 Curve of stress -depth at maximum stress of model 1

通过对比可知,存在残余压应力的齿轮齿根处弯曲应力相对于不存在残余压应力的齿轮要小,且轮齿表层弯曲应力随深度减小快。因为轮齿表层存在残余压应力,可以抵消一部分工作拉应力,而残余压应力值随深度先增大后减小,故弯曲应力在一定深度后会稍微增大。

### 3.4 齿轮弯曲疲劳寿命计算分析

根据式(2)分别对两模型进行理论疲劳寿命计算,得到模型1疲劳寿命为 $1.11 \times 10^7$ 次,模型2疲劳寿命为 $1.5 \times 10^5$ 次。

ANSYS 疲劳分析是基于 Miner 法则进行的,以弯曲强度分析结果为基础,在疲劳计算模块中,设置应力作用位置、循环次数以及载荷,实现疲劳寿命计算。根据 3.3 节两模型的弯曲强度分析结果,设定应力位置为齿根弯曲应力最大处,齿轮疲劳循环次数设为 10 000 次,分别对其进行疲劳寿命分析,模型1弯曲疲劳寿命为 $1.5 \times 10^7$ 次,模型2疲劳寿命为 $4.396 \times 10^5$ 次。

对比结果可知,残余压应力的存在提高了轮齿的抗弯曲疲劳性能。理论计算值较仿真值小,其原因在于理论计算时将载荷全部加载在轮齿齿顶,且未考虑齿根圆角的影响。因此,仿真计算结果更符合实际工作情况,计算结果更精确,具有可信度。

## 4 结论

采用施加预应力的方法来实现对齿轮经渗碳淬火产生的残余压应力的模拟,并对存在及不存在残余压应力的齿轮分别进行分析。由分析可知:存在残余压应力的齿轮最大拉应力为 567 MPa、不存在的为 650 MPa,从定量角度证明了齿面残余压应力的存在对轮齿强度提高有益。在此基础上分别对两者进行了疲劳寿命分析,结果表明,存在残余压应力齿轮的疲劳寿命约为不存在残余压应力齿轮的 30 倍。相对于简化理论计算,仿真方法计算结果更精确、更符合齿轮实际工作状态,减轻了疲劳试验的工作量,同时硬齿面

齿轮的仿真计算方法为减速器部件、整机强度及疲劳寿命仿真分析提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 陈毅. 20CrMnMo 齿轮齿根残余应力理论及试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [2] 谢俊峰. 喷丸对渗碳齿轮的变质层形成及弯曲疲劳寿命的影响研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [3] LI Z C, FREBORG A M, HANSEN B D, et al. Modeling the effect of carburization and quenching on the development of residual stresses and bending fatigue resistance of steel gears[J]. Journal of materials engineering & performance, 2013, 22(3): 664-672.
- [4] 王广生. 金属热处理缺陷分析及案例[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 84-90.
- [5] 李舜韶. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 11-13.
- [6] 夏云清. 装载机差速器齿轮的非线性接触与疲劳寿命分析[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.
- [7] 杨忠炯, 董栋. 振动对 TBM 液压泵泵轴受力及疲劳寿命影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(4): 6-10.
- [8] 张剑雄, 王良模, 夏汉关, 等. 变速器倒挡齿轮疲劳寿命的有限元分析[J]. 机械传动, 2013, 37(9): 110-112, 117.
- [9] 马朋朋. 基于随机有限元法的行星传动装置疲劳可靠性分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- [10] 杨志强. 渗碳圆柱齿轮淬火过程的数值模拟[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.
- [11] 刘竹丽, 赵敏敏, 马朋朋, 等. 基于 ANSYS 的斜齿轮副接触分析与可靠性分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(2): 6-9.
- [12] 鲍洪, 安琦. 渐开线直齿轮轮齿载荷及应力计算方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2012, 38(1): 116-122.

## The Influence of Residual Stress of Tooth Surface on Bending Fatigue Life of Gear Tooth

LIU Zhuli<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>1</sup>, WANG Zhuxin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. AVIC Jonhon Optronic Technology Co., Ltd., Luoyang 471000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of residual compressive stress on the bending strength and fatigue life of gear teeth, ANSYS finite element software was used as the tool to build the tooth surface in layers, and different prestress forces were applied in each depth of layer to simulate the residual compressive stress of carburizing and quenching gear. The residual compressive stress gear and the absence of residual compressive stress gear were respectively analyzed for flexural strength and flexural fatigue life. The results of the study were that the maximum tensile stress of the gear with and without residual compressive stress were respectively 567 MPa and 650 MPa, which showed that the residual compressive stress could make gear bending fatigue resistance greatly improved.

**Key words:** gear; ANSYS; bending strength; fatigue life

# 轴与齿轮过盈配合参数对齿形的影响研究

周 洋,徐改姣,李大磊

(郑州大学 机械与动力工程学院,河南 郑州 450001)

**摘 要:**为研究轴-齿轮过盈装配对齿形的影响,以拉美公式和渐开线方程为基础,结合有限元方法建立轴-齿轮过盈装配后齿形变形量的计算模型。同时,基于 MATLAB 编写相应的计算程序,并研究了摩擦系数、过盈量等参数对齿轮齿形径向位移的影响。研究结果表明:齿轮的径向变形量随摩擦系数和过盈量的增加而增大,随着齿轮齿数的增加而减小。

**关键词:**过盈装配;拉美公式;摩擦系数;过盈量;径向位移

中图分类号:TH123.4 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.018

## 0 引言

齿轮由于其结构简单、传动平稳等优点而被广泛应用于工程机械中<sup>[1]</sup>。齿轮的传动是通过与轴的配合实现的。其中,轴-齿轮过盈配合因其结构简单、承载能力大、对中性好、抗冲击性强等优点而被普遍用于传动精度高、低振动的设备中<sup>[2-3]</sup>。国内外学者针对过盈配合进行了大量的研究,目前针对轴-齿轮过盈配合的研究主要集中在结合面的应力分布状态的计算方法<sup>[4-9]</sup>、过盈量的确定<sup>[10-12]</sup>和过盈配合对轴、齿轮疲劳寿命及磨损的影响<sup>[13-15]</sup>等方面,所采用的方法大多为有限元法,研究的重点为轴-齿轮过盈配合接触面处的变形和应力。

然而,过盈装配的实质是在装配结合面发生弹性变形,这种变形不仅可以影响到装配结合面,还会影响到齿轮的齿形。过盈配合后齿形的变化会对齿轮副侧隙、啮合线、接触应力等产生影响,而以上参数的变化又会导致齿轮的传递特性和疲劳寿命发生改变。随着齿轮传动系统高速化的发展,齿形变化带来的影响越来越明显。因此,有必要建立轴-齿轮过盈装配后齿形变化的精确计算模型。

综上所述,笔者拟基于渐开线方程和弹性力学中的拉美公式,研究轴-齿轮过盈装配的齿形变化规律,并通过 MATLAB 编写了过盈配合

装配应力应变计算系统,准确获得齿形上任意位置的变形,为齿轮过盈装配后齿形计算提供精确模型。

## 1 理论基础

### 1.1 齿轮与轴过盈装配的应力、位移理论计算

轴-齿轮过盈配合面可简化为图1,其中轴径为 $2R_a$ ,齿轮齿顶圆直径为 $2R_i$ ,过盈配合产生的内应力为 $p$ 。

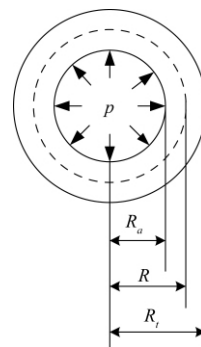


图1 轴-齿轮过盈简化模型

Figure 1 The theoretical model of peg-in-hole

齿轮应力分量与位移为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{R^2 R_a^2 - R_i^2 R_a^2}{R_i^2 R^2 - R^2 R_a^2} p; \\ \sigma_\theta = -\frac{R_i^2 R_a^2 + R^2 R_a^2}{R_i^2 R^2 - R^2 R_a^2} p, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$ 为径向应力; $\sigma_\theta$ 为周向应力。

收稿日期:2019-10-12; 修订日期:2020-01-11

基金项目:河南省高等学校重点科研项目(20A460021)

作者简介:周洋(1984—),男,河南郑州人,郑州大学讲师,博士,主要从事无应力集中装配,E-mail:zhouyang@zzu.edu.cn。

$$u = \frac{R_a^2 p}{E(R_t^2 - R_a^2)} \left[ \frac{(1 + \mu) R_t^2}{R} + (1 - \mu) R \right], \quad (2)$$

同理可得轴任意位置处的径向位移<sup>[11]</sup>:

$$u = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu) R}{E} p, \quad (3)$$

式中:  $\mu$  为材料的泊松比;  $E$  为弹性模量;  $R$  为接触半径到齿顶圆直径之间的任意半径。

### 1.2 轴-齿轮过盈量的确定

由于过盈量的存在,轴在过盈装配后受到压力从而在表面产生压应力,而此时齿轮与轴的配合孔会产生拉应力,这会使轴与齿轮内孔径产生径向位移,总的位移为<sup>[11]</sup>:

$$\Delta = u_1 + u_2, \quad (4)$$

式中:  $u_1$ 、 $u_2$  分别为齿轮与轴的径向变化量。

由式(2)、(3)可知在接合面处,齿轮、轴的径向位移分别为:

$$u_1 = \frac{R_a^2 p}{E(R_t^2 - R_a^2)} \left[ \frac{(1 + \mu) R_t^2}{R_a} + (1 - \mu) R_a \right], \quad (5)$$

$$u_2 = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu) R_a}{E} p. \quad (6)$$

轴-齿轮过盈装配必须保证装配接合面始终在弹性变形范围内。因此,装配接合面处的接触应力必须小于材料的许用应力,过盈配合接触面的二维应力状态为<sup>[11]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2}, \\ \sigma_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\tau_{r\theta} = \beta p$   $\beta$  为摩擦系数。

将  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  代入式(8),可得

$$\sigma_{3r} = \sigma_1 - \sigma_3 < \frac{[\sigma]}{n}, \quad (8)$$

式中:  $[\sigma]$  为材料的许用应力。由式(1)、(2)、(7)、(8)可得最大的接触应力为:

$$p_{\max} < \frac{[\sigma]}{2n \sqrt{\frac{R_a^4}{(R_t^2 - R_a^2)^2} + \beta^2}}, \quad (9)$$

将式(5)、(6)和(9)代入式(4),可得最大过盈量  $\Delta$  为:

$$\Delta = \frac{R_a^2 p_{\max}}{E(R_t^2 - R_a^2)} \left[ \frac{(1 + \mu) R_t^2}{R_a} + (1 - \mu) R_a \right] + \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu) R_a}{E} p_{\max}. \quad (10)$$

### 1.3 齿形变形量计算

轴-齿轮过盈装配会导致齿形发生改变。若要求解齿形的变化量,首先要建立过盈装配前齿

形的计算模型。由于渐开线齿形具有易加工、承载能力大等优点,因此本节选用渐开线齿形为研究对象。

图2为渐开线示意图,齿轮渐开线方程为:

$$\begin{cases} x = R_b(\sin \theta - \theta \cos \theta); \\ y = R_b(\cos \theta + \theta \sin \theta), \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $R_b$  为基圆半径;  $\theta$  为渐开线发生线在基圆上的滚动角。

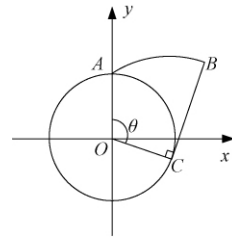


图2 单齿渐开线示意图

Figure 2 The diagram of involute schematic

过盈装配后,  $x$ 、 $y$  坐标变化量为:

$$\begin{cases} \Delta x = u \cos \alpha; \\ \Delta y = u \sin \alpha, \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $u$  为齿轮径向位移量。

$$\alpha = \arctan \left| \frac{y}{x} \right| = \arctan \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|, \quad (13)$$

则新的齿形坐标可表示为:

$$\begin{cases} x' = R_b(\sin \theta - \theta \cos \theta) + u \cos \alpha; \\ y' = R_b(\cos \theta + \theta \sin \theta) + u \sin \alpha. \end{cases} \quad (14)$$

## 2 有限元仿真分析

### 2.1 有限元模型的建立

为验证理论解的准确性,以渐开线斜齿轮为研究对象,开展轴-齿轮过盈配合的有限元分析。

图3为斜齿轮与轴最大过盈量装配时所建立的有限元模型,齿轮模数  $m = 2$ ,齿数  $z = 30$ ,压力角  $\alpha = 20^\circ$ ,模型材料为45钢,具体参数  $E = 2.1 \times 10^5$  MPa,  $\mu = 0.3$ ,  $[\sigma] = 300$  MPa。

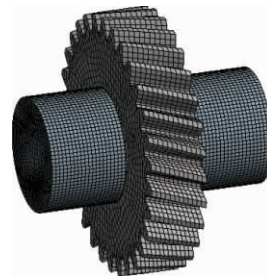


图3 齿轮与轴过盈配合有限元模型

Figure 3 The element model of interference fit



图4为过盈配合区域齿轮配合表面应力分布图,应力从接触区域向四周扩散,接触应力值在66.24~88.639 MPa,中间位置应力79.80 MPa,与理论公式推导出的 $p_{\max} = 77.094$  MPa基本一致。

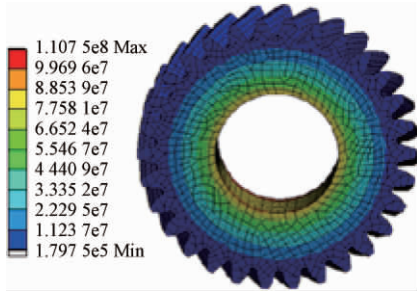


图4 齿轮与轴过盈配合接触应力分布

Figure 4 The distribution of contact stress

## 2.2 理论计算与仿真结果对比分析

将有限元仿真与理论推导结果进行对比,验证理论公式。选取轴径 $R_a = 15$  mm,模数 $m = 2$  mm,压力角 $\alpha = 20^\circ$ ,齿数分别为 $z_1 = 25$ , $z_2 = 30$ , $z_3 = 35$ , $z_4 = 45$ , $z_5 = 50$ 斜齿轮,结果对比如图5、图6所示。

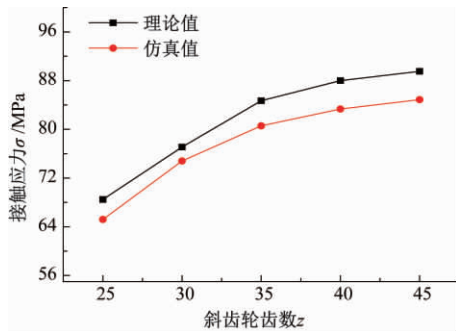


图5 不同齿数接触应力对比图

Figure 5 The contact stress of different number of teeth

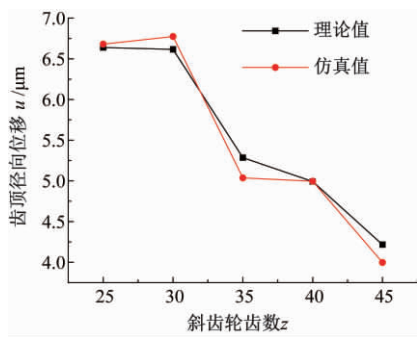


图6 不同齿数齿顶圆的径向位移

Figure 6 The radical displacement under different number of teeth

轴-齿轮过盈装配连接质量取决于装配接合面压力 $p$ 、摩擦系数 $\beta$ 、过盈量 $\Delta$ 等参数。为达到最优装配质量,有必要研究以上参数对接触应力

和齿轮变形的影响。

## 2.3 摩擦系数对接触应力及径向位移的影响

摩擦系数与轴和齿轮表面质量和润滑状态相关,本文摩擦系数 $\beta$ 选取范围是0.1~0.2,根据式(9)、(2)、(4)可分别计算出不同 $\beta$ 时接触应力、接触面处径向位移及过盈量,其变化趋势如图7~8所示。

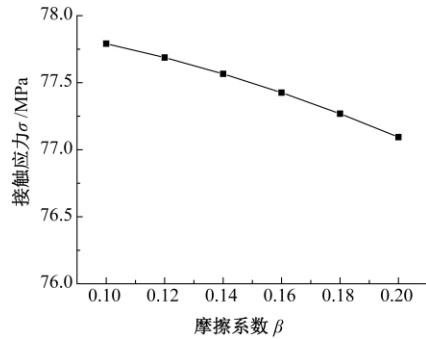


图7 摩擦系数对接触应力的影响

Figure 7 The influence of friction coefficient on contact stress

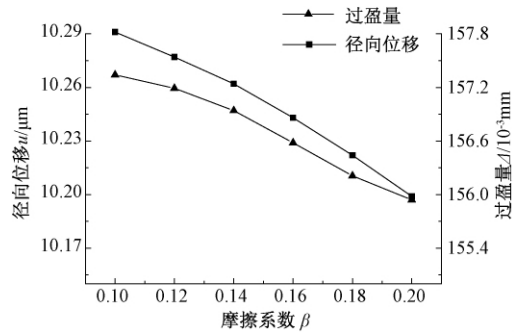


图8 摩擦系数对径向位移与过盈量的影响

Figure 8 The influence of friction coefficient on radical displacement and interference

由图7、图8可得:随着摩擦系数的增加,装配接合面处的接触应力和齿顶处的径向位移逐渐减小。因此,过盈装配时应合理选取 $\beta$ 的取值。

## 2.4 过盈量对接触应力及径向位移的影响

过盈量对过盈装配有重要的影响:过盈量过小,会造成齿轮传动过程中出现打滑现象,无法传递力和扭矩;过盈量过大,会造成装配困难,并导致齿轮和轴发生塑性变形。因此,本节讨论过盈量对接触应力和齿形变形的影响。

本节中,斜齿轮齿数 $z = 30$ ,过盈量 $\Delta$ 范围为9~13  $\mu\text{m}$ 。根据式(2)、(9)可分别计算出不同过盈量对接触应力和齿顶径向位移,其变化趋势如图9所示。由图9可得:在弹性范围内,随着过盈量的增加,装配接合面处的接触应力、径向位移呈线性增大趋势。

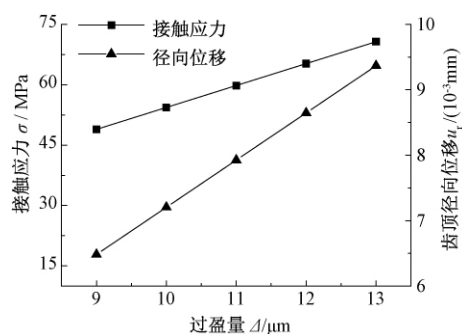


图9 过盈量对接触应力、径向位移的影响

Figure 9 The influence of interference on contact stress and radial displacement

### 3 装配前后齿形变化

由上述章节可知,过盈配合会导致齿形发生改变,而齿形的变化又会导致齿轮副侧隙发生改变。齿轮侧隙过大会导致齿轮在传动过程中产生冲击,过小则会加剧磨损,严重情况下会造成齿轮咬合卡死,造成齿轮箱损坏。因此,有必要对过盈装配后齿形的变化进行研究。

本节中,轴径为  $R_a = 25 \text{ mm}$ ,模数  $m = 4 \text{ mm}$ ,齿数压力角  $\alpha = 20^\circ$ ,齿数  $z = 20$ ,齿轮和轴的材料均选用 45 号钢。由式(10)和 MATLAB 编程可得装配前后齿形变化如图 10 所示。其中, I 处放大大图如图 11 所示。

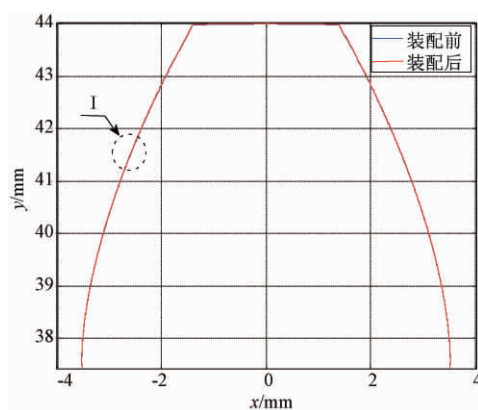


图10 装配前后齿形变化对比图

Figure 10 The contrast of tooth shape before and after assembly

### 4 结论

基于弹塑性力学得到轴与齿轮过盈配合时接触应力、径向位移的解析式,并利用有限元软件验证了解析式的正确性。得到变形后齿轮坐标计算公式,为后续齿轮侧隙的分析提供理论计算模型。具体的结论如下:

(1) 基于渐开线方程建立齿轮装配后齿形变

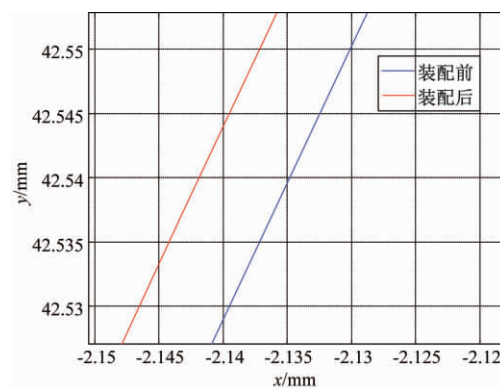


图11 I处放大大图

Figure 11 The enlarged figure of I

化量的计算模型,研究过盈装配对齿形的影响,为齿轮侧隙的设计提供理论基础。

(2) 计算了不同齿数下装配接合面接触应力和径向位移。随着齿数的增加,接触应力逐渐变大,而径向位移逐渐变小。

(3) 研究了摩擦系数对装配接合面接触应力和径向位移的影响。随着摩擦系数的增大,接触应力和径向位移逐渐变小。

(4) 讨论了过盈量对装配接合面处接触应力和径向位移的影响规律。最大接触应力和齿形径向位移随着过盈量的增加呈线性增大趋势。

### 参考文献:

- [1] 刘竹丽,赵敏敏,马朋朋,等. 基于 ANSYS 的斜齿轮副接触分析与可靠性分析[J]. 郑州大学学报(工学版) 2015, 36(2): 6-9.
- [2] 李亚洲,汤易升,陈炜,等. 基于 ANSYS Workbench 对圆柱面过盈配合接触应力的研究[J]. 天津理工大学学报 2017, 33(3): 1-5.
- [3] 濮良贵. 机械设计[M]. 8 版. 北京: 高等教育出版社 2005: 129-136.
- [4] JIN X, ZHANG Z J, YE X, et al. Calculating model of interference amount for miniaturized gear and shaft shrinkFit[J]. Journal of Beijing institute of technology, 2006, 15(2): 138-143.
- [5] ZHANG Y, MCCLAIN B, FANG X D et al. Design of interference fits via finite element method[J]. International journal of mechanical sciences, 2000, 42(9): 1835-1850.
- [6] SEN S, AKSAKAL B. Stress analysis of interference fitted shaft-hub system under transient heat transfer conditions[J]. Materials & design, 2004, 25(5): 407-417.
- [7] 邹渊,孙逢春,王文清,等. 过盈配合时齿轮内径与预应力关系研究[J]. 机械传动, 2003, 27(6): 45-



- 46-55.
- [8] 王少江,李学明,张安鹏,等. 大型焊接齿轮与轴过盈配合有限元分析[J]. 煤矿机械, 2015, 36(5): 140-142.
- [9] 关丽坤,任学平,郭书萍,等. 过盈联接的有限元分析[J]. 机械设计, 2005, 22(增刊1): 275-276.
- [10] CHU S J, JEONG T K, JUNG E H, et al. Effect of radial interference on torque capacity of press- and shrink-fit gears[J]. International journal of automotive technology, 2016, 17(5): 763-768.
- [11] 何亚峰,杨小斌,干为民,等. 齿轮与轴压装过程过盈配合研究[J]. 机械传动, 2014, 38(12): 33-36.
- [12] 张炳义,戴思锐,冯桂宏,等. 磁力齿轮内转子护套过盈量计算及其应力分析[J]. 机电工程, 2017, 34(8): 817-822.
- [13] 贾国海,龚金科,鄂加强,等. 齿轮轴过盈配合对轴肩微动磨损的影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 36-41.
- [14] 赵俊,林腾蛟,钟声,等. 行星轮-轴承过盈配合部位疲劳寿命及其影响因素分析[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(4): 355-361.
- [15] LANOUE F, VADEAN A, SANSCHAGRIN B, et al. Finite element analysis and contact modelling considerations of interference fits for fretting fatigue strength calculations[J]. Simulation modelling practice & theory, 2009, 17(10): 1587-1620.

## Research on the Influence of Interference Fit Parameters of Shaft and Gear on Tooth Profile

ZHOU Yang, XU Gaijiao, LI Dalei

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to study the influence of shaft-gear interference fit on tooth profile, the calculation model of the tooth deformation was proposed by combining the shaft-gear interference which based on Lamé equation and involute equation was established by finite element method in this paper. At the same time, the corresponding calculation program was compiled based on MATLAB, and the influence of the friction coefficient, interference and other parameters on the radial displacement of the gear tooth shape was studied. The results showed that the radial deformation of the gear increased with the increase of the friction coefficient and interference, and decreased with the increase of the number of teeth.

**Key words:** interference fit; Lamé equation; friction coefficient; interference; radial displacement

# 基于 WBS-RBS 和 AHP 的港珠澳大桥人工岛建设风险分析

李宗坤, 王 特, 葛 巍, 宋子元

( 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 针对港珠澳大桥人工岛建设系统复杂、不确定因素多的问题,运用 WBS-RBS 方法对该工程进行项目结构分解和风险分解,构建了 WBS-RBS 风险识别矩阵。采用层次分析法和风险度理论计算各指标层的权重和风险度,并对该工程进行了风险评价。结果表明:港珠澳大桥人工岛建设总体风险水平为 3 级中等风险,与工程实际相符合,说明该方法是合理可行的,可为类似工程建设风险评价体系的构建提供借鉴和参考。

**关键词:** 人工岛; 港珠澳大桥; 层次分析法; 风险因素; 权重; 风险度

**中图分类号:** TV512 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.019

## 0 引言

人工岛建设相比于内陆工程建设,具有施工环境复杂、不确定因素多及技术难度高等特点。考虑到此类工程规模庞大、安全指标要求高且管理困难,必须对工程进行系统的风险分析,识别出各工作阶段的风险因素,并作出综合性评价。

国内对于人工岛建设风险的研究取得了较多的成果。宋君妍等<sup>[1]</sup>通过对人工岛开发建设过程的风险分析与对策研究,提出了有效的风险预防及控制措施。冯民学等<sup>[2]</sup>对洋口港区人工岛进行了雷击风险计算和风险区等级划分。王彦林等<sup>[3]</sup>对港珠澳大桥东、西人工岛施工图设计进行了风险评估,详细讨论了安全风险的防范建议。以上大多注重于整体工程的综合评价,对于各分项工程风险识别方法的思考并不明确。WBS-RBS 是一种广泛应用于风险分析的方法,已在较多实际工程的风险评价中得到了应用。陈国华等<sup>[4]</sup>运用 WBS-RBS 方法对跨海桥梁施工作业和风险层次进行了分解,确定出了对应工程的风险等级和主要影响因素。贾俊峰等<sup>[5]</sup>通过构建 WBS-RBS 结构提高了土建工程施工风险评估的准确性。笔者结合港珠澳大

桥人工岛工程实例,运用 WBS-RBS 风险辨识方法和 AHP 方法计算并分析工程建设过程中的风险因素及权重,并按照风险度理论及风险标准对各阶段风险水平进行综合评价,详细分析了各分项工程中的风险因素,规避了其他方法分析不全面的弊端,使该工程的风险识别更加清晰和直观,从而提高风险评价结果的可靠性。

## 1 工程概况

港珠澳大桥东西人工岛是连接东西桥梁和海底隧道的重要结合点,更是集办公、监控、隧道救援养护等多功能为一体的综合项目,为港珠澳大桥工程全线路段的重点配套项目。东、西人工岛均采用椭圆形布设,东人工岛岛长 625 m,宽 225 m,总面积为 10.316 万 m<sup>2</sup>;西人工岛岛长 625 m,宽 185 m,总面积为 9.796 万 m<sup>2</sup>。

由于人工岛施工范围内有 800 万吨海床淤泥,施工团队采用了“钢筒围岛”方案:在陆地上预先制造 120 个直径 22.5 m、高度 55 m、重量达 550 t 的巨型圆形钢筒,通过船只将其直接固定在海床上,然后在钢筒合围的中间区域进行填土造岛,其施工工法和八锤联动液压振动锤为世界首创<sup>[6]</sup>。人工岛分别通过岛桥结合部和岛隧结合部实现与桥、隧的连接。

收稿日期:2019-10-12; 修订日期:2020-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51709239,51679222)

作者简介:李宗坤(1961—),男,河南邓州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事水利工程风险评价与管理研究,E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn。

## 2 风险识别

港珠澳大桥人工岛建设地处外海,技术新、经验少,不确定因素较多,容易引起风险的因素也很多,同一风险因素在不同的建设阶段中也会不同。基于各风险因素的时效性和动态特性,对工程分别进行项目结构分解和风险分解,并构造WBS-RBS矩阵对人工岛建设过程中可能存在的风险进行识别。

项目分解(WBS)<sup>[7-8]</sup>是从全局出发,将一个整体项目分解成若干个相互独立、易于描述的作业单元,可以深入了解和牢牢把握项目实施

的具体细节。项目分解的方法比较灵活,可以从实施过程、空间位置、功能或要素等方面入手进行分解。考虑到港珠澳大桥人工岛建设项目的特点,按实施过程进行WBS分解,如图1所示。

风险分解(RBS)<sup>[7-8]</sup>是将工程实施过程中可能遇到的风险逐层分解,从而得到不同层次的子风险。在参照相关工程的基础上,充分考虑各方面致险因素,并结合生态文明建设思想,将风险分解为自然环境风险、海洋工程风险、岛内施工风险、环境污染风险和其他风险共5大类,并逐层进一步分解,如图2所示。

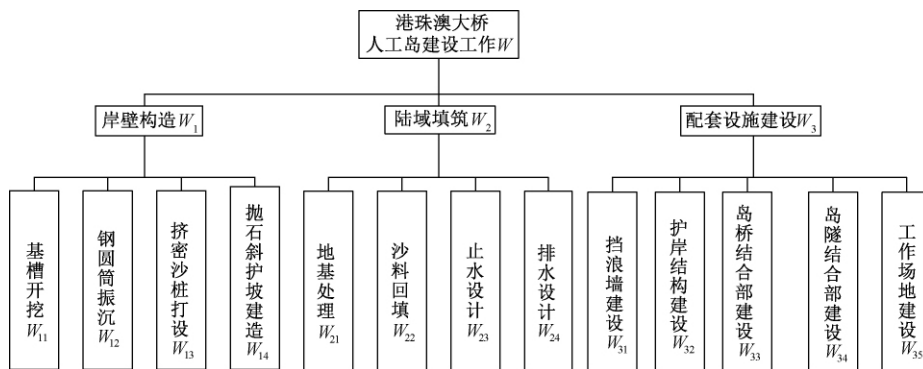


图1 港珠澳大桥人工岛建设WBS分解结果

Figure 1 Result of WBS decomposition of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

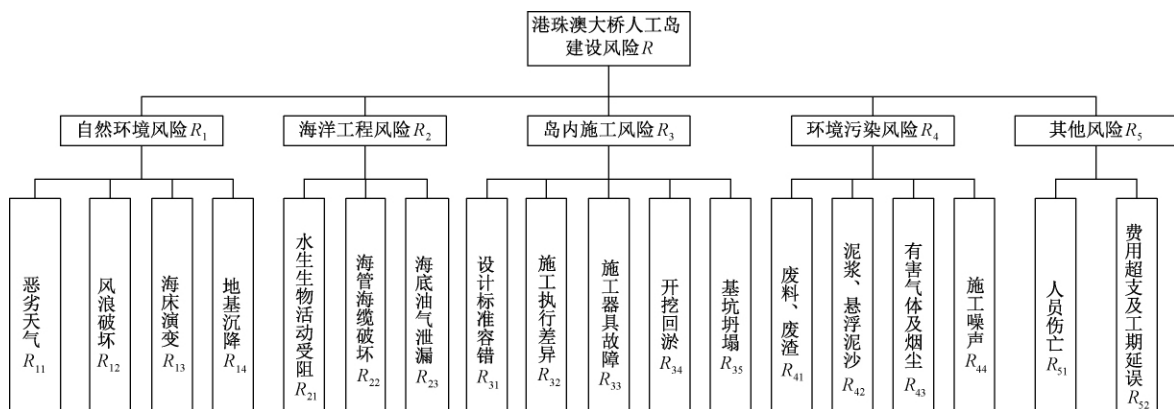


图2 港珠澳大桥人工岛建设RBS分解结果

Figure 2 Result of RBS decomposition of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge

为充分考虑港珠澳大桥人工岛建设工作的实际需要,并使分解结果便于计算,可建立WBS-RBS风险识别矩阵,对各级子工作中所存在的风险因素进行有效识别和清晰反馈,进而全方位、多角度地反映该建设过程中的风险状况。

基于以上理论,构造WBS-RBS风险识别矩

阵A。矩阵A的列分别对应各2级子工作,行分别对应各2级子风险。对于确实存在的风险因素,矩阵对应元素设为1。对于比较模糊、可能存在的风险项,也认定其存在,然后根据后期的专家打分确定其权重和重要性。而对于子工作中几乎不可能发生的或对整个工程影响甚小的风险项,则可进行忽略,即将对应元素设为0。

$A =$

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

### 3 风险计算

#### 3.1 层次分析法

层次分析法(AHP)<sup>[9]</sup>适用于定性问题的定量分析,可以将复杂问题逐层分解为更加系统、直观的递阶层次结构。结合WBS-RBS判断矩阵,采用层次分析法,确定各分项元素相对于目标的重要程度。具体实施过程如下:

(1) 构建各风险元素相对于准则层的判断矩阵:

$$B = (b_{ij})_{n \times n}, \quad (1)$$

式中: $b_{ij}$ 表示对于上一层对象而言,风险因素 $R_i$ 相对于 $R_j$ 的重要程度。

$b_{ij}$ 取值可根据美国运筹学家T. L. Saaty提出的1~9标度法则来确定<sup>[7]</sup>。 $b_{ij}$ 具体取值及意义见表1。若 $i=j$ ,则 $b_{ij}=1$ ;反之 $b_{ij}=1/b_{ji}$ 。

表1  $b_{ij}$ 取值及意义

Table 1 Value and significance of $b_{ij}$	
$b_{ij}$ 取值	意义
1	$i$ 与 $j$ 一样重要
3	$i$ 比 $j$ 稍微重要
5	$i$ 比 $j$ 明显重要
7	$i$ 比 $j$ 强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 极其重要
2、4、6、8	上述中间状态的对应取值

(2) 根据判断矩阵 $B$ ,确定各准则下风险因

素的相对权重。首先求出判断矩阵 $B$ 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ ,再求出最大特征值对应的特征向量 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ ,并对该特征向量进行归一化处理得到向量 $V, V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ 。归一化处理后向量中的值即为其对应元素的相对权重<sup>[10]</sup>。向量 $V$ 的计算如式(2)所示:

$$v_i = \frac{u_i}{\sum_{i=1}^n u_i}. \quad (2)$$

(3) 利用一致性指标 $CR$ 对矩阵进行一致性检验。当 $CR$ 小于0.1时,认为判断矩阵的一致性满足要求<sup>[11]</sup>。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; \quad (3)$$

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (4)$$

式中: $CI$ 为相容性指标; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; $n$ 为判断矩阵的阶数; $RI$ 为随机性指标,可参照美国运筹学家T. L. Saaty给定的矩阵阶数与随机性指标参考值<sup>[12]</sup>,见表2。

表2 随机性指标 $RI$ 取值

Table 2 Value of the mean random consistency index  $RI$

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8
$RI$	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41

#### 3.2 风险度理论

风险度<sup>[11]</sup>是一种量化地描述风险概率以及损失程度的分析方法。此方法认为风险度 $D$ 可以根据该风险发生的可能性程度 $L$ 和所造成的损失程度 $C$ 来确定,其计算公式为:

$$D = L \times C, \quad (5)$$

式中: $L$ 、 $C$ 的取值为1~5,其具体取值所对应的含义见表3; $D$ 的取值可反映风险的等级,这里采用5级风险标准来划分风险等级<sup>[13]</sup>,具体取值及描述见表4。

表3  $L$ 和 $C$ 取值及含义

Table 3 Value and description of  $L$  and  $C$

取值	$L$ 值含义	$C$ 值含义
1	几乎不会发生	几乎不引起损失
2	发生可能性较小	引起较小损失
3	可能会发生	引起一般损失
4	发生可能性较大	引起较大损失
5	极易发生	引起巨大损失

鉴于专家打分法是构建风险判断矩阵及风险度计算的重要环节和依据,在具体评估时应选择具有丰富的外海造岛理论知识和工作经验的专家

表 4 风险等级  $D$  取值及语言描述  
Table 4 Value of risk rank  $D$  and description

$D$ 取值	风险等级	风险水平
1 ~ 3	1 级	低风险
3 ~ 6	2 级	较低风险
6 ~ 10	3 级	中等风险
10 ~ 16	4 级	较高风险
16 ~ 25	5 级	高风险

进行打分,以实际调研资料和现有成果为依托,充分论证各风险因素对工程目标的影响程度。

3.3 港珠澳大桥人工岛建设风险度计算

港珠澳大桥人工岛建设各层因素权重和风险度计算具体步骤如下:

(1) 以矩阵  $A$  的风险识别结果为依据,运用专家打分法对各 2 级子工作中的风险因素进行两两比较,构建判断矩阵,并进行一致性检验,进而确定出各风险因素相对于 2 级子工作的权重。

(2) 根据表 3 中  $L$ 、 $C$  的取值及相应含义,咨询专家并查阅相关资料,对各参数进行赋值,进而计算各 2 级子风险相对于各 2 级子工作的风险度。

(3) 由各 2 级子风险的权重及对应的风险度进行加权运算,得出各 2 级子工作的风险度,公式如下:

表 5 各级工作风险度及权重计算结果

Table 5 Calculation result of risk degree and weight in each work

1 级子工作	1 级子工作权重	1 级子工作风险度	2 级子工作	2 级子工作权重	2 级子工作风险度
岸壁构造 $W_1$	0.539	6.143	基槽开挖 $W_{11}$	0.097	8.280
			钢圆筒振沉 $W_{12}$	0.543	5.635
			挤密沙桩打设 $W_{13}$	0.255	5.809
			抛石斜护坡建造 $W_{14}$	0.103	7.634
陆域填充 $W_2$	0.163	7.013	地基处理 $W_{21}$	0.280	6.373
			沙料回填 $W_{22}$	0.140	11.549
			止水设计 $W_{23}$	0.339	6.210
			排水设计 $W_{24}$	0.239	6.241
配套设施建设 $W_3$	0.297	9.344	挡浪墙建设 $W_{31}$	0.054	6.223
			护岸结构建设 $W_{32}$	0.107	9.472
			岛桥结合部建设 $W_{33}$	0.213	9.490
			岛隧结合部建设 $W_{34}$	0.505	10.160
			工作场地建设 $W_{35}$	0.119	6.924

4 风险评价

由表 5 可以看出,在岸壁构造工作中,基槽开挖  $W_{11}$  的风险度最高;陆域填充工作中,沙料回填  $W_{22}$  的风险度最高;配套设施建设工作中,岛隧结合部建设  $W_{34}$  的风险度最高。

$$D_{ij} = \sum_{l=1}^n \lambda_{ijl} D_{ijl} , \tag{6}$$

式中:  $D_{ij}$  表示对应工作的风险度;  $\lambda_{ijl}$  表示各风险因素在所属工作下的相对权重;  $D_{ijl}$  表示各风险因素在所属工作下的风险度;  $n$  为各子工作中所包含的风险因素个数。

(4) 根据步骤(3)中各 2 级子工作的权重及风险度,再次进行加权运算,求出各 1 级子工作的风险度,以此类推,最终求出该工程的总风险度。

限于文章篇幅,仅以“钢圆筒振沉”(  $W_{12}$  ) 这个 2 级子工作为例,来说明此方法的应用。由矩阵  $A$  可知,  $W_{12}$  中所具有的风险因素有  $R_{11}$ 、 $R_{21}$ 、 $R_{22}$ 、 $R_{23}$ 、 $R_{33}$ 、 $R_{42}$ 、 $R_{44}$ , 对此 7 项风险因素进行整理并打分,构建判断矩阵。计算该判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量,由式(3)和(4)计算出一致性指标为 0.051,说明该矩阵一致性满足要求。对该判断矩阵最大特征值所对应的特征向量进行归一化处理,得各 2 级子风险相对于 2 级子工作  $W_{ij}$  的权重分别为 0.050、0.044、0.204、0.434、0.166、0.069、0.030。采用专家打分法并由式(5)计算出各子风险的风险度分别为 8、9、3、4、12、6、8,则 2 级子工作  $W_{12}$  的风险度为 5.635。以此类推,可求出所有 2 级子工作的权重,见表 5。

根据表 5 中各 2 级子工作的权重及风险度,通过加权运算,可计算出各 1 级子工作的风险度,再结合各 1 级子工作所占权重,最终得出港珠澳大桥人工岛建设项目的总体风险度  $D = 7.236$ 。由评价结果和表 5 可知,该项目总体风险水平为 3 级中等风险,属可接受风险,总体上处于可控状

态。其中 2 级子工作沙料回填  $W_{22}$  和岛隧结合部建设  $W_{34}$  的风险水平为 4 级较高风险,需要给予重点关注。

## 5 结束语

港珠澳大桥人工岛建设工程系统庞大、技术难度高。通过构造 WBS-RBS 矩阵,将该工程进行项目结构分解和风险分解,并对项目建设过程中各风险因素进行识别和重要性比较,运用 AHP 方法对各风险因素进行定量计算,确定其权重和各级子工作的风险度,进而计算出该工程总体风险度和风险等级。评价结果和工程调研结果基本一致,可为其他同类工程的风险识别、定量分析和风险防范措施的制定提供借鉴。

此外,工程建设过程中各风险因素的相对重要性是随工程的推进不断变化的,可在风险分析中引入时间因素,使风险评价结果更加科学可靠。

## 参考文献:

- [1] 宋君妍,许朝旭,桑大钊. 油田人工岛开发建设风险控制措施分析[J]. 安全、健康和环境,2013,13(1):45-49.
- [2] 冯民学,焦雪,钟颖颖,等. 江苏洋口港区雷电特性及风险区划[J]. 气象科学,2012,32(1):86-93.
- [3] 王彦林,吴泽生. 港珠澳大桥东、西人工岛施工图设计安全风险评估[J]. 施工技术,2013,42(11):64-68.
- [4] 陈国华,吴武生,徐三元,等. 基于 WBS-RBS 与 AHP 的跨海桥梁工程施工 HSE 风险评价[J]. 中国安全科学学报,2013,23(9):51.
- [5] 贾俊峰,梁青槐. WBS-RBS 与 AHP 方法在土建工程施工安全风险评估中的应用[J]. 中国安全科学学报,2005,15(7):101.
- [6] 王彦林,闫禹. 港珠澳大桥外海人工岛快速成岛技术[J]. 施工技术,2012,41(8):47-51.
- [7] 田林钢,马成功,王绪. 基于 AHP-熵权法的水利工程业主风险模糊评价[J]. 人民黄河,2017,39(12):117-122.
- [8] LI Z K, WANG T, GE W, et al. Risk analysis of earth-rock dam breach based on dynamic bayesian network[J]. Water, 2019, 11(11): 2305.
- [9] 葛巍,李宗坤,王文姣,等. 基于 WBS-RBS 和 AHP 的土石坝施工期风险评估[J]. 人民黄河,2013,35(6):121-123.
- [10] 项贻强,吴强强,张婷婷. 基于 AHP-FCE 模型的桥梁设计风险评估研究[J]. 土木工程学报,2010,43(S2):275-280.
- [11] 李宗坤,张亚东,宋浩静,等. 基于施工进度计划的建设工程施工期风险分析[J]. 水力发电学报,2015,34(6):204-212.
- [12] 刘铮,吴小萍,杨立国. 层次分析法及消去与选择转换法在铁路环评中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版),2007,28(3):56-60.
- [13] 李宗坤,吴赛,李定斌,等. 南水北调中线工程潮河段征迁安置风险分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2016,37(4):57-61.

## Risk Analysis of Artificial Island Construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge Based on WBS-RBS and AHP Methods

LI Zongkun, WANG Te, GE Wei, SONG Ziyuan

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In view of the the complexity and uncertainty of construction system of artificial island of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge, the WBS-RBS method was used to decompose the project structure and risk. The AHP method and risk degree theory were used to calculate the weight and risk degree of each index layer, and the risk evaluation of the project was carried out. The results showed that the overall risk level of the artificial island construction of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge was 3-level medium risk, which was in line with the actual project, indicating that the method was reasonable and feasible, and could cast extra light on the construction of similar project risk assessment system.

**Key words:** artificial island; Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge; AHP; risk factor; weight; risk degree

## 母岩变形特性差异对堆石料力学性质的影响

韩华强<sup>1</sup>, 陈生水<sup>1</sup>, 王占军<sup>2,3</sup>, 郑澄锋<sup>1</sup>, 傅 华<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 长江勘测规划设计研究院, 湖北 武汉 430010; 3. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘 要:** 针对当前研究中很少甚至忽略母岩变形特性对堆石料力学性质的影响, 采用大型静力三轴仪及大型渗透仪, 分别进行了2种堆石料三轴试验和渗透试验, 得到了不同岩性堆石料强度、变形和渗透特性的变化规律, 初步分析了母岩变形特性差异对堆石料力学性质的影响机制。试验结果表明: 母岩单轴抗压强度相同条件下不同堆石料的强度并不相同, 母岩变形特性对堆石料的力学特性同样具有重要影响, 主要表现在对于堆石料的强度及变形特性的影响上, 而对于堆石料渗透特性的影响则相对较小; 影响机制则主要体现在由于母岩变形特性差异导致的堆石料累积体积变形的差异上, 堆石料累积体积变形的差异进一步导致母岩弹性模量低的堆石料反而获得较大的峰值强度。建议应从母岩强度和变形特性两个方面研究母岩对堆石料力学特性的影响。

**关键词:** 堆石料; 母岩; 变形特性; 力学性质; 影响

中图分类号: TU411

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.017

### 0 引言

堆石料具有压实性能好、填筑密度大、沉陷变形小、透水性强以及抗剪强度高工程特性, 因而被广泛应用于土石坝、公路、铁路、机场、房建等建筑工程中<sup>[1]</sup>。堆石料的强度和变形特性事关建筑物的安全运行, 国内外学者针对堆石料的力学特性及其影响因素开展了大量的研究工作<sup>[2-10]</sup>。结果表明: 除级配、颗粒破碎、劣化、缩尺效应、孔隙率、应力状态、加载路径等因素的影响外, 堆石料的力学特性与其母岩性质也有着紧密联系。

母岩性质是影响堆石料力学特性的重要因素, 目前关于母岩性质对堆石料力学性质的影响研究多集中于母岩的抗压强度及颗粒形状等方面, 主要包括母岩颗粒大小、形状、强度以及表面粗糙程度等, 一般认为其中某一因素的变化必然会引起堆石料力学特性的改变。母岩强度是影响堆石料力学特性的重要因素, 母岩强度越高, 产生破碎所需的压力也越高, 堆石料的抗剪强度相应

也越高, 反之亦然<sup>[11-12]</sup>。然而迄今为止, 母岩变形指标对堆石料力学特性影响的研究工作几乎无人涉及。为此, 笔者采用大型静力三轴仪及大型渗透仪, 选择了两种抗压强度大体相同而弹性模量差别较大的弱风化白云岩和弱风化闪长岩, 研究了母岩变形指标差异对堆石料力学性质的影响。

### 1 堆石料母岩基本特性

图1为本次试验采用的弱风化白云岩试样和弱风化闪长岩试样照片, 通过岩石试验得到两种岩体饱和条件下母岩的抗压强度、软化系数、弹性模量及泊松比等力学指标如表1所示。



(a) 弱风化白云岩 (b) 弱风化闪长岩

图1 母岩照片对比

Figure 1 Photograph of mother rock

收稿日期:2019-10-01; 修订日期:2019-12-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404804); 国家自然科学基金资助项目(51609182); 湖北省自然科学基金项目(2016CFB277)

作者简介:韩华强(1978—),男,河南鄆城人,南京水利科学研究院教授级高工,博士,主要从事土石坝工程研究, Email: hqhan@nhri.cn。



表1 母岩基本特性

Table 1 Basic characteristics of mother rock

岩性	弱风化白云岩	弱风化闪长岩
抗压强度/MPa	132.6	128.0
软化系数	0.73	0.73
弹性模量/GPa	67.0	48.7
泊松比	0.26	0.27

从表1可以看出,弱风化白云岩与弱风化闪长岩(简称白云岩试样与闪长岩试样)的抗压强度接近,但两者弹性模量差别较大,白云岩试样弹性模量为闪长岩试样弹性模量的1.4倍。

## 2 堆石料静力三轴试验方案及过程

### 2.1 试样制备

静力三轴试样尺寸均为 $\phi 300\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ ,试验所用堆石料母岩分别为上述白云岩及闪长岩,堆石料试样级配如图2所示,根据SL237—1999《土工试验规程》<sup>[13]</sup>通过密度试验得到室内相关物理力学性质指标见表2。

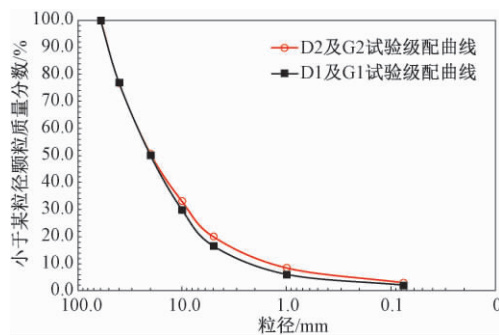


图2 试验模拟级配

Figure 2 Test simulation grading

表2 试样物理力学性质指标

Table 2 Basic physical property index of rockfill

试样编号	岩性	比重	最小干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最大干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	制样干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	孔隙率/%	相对密度
D1	弱风化白云岩	2.86	1.64	2.26	2.26	21	1.0
D2	白云岩	2.86	1.66	2.29	2.29	20	1.0
G1	弱风化闪长岩	2.89	1.67	2.29	2.29	21	1.0
G2	闪长岩	2.89	1.72	2.32	2.32	20	1.0

### 2.2 试样条件

试验按照SL237—1999《土工试验规程》进行,试样初始均处于自然风干状态,按规程分 $60\text{ mm} \sim 40\text{ mm}$ 、 $40\text{ mm} \sim 20\text{ mm}$ 、 $20\text{ mm} \sim 10\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$ 、 $5\text{ mm} \sim 0\text{ mm}$ 5种粒径范围进行制备。试样制好后采用水头饱和法自下而上对试样进行饱和,然后分别进行300,600,900及1200

kPa围压条件下的静力三轴试验。

## 3 堆石料静力三轴试验结果分析

### 3.1 不同岩性的堆石料强度与变形特性

图3为白云岩试样和闪长岩试样两种堆石料三轴剪切试验应力-应变曲线,图4为两种堆石料的摩尔库仑强度包络线。由图3可以看出,不同围压条件下,闪长岩试样峰值强度均大于白云岩试样,但二者达到峰值强度的过程并不相同:图3(a)在剪切起始阶段,白云岩试样强度增长较闪长岩试样迅速,相同应变下,白云岩试样强度大于闪长岩试样;随着试样应变发展,闪长岩试样应力、应变线逐渐超越白云岩试样,表明随着应变发展,闪长岩试样的强度逐渐超过白云岩试样,在应力-应变曲线达到峰值后,闪长岩试样堆石料应力软化的特征也比白云岩试样更为显著;对比图3(b),闪长岩试样的应力增长速率和峰值强度均大于白云岩试样。为清楚起见,图5和图6分别给出了两种堆石料应力、应变发展过程以及剪切体积应变随轴向应变发展过程。从体积变形发展过程看,在低围压下,两者均发生了明显剪胀,但闪长岩试样剪胀程度明显强于白云岩试样;随着围压增大,堆石料颗粒破碎率提高,剪胀均受到抑制,但白云岩试样堆石料剪胀受到的抑制更为明

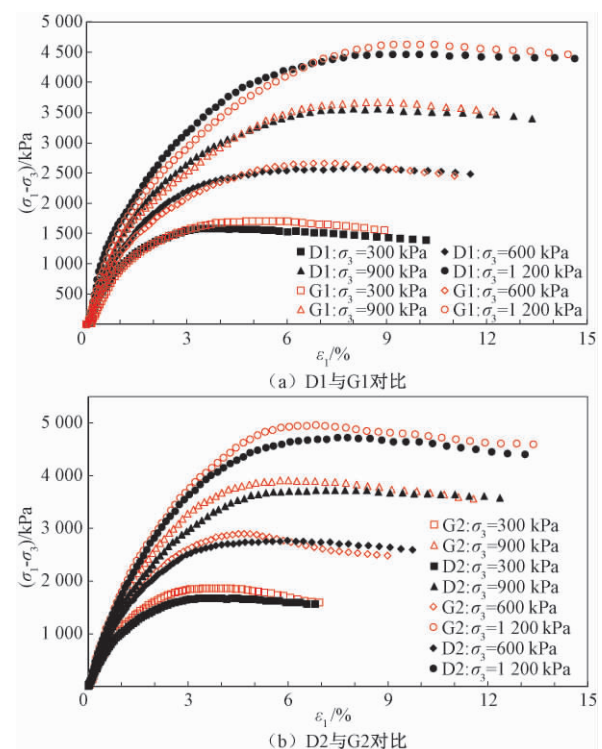


图3 不同堆石料应力-应变曲线对比

Figure 3 Stress strain line

显,其剪胀现象几乎消失,而闪长岩试样仍能表现出较强的剪胀。

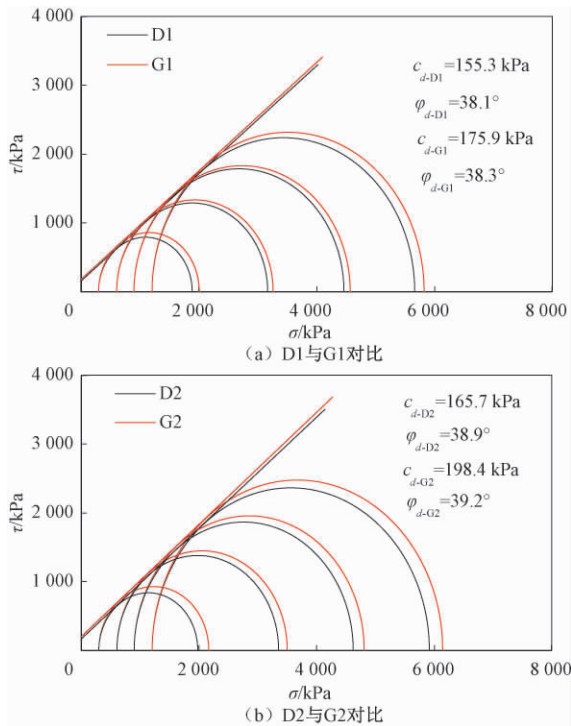


图4 不同堆石料摩尔库仑强度包线对比  
Figure 4 Mohr-Coulomb strength envelope

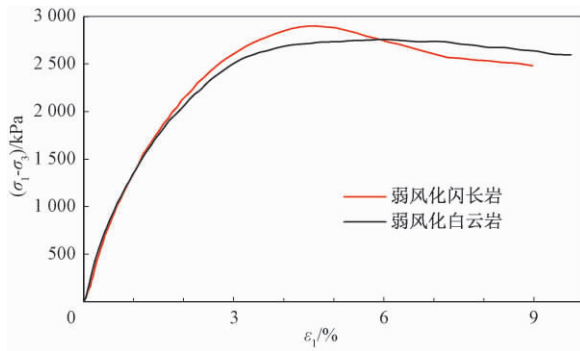


图5 堆石料应力-应变发展过程示意图  
Figure 5 Diagrammatic sketch of stress and strain development process

### 3.2 母岩变形特性差异对堆石料力学性质影响机制探讨

从上述试验结果可以看出,尽管闪长岩试样母岩的强度略小于白云岩试样,但在相同孔隙率及级配条件下,从二者的强度指标凝聚力  $c_d$  及内摩擦角  $\varphi_d$  可以看出,由闪长岩构成的堆石料强度却大于由白云岩构成的堆石料强度,显然产生这一结果的原因应与其母岩的弹性模量不同有关。

在剪切起始阶段,白云岩试样的强度增长速率较闪长岩试样大,反映出混合料的初始弹性模量相对较大的特点,显然正相关于母岩的弹性模量,反映了白云岩母岩的弹性模量大于闪长岩母

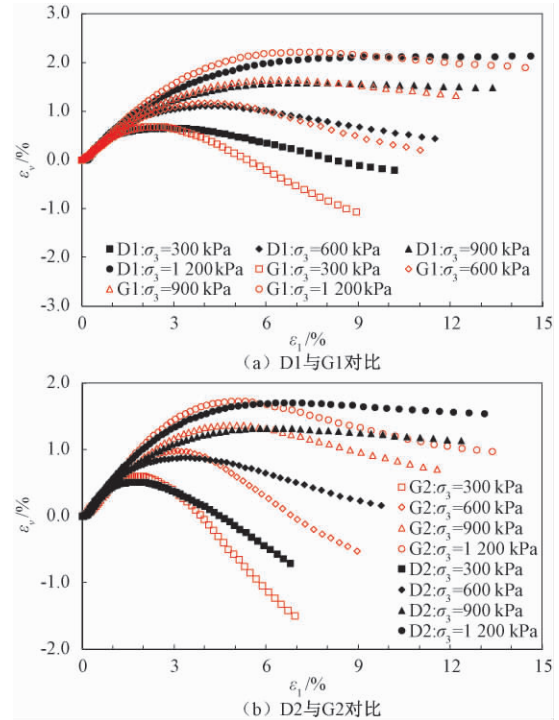


图6 堆石料体积应变-轴向应变关系曲线对比  
Figure 6 Relationship curves of axial strain and volume strain

岩弹性模量的特点,由此产生混合料的初始弹性模量也相对较大,使得在相同应变下,白云岩试样混合料强度大于闪长岩试样。随着应变增长,在达到一定应力水平后,骨料分担荷载逐渐超过其母岩的破碎强度,堆石料开始产生明显的颗粒破碎。颗粒破碎的发生对堆石料的级配产生一定的调整作用。而随着应变的进一步增长,在接近峰值强度前,堆石料应力-应变曲线均逐渐变缓,白云岩试样堆石料应力-应变曲线变缓的趋势更加显著,导致闪长岩试样应力-应变曲线逐渐超越白云岩,并且在达到峰值强度后,白云岩试样的剪胀性也受到一定抑制,显然这主要和不同母岩堆石料颗粒破碎发展的过程并不同步有关,这种堆石料颗粒破碎发展过程的不同步也直观地体现在堆石料体积变形随应变的发展过程中。

从体积变形来看,由于闪长岩试样母岩初始弹性模量明显小于白云岩试样,在剪切起始阶段,闪长岩试样体变增长较白云岩试样迅速,堆石料剪缩及由此导致的堆石破碎量均较白云岩试样大,硬化程度相对较高。在达到一定应力水平时,随母岩骨料分担荷载的增大,由于前期已累积了相对较大的破碎量,后期闪长岩试样破碎量增加量相对白云岩试样变缓,应力-应变曲线增长变缓趋势相对不明显,随应变发展,使得闪长岩试样应力-应变曲线逐渐超越白云岩试样。同时,由于堆

石料的剪缩,一定程度上也提高了堆石料的峰值强度,使得闪长岩试样具有比弱风化白云岩试样更大的强度。

由此表明,堆石料的力学特性一方面受母岩强度的影响,母岩强度越高,发生颗粒破碎需要的压力越高,堆石料的抗剪强度也越高。另一方面堆石料的力学特性也与母岩的变形特性有关,母岩变形特性对堆石料力学特性的影响主要体现在颗粒破碎和剪缩两个方面。同等母岩强度条件下,母岩弹性模量越大,在剪切起始阶段,堆石料的强度增长越迅速,同等应变条件下,堆石料的轴向应力也越大,体积变形量及颗粒破碎量均相对较小,而母岩弹性模量小的堆石料累积了更大的体积变形及颗粒破碎量;随着应变发展,当达到一定应力水平时,母岩弹性模量相对较大的堆石料颗粒破碎量开始显著增加,堆石料的强度增长相对变缓,而母岩弹性模量相对较小的堆石料由于累积了相对较大的体积变形,同时由于剪缩作用,堆石料强度增长变缓的趋势相对较小,其混合料的峰值强度有可能超越母岩弹性模量大的堆石料。因此,宜从两个方面研究母岩对堆石料力学特性的影响:一方面应重视母岩强度对堆石料力学特性的影响;另一方面也应重视母岩的变形特性对堆石料力学特性的影响。

#### 4 堆石料的渗透特性

渗流和渗透控制也是土石坝工程中一项极其重要的课题,直接关系到工程的安全和投资<sup>[14]</sup>,为此,进一步研究了母岩变形特性差异对堆石料渗透特性的影响。渗透试验采用常水头法,渗流方向为从下向上,试样尺寸为 $\phi 300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ ,其中,300 mm为渗径。装样时在透水孔直径为2 mm的透水板上部铺一层孔径0.075 mm细钢丝网,以减少颗粒离析造成透水板堵塞,具体试验步骤及渗透系数计算方法见SL237—1999《土工试验规程》。渗透系数试验结果见表3。

表3 渗透试验结果

Table 3 Permeability test results

试样 编号	岩性	孔隙率/ %	$\rho_d /$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$k_{20} /$ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
D1	弱风化白云岩	21	2.26	$2.84\times 10^{-1}$
G1	弱风化闪长岩	21	2.29	$3.17\times 10^{-1}$
D2	弱风化白云岩	20	2.29	$7.35\times 10^{-2}$
G2	弱风化闪长岩	20	2.32	$6.26\times 10^{-2}$

由表3可以看出,在相同孔隙率、同级配、

相同制样相对密度条件下,不同变形特性母岩堆石料的渗透系数差别不大,两种堆石料渗透系数的差值基本上控制在规范规定的 $2\times 10^{-n}$ 的差值范围内,由此表明,堆石料的渗透系数主要与堆石料的孔隙率、级配及相对密度有关,母岩性质的差异主要影响堆石料的力学特性,而对堆石料渗透系数的影响并不显著。

#### 5 结论

(1) 母岩变形特性差异对堆石料的力学性质有显著影响,母岩单轴抗压强度相同条件下,不同堆石料的强度随岩性差异而不同。本次试验条件下,单轴抗压强度较低的闪长岩堆石料的强度指标反而略高于单轴抗压强度较高的白云岩堆石料。

(2) 堆石料的变形指标与母岩的变形指标有正相关的关系,虽然白云岩试样堆石料的强度指标低于闪长岩,但由于白云岩试样母岩的弹性模量明显高于闪长岩,在初始剪切阶段白云岩试样堆石料的初始弹性模量明显高于闪长岩。

(3) 母岩变形特性对堆石料力学特性影响机制主要体现在颗粒破碎和剪缩两个方面。在剪切起始阶段,母岩弹性模量越大,堆石料的强度增长越迅速,同等应变条件下,堆石料的强度也越大,体积变形量及颗粒破碎量均相对较小,而母岩弹性模量小的堆石料累积了更大的体积变形及颗粒破碎量;随应变发展,当达到一定应力水平时,弹性模量相对较大的堆石料颗粒破碎量显著增加,堆石料的强度增长相对变缓,而母岩弹性模量相对较小的堆石料由于累积了相对较大的体积变形,由于剪缩作用,堆石料的强度增长变缓的趋势相对较小,其混合料的峰值强度有可能超越母岩弹性模量大的堆石料。

(4) 岩性差异对堆石料力学特性的影响主要表现在强度及体积变形特性,对于堆石料渗透特性的影响相对较小。

(5) 研究母岩对堆石料力学特性的影响,应从母岩强度和变形特性两个方面展开研究。

#### 参考文献:

- [1] 韩华强,陈生水,傅华,等. 循环荷载作用下堆石料的颗粒破碎特性[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1753-1760.
- [2] ROWE P W. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact[J]. Proceed-

- ings of royal society of London ,series A: mathematical and physical sciences ,1962 269( 1339) : 500-527.
- [3] 陈生水,韩华强,傅华. 循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32( 8): 1151-1157.
- [4] 陈生水. 土石坝试验新技术研究与应用[J]. 岩土工程学报,2015,37( 1): 1-28.
- [5] 刘汉龙,秦红玉,高玉峰,等. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学,2005,26( 4): 562-566.
- [6] ISHIHARA K ,OKADA S. Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand[J]. Soils and foundations , 1982 ,22( 3) : 109-125.
- [7] 柏树田,崔亦昊. 堆石的力学性质[J]. 水力发电学报,1997,16( 3): 21-30.
- [8] 程展林,丁红顺,吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29( 8): 1151-1158.
- [9] 傅华,韩华强,凌华. 母岩性质对粗颗粒材料动力特性影响试验研究[J]. 三峡大学学报( 自然科学版),2014,36( 5): 56-59,63.
- [10] 崔允亮,项鹏飞,王新泉,等. 考虑塑性体积应变的扰动状态本构模型改进[J]. 郑州大学学报( 工学版) 2018,39( 1): 47-52.
- [11] 张兵,高玉峰,刘伟,等. 坝体填筑料压缩特性及影响因素分析[J]. 岩土力学,2009,30( 3): 741-745.
- [12] 张启岳,司洪洋. 粗颗粒土大型三轴压缩试验的强度与应力-应变特性[J]. 水利学报,1982,13( 9): 22-31.
- [13] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程: SL237—1999[S]. 北京: 中国水利水电出版社,1999.
- [14] 吴军民,喻石,韩华强,等. 砂砾石垫层料与堆石过渡料的联合抗渗试验研究[J]. 水电与抽水蓄能,2016,2( 3): 60-63,72.

## Influence of Deformation Characteristics of Mother Rock on Mechanical Properties of Rockfill Materials

HAN Huaqiang<sup>1</sup>, Chen Shengshui<sup>1</sup>, WANG Zhanjun<sup>2,3</sup>, ZHENG Chengfeng<sup>1</sup>, FU Hua<sup>1</sup>

( 1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering ,Nanjing Hydraulic Research Institute ,Nanjing 210024 , China; 2. Changjiang Institute of Survey ,Planning ,Design and Research ,Wuhan 430010 ,China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science ,Wuhan University ,Wuhan 430072 ,China)

**Abstract:** Based on the large-scale static three axis instrument and the large permeability apparatus ,the triaxial tests and permeability tests were carried on two kinds of rockfill materials. Finally ,the variations of strength ,deformation and permeability characteristics in different lithological rockfill materials were obtained ,and the influence mechanisms of deformation characteristics of mother rock on mechanical properties of rockfill materials were preliminary analyzed. The result showed that the deformation characteristics of mother rock also played an important role in the mechanical properties of rockfill materials ,namely the influence of mother rock on the mechanical properties of rockfill materials mainly lay in the strength and deformation characteristics ,while the influence on permeability characteristics of rockfill was relatively small. The strength of different rockfill materials was not the same even though the mother rocks were under the same uniaxial compressive strength. The influence mechanism of deformation characteristics of mother rock on the mechanical properties of rockfill materials was mainly reflected in two aspects: particle crushing and shear shrinkage. The initial deformation index of rockfill materials had a positive correlation with the deformation index of the mother rock ,and in the initial stage of shearing ,the more the deformation index of mother rock ,the faster and the greater the strength of rockfill materials were under the same strain condition ,while the cumulative volume deformation and particle breakage were relatively small. With the development of rockfill strain ,when a certain stress level was reached ,rockfill materials with relatively small deformation index of the mother rock accumulated a relatively large volume deformation due to the shear shrinkage ,which led a slow tendency of rockfill materials strength growth was relatively small. While the crushing amount of rockfill materials with large deformation index increased significantly ,and led a relatively slow growth of rockfill strength. It was possible to obtain a larger peak strength even the deformation index of mother rock was low. Research conclusions indicated that the influence of mother rock on the mechanical properties of rockfill should be studied from two aspects of strength and deformation characteristics.

**Key words:** rockfill materials; mother rock; deformation characteristics; mechanical properties; influence

文章编号:1671-6833(2020)03-0072-07

## 基于拉丁超立方抽样的改进型多链 DRAM 算法 求解地下水污染反问题

张双圣<sup>1,3</sup>, 强 静<sup>2</sup>, 刘汉湖<sup>1</sup>, 刘喜坤<sup>3</sup>, 孙韶华<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 数学学院, 江苏 徐州 221116;  
3. 徐州市城区水资源管理处, 江苏 徐州 221018; 4. 山东省城市供排水水质监测中心, 山东 济南 250100)

**摘要:** 针对运用贝叶斯统计方法求解地下水污染反问题时, 经典 MCMC 算法( Metropolis 算法) 求解结果受样本初始点影响且计算效率低的问题, 提出了一种基于拉丁超立方抽样方法的改进型多链延迟拒绝自适应 Metropolis 算法( DRAM)。将贝叶斯统计方法与二维水质对流-扩散方程相耦合, 建立地下水污染源识别模型。构建一个污染物在地下水含水层中瞬时排放的算例, 分别运用 Metropolis 算法、多链 Metropolis 算法以及改进型多链 DRAM 算法对污染源信息( 污染源强度、排放位置(  $x, y$ ) 和排放时长) 进行反求。算例研究表明, Metropolis 算法受样本初始点影响, 容易出现反演结果局部最优或者反演结果难以收敛的问题; 多链 Metropolis 算法虽然显著提高了反演结果的准确性, 但是反演效率相对低下; 改进型多链 DRAM 在保证反演准确性的条件下, 可显著提高反演效率( 相对于多链 Metropolis 算法提高 68%) , 实现反演结果准确性与效率的双提高。

**关键词:** 二维水质模型; 贝叶斯-马尔科夫链蒙特卡洛法; 拉丁超立方抽样; 延迟拒绝自适应 Metropolis 算法; 污染源识别

中图分类号: X703

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.016

### 0 引言

目前, 国内外水污染溯源问题的研究较多, 其本质是水质模型参数的识别。参数识别方法主要有马尔科夫链蒙特卡罗算法( Markov chain Monte Carlo, MCMC) [1-7]、微分进化算法[8-11]、遗传算法[12-13]和最小二乘算法[14]等。陈海洋等[3]运用经典 MCMC 算法实现了水体污染源项的识别, 得到了污染源强度、污染源位置和污染源排放时长 3 个未知参数的估计值。闵涛等[11]利用遗传算法求解对流-扩散方程源项识别反问题。这些算法可分为确定性方法和不确定性方法, 其中确定性方法未考虑误差因素, 得到参数确定的估计值, 但容易丢掉“真值”; 不确定性方法具有较强的随机性, 收敛速度慢, 计算量随着参数的增多而呈指数增长, 得到待估参数的一个小的可靠范围。其中, MCMC 方法应用较为广泛。Metropolis 算法[13-14]是一种经典的 MCMC 方法, 应用非常广

泛。大多数 MCMC 算法都是通过改进 Metropolis 算法得到的, 比如延迟拒绝算法( delayed rejection, DR) [15-16]、自适应 Metropolis 算法( AM) [17]、延迟拒绝自适应 Metropolis 算法( DRAM) [18]等。DRAM 算法是一种高效自适应 MCMC 算法, 其本质是把 DR 算法和 AM 算法二者组合起来。DR 算法保证了马尔科夫链的局部自适应, AM 算法采用全局自适应调整策略, 因此 DRAM 算法能够对 MCMC 链条进行全局和局部的自适应, DRAM 算法抽样效率优于 DR 算法和 AM 算法各自单独使用的情况[19]。但是 Metropolis 算法和 DRAM 算法都只有一条链, 容易陷入到局部最优值[19-20], 计算结果给决策者造成一定的负面影响。

运用二维地下水水质对流-扩散方程, 通过贝叶斯公式建立水体污染源识别模型, 得到污染源强度、排放位置(  $x, y$ ) 和排放时长 4 个未知参数的后验概率密度函数, 并运用拉丁超立方抽样方

收稿日期:2019-10-07; 修订日期:2019-12-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( 51774270); 国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目( 2015ZX07406005)

作者简介: 张双圣( 1983—), 男, 山东昌邑人, 中国矿业大学博士研究生, 主要从事地下水污染控制研究, E-mail: zhang\_shuangsheng@163.com。

法<sup>[21]</sup>优化 DRAM 算法,实现参数反演过程中准确性与效率的双提高,为突发性水污染反问题研究提供借鉴。

## 1 研究方法

### 1.1 贝叶斯公式

贝叶斯公式<sup>[22-23]</sup>如下:

$$p(\alpha|d) = \frac{p(d|\alpha)p(\alpha)}{p(d)} \propto p(d|\alpha)p(\alpha), \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为模型的未知参数;  $d$  为实测数据;  $p(\alpha|d)$  为参数的后验概率密度函数;  $p(\alpha)$  为参数的先验概率密度函数;  $p(d|\alpha)$  为条件概率密度函数;  $p(d)$  为归一化的积分常数。

假设模型中未知参数共有  $m$  个,则  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ 。环境水力学的模型参数都分布在一个特定的范围内,可以认为每个参数都服从均匀分布,且  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m$  相互独立。模型参数  $\alpha_i$  的先验概率密度函数可定义为:

$$p(\alpha_i) = \begin{cases} \frac{1}{B_i - A_i}, & \alpha_i \in [A_i, B_i]; \\ 0, & \text{其他。} \end{cases} \quad (2)$$

总的先验分布  $p(\alpha)$  可表示为:

$$p(\alpha) = \prod_{i=1}^m p(\alpha_i). \quad (3)$$

假设模型中实测值共有  $n$  个,即  $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ 。 $d_i$  表示第  $i$  个实测数据,  $C_i(x, y, t|\alpha)$  表示相应的第  $i$  个预测值,则  $\varepsilon_i = d_i - C_i(x, y, t|\alpha)$  为测量误差,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。假设测量误差服从均值为 0、标准偏差为  $\sigma$  的正态分布,且相互独立,则条件概率密度函数  $p(d|\alpha)$  可表示如下:

$$p(d|\alpha) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \cdot \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{[d_i - C_i(x, y, t|\alpha)]^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (4)$$

联合式 (1) ~ (4), 可得后验概率密度函数  $p(\alpha|d)$  为:

$$p(\alpha|d) = \frac{\prod_{i=1}^m p(\alpha_i)}{(2\pi\sigma^2)^{n/2} p(d)} \cdot \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{[d_i - C_i(x, y, t|\alpha)]^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (5)$$

由于  $\frac{\prod_{i=1}^m p(\alpha_i)}{(2\pi\sigma^2)^{n/2} p(d)}$  是与参数  $\alpha$  的选取无关

的固定数,可记为  $\lambda$ 。故式 (5) 可写为:

$$p(\alpha|d) = \lambda \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \frac{[d_i - C_i(x, y, t|\alpha)]^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (6)$$

在实测数据  $d$  固定的条件下,式 (6) 是关于参数  $\alpha$  的函数。式 (6) 通过积分求解参数  $\alpha$  的概率分布,计算较为复杂,难以得出明确的解析表达式。并且随未知参量维数的增加,数值积分算法的计算量将呈指数增长,实现复杂且难度较大。

### 1.2 延迟拒绝自适应 Metropolis 算法

式 (6) 一般可采用马尔科夫链蒙特卡罗方法 (MCMC) 近似求解。MCMC 方法的核心是 Monte Carlo 模拟方法和 Markov Chain 抽样方法。当“概率事件”样本点足够多时,频率可以近似代表概率,这是 Monte Carlo 模拟方法的本质,而 Markov Chain 抽样方法能够保证 Markov 链花更多的时间在概率大的区域,节省 Monte Carlo 模拟方法的工作量。

Metropolis 算法是一种经典的 MCMC 算法,应用非常广泛,具体算法参见文献 [13-14],其提议分布一旦设定便保持不变,当提议分布远离目标分布时,马尔科夫链收敛速度会变慢。为了提高马尔科夫链收敛效率,Haario 等<sup>[18]</sup>将 DR 算法和 AM 算法结合提出了高效自适应 DRAM 算法,其具体步骤如下。

#### 1.2.1 非自适应阶段

(1) 在模型未知参数  $\alpha$  先验范围内随机产生初始的参数样本  $X_t (t = 1)$ , 非自适应阶段迭代次数为  $N_0$ , 提议分布为高斯分布  $q_t = N(X_t, C_0)$ , 其中  $C_0$  为协方差矩阵,要求  $C_0$  满足对称正定条件,并且高斯分布满足对称随机游走。

(2) 从提议分布  $N(X_t, C_0)$  中抽取一个参数样本  $X^*$ ; 产生  $[0, 1]$  上的随机数  $u$ ; 计算接受概率  $\min\left\{1, \frac{p(X^*|d)}{p(X_t|d)}\right\}$ , 其中  $p(X^*|d)$  与  $p(X_t|d)$  由式 (6) 计算得到。如果  $u < \min\left\{1, \frac{p(X^*|d)}{p(X_t|d)}\right\}$ , 接受  $X^*$ , 即  $X_{t+1} = X^*$ ; 否则,拒绝  $X^*$ , 即  $X_{t+1} = X_t$ 。

(3) 重复过程 (2), 直至达到迭代次数  $N_0$ 。

#### 1.2.2 自适应阶段

(1) 通过步骤 (1) 已抽取到样本点  $X_1, X_2, \dots, X_{N_0}$ , 此时  $t = N_0$ 。下一步提议函数  $q_t^1(X_t, \cdot) = N(X_t, C_t^1)$ , 式中  $C_t^1 = s_m \text{cov}(X_1, X_2, \dots, X_t) + s_m \varepsilon I_m$ ;  $m$  表示参数  $\alpha$  的维数  $s_m = 2.38/m^2$ <sup>[18]</sup>;  $\varepsilon$



表示一个很小的正数,可取为 $10^{-6}$ ,目的是保证 $C_t^{-1}$ 为正定矩阵; $I_m$ 是一个 $m$ 维单位矩阵。自适应阶段迭代次数为 $N$ 。

(2) 马尔科夫链的当前状态为 $X_t$ ,从提议分布 $q_{t+1}$ 中抽取一个样本 $X_1^*$ ;计算接受概率 $A_t^1(X_t, X_1^*) = \min\left\{1, \frac{p(X_1^*|d)}{p(X_t|d)}\right\}$ ;产生 $[0, 1]$ 上随机数 $u_1$ 。

如果 $u_1 < A_t^1(X_t, X_1^*)$ ,接受 $X_1^*$ ,即 $X_{t+1} = X_1^*$ ,转入过程(3)。

如果 $u_1 \geq A_t^1(X_t, X_1^*)$ ,设定 $2 \leq i \leq 3$ , $\gamma = [1, 0.2, 0.01]$ , $C_t^2 = \gamma_2 C_t^1$ ,从 $q_t^2(X_t, \cdot) = N(X_t, C_t^2)$ 中抽取一个样本 $X_2^*$ ;计算接受概率 $A_t^2(X_t, X_1^*, X_2^*) =$

$\min\left\{1, \frac{p(X_2^*|d) q_t^1(X_2^*, X_1^*) [1 - A_t^1(X_2^*, X_1^*)]}{p(X_t|d) q_t^1(X_t, X_1^*) [1 - A_t^1(X_t, X_1^*)]}\right\}$ ;产生 $[0, 1]$ 上随机数 $u_2$ ;如果 $u_2 < A_t^2(X_t, X_1^*, X_2^*)$ ,接受 $X_2^*$ ,即 $X_{t+1} = X_2^*$ ,转入(3)。

如果 $u_2 \geq A_t^2(X_t, X_1^*, X_2^*)$ , $C_t^3 = \gamma_3 C_t^1$ ,从 $q_t^3(X_t, \cdot) = N(X_t, C_t^3)$ 中抽取一个样本 $X_3^*$ ;计算接受概率

$A_t^3(X_t, X_1^*, X_2^*, X_3^*) = \min\left\{1, \frac{p(X_3^*|d) q_t^1(X_3^*, X_2^*) q_t^2(X_3^*, X_1^*)}{p(X_t|d) q_t^1(X_t, X_1^*) q_t^2(X_t, X_2^*)} \frac{[1 - A_t^1(X_3^*, X_2^*)][1 - A_t^2(X_3^*, X_2^*, X_1^*)]}{[1 - A_t^1(X_t, X_1^*)][1 - A_t^2(X_t, X_1^*, X_2^*)]}\right\}$ 产生区间 $[0, 1]$ 上随机数 $u_3$ ;如果 $u_3 < A_t^3(X_t, X_1^*, X_2^*, X_3^*)$ ,接受 $X_3^*$ ,即 $X_{t+1} = X_3^*$ ,转入过程(2)。

(3) 重复过程(2),直至达到迭代次数 $N$ 。

### 1.3 拉丁超立方抽样

采用 Metropolis 算法和 DRAM 算法求解多维参数反演问题,Markov Chain 容易受到样本初始点的影响,可能在局部最优处达到稳定或者产生难以收敛的问题。

为了保证样本初始点的随机性和均匀性,本研究基于拉丁超立方抽样方法<sup>[21]</sup>对 DRAM 算法进行改进。拉丁超立方抽样方法是一种多维分层随机抽样方法,具有良好的散布均匀性和代表性。假设要在 $m$ 维模型参数 $\alpha$ 先验范围 $[A_i, B_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )内抽取 $q$ 组样本,具体步骤如下:

(1) 把 $m$ 维模型参数的 $m$ 个先验范围 $[A_i, B_i]$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )都均分成 $q$ 个小区间,小区间可记为 $[A_{ij}, B_{ij}]$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, q$ )。总共产生 $m \times q$ 个小区间。

(2) 在任一小区间 $[A_{ij}, B_{ij}]$ 中随机抽取一个数,记为 $\alpha_{ij}$ ,总共产生 $m \times q$ 个数,组成矩阵为

$$\Psi_{mq} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1q} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \cdots & \alpha_{mq} \end{bmatrix}。$$

(3) 对矩阵 $\Psi_{mq}$ 中行向量 $[\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{iq}]$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )进行随机排序,所得向量记为 $[\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{iq}]$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ );由此得到矩阵

$$\Phi_{mq} = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1q} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2q} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{m1} & \beta_{m2} & \cdots & \beta_{mq} \end{bmatrix}。$$

(4) 矩阵 $\Phi_{mq}$ 中每个列向量是一组样本,共抽取得到 $q$ 组样本。

### 1.4 改进型多链 DRAM 算法

改进型多链 DRAM 算法具体步骤:

(1) 运用拉丁超立方抽样方法,在模型参数先验范围内随机抽取 $q$ 组初始样本。

(2) 分别以 $q$ 组初始样本作为初始点采用 DRAM 算法进行迭代运算,得到 $q$ 条 Markov Chains。

(3) 对上面 $q$ 条 Markov Chains 求平均值作为最终结果。

## 2 算例应用

### 2.1 算例概述

均质各向同性地下含水层中,二维地下水水质对流-扩散方程<sup>[24-25]</sup>可以表述为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (uC) = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (7)$$

式中: $C$ 为测点 $(x, y)$ 在 $t$ 时长的污染物的质量浓度,mg/L; $t$ 为污染物排放后开始预测的时长,d; $D_x, D_y$ 分别为纵向、横向的弥散系数, $m^2/d$ ; $u$ 为地下含水层水流平均流速, $m/d$ 。

对于污染物瞬时点源排放模式,方程的解析解可表示为:

$$C(x, y, t) = \frac{M}{4\pi kh \sqrt{D_x D_y t}} \exp \left[ -\frac{(x-ut)^2}{4D_x t} - \frac{y^2}{4D_y t} \right], \quad (8)$$

式中: $M$ 为污染物的排放量,g; $h$ 为含水层的厚度,m; $x, y$ 分别为预测点距排放点的纵向、横向距离,m; $k$ 为含水层的有效孔隙率。

假设研究区域为均质各向同性地下含水层(建立坐标系,如图1)。含水层厚度为 $h = 1$  m,



孔隙率  $k=0.3$   $x$  轴代表含水层中水流的方向, 水流速度为  $u=5\text{ m/d}$ ; 纵向弥散系数为  $1.5\text{ m}^2/\text{d}$ , 横向弥散系数为  $0.3\text{ m}^2/\text{d}$ 。待求参数真值: 污染物泄漏点坐标为  $(X_0=200\text{ m}, Y_0=200\text{ m})$ , 污染源强度  $M=1\ 000\text{ g}$ , 污染源排放时长  $T_0=110\text{ d}$ 。观测点  $D$  坐标为  $(X_1=800\text{ m}, Y_1=215\text{ m})$ 。

2.2 监测数据

以构建的算例模型的计算值作为观测值, 设定 2017 年 5 月 1 日上午 10:00 点作为初始监测时间, 其后每隔 2 d 测量一次, 直至 2017 年 5 月 21 日上午 10:00 点结束。将研究区水文地质参数代入

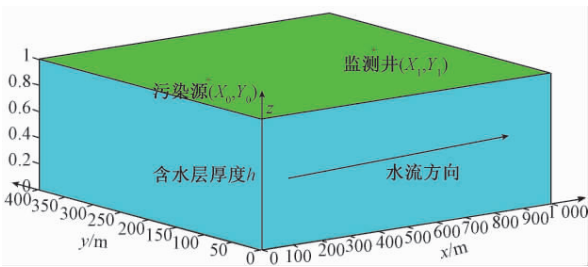


图 1 算例模型示意图

Figure 1 Sketch of example model

式(8), 可计算得出观测点  $D$  的污染物浓度  $d_i$ , 以此作为观测点  $D$  的污染物的观测值, 如表 1 所示。

表 1 观测点  $D$  处污染物观测浓度序列  
Table 1 Sequence value of pollutant concentration at observation point  $D$

时刻	5 月 1 日	5 月 3 日	5 月 5 日	5 月 7 日	5 月 8 日	5 月 10 日
质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	0.014 80	0.061 20	0.179 6	0.381 1	0.594 0	0.690 7
时刻	5 月 12 日	5 月 15 日	5 月 17 日	5 月 19 日	5 月 21 日	
质量浓度/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	0.608 0	0.410 6	0.215 5	0.088 90	0.029 16	

2.3 结果及比较

根据先验信息, 污染源强度  $M$ 、污染源位置坐标  $(X_0, Y_0)$  和污染源排放时长  $T_0$  4 个待求参数的取值范围分别为:  $400\text{ g}\leq M\leq 1\ 600\text{ g}$ ,  $-200\text{ m}\leq X_0\leq 600\text{ m}$ ,  $185\text{ m}\leq Y_0\leq 215\text{ m}$ ,  $60\text{ d}\leq T_0\leq 160\text{ d}$ 。运用 MATLAB 软件编程, 对比分析不同算法的求解结果。

2.3.1 Metropolis 算法求解结果

采用经典 Metropolis 算法构建马尔科夫链对模型进行求解, 马尔科夫链选取初始点不同, 4 个待估参数  $M, X_0, Y_0, T_0$  的迭代曲线差别很大。以待估参数  $M$  为例, 随机选取两组不同初始样本, 如样本点 1:  $(M, X_0, Y_0, T_0) = (827.44, 592.05, 190.59, 80.77)$ ; 样本点 2:  $(M, X_0, Y_0, T_0) = (687.50, 141.15, 213.89, 146.97)$ , 待估参数  $M$  迭代曲线见图 2。

由图 2(a) 可知, 在初始样本点为  $M_1=827.44\text{ g}$  Metropolis 算法迭代到 5 000 次时, 参数  $M$  值逐渐趋于稳定, 并最终在  $M=1\ 450\text{ g}$  处收敛, 但是该值与真值( $M=1\ 000\text{ g}$ ) 相差较大, 误差达 45%。另由图 2(b) 可知, 在样本初始点为  $M_2=687.50\text{ g}$ , Metropolis 算法迭代到 50 000 次时, 参数  $M$  值仍未收敛。因此运用 Metropolis 算法求解污染源强度时, 求解结果受样本初始点的影响较大, 容易出现局部最优或者难以收敛的问题。同理, 在求解另外 3 个待求参数  $X_0, Y_0, T_0$  时也会出现类似问题。

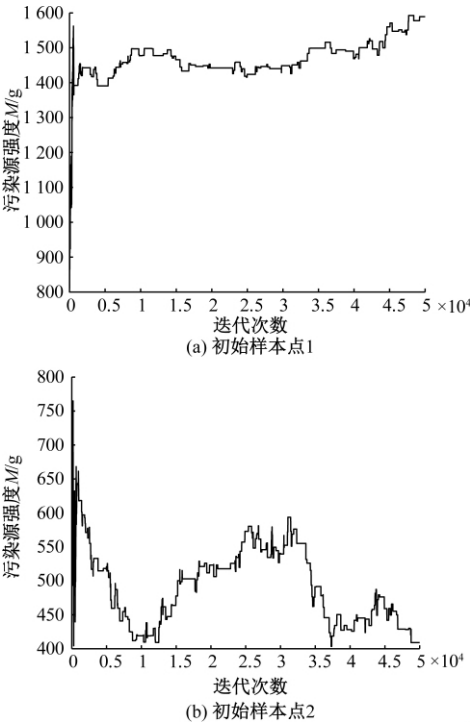


图 2 基于 Metropolis 算法的不同初始点模型参数  $M$  迭代曲线图

Figure 2 Iterative curves of model parameter  $M$  based on Metropolis algorithm with different initial values

2.3.2 多链 Metropolis 算法求解结果

为防止反演结果的局部最优, 构建基于拉丁超立方抽样的多链 Metropolis 算法求解算例( 设定 40 条链, 单链长度为 50 000)。污染源强度  $M$ 、污染源位置坐标  $(X_0, Y_0)$  和污染源排放时长  $T_0$  的反演迭代曲线见图 3。

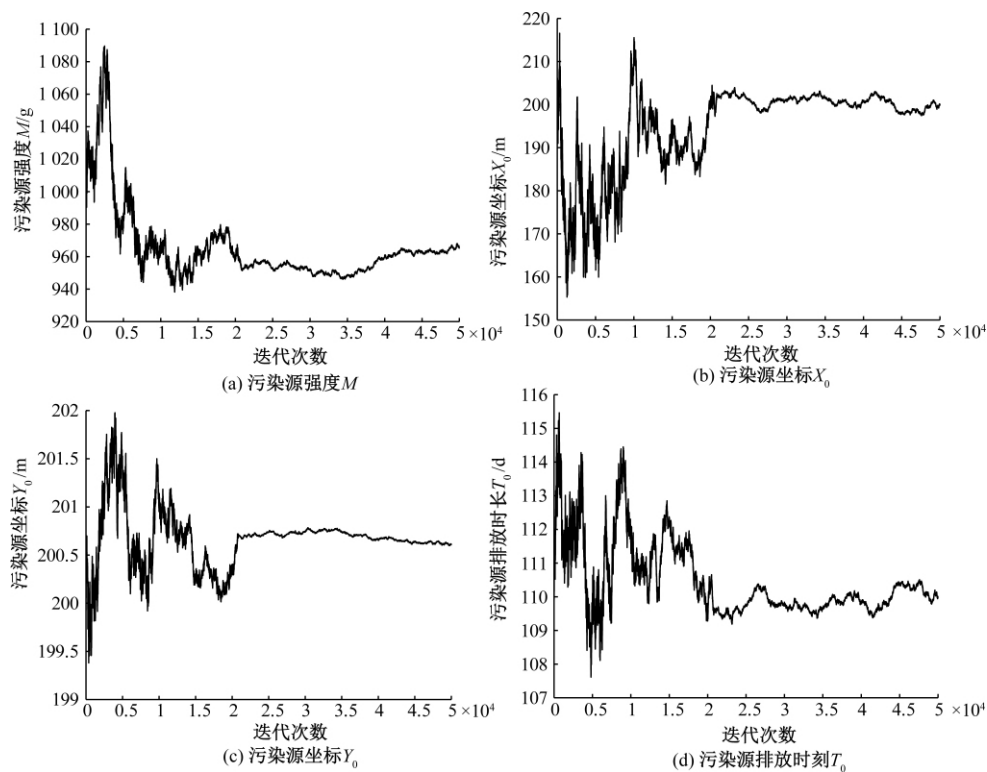


图3 基于多链 Metropolis 算法的模型参数迭代曲线

Figure 3 Iterative curves of model parameters based on multi-chain Metropolis algorithm

由图3可知,当基于拉丁超立方抽样的多链 Metropolis 算法迭代到 25 000 次时,4 个参数反演结果均基本在真值处达到稳定且收敛,而且通过程序验证迭代结果不受样本初始点选取的影响,有效解决了经典 Metropolis 算法受初始点的影响导致不收敛或局部最优的问题,表明该算法具有较强的稳定性。剔除前 25 000 次不稳定结果,对剩余的 25 000 次计算结果进行后验统计分析,见表2。

由表2可知,基于拉丁超立方抽样的多链 Metropolis 算法得出的4个待估参数  $M$ 、 $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $T_0$  的均值与真值的误差分别为 4.36%、0.18%、0.35%、0.08%,中值误差分别为 4.30%、0.15%、0.35%、0.06%,表明基于拉丁超立方抽样方法的 Metropolis 算法可实现计算结果的全局最优,有效提高反演结果的准确性。

### 2.3.3 改进型多链 DRAM 算法求解结果

多链 Metropolis 算法虽然有效提高了反演结

果的准确性,但是迭代次数需达到 25 000 次时才能收敛,反演效率相对偏低,为此笔者构建基于拉丁超立方抽样的多链 DRAM 算法(设定 40 条链,单链长度为 12 000)进行参数求解。4 个参数的反演遍历均值图见图4。

由图4可知,改进型多链 DRAM 算法迭代到 8 000 次时,4 个参数取值均基本达到稳定,与基于拉丁超立方抽样的多链 Metropolis 算法(25 000 次时迭代稳定且收敛)相比,速率提高 68%,并且通过程序验证迭代结果不受样本初始点的影响,表明基于拉丁超立方抽样的 DRAM 方法具有较高的反演效率及稳定性。

对于改进型多链 DRAM 算法的反演结果,剔除前 10 000 次不稳定结果,对剩余的 2 000 次模型参数进行后验统计分析,见表3。由表3可知,该算法在提高反演效率的前提下,同样可保证反演结果的准确性。

表2 基于多链 Metropolis 算法的模型参数后验统计结果

Table 2 Posterior statistical results of model parameters based on multi-chain Metropolis algorithm

参数	均值	均值误差 / %	中值	中值误差 / %
污染源强度 $M/g$	956.38	4.36	957.02	4.30
污染源坐标 $X_0/m$	200.36	0.18	200.29	0.15
污染源坐标 $Y_0/m$	200.69	0.35	200.69	0.35
泄漏时间距离首次监测时间 $T_0/d$	109.91	0.08	109.93	0.06

表3 基于改进型多链 DRAM 算法的模型参数后验统计结果

Table 3 Posterior statistical results of model parameters based on improved multi-chain DRAM algorithm

参数	均值	均值误差%	中值	中值误差%
污染源强度 $M/g$	969.93	3.01	1 013.83	2.62
污染源坐标 $X_0/m$	197.99	1.01	186.77	0.93
污染源坐标 $Y_0/m$	200.84	0.42	200.38	0.41
泄漏时间距离首次监测时间 $T_0/d$	109.60	0.37	107.37	0.35

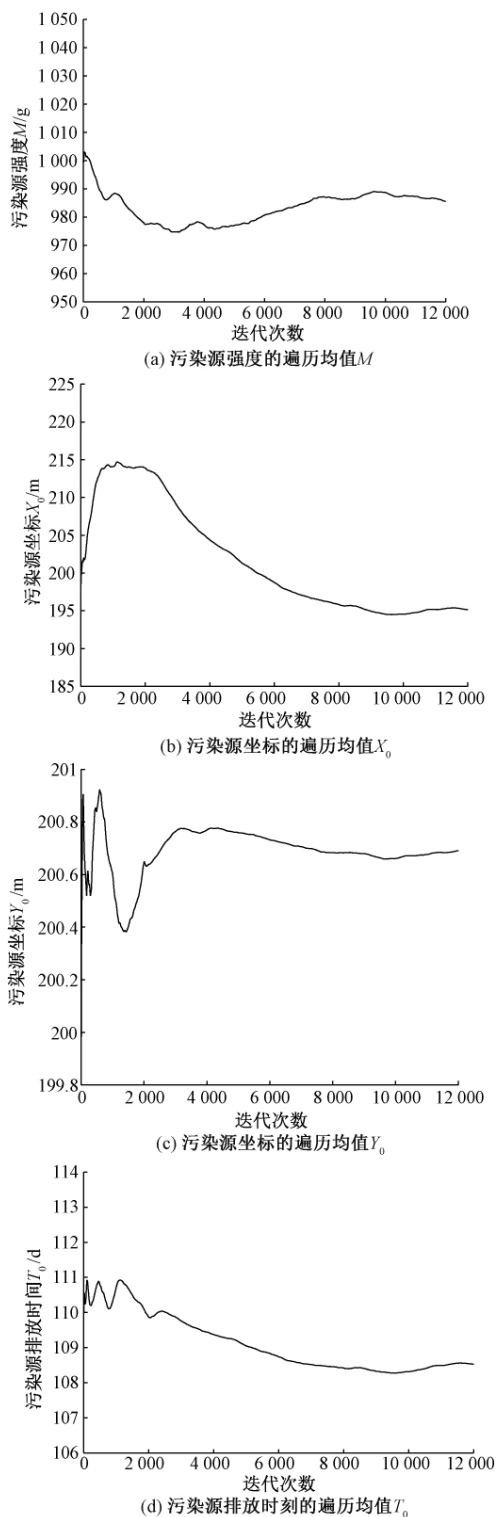


图4 基于改进型多链 DRAM 算法的模型参数遍历均值图  
Figure 4 Ergodic mean plots of model parameters based on improved multi-chain DRAM algorithm

### 3 结论

(1) 利用 Bayesian 公式以概率语言解决突发性地下水污染反问题,可有效获取污染源信息(污染源强度、污染源位置和污染源排放时长)。

(2) 运用经典 Metropolis 算法求解污染源信息时,求解结果受样本初始点的影响较大,容易出现局部最优或者难以收敛的问题,反演得到的未知参数估计值误差较大。

(3) 基于拉丁超立方抽样的 Metropolis 算法可实现反演结果的全局最优,有效提高反演结果的准确性,但是效率相对低下。基于拉丁超立方抽样的 DRAM 算法在保证反演结果准确性的前提下,可显著提高反演效率,其可靠性和稳定性均优于经典 Metropolis 算法。

### 参考文献:

- [1] HAARIO H, SAKSMAN E, TAMMINEN J. An adaptive Metropolis algorithm [J]. Bernoulli, 2001, 7 (2): 223-242.
- [2] ZENG L Z, SHI L S, ZHANG D X, et al. A sparse grid based Bayesian method for contaminant source identification [J]. Advances in water resources, 2012, 37: 1-9.
- [3] 陈海洋, 腾彦国, 王金生, 等. 基于 Bayesian-MCMC 方法的水体污染识别反问题 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(6): 74-78.
- [4] 杨海东, 肖宜, 王卓民, 等. 突发性水污染事件溯源方法 [J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 122-128.
- [5] 顾文龙, 卢文喜, 张宇, 等. 基于贝叶斯推理与改进的 MCMC 方法反演地下水污染源释放历史 [J]. 水利学报, 2016, 47(6): 772-779.
- [6] 朱嵩, 毛根海, 刘国华, 等. 改进的 MCMC 方法及其应用 [J]. 水利学报, 2009, 40(8): 1019-1023.
- [7] RUZEK B, KVASNICKA M. Differential evolution algorithm in the earthquake hypocenter location [J]. Pure and applied geophysics, 2001, 158(4): 667-693.
- [8] 牟行洋. 基于微分进化算法的污染源识别反问题研究 [J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2011, 26(1): 24-30.
- [9] 张双圣, 强静, 刘喜坤, 等. 基于贝叶斯-微分进化算法的污染源识别反问题 [J]. 山东大学学报(工学版), 2018, 48(1): 131-136.

- [10] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
- [11] 闵涛, 周孝德, 张世梅, 等. 对流-扩散方程源项识别反问题的遗传算法 [J]. 水动力学研究与进展(A 辑) 2004, 19(4): 520-524.
- [12] 王秀峰, 卢桂章. 系统建模与辨识 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [13] METROPOLIS N, ROSENBLUTH A W, ROSENBLUTH M N, et al. Equation of state calculations by fast computing machines [J]. The journal of chemical physics, 1953, 21(6): 1087-1092.
- [14] HASTINGS W K. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications [J]. Biometrika, 1970, 57(1): 97-109.
- [15] TIERNEY L, MIRA A. Some adaptive Monte Carlo methods for bayesian inference [J]. Statistics in medicine, 1999(17/18): 2507-2515.
- [16] MIRA A. Ordering and improving the performance of Monte Carlo Markov chains [J]. Statistical science, 2001, 16(4): 340-350.
- [17] HAARIO H, SAKSMAN E, TAMMINEN J. An adaptive Metropolis algorithm [J]. Bernoulli, 2001, 7(2): 223-242.
- [18] HAARIO H, LAINE M, MIRA A, et al. DRAM: Efficient adaptive MCMC [J]. Statistics and computing, 2006, 16(4): 339-354.
- [19] 张江江. 地下水污染源解析的贝叶斯监测设计与参数反演方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [20] VRUGT J A. Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: theory, concepts, and MATLAB implementation [J]. Environmental modeling & software, 2016, 75: 273-316.
- [21] 戴英彪. 基于拉丁超立方试验设计的事故再现结果不确定性分析 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2011.
- [22] 师黎, 王艺. 基于贝叶斯估计的初级视皮层光栅朝向编码研究 [J]. 郑州大学学报(工学版) 2012, 33(6): 1-4.
- [23] 刘厂, 赵俊翔, 胡海. 基于双贝叶斯估计的动态威胁运动状态估计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 55-60.
- [24] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- [25] 郑春苗, BENNETT G D. 地下水污染物迁移模拟 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.

## Improved Multi-chain DRAM Algorithm Based on Latin Hypercube Sampling for Inverse Problems of Underground Water Pollution

ZHANG Shuangsheng<sup>1,3</sup>, QIANG Jing<sup>2</sup>, LIU Hanhu<sup>1</sup>, LIU Xikun<sup>3</sup>, SUN Shaohua<sup>4</sup>

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mathematics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Xuzhou City Water Resource Administrative Office, Xuzhou 221018, China; 4. Shandong Province Urban Water Supply and Drainage Monitoring Center, Jinan 250100, China)

**Abstract:** Aiming at the problem caused by samples' initial values with classical MCMC algorithm (Metropolis algorithm), when the inverse problems of underground water pollution were solved by Bayesian statistical methods, an improved multi-chain delayed rejection and adaptive Metropolis (DRAM) algorithm based on latin hypercube sampling was presented. An underground water pollution source identification model was built by coupling Bayesian statistical methods to two-dimensional water quality convection-diffusion equation. An example of a pollutant in the underground aquifer discharged instantly was put forward, and the pollution source information including source's position, intensity and discharging time was solved by Metropolis algorithm, multi-chain Metropolis algorithm and improved multi-chain DRAM algorithm respectively. The example showed that the inversion results affected by initial values with Metropolis algorithm were locally optimal or difficult to convergence, while the multi-chain Metropolis algorithm could significantly improve the accuracy of the inversion results, the inversion efficiency was relatively low. On the contrary, the improved multi-chain DRAM could significantly improved the inversion efficiency under the condition of accuracy (improved by 68% compared with the multi-chain Metropolis algorithm), realizing double improvement of inversion accuracy and efficiency.

**Key words:** two-dimensional water quality model; Bayesian-Markov chain Monte Carlo simulation; latin hypercube sampling; delayed rejection and adaptive Metropolis algorithm; pollution source identification

文章编号:1671-6833(2020)03-0079-06

## 含水率及应变速率对冻结粉质黏土强度特性影响

张雅琴<sup>1</sup>, 杨平<sup>1</sup>, 江汪洋<sup>1</sup>, 张婷<sup>1</sup>, 陈亮<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 常州市轨道交通有限公司, 江苏 常州 213000)

**摘 要:** 人工冻土单轴抗压强度和弹性模量是人工冻结法设计的关键参数, 准确掌握其变化规律极为重要, 为此开展了不同含水率及应变速率条件下粉质黏土人工冻土单轴抗压强度试验研究。结果表明: 大部分试样呈现腰鼓型破坏, 随着含水率的增加, 应力-应变曲线逐渐由应力软化型向应力硬化型转变, 存在一达到强度峰值的最优含水率, 对于南京典型粉质黏土该含水率为 22%, 接近饱和含水率; 重塑粉质黏土的弹性模量随含水率的增长而增长, 但增长率呈下降趋势; 单轴抗压强度和弹性模量均随应变速率的增加呈衰减性增大; 回弹模量随加卸荷次数的增加逐渐增大, 当加卸荷次数达 7 次后, 回弹模量值基本稳定。

**关键词:** 人工冻结粉质黏土; 含水率; 加载速率; 强度特性; 回弹模量

**中图分类号:** TU445 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.006

### 0 引言

国内外学者对冻土强度展开了大量研究<sup>[1-3]</sup>, 主要从两个方面入手, 一方面是土体本身物理性质<sup>[4-11]</sup>对强度的影响, 主要包括含水率、干密度、含冰量、试样形状等。存在最佳含水率使冻土抗压强度最大, 抗压强度随干密度增大而减小。冰含量越多, 承受荷载能力越强, 冻土强度越大。随着含盐量升高, 冻土强度先增大后减小, 存在最大强度。冻结粉土抗压强度和破坏应变与试件形状有关, 试验条件相同情况下, 正方体试件性能高于圆柱体试件。另一方面是试验条件<sup>[12-18]</sup>的影响, 主要包括围压、试验温度、应变速率、冻融循环次数等。

冻土强度随应变速率增加呈幂函数上升状态, 因此试验中应慎重选择应变速率。温度对冻土强度的影响与冰结晶有关, 总体呈负相关。冻融循环对粗粒土试件回弹模量有一定弱化作用。但关于含水率及应变速率对粉质黏土单轴抗压强度影响的认识还不深刻, 特别是对冻土弹性模量、回弹模量及其影响因素的研究较少。

南京位于长三角地区, 地层软弱, 地下水丰富, 地铁建设发展迅速, 加固软弱土层隔绝地下水

影响是施工难点, 人工冻结法的出现有效解决了这一难题, 因此南京地铁联络通道、盾构隧道端头加固等多采用人工冻结法, 大量人工冻土问题亟需解决。人工冻结法设计要考虑冻结壁厚度及后续变形问题, 常选取冻土单轴抗压强度和弹性模量为主要力学参数指标, 因此有必要明确其变化规律及内在机理。

基于人工冻结粉质黏土单轴抗压强度试验, 研究了含水率、应变速率对南京地区粉质黏土冻土应力应变特性、单轴抗压强度、弹性模量与回弹模量的影响规律。

### 1 试样制备及试验方法

试验用土来自南京地铁 5 号线, 选取最典型的粉质黏土进行试验, 该土样基本物理特性指标见表 1。采用微机控制多功能冻土压力试验机 (WDT-100B) 进行试验, 该试验机最大轴向荷载为 100 kN, 精度为 1%, 温度控制范围为 -50~50 ℃, 上下波动 ±0.2 ℃。通过设置参数自动采集试样荷载和变形数据, 并实时自动显示数据曲线图。

研究原状土和重塑土两种土样状态, 将现场取回的原状粉质黏土削成  $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  的圆柱形可得原状土试样。将土样烘干后进行粉碎

收稿日期: 2019-08-10; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51478226); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目

通信作者: 杨平 (1964—) 男, 江西宜春人, 南京林业大学教授, 博士生导师, 主要从事环境岩土与地下工程研究, E-mail: yangping@nifu.edu.cn。

表 1 试验用土基本物理特性指标  
Table 1 Physical indexes of the soil

土质	基本描述	埋深/m	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	含水率/ %	干密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	比重	液限/%	塑限/%
粉质黏土	灰青色,可塑	19.1~27.3	2.03	20.62	1.68	2.71	29.6	17.5

并过 2 mm 筛,在干土中掺入一定量纯水达到试验含水率后养护 24 h。然后进行分层击实使其干密度与原状土样一致,试样尺寸为  $\phi 50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。最后将试样在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境箱中放置 24 h,使试件内温度一致,可得重塑土试样。

具体试验规划如表 2 所示。每组试验进行 3 组平行试验,实验离散值超 20%时补做一组平行试验。在类似试验中,应变速率取值较小的成果较多,因此本次试验将研究大应变速率对强度和弹性模量的影响,具体取值为 1、10、20、40  $\%\cdot\text{min}^{-1}$ 。

表 2 试验规划  
Table 2 Testing plans

试验类型	土样 状态	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变速率/ ( $\%\cdot\text{min}^{-1}$ )	含水率/ %
	原状土		10	20.62
抗压试验	重塑土	-10	10	16、18、20.62、 22、24、26
	重塑土		1、10、20、40	20.62
回弹试验	重塑土	-10	10	20.62

注:回弹应力为  $\sigma_s/2$ ,加卸载次数为 10。

在峰值应力对应的应变基础上再加 5%应变值作为抗压强度试验终止条件,如果没有明显峰值则取 20%应变为终止条件。试验结束后观察试样破坏形态。回弹试验具体步骤为:①将试验放在加载台中央,避免偏心受力;②第一次加载前进行 10 kPa 小荷载持续 30 s 的接触性预压;③进行轴向加载,当轴向应力达到抗压强度 50%时开始轴向卸载,将轴向应力卸载至零;④轴向应力卸载至零后稳定 5 min(回弹间隔时间),重新将轴向应力加载至抗压强度 50%然后卸载到零,按加载-卸载-稳定-再加载的顺序重复循环 10 次后加载至试样破坏,结束试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 原状与重塑粉质黏土破坏形态

在试验结果中选取部分具有代表性的原状与重塑粉质黏土试样的破坏形态如图 1~图 3 所示。

破坏形态以塑性破坏为主,冻土试样为中部凸起的腰鼓型破坏,并伴随竖向裂纹。此种破坏

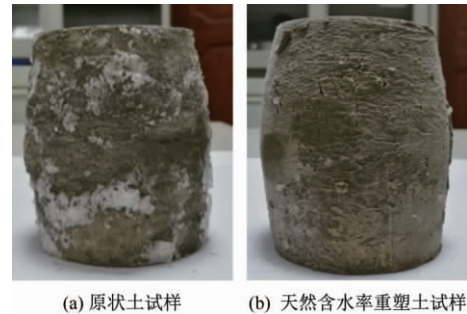


图 1 原状和重塑土破坏形态( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率  $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$ )

Figure 1 Destructive form of original and remolded silty clay( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , strain rate is  $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$ )

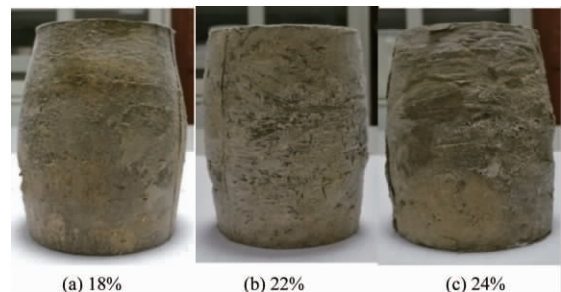


图 2 不同含水率重塑土破坏形态( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率  $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$ )

Figure 2 Destructive form of remolded silty clay with different water content( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , strain rate is  $10\text{ }\%\cdot\text{min}^{-1}$ )

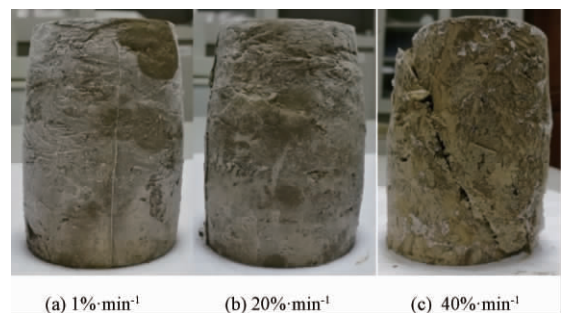


图 3 不同应变速率重塑土破坏形态( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 含水率 22%)

Figure 3 Destructive form of remolded silty clay with different strain rate( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , water content is 22%)

形态与试样中孔隙水相态有关,液态孔隙水为主时承受荷载能力较弱,土体向较高应力状态处滑移,表面土体颗粒间胶结力不足以抵抗挤压,因此产生裂缝,同时受试验装置两端摩擦力限制,两端变形有限,最终试样呈现腰鼓型塑性破坏。



图1为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }\% \cdot \text{min}^{-1}$ 下原状土和重塑土的冻土破坏形态,两者略有区别。前者腰鼓位置偏离中心且腰线有所起伏,后者腰鼓位置则较为居中且腰线圆滑。相对于原状土,重塑土更为均匀,破坏形态更为一致。

图2为不同含水率重塑粉质黏土冻土破坏试样,表面竖向裂缝随含水率增加逐渐减少,但裂缝宽度增加且分布分散,腰线弧度趋于平缓。

图3为不同应变速率重塑粉质黏土冻土破坏试样,在 $40\text{ }\% \cdot \text{min}^{-1}$ 应变速率下重塑粉质黏土试样呈现剪切破坏,其剪切破坏角略大于 $45^{\circ}$ 。

## 2.2 含水率对强度和弹性模量的影响

不同含水率下重塑粉质黏土冻土应力-应变关系如图4所示。由图4可知,不同含水率重塑粉质黏土冻土应力在峰值应力对应的应变基础上再加5%应变值作为应变关系曲线线性段大致相同,但最终曲线形态存在差异。当含水率 $\geq 22\%$ 时,试样呈现应变硬化形态;当含水率 $\leq 20.6\%$ 时,试样呈现应变软化形态,且随含水率的减小,应变软化更加显著,说明含水率对试样应力-应变关系曲线破坏形态有显著影响,存在含水率分界点(22%)。颗粒间胶结力主要为冰-土胶结力,低于分界点时,胶结力较小,脆性破坏为主;高于分界点时,胶结力逐渐增强,塑性破坏为主。

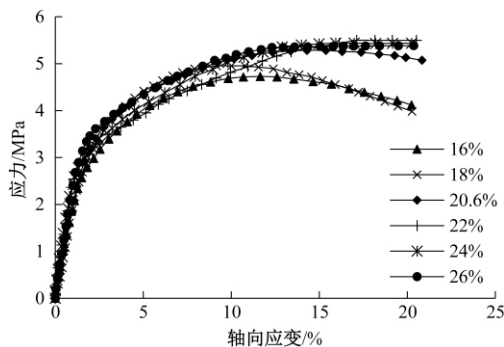


图4 不同含水率下冻结粉质黏土试样应力-应变关系曲线

Figure 4 The stress-strain curves of frozen soil with different water content

单轴抗压强度及弹性模量与含水率关系如图5所示。由图5(a)可知,重塑粉质黏土的冻土单轴抗压强度与含水率关系曲线存在峰值,峰值前后皆近似线性关系,可用线性函数进行拟合,但峰值前后单轴抗压强度随含水率变化的变化速率不同,减小速率仅为增长速率的 $1/4$ 。说明含水率对重塑粉质黏土单轴抗压强度的影响与土体饱和

度有关。土体未饱和时,含冰量随含水率上升而增加,冰-土胶结力增强,抵抗荷载能力提升,单轴抗压强度增大;土体饱和后,由于成冰能力有限,存在大量未冻水使颗粒表面水膜增厚,导致土颗粒间摩擦力减小,胶结力减弱。荷载主要由固态冰承担,因此冰的含量开始起支配作用,越来越多呈现出冰的特性,而冰的强度约为 $3\sim 4\text{ MPa}$ <sup>[19]</sup>,明显低于重塑粉质黏土冻土强度。冰强度受到粒径尺寸影响,粒径尺寸小的冰强度要大于粒径尺寸大的强度。粒径越小,颗粒间接触面越多,对相对运动阻碍越大,对材料变形阻力就越大。因此,试样中含水率越大,冰粒径尺寸越大,抗压强度越小。但在纯人工冰中影响值不超过 $0.5\text{ MPa}$ ,相对于冻土整体强度而言影响较小,因此强度下降缓慢。此外,由于冻结产生的新的体积膨胀已不能完全被孔隙容纳,将破坏土体骨架产生新裂隙,故达到饱和含水率后单轴抗压强度随着含水量的增加而略减小。

由图5(b)可知,重塑粉质黏土冻土的弹性模量随含水率增长而衰减性增大,可见含水率对弹性模量影响主要集中在饱和含水率以下,达到饱和含水率后,含水率对弹性模量影响逐渐减小,弹性模量趋于稳定,饱和含水率亦为分界点。

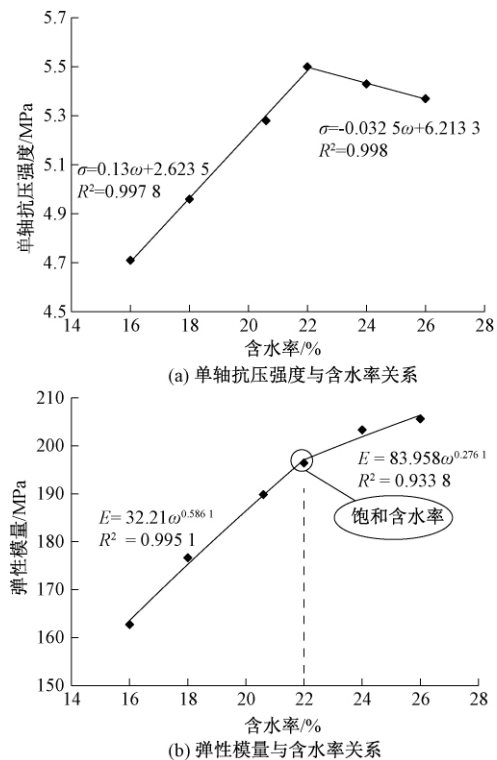


图5 单轴抗压强度及弹性模量与含水率关系曲线  
Figure 5 The curve of uniaxial compressive strength and elastic modulus with water content



### 2.3 应变速率对强度和弹性模量的影响

不同应变速率下重塑粉质黏土试样应力-应变关系如图 6 所示。不同应变速率下试样均呈应变软化形态,说明破坏形态受应变速率影响较小,主要影响试样强度与模量。应变速率增加,线性段应力增速提高,线性转折点应力值增大。

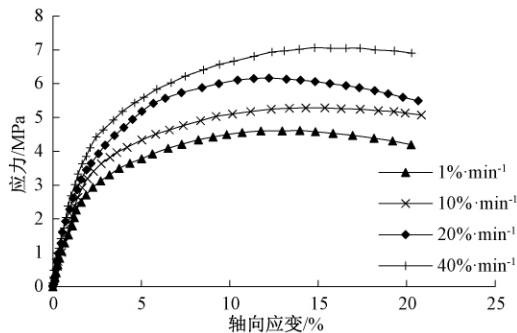


图 6 不同应变速率下冻结重塑粉质黏土试样应力-应变关系曲线

Figure 6 The stress-strain curves of frozen soil with different strain rates

单轴抗压强度及弹性模量与应变速率关系曲线如图 7 所示。由图 7 可知,冻结重塑粉质黏土单轴抗压强度和弹性模量均随应变速率增加而增大,应变速率由  $1\% \cdot \text{min}^{-1}$  增至  $40\% \cdot \text{min}^{-1}$  时,单轴抗压强度增强约 50%,弹性模量的提高也超过了 40%,可见单轴抗压强度和弹性模量受应变速率影响较大,对比冻土单轴抗压强度及弹性模量时要在应变速率统一的基础上进行,因此冻土试验规范规定试验应变速率为  $1\% \cdot \text{min}^{-1}$ ,以减少应变速率变化影响。

南京冻结粉质黏土单轴抗压强度随应变速率大致呈幂指数 ( $y = mx^a$ ) 增长,其中系数  $a$  小于 1,即单轴抗压强度增长率随应变速率增长逐渐变小;青藏高原高含水率粉质砂土规律类似,但抗压强度总体低于南京,应变速率影响较小,在小于  $0.6 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时敏感度相对较高;兰州冻结黄土也呈幂指数形式增长,但系数  $a$  大于 1,增长率变大,在  $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  间灵敏度最高;杭州冻结淤泥质黏土在应变速率小于  $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时呈线性增长,强度在 2~5 MPa ( $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。说明不同土质单轴抗压强度对应变速率的灵敏度及变化规律是不同的。

### 2.4 重塑粉质黏土回弹模量特性

对冻结重塑粉质黏土回弹试验回弹应力取单轴抗压强度值 (5.28 MPa) 的一半,得到应力-应变曲线如图 8 所示。卸载后再加载使曲线形成滞

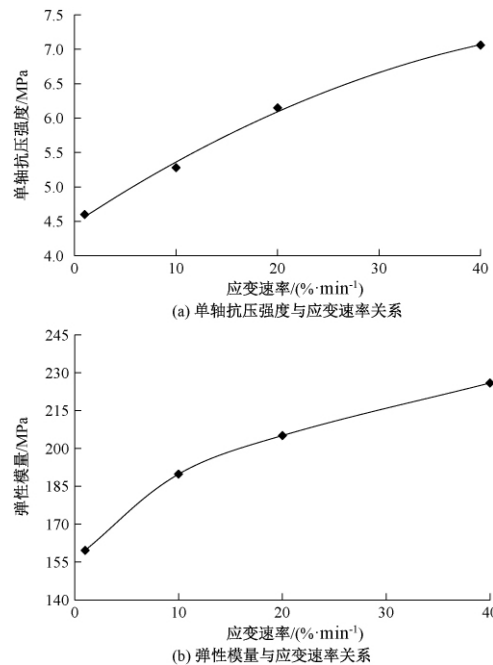


图 7 单轴抗压强度及弹性模量与应变速率关系曲线  
Figure 7 The curve of uniaxial compressive strength and elastic modulus with strain rate

回圈,且在回弹间隔时间内,回弹变形随着时间的延长不断增大,说明存在滞后回弹现象,总回弹变形量为瞬时回弹量与滞后回弹量的总和。初始加载产生的变形量远大于第一次的卸载总回弹变形量,但两者之差随加卸荷次数增加而逐渐减小,说明初始加载时以塑性变形为主,弹性变形只有很小一部分,但随着频繁加卸载,弹性变形比例迅速提升甚至在后期成为变形主体,此时冻土处于弹性压密状态。第 10 次卸载完成后开始持续加载直至破坏。若延长初始加荷段将发现应力-应变曲线与第 10 次加载至破坏曲线重合,若直接将两者相连,整个曲线形态类似于单轴抗压强度关系曲线,这一发现与前人描述一致<sup>[20]</sup>。

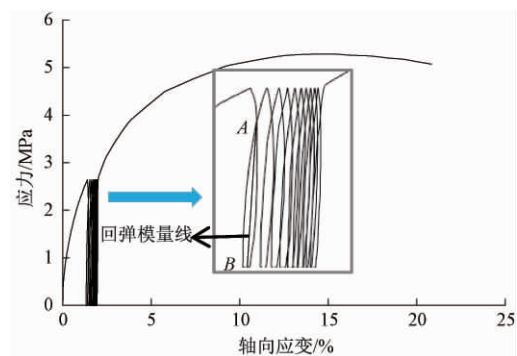


图 8 回弹试验重塑粉质黏土应力-应变关系曲线  
Figure 8 The stress-strain curve of frozen soil under resilient modulus test

回弹模量为应力幅值与弹性应变的比值,即

$$E_d = \sigma_d / \varepsilon_c, \quad (1)$$

可近似看成滞回圈顶点连线斜率(如线AB)。图9为重塑粉质黏土回弹模量与加卸荷次数的关系。

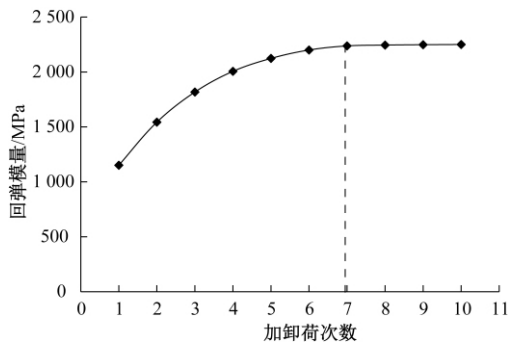


图9 回弹模量与加卸荷次数关系曲线

Figure 9 The curve of resilient modulus with the number of times of loading

回弹模量随加卸荷次数的增加先迅速增大,反复7次卸载后趋于平缓,冻土塑性变形在反复加卸载中迅速减小,导致稳定时的回弹模量值是弹性模量值的12倍。对回弹模量与加卸荷次数关系用双曲线公式进行拟合,见式(2):

$$E_e = \frac{n}{a + bn}, \quad (2)$$

式中:  $E_e$  为回弹模量,MPa;  $n$  为加卸荷次数;  $a$  和  $b$  为试验常数,对关系进行拟合得到:  $a$  值为0.0005,  $b$  值为0.0004; 相关系数为0.9944。

### 3 结论

选取南京地铁5号线粉质黏土,通过冻土单轴抗压试验探讨了人工冻结状态下,含水率及加载速度对单轴抗压强度的影响,主要结论如下:

(1) 人工冻结原状及重塑粉质黏土试样大部分呈现腰鼓型破坏,仅在高应变速率下才可能呈剪切破坏形态。

(2) 重塑粉质黏土冻土单轴抗压强度受含水率影响,随着含水率的增加,应力-应变曲线逐渐由应力软化型向应力硬化型转变。存在最优含水率使冻土强度达到峰值,该最优含水率接近饱和含水率。

(3) 冻结重塑粉质黏土的弹性模量随含水率的增长而呈衰减性增长,含水率对弹性模量影响主要集中在饱和含水率以下,达到饱和含水率后,含水率对弹性模量影响逐渐减小,弹性模量趋于稳定,饱和含水率为分界点。

(4) 冻结重塑粉质黏土的单轴抗压强度和弹性模量均随应变速率的增加而增大,但弹性模量

的增长速率随应变速率增大逐渐减小。

(5) 重塑粉质黏土回弹模量随加卸荷次数的增加先迅速增大,反复7次卸载后趋于平缓,可用双曲线公式  $E_e = \frac{n}{a + bn}$ ,对回弹模量与加卸荷次数关系进行拟合。

(6) 对比了原状土与重塑土破坏形态的区别,从宏观上详细描述了不同含水率及应变速率下的破坏形态,并发现存在使强度最大的最优含水率,且最优含水率接近饱和含水率。

### 参考文献:

- [1] 程国栋,周幼吾.中国冻土学的现状和展望[J].冰川冻土,1988,10(3):221-227.
- [2] 朱元林,吴紫汪,何平,等.我国冻土力学研究新进展及展望[J].冰川冻土,1995,17(增刊1):6-14.
- [3] 马巍,王大雁.中国冻土力学研究50a回顾与展望[J].岩土工程学报,2012,34(4):625-640.
- [4] 贺俊,杨平,何文龙.苏州地铁典型土层冻土力学特性研究[J].水文地质工程地质,2010,37(5):72-76.
- [5] 陈有亮,王明,徐珊,等.上海人工冻结软黏土抗压抗拉强度试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(7):1046-1051.
- [6] CHRIST M, KIM Y C. Experimental study on the physical-mechanical properties of frozen silt[J]. KSCE journal of civil engineering, 2009, 13(5): 317-324.
- [7] 杜海民,张淑娟,马巍.初始含水量对冻结粉质砂土变形与强度的影响[J].岩土力学,2014,35(10):2855-2860.
- [8] 何平,程国栋,杨成松,等.非饱和冻土的强度分析[J].冰川冻土,2002,24(3):260-263.
- [9] 蔡正银,吴志强,黄英豪,等.含水率和含盐量对冻土无侧限抗压强度影响的试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(9):1580-1586.
- [10] 孙立强,路江鑫,李恒,等.含水率和含盐量对人工冻土强度特性影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(S2):27-31.
- [11] 李海鹏,杨维好,黄家会,等.试件形状对冻结粉土抗压强度影响的试验研究[J].冰川冻土,2005,27(6):920-925.
- [12] 陈忠达,陈冬根,陈建兵,等.冻融循环对不同含水率粗粒土回弹模量的影响[J].郑州大学学报(工学版),2014,35(4):9-13.
- [13] HU X D, WANG J T, YU R Z. Uniaxial compressive and splitting tensile tests of artificially frozen soils in tunnel construction of Hong Kong[J]. Journal of Shanghai Jiaotong university (science), 2013, 18(6): 688-692.

- [14] LI H P, ZHU Y L, ZHANG J B, et al. Effects of temperature, strain rate and dry density on compressive strength of saturated frozen clay[J]. Cold regions science and technology, 2004, 39(1): 39-45.
- [15] 尹珍珍, 陈有亮, 王鹏. 上海人工冻结黏土单轴无侧限抗压强度试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 788-792.
- [16] XU X T, WANG Y B, YIN Z H, et al. Effect of temperature and strain rate on mechanical characteristics and constitutive model of frozen Helin loess[J]. Cold regions science and technology, 2017, 136: 44-45.
- [17] 江汪洋, 杨平, 陈斌, 等. 宁波海相软弱土层人工冻土强度特性试验研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(5): 126-131.
- [18] 孙谷雨, 杨平, 刘贵荣. 南京地区冻结粉质黏土邓肯-张模型参数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S1): 2989-2995.
- [19] 张丽敏, 李志军, 贾青, 等. 人工淡水冰单轴压缩强度试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1392-1396.
- [20] 徐湘田, 赖远明, 周志伟, 等. 循环与单调加载作用下冻结黄土的变形与损伤特性[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1184-1191.

## Effect of Water Content and Strain Rate on the Strength Characteristics of Frozen Silty Clay

ZHANG Yaqin<sup>1</sup>, YANG Ping<sup>1</sup>, JIANG Wangyang<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Changzhou Rail Transit Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

**Abstract:** Uniaxial compressive strength and elastic modulus of the artificial frozen soil were the key parameters of artificial ground freezing method design, it was extremely important to grasp their variation accurately. So the experimental study on uniaxial compressive strength of artificial frozen silty clay was carried out under the different water content and strain rate. The results showed that most samples were drum-type damaged. With the increase of water content, the stress-strain curve gradually changed from stress softening to stress hardening. There was an optimum water content for Nanjing typical silty clay, under which, the compressive strength was highest. The optimum water content was 22%, which approached saturated water content. Elastic modulus of remolded silty clay showed a increasing trend as water content increasing, but the growth rate declined. The uniaxial compressive strength and elastic modulus increased with the strain rate. The resilient modulus increased with the loading times, when loading times up to 7 times, the resilient modulus was basically stable.

**Key words:** artificial frozen silty clay; water content; loading rate; strength characteristic; resilient modulus

文章编号:1671-6833(2020)03-0085-06

# 高压变电站构架避雷针结构承载力分析与加固研究

王朝华<sup>1</sup>, 赵桂峰<sup>2</sup>, 刘冉<sup>2</sup>, 陈怡文<sup>2</sup>

(1. 国家电网河南省电力公司 电力科学研究院 河南 郑州 450052; 2. 郑州大学 土木工程学院 河南 郑州 450001)

**摘要:**建立了典型构架避雷针结构的 ANSYS 有限元模型,对其进行设计荷载组合工况下的静力承载力分析和风致动力响应分析。结果表明:典型构架避雷针结构 T 型相贯节点处由于构造缺陷易出现应力集中问题,在该区域设置加劲肋可显著降低相贯节点区的应力水平,有效缓解应力集中问题。现行规范拟静力方法设计的构架避雷针结构是偏于不安全的,实际设计时,建议将规范拟静力方法得到的结果乘以相应的动力放大系数  $\delta$ (就本算例工况而言,建议取  $\delta \geq 1.6$ ) 以考虑脉动风对结构的不利影响。

**关键词:** 构架避雷针结构; 静力承载力; 风致动力响应; 相贯节点

**中图分类号:** TU323 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.02.011

## 0 引言

现代大型变电站中常用的变电构架和避雷针是钢管结构,它具有构造简单、受力明确、轻质高强<sup>[1-2]</sup>等特点,尤其适合标准化生产和制作。其中构架避雷针是由法兰将各段钢管连接而成的单管构件,高度一般在 20~50 m<sup>[3]</sup>,属于典型的高耸结构,在风荷载作用下,避雷针各段连接处易产生振动累积损伤,在薄弱位置甚至可能发生断裂。近年来,在役构架避雷针断裂事故时有发生<sup>[4]</sup>,如元江 220 kV 变电站、东屿 220 kV 变电站和宁夏某 750 kV 变电站。2014 年 12 月,河南某 500 kV 变电站构架避雷针出线侧发生折断事故,断口位于避雷针和横梁的相贯 T 型节点处,表现为避雷针底座钢管横梁撕裂。

迄今为止,关于构架避雷针断裂原因的分析主要是从材料化学成分、金相组织等方面进行<sup>[4]</sup>,对于避雷针及其相贯节点的受力特性尤其是风致动力响应等方面的研究较少,使得标准化设计制作的构架避雷针仍不能较好地反映其在实际复杂应力状态下的受力特点。为此,采用 ANSYS 软件建立典型构架避雷针结构的有限元模

型,按照 DL/T5457—2012《变电站建筑结构设计技术规程》<sup>[5]</sup>推荐的设计方法,将风荷载等效为静力作用施加在结构上,分析典型构架避雷针结构在设计荷载工况下的承载特点和薄弱环节,在此基础上对结构进行风致动力响应分析并提出加固建议,以期类似构架避雷针结构的优化设计和日常维护提供依据。

## 1 构架避雷针结构的有限元模型

以河南省某 500 kV 高压变电站中的出线侧变电构架<sup>[6]</sup>为研究对象,按照原设计图纸可得到其整体构架避雷针的计算模型和部分构件尺寸,如图 1 所示。该变电构架共六跨,中间和右边跨各设一根避雷针,材料为 Q235B,避雷针由 6 段圆钢管连接而成,自下而上各段钢管规格分别为:  $D_1D_2(\phi 325 \times 8)$ 、 $D_2D_3(\phi 325 \times 10)$ 、 $D_3E_1(\phi 325/220) \times 6$ 、 $E_1E_2(\phi 140 \times 4)$ 、 $E_2E_3(\phi 89 \times 5)$ 、 $E_3E_4(\phi 48 \times 3.5)$ ,各段长度及标高如图 1 所示。构架横梁采用 Q345B 圆钢管,规格为  $\phi 480 \times 6$ ,每跨横梁中都有 3 个位置留有挂导线孔;同时,在未设置避雷针的各构架柱上部还设有悬挂地线的地线柱,地线柱亦采用 Q235B 圆钢管,规格为  $\phi 325 \times 8$ 。构

收稿日期:2019-09-29; 修订日期:2019-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108425); 国网河南省电力公司科技攻关项目

作者简介:王朝华(1974—),男,河南洛阳人,国家电网河南省电力公司高级工程师,主要从事电网金属结构检测管理与施工维护研究。

通信作者:赵桂峰(1978—),女,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事电网基础设施防灾减灾研究, E-mail: gfhzhao@zzu.edu.cn。

架柱为人字形,两端沿  $y$  向分别设置侧向支撑,同时沿柱高方向设置两道横撑;构架柱和支撑杆件均采用 Q235B 钢材,除最上层横撑(如  $C_1C_2$ )采用 L89×7 角钢外,其他杆件均采用  $\phi 325 \times 8$  圆钢管。构架跨度及支柱间距详见图 1。

选用 Beam188 单元<sup>[7]</sup>模拟构架杆件,取双线性随动强化模型 BKIN 模拟 Q235B 和 Q345B 钢材本构关系,屈服强度分别为 235 MPa 和 345 MPa,弹性模量和泊松比分别为  $2.06 \times 10^5$  MPa 和 0.3,强化模量取 0.02 倍弹性模量。最终建立的有限元模型如图 2 所示,共有 3 418 个节点和 3 310 个单元,所有杆件均采用刚性连接,各构架柱底部均采用固定端约束。

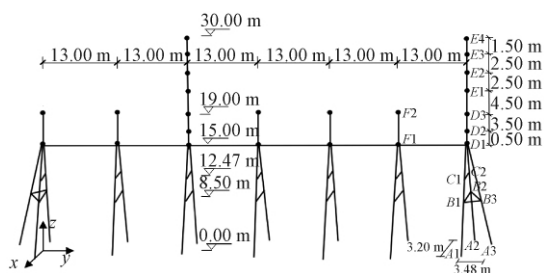


图 1 变电构架避雷针结构计算模型示意图

Figure 1 Schematic diagram of a substation framework with lightning rods

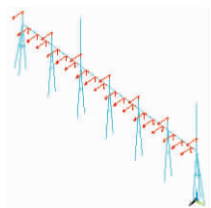


图 2 变电构架避雷针结构的有限元模型图

Figure 2 Finite element model of the substation framework with lightning rods

## 2 构架避雷针结构的设计荷载工况及静力承载力分析

### 2.1 设计荷载工况

根据规范<sup>[5]</sup>的规定,设计变电构架时,应考虑结构可能同时出现的不同荷载,并按各工况下的最不利效应组合进行设计。由于该变电构架所在地的基本风压  $w_0 = 0.35 \text{ kN/m}^2$ ,根据风压和风速的换算关系,可换算出 10 m 高处的设计风速  $v = 23.66 \text{ m/s}$ 。安装和检修时取风速  $v = 10 \text{ m/s}$ ,对应的基本风压为  $w_0 = 0.0625 \text{ kN/m}^2$ ,该值小于规范<sup>[5]</sup>规定的最小基本风压  $0.30 \text{ kN/m}^2$ ,故静力设计时仍选用最小基本风压。由此可列出构架避雷针结构在承载能力极限状态时的以下 5 种荷载

效应组合工况:

①大风工况: 1.2 恒荷载+1.3 导(地)线荷载(大风条件)+1.4 结构风压(取  $v = 23.66 \text{ m/s}$ );

②最大覆冰工况: 1.2 恒荷载+1.3 导(地)线荷载(覆冰情况)+1.4 结构风压(取  $v = 10 \text{ m/s}$ );

③温度工况: 1.2 恒荷载+1.3 导(地)线荷载(最高温度)+1.0 温度作用+1.4 结构风压(取  $v = 10 \text{ m/s}$ );

④安装工况: 1.2 恒荷载+1.2 导(地)线荷载(安装条件)+1.4 结构风压(取  $v = 10 \text{ m/s}$ );

⑤检修工况: 1.2 恒荷载+1.2 导(地)线荷载(检修条件)+1.4 结构风压(取  $v = 10 \text{ m/s}$ )。

进行荷载工况组合时,结构自重可在 ANSYS 软件中通过施加重力加速度的方式自动计入。由于导(地)线本身细且柔,对结构整体的刚度影响很小,因此建模时只在构架相应位置施加导(地)线的三相荷载,具体数值见表 1。由表 1 知,导(地)线的张力有 3 种类型: 水平张力、垂直荷重和侧向张力,分别对应于模型的  $x$ 、 $z$  和  $y$  向。

根据表 1,可判断设计最大风速工况、检修上人三相各 100 kg 和检修上人单相 150 kg 工况为结构的不利工况。按照上述参数和不利工况条件,对结构进行设计荷载组合效应下的静力承载力分析,结果如表 2 所示。可以看出,避雷针根部到中间变截面处(标高 15~15.5 m)的应力值较大;总体上看设计最大风荷载垂直构架长度方向( $x$  向)作用时为最不利工况组合。因此本文以设计风速  $x$  向作用为例对构架避雷针进行承载性能分析。

### 2.2 设计风荷载下构架避雷针的静力承载力

在设计风速  $x$  向作用下,构架避雷针不同高度处的风荷载可按式(1)计算<sup>[5]</sup>:

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_s w_0 \quad (1)$$

式中:  $w_k$  为风荷载标准值;  $w_0$  为基本风压值;  $\beta_z$  为高度  $z$  处的风振系数;  $\mu_z$  为风压高度变化系数;  $\mu_s$  为风荷载体型系数,对于圆形独立单杆,可按如下规定计算<sup>[5]</sup>: 当  $\mu_z w_0 d^2 \leq 0.002$  时  $\mu_s = 1.2$ , 当  $\mu_z w_0 d^2 \geq 0.015$  时  $\mu_s = 0.6$ , 中间按线性插值计算,其中  $w_0$  按  $\text{kN/m}^2$  计算,  $d$  为单杆直径,按 m 计算。

(1) 构架避雷针的应力和位移响应。为了分析地线对避雷针受力的影响,本节分别考虑避雷针上是否悬挂地线两种情况,计算结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在设计风速等效静载作用下,边跨和中间跨构架避雷针下部的应力较大,顶端的



表 1 变电构架导(地)线张力设计参数

Table 1 Parameters of the conductor (ground line) tensions of the substation framework							kN
导线型号	荷载条件	最高温度	最大风速	覆冰	安装	检修上人 三相各 100 kg	检修上人 单相 150 kg
LGJ-500/45	$R$	1.446	3.49	2.012	1.450	1.950	2.200
	$Z$	0.821	0.821	0.821	0.821	0.821	0.821
	$H$	4.271	10	7.439	5.073	10.022	12.642
地线张力		$R=1.13$		$Z=0.64$		$H=5.0$	

注:表中  $R$  指垂直荷重  $Z$  指侧向风压  $H$  指水平张力。

表 2 3 种最不利组合工况下避雷针各段连接点处的应力

Table 2 Stress at each connection point of the lightning rod subjected to wind loads under three working conditions								MPa
高度/ m	节点号	风荷载垂直构架长度方向( $x$ 向)			风荷载顺构架长度方向( $y$ 向)			
		工况①	工况⑤(三相)	工况⑤(单相)	工况①	工况⑤(三相)	工况⑤(单相)	
23.5	N243	114.88	103.98	103.97	114.91	104.00	104.00	
19.0	N213	48.73	43.59	43.59	48.74	43.60	43.60	
15.5	N183	142.95	134.80	134.80	107.79	102.02	102.03	
15.0	N182	156.61	149.90	149.90	119.91	113.63	113.63	

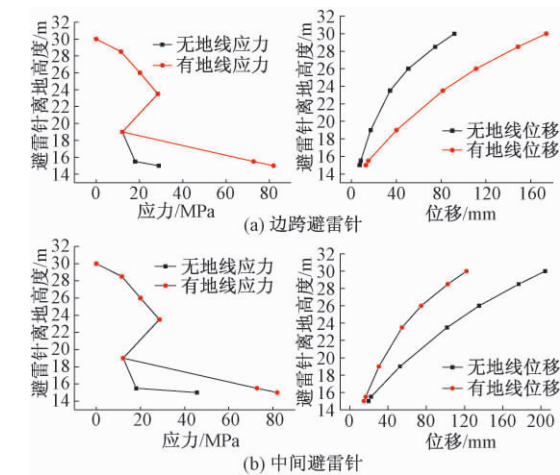


图 3 构架避雷针有无地线时节点应力及位移对比  
Figure 3 Comparison of the stress and displacement results for the lightning rods with and without ground wire

位移较大;悬挂地线时,避雷针底部应力和顶部位移较没有地线时增加较多,最大应力为 82 MPa,最大位移为 173.92 mm,均在规范<sup>[5]</sup>许可范围内。由于地线张力施加在避雷针底部附近,因此挂线时,避雷针根部附近的应力增加较多,地线张力的影响不可忽视。对比边跨和中间跨避雷针的响应可知,相同情况下中间避雷针的应力和位移均比边跨避雷针对应节点的值大,说明中间避雷针受力更为不利,结构设计时应予以关注。

(2) 构架避雷针相贯节点的受力特点及加固分析。由于实际中构架避雷针断裂多发生在避雷

针与横梁的 T 型相贯节点处。为进一步了解该部位的应力分布,进而提出合适的加固方案,本节以中间避雷针为例,采用 Shell 93 单元建立典型相贯节点的精细化有限元模型,避雷针各段之间通过创建刚性区连接,横梁两端的法兰盘和加劲肋对称设置,构架柱底部设置为固结,建模时各部件采用切分和搭接命令形成整体。在前述结构自重、地线张力和风荷载作用下,相贯节点处的应力分布如图 4(a) 所示。可以看出,在设计荷载作用下,避雷针和横梁交接处应力水平较高,虽然总体上仍处于安全范围,但在相贯节点根部出现了明显的应力集中现象,最大拉应力达到 398.30 MPa。该值已超过了钢材的屈服强度(345 MPa),说明上述避雷针相贯节点构造不够合理,在随时间不断变化的风荷载等因素作用下易发生脆断事故。

为改进上述构造的不足,考虑在避雷针和横梁 T 型相贯节点处设置加劲肋,对其进行加固。具体方案如下:在横梁中部设置 3 道竖向加劲肋,厚度为 12 mm,间隔 100 mm。采用和未加固避雷针相同的方式对加固后的结构进行静力加载分析,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,当在横梁上设置加劲肋后,相贯节点区域的应力明显减小,最大值为 120.07 MPa,出现在中部竖向加劲肋和横梁相贯位置处,该值远小于钢材屈服强度。这说明笔者建议的加固方式可以有效缓解构架避雷针相贯节点区域的应力

集中现象,是一种较为可行的加固方案。

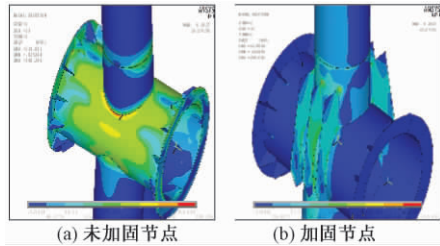


图4 加固前后构架避雷针相贯节点应力云图

Figure 4 Stress of the unreinforced and reinforced tubular joint of the lightning rod

### 3 构架避雷针的风致动力响应分析

考虑到构架避雷针结构具有高度高、刚度小的特点,在脉动风作用下极易发生振动。因此,对其进行设计风速作用下的动力响应分析,了解其受力特点,进而提出合理的设计建议,这对于预防类似断裂事故的发生具有较大的实际意义。

#### 3.1 脉动风速时程模拟

由于缺乏可靠的实测风速数据,采用谐波叠加法<sup>[8]</sup>模拟构架避雷针结构的风场,将模拟结果作为结构的输入荷载来进行风振响应分析。谐波叠加法是采用一系列余弦波加权叠加以实现

风速模拟的,具有计算简单、数据稳定且精度较高的优点。基于多维随机过程样本模拟理论,谐波叠加法模拟的随机过程为:

$$V_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N \cdot \{ a_{jm}(l) \cos[\omega_l t - \varphi_{jm}(\omega_l)] + b_{jm}(l) \sin[\omega_l t - \varphi_{jm}(\omega_l)] \} \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

式中:  $a_{jm}(l) = \sqrt{2\Delta\omega} |I_{jm}(\omega_l)| \eta_m$ ;  $b_{jm}(l) = \sqrt{2\Delta\omega} |I_{jm}(\omega_l)| \xi_m$ ;  $\eta_m$  和  $\xi_m$  是相互独立的标准差为1、均值为0的高斯随机数;  $\Delta\omega = (\omega_b - \omega_a)/N$  是圆频率的增量;  $\varphi_{jm}(\omega_l)$  是处于不同位置处的相位角。

由于变电构架各跨的间距较大,相邻构架相关性较弱,模拟时只需考虑结构竖向的风速相关性。模拟采用的各参数见表3。限于篇幅,这里仅以中间避雷针顶部节点42(标高为30 m)和中部节点39(标高为23.5 m)为例,给出模拟的风速时程曲线,同时将模拟所得的脉动风速功率谱和目标谱进行比较,结果如图5所示,二者吻合较好。因此,笔者模拟的脉动风荷载时程样本,可用于构架避雷针结构的风振响应分析。在获得了各节点位置处的脉动风时程后即可依据体型系数按照准定常理论<sup>[10]</sup>建立节点脉动风荷载。

表3 风速时程模拟各参数

Table 3 Parameters of the wind speed time simulation

参数	模拟方法	平均风速模型	基本风压 ( $N \cdot m^{-2}$ )	地面粗糙度 类别、系数	脉动风速谱	模拟 点数	风速时程 总时间/步长	频率采 样点数	上限 频率/Hz
取值	谐波叠加	对数律	0.35	B类、0.16	Davenport <sup>[9]</sup>	56	600 s/0.1	2 048	10

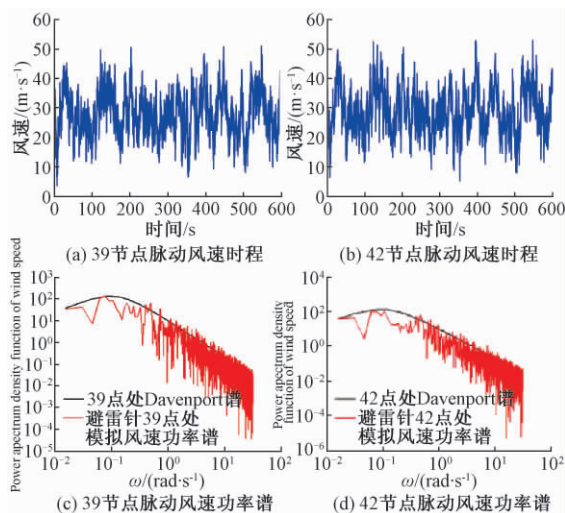


图5 避雷针代表点处的脉动风速时程及其功率谱

Figure 5 Wind speed time history curve and power spectrum at each representative points of the lightning rod

#### 3.2 构架避雷针的风致动力响应

##### 3.2.1 未加固构架避雷针的风振响应

首先分析未加固的构架避雷针的风振响应,结果如图6所示。由图6可以看出,设计风速作用下,构架避雷针的应力和位移动力响应均较静力时有较大增加。为更清楚地了解避雷针在动、静力荷载作用下的响应特点,笔者还计算了两种情况下中间避雷针主要节点的应力响应比值,如表4所示。

对比表4中结果可知,考虑脉动风的影响时,避雷针主要节点的应力响应均大于静力情况,就具体数值来看,避雷针底部应力水平较高,为受力最不利截面,动静力应力比值为1.57,说明按照现行规范拟静力方法设计的构架避雷针对于脉动风的动载效应考虑不全面,结果偏于不安全。再结合表4还可以看出,避雷针中间变截面应力发生了突变,说明其构造不合理。建议实际设计时



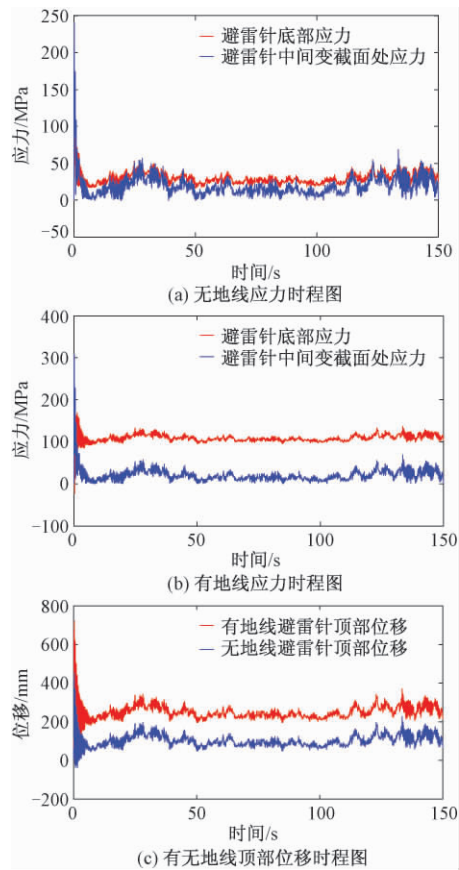


图 6 构架避雷针底部和变截面处应力及顶部位移时程  
Figure 6 Time history of the stress at the bottom and the variable cross-section and the displacement at the top of the lightning rod

表 4 设计风速作用下构架避雷针的动、静力应力响应对比  
Table 4 Comparison of the dynamic and static stress of the middle lightning rod under the design wind speed

高度/ m	节点 号	无地线应力/MPa			有地线应力/MPa		
		SR	TR	TR/SR	SR	TR	TR/SR
23.5	N243	28.54	68.55	2.40	28.62	68.96	2.41
19.0	N213	12.16	25.55	2.10	12.19	25.68	2.08
15.5	N183	18.11	33.84	1.87	72.80	112.86	1.55
15.0	N182	45.62	66.26	1.45	82.00	128.39	1.57

注: SR 表示静力计算结果, TR 表示动力计算结果,下同。

将设计风速下的拟静力分析结果乘以相应的动力放大系数  $\delta$  (就本文算例工况而言,建议取  $\delta \geq 1.6$ ) 以考虑脉动风对结构的不利影响。同时采用均匀渐变的圆钢管截面避雷针形式,避免截面的突变引起应力集中等不利影响。

3.2.2 构架避雷针相贯节点区域的风振响应

前文分析表明,构架避雷针相贯节点区域较为薄弱。因此,本节重点考察脉动风作用下相贯节点区域的应力。为了反映脉动风对避雷针相贯

节点区域应力的影响,同时对加固效果进一步评价,本节计算了加固前后构架避雷针相贯节点区域的最大拉应力时程曲线,如图 7 所示。

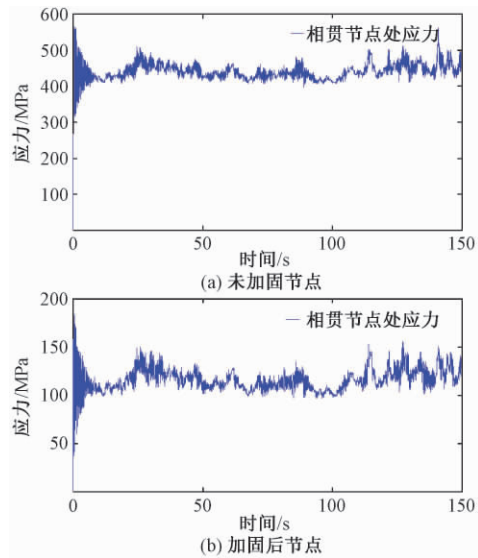


图 7 加固前后构架避雷针相贯节点区域最大拉应力时程

Figure 7 Time history of the maximum tensile stress of the unreinforced and reinforced tubular joint of the lightning rod

从图 7 可以看出,在脉动风作用下加固前相贯节点区域最大拉应力达到了 560.15 MPa,远超过横梁钢材屈服强度;而加固后最大拉应力仅为 155.21 MPa,仍在弹性范围之内。为了更清楚地对比加固前后构架避雷针动、静力响应,笔者还计算了悬挂地线时避雷针各代表高度处的应力值,结果如表 5 所示。由表 5 可知,当在横梁上设置加劲肋后,各代表位置处的动、静应力值都明显减小,尤其是相关节点和中间变截面处的动、静应力比值也明显减小,分别为 1.29 和 1.81。这说明设置加劲肋可以有效缓解结构的应力集中现象,是较为可行的加固方式,但脉动风引起的动力放大效应仍然不能忽略。

表 5 加固前后构架避雷针有地线时的应力对比  
Table 5 Comparison of the dynamic and static stress of the unreinforced and reinforced lightning rod with ground wire

高度/ m	加固后 SR/ MPa	加固前 TR/ MPa	加固后 TR/ MPa	加固后 TR/加固 前 TR	加固后 TR/加固 后 SR
23.5	33.31	180.11	60.36	0.34	1.81
19.0	27.45	164.16	33.64	0.20	1.23
15.5	88.77	190.34	95.09	0.50	1.07
15.0	120.07	560.15	155.21	0.28	1.29

## 4 结论

对现代大型变电站中常用的构架避雷针结构进行了设计风荷载作用下的静力和风致动力响应分析,了解了结构的整体受力特点和薄弱环节,并根据分析结果提出了加固设计建议。

(1) 目前常用的变电构架避雷针结构中,避雷针和横梁 T 型相贯节点区域构造不合理,容易出现应力集中现象。通过在该区域设置加劲肋的方式可显著降低相贯节点区的应力水平,有效缓解应力集中,建议工程中参考使用。

(2) 在变电构架避雷针结构的标准化设计中,按照现行规范拟静力方法设计的结果是偏于不安全的。实际设计时建议将规范拟静力方法得到的结果乘以相应的动力放大系数  $\delta$  (就本文算例工况而言,建议取  $\delta \geq 1.6$ ) 以考虑脉动风对结构的不利影响。

(3) 当前标准化设计中典型构架避雷针中间采用变截面形式连接不够合理。建议在实际中采用均匀渐变的圆钢管截面避雷针形式,避免截面突变引起的局部应力增大等不利影响。

## 参考文献:

- [1] VANDERBILT M D, CRISWELL M E. Analysis and design of single-pole transmission structures [J]. Computers & structures, 1988, 28(4): 551-562.
- [2] 李天,袁征,郑德乾,等. 应用高等分析理论分析人字形电力构架[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(1): 15-18.
- [3] 张劲光,王朝华,库永恒,等. 高压变电站构架避雷针结构抗震性能分析[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 192-201.
- [4] 丁国君,郭磊,董曼玲,等. 构架避雷针折断原因分析及对策[J]. 河南电力, 2015, 43(4): 6-9.
- [5] 国家能源局. 变电站建筑设计技术规程: DL/T 5457—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [6] 陈怡文. 变电构架避雷针结构的风致动力响应分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [7] 王新敏,李义强,许宏伟. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [8] RICE S O. Mathematical analysis of random noise [J]. The bell system technical journal, 1944, 23(3): 282-332.
- [9] DAVENPORT A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly journal of the royal meteorological society, 1961, 87(372): 194-211.
- [10] DYRBYE C, XHANSEN S O. Wind loads on structures [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1996.
- [1] VANDERBILT M D, CRISWELL M E. Analysis and

## Bearing Capacity and Reinforcement Analysis of a High Voltage Substation Framework with Lightning Rods

WANG Chaohua<sup>1</sup>, ZHAO Guifeng<sup>2</sup>, LIU Ran<sup>2</sup>, CHEN Yiwen<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Corporation, Zhengzhou 450052, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The finite element model of a typical substation framework with lightning rods was established by using ANSYS software. The static bearing capacity and wind-induced dynamic response analysis were carried out under the design load combination conditions. The results showed that the stress concentration phenomenon was easy to occur due to the structural defects in the T type tubular joint of the typical substation structure with lightning rods, and it could be effectively relieved by installing stiffening ribs in the T type tubular joint area. Furthermore, the lightning rod designed by the current standard static method was unsafe. In actual design, it was suggested that the results of the pseudo static method should be multiplied by a dynamic amplification factor  $\delta$  to take into account the adverse effects of the pulsating wind on the structure. For the case in this paper, it was suggested that  $\delta$  should be no less than 1.6.

**Key words:** substation framework with lightning rods; static bearing capacity; wind-induced dynamic response; tubular joint

# 基于累积前景理论的组合出行交通分配模型

张雪妍, 贺 锋

(中国人民解放军军事科学院 国防工程研究院, 北京 100091)

**摘 要:** 城市交通网络是包含多种交通方式的不确定性复杂系统, 出行者作为交通网络的直接参与者, 对交通方式和路径的选择行为将直接影响交通网络的均衡状态。以累积前景理论为基础, 在随机交通网络中, 考虑出行者的观测误差和风险决策行为, 分析了组合出行下的随机用户均衡条件, 并建立了相应的变分不等式模型。根据变分不等式定理, 分析了模型的等价性和解的存在性, 采用基于路径的相继平均算法对问题进行求解。引入超级网络作为算例, 对模型进行了验证, 并对模型参数进行了敏感度分析。计算结果表明: 基于累积前景理论的组合出行交通分配模型, 能够更加有效地刻画出行者在不确定交通环境下的交通方式和换乘站点的选择行为, 为城市交通方式划分和换乘站点选址等工作提供理论支持。

**关键词:** 交通运输工程; 累积前景理论; 组合出行模式; 交通分配; 相继平均算法

**中图分类号:** U491.1 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.02.004

## 0 引言

随着城市交通出行方式的多样化, 出行者的出行模式从单一的交通方式出行转变为多交通方式的组合出行, 如停车换乘(P&R, park and ride)出行方式。相比单一出行方式, 组合出行更能刻画出行者的实际出行行为。Fernández等最早建立了固定需求下的组合出行交通分配模型<sup>[1]</sup>, 在此基础上, 国内外学者进行了相应的扩展研究, 主要包括混合交通分配模型<sup>[2]</sup>、弹性交通分配模型<sup>[3]</sup>、随机交通均衡分配模型<sup>[4]</sup>和动态交通分配模型<sup>[5]</sup>。这些组合出行模型与单一出行方式的模型相比, 不仅能够分析出行者的广义路径选择行为, 还能研究出行者的换乘站点选择行为, 为网络换乘站点的规划提供理论支持。然而, 上述研究均是在确定性网络中展开的, 并没有考虑交通网络的不确定性。

交通系统是典型的不确定性系统<sup>[6]</sup>, 比如受天气、交通事故的影响, 路网通行能力将会衰减, 考虑该种不确定性, 孟梦等<sup>[7]</sup>研究了降级路网下组合出行交通流分配模型与算法。但是除了交通系统的不确定性外, 出行者本身还存在观测误差和非完全理性行为, 因此并非所有出行者均会选

择实际费用最小的路径<sup>[8]</sup>。累积前景理论是Tversky和Kahneman<sup>[9]</sup>在一系列心理学实验基础上提出的, 用于描述经济行为主体面临不确定条件时的决策行为过程。研究者们通过一系列实证调研, 发现累积前景理论能够很好地描述出行者在不确定环境下的路径选择行为, 并将其应用于交通网络分配和路径优化等问题<sup>[10-11]</sup>。

为了定量分析随机组合网络中出行者的交通选择行为和网络均衡状态, 在现有文献的基础上, 引入累积前景理论, 采用前景值描述出行者在不确定交通网络中的选择效用, 基于随机效用理论分析了网络随机用户均衡条件, 并建立了相应的变分不等式模型。该模型同时考虑了交通系统不确定性、组合出行方式、出行者观测误差和风险决策行为, 可以更加精确地描述出行者的交通选择行为和网络均衡状态。

## 1 基本符号和理论

### 1.1 基本符号

定义交通网络  $G = (N, A)$ ,  $N$  为节点的集合,  $A$  为路段集合,  $W$  为 OD 对集合。  $R$  和  $D$  分别代表城市道路路段集合和地铁路段集合, 它们之间由换乘路段集合  $E$  进行连接  $R \cup D \cup E = A$ 。  $M$  为

收稿日期:2019-05-19; 修订日期:2019-12-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61703351)

作者简介:张雪妍(1991—), 女, 辽宁沈阳人, 中国人民解放军军事科学院工程师, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究, E-mail: 603110650@qq.com。

交通方式集合,包含小汽车和地铁两种方式,用 1 和 2 表示。 $w$  为一个 OD 对,  $q^w$  为 OD 对  $w$  的出行需求,  $K^w$  为 OD 对  $w$  的所有路径集合,  $f_k^w$  为 OD 对  $w$  之间路径  $k \in K^w$  的流量,  $x_a$  为路段  $a$  上的流量,  $\delta_{a,k}^w$  为路段-路径关联变量,若路段  $a$  在路径  $k$  上,则  $\delta_{a,k}^w = 1$ , 否则  $\delta_{a,k}^w = 0$ ,  $T_a$  为路段出行时间预算,  $T_k^w$  为 OD 对  $w$  之间路径  $k$  的出行时间预算,  $v_k^w$  为 OD 对  $w$  之间路径  $k \in K^w$  的前景值。

## 1.2 累积前景理论

累积前景理论将风险的前景和不确定性因素纳入前景理论中,用决策权重函数替换决策概率值,分别考虑损失和收益,主要包含了 3 个基本观点:①收益和损失是相对于参考点而言的;②面对收益人们倾向于风险规避,面对损失人们倾向于风险偏好;③人们会高估小概率事件发生的可能,而低估大概率事件发生的概率。

在累积前景理论框架下,每条可行路径对应着相应的价值函数和决策权重函数,它们的乘积为路径前景值。根据累积前景理论,出行者将路径的前景值作为路径选择依据。计算路径的前景值,需要 3 个基本要素,分别为路径的价值函数、参照点和决策权重函数。

(1) 路径的价值函数与参照点密切相关,可以由下式表示:

$$g(T_k^w) = \begin{cases} (u^w - T_k^w)^m, & T_k^w \leq u_0; \\ -\lambda(T_k^w - u^w)^n, & T_k^w > u_0, \end{cases} \quad (1)$$

式中:参数  $m > 0$ ,  $n \leq 1$  表示出行者对价值收益和损失的敏感程度;  $\lambda \geq 1$  表示出行者对损失的规避系数;  $u^w$  为参照点。

(2) 采用内生的方式确定参考点<sup>[12]</sup>,即该 OD 对所有路径中出行时间预算的最小值:

$$u_0^w = \min_{k \in K^w} \{T_k^w\}. \quad (2)$$

(3) 为了确保权重函数是关于到达概率的单调递增函数,采用 Prelec 给出决策权重函数的形式<sup>[13]</sup>:

$$w(p) = \exp[-(-\ln p)^\gamma] \quad 0 < \gamma < 1. \quad (3)$$

沿用 Connors 的推导过程<sup>[14]</sup>,令  $F(T_k^w)$  为  $T_k^w$  的概率分布函数,从而得到路径的前景值为:

$$v_k^w = \int_{u_0^w}^{u_k^w} \frac{dw[F(T_k^w)]}{dT_k^w} g(T_k^w) dT_k^w + \int_{u_0^w}^{u_k^w} -\frac{dw[1-F(T_k^w)]}{dT_k^w} g(T_k^w) dT_k^w, \quad (4)$$

式中:  $u_k^w$  和  $\bar{u}_k^w$  分别为出行时间预算的下界和上界,上下界的取值会对前景值的计算造成影响,比

较合理的取值方法为:  $u_k^w$  为路径自由出行时间,  $\bar{u}_k^w = E(T_k^w) + 3\sqrt{\text{var}(T_k^w)}$ 。

## 2 模型建立

### 2.1 路径出行时间预算

小汽车网络路段出行时间采用 BPR (Bureau of Public Road) 函数,即

$$T_a(x_a, C_a) = t_a^0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right], \quad \forall a \in R, \quad (5)$$

式中:  $t_a^0$  为路段自由行走时间;  $x_a$  为路段流量;  $C_a$  为路段实际通行能力;  $\alpha$  和  $\beta$  为参数,通常取  $\alpha = 0.15$ ,  $\beta = 4$ 。

降级路网条件下,路段通行能力会在外部条件干扰下衰减,此时  $C_a$  为一个变量。令  $C_a$  服从  $[\theta_a \bar{C}_a, \bar{C}_a]$  上的均匀分布,其中  $\bar{C}_a$  为路段  $a$  的设计通行能力,  $\theta_a$  为其通行能力的降级系数。经推导,可以得到小汽车网络路段出行时间的均值和方差<sup>[15]</sup>,分别为:

$$E(T_a) = t_a^0 + \alpha t_a^0 x_a^\beta \frac{1 - \theta_a^{1-\beta}}{\bar{C}_a^\beta (1 - \theta_a) (1 - \beta)}, \quad \forall a \in R; \quad (6)$$

$$\text{var}(T_a) = \alpha^2 (t_a^0)^2 x_a^{2\beta} \left\{ \frac{1 - \theta_a^{1-2\beta}}{\bar{C}_a^{2\beta} (1 - \theta_a) (1 - 2\beta)} - \left[ \frac{1 - \theta_a^{1-\beta}}{\bar{C}_a^\beta (1 - \theta_a) (1 - \beta)} \right]^2 \right\}, \quad \forall a \in R. \quad (7)$$

换乘时间通常由步行时间和等待时间组成。步行时间由换乘点到地铁站点的距离  $l_a$ ,  $\mu \in E$  和步行速度  $v_{\text{walk}}$  决定,等待时间与发车间隔  $t_f$  相关,假设其服从  $[0, t_f]$  的均匀分布。则换乘时间的均值和方差为:

$$E(T_a) = \frac{l_a}{v_{\text{walk}}} + \frac{t_f}{2}, \quad \forall a \in E; \quad (8)$$

$$\text{var}(T_a) = \frac{(t_f)^2}{12}, \quad \forall a \in E. \quad (9)$$

地铁运行时间相对比较平稳,几乎不受路段上流量的影响,因此可假设地铁网络的路段出行时间为一个常数定值  $T_a$ ,  $\mu \in D$ 。

假设路段出行时间相互独立,根据中心极限定理,路径的出行时间总是服从正态分布,则路径  $k$  的均值和方差为:

$$E(T_k^w) = \sum_{a \in R} \delta_{a,k} E(T_a) + \sum_{a \in E} \delta_{a,k} E(T_a) + \sum_{a \in D} \delta_{a,k} T_a; \quad (10)$$

$$\text{var}(T_k^w) = \sum_{a \in R} \delta_{a,k} \text{var}(T_a) + \sum_{a \in E} \delta_{a,k} \text{var}(T_a). \quad (11)$$

若给定到达概率  $p$ , 则路径  $k$  的出行时间预算为:

$$T_k^w = E(T_k^w) + \sqrt{\text{var}(T_k^w)} \cdot \Phi^{-1}(p), \quad (12)$$

式中:  $\Phi^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布反函数。

## 2.2 随机用户均衡条件

考虑出行者的观测误差, 则出行者的感知路径前景值为一个随机变量, 它由实际前景值  $v_k^w$  和一个随机误差项  $\varepsilon_k^w$  组成:

$$\tilde{v}_k^w = v_k^w + \varepsilon_k^w. \quad (13)$$

假设观测误差项服从独立同 Gumbel 分布, 根据随机效用理论, 选择路径  $k$  的概率为

$$P_k^w = \frac{\exp(\theta v_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(\theta v_k^w)}, \quad \forall k \in K^w, w \in W, \quad (14)$$

式中:  $\theta > 0$ , 为参数, 反映出出行者对路网的熟悉程度。

根据网络均衡条件, 达到随机用户均衡状态时应满足如下条件:

$$f_k^w = P_k^w \cdot q^w; \quad (15)$$

$$\text{s. t. } q^w = \sum_{k \in K^w} f_k^w; \quad (16)$$

$$f_k^w \geq 0; \quad (17)$$

$$q^w \geq 0; \quad (18)$$

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} f_k^w \delta_{a,k}^w. \quad (19)$$

式(15)为随机用户均衡条件, 式(16)为流量守恒约束, 式(17~18)为流量非负约束, 式(19)为路径-路段流量关系。

## 2.3 变分不等式模型

将随机用户均衡条件转化为等价的变分不等式模型, 对模型解的存在性和等价性进行证明。

首先定义期望最小费用<sup>[16]</sup>, 其表达式为:

$$S(v^w) = \frac{1}{\theta} \ln \sum_{k \in K^w} \exp(\theta v_k^w). \quad (20)$$

令  $\Omega$  为所有可行路径流量集  $f$  的集合, 随机用户均衡模型的解等价于寻找一个可行的路径流量集  $f^* \in \Omega$ , 使得  $\forall f_k^{w*} \in f^*$  满足如下变分不等式:

$$\sum_{w \in W} \sum_{k \in K^w} \left[ S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w \right] \times (f_k^w - f_k^{w*}) \geq 0. \quad (21)$$

(1) 等价性证明。根据变分不等式定理, 变分不等式等价于如下的互补松弛条件:

$$\left[ S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w \right] \times f_k^{w*} = 0, \quad (22)$$

$$\left[ S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w \right] \geq 0, \quad (23)$$

$$f_k^{w*} \geq 0, \quad \forall k \in K^w, w \in W. \quad (24)$$

当  $f_k^{w*} > 0$  时, 由上式(22~24)可知:

$$S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w = 0. \quad (25)$$

对式(25)进行等价变换, 即可得到:

$$f_k^{w*} = \frac{\exp(\theta v_k^w)}{\sum_{k \in K^w} \exp(\theta v_k^w)} \cdot q^w. \quad (26)$$

不难看出, 式(26)等价于随机用户均衡条件, 从而得证变分不等式模型(21)等价于随机用户均衡条件(14~19)。

(2) 存在性证明。由约束条件(16~19)可知, 可行路径集  $\Omega$  是由一系列线性约束构成, 因此为紧致凸集, 由式(12)和式(20)可知  $v_k^w$  和  $S(v^w)$  是关于  $f_k^w$  的连续函数, 从而  $S(v^w) + \frac{1}{\theta} (\ln f_k^{w*} - \ln q^w) - v_k^w$  是关于  $f_k^w$  的连续函数, 根据变分不等式定理<sup>[17]</sup>, 模型至少存在一个解。

## 3 求解算法

如前文所述, 出行者将路径的前景值作为路径选择依据, 采用基于路径的相继平均算法 MSA 对模型进行求解, 其具体步骤如下:

**step 0** 初始化: 设定有效路径集合  $K^w$ , 初始化参数, 计算路径初始时间预算  $T_k^w$  和前景值  $v_k^w$ , 采用式(26)对交通需求  $q^w$  在路网上进行随机用户均衡加载, 得到路径初始流量  $f_k^{w(1)}$  和初始路段流量  $x_a^1$ ,  $n = 1$ ;

**step 1** 更新路径前景值: 根据路段流量, 由式(6)~(12)更新路径出行时间, 再由式(1)~(4)更新路径前景值  $v_k^w$ ;

**step 2** 确定方向: 基于路径前景值  $v_k^w$ , 对交通需求  $q^w$  在路网上进行随机用户均衡加载, 得到辅助路径流量  $\tilde{f}_k^{w(n)}$ , 得到路径流量更新方向  $\tilde{f}_k^{w(n)} - f_k^{w(n)}$ ;

**step 3** 更新路径和路段流量:  $f_k^{w(n+1)} = f_k^{w(n)} + a_n (\tilde{f}_k^{w(n)} - f_k^{w(n)})$ ,  $a_n = \frac{1}{n}$ , 由路径路段关联矩阵得到路段流量  $x_a^{n+1}$ ;

**step 4** 收敛检验:

$$\text{当 } \frac{\sqrt{\sum_w \sum_k (f_k^{w(n+1)} - f_k^{w(n)})^2}}{\sum_w \sum_k f_k^{w(n)}} \leq 10^{-3}, \text{ 算法结束}$$

束,否则  $n = n + 1$  ,返回第一步。

#### 4 算例

引入“超级网络”的概念<sup>[18]</sup> ,将交通网络表达为包含多个交通方式子网络的超级网络 ,同时在各子网络节点间添加虚拟弧段表示交通方式之间的换乘。图 1 展示了一个传统网络转换为超级网络的过程。

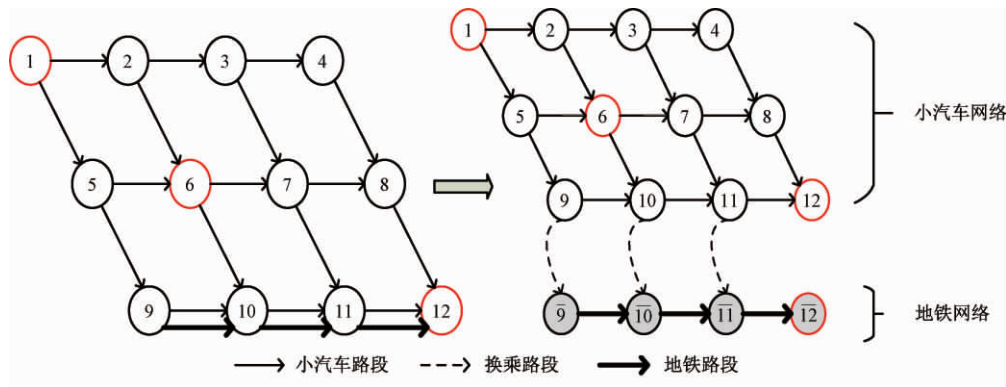


图 1 超级网络

Figure 1 Super network

如图 1 所示 ,网络中包含小汽车网络和地铁网络两个子网络 ,包含 16 个节点 ,共两个 OD 对 ( 1 ,12) 和 ( 6 ,12) ,它们的交通需求分别为  $q^1 = 1\,500\text{ pcu/h}$   $q^2 = 1\,200\text{ pcu/h}$  。网络中共 23 条路段 ,其中 17 条小汽车网络路段 3 条换乘路段 ( 9  $\rightarrow$  9 ,10  $\rightarrow$  10 ,11  $\rightarrow$  11) 和 3 条地铁路段 ( 9  $\rightarrow$  10 ,10  $\rightarrow$  11 ,11  $\rightarrow$  12) 。小汽车网络、换乘网络和地铁网络的路段参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 小汽车网络路段参数

Table 1 Parameters for links in network of cars

编号	路段	$t_a^0 / \text{min}$	$\bar{C}_a / (\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$	编号	路段	$t_a^0 / \text{min}$	$\bar{C}_a / (\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$
1	1 $\rightarrow$ 2	14	900	10	7 $\rightarrow$ 8	14	900
2	2 $\rightarrow$ 3	15	800	11	5 $\rightarrow$ 9	20	700
3	3 $\rightarrow$ 4	14	900	12	6 $\rightarrow$ 10	20	700
4	1 $\rightarrow$ 5	20	700	13	7 $\rightarrow$ 11	17	1 000
5	2 $\rightarrow$ 6	17	700	14	8 $\rightarrow$ 12	16	900
6	3 $\rightarrow$ 7	15	1 000	15	9 $\rightarrow$ 10	14	800
7	4 $\rightarrow$ 8	17	900	16	10 $\rightarrow$ 11	13	900
8	5 $\rightarrow$ 6	16	800	17	11 $\rightarrow$ 12	12	900
9	6 $\rightarrow$ 7	15	600				

对于组合出行下的分配结果 ,相比路径流量 ,本文更加关注每个 OD 对中选择小汽车出行和换乘出行的流量 ,以及每个换乘站点的流量。下面将分析参数变化对均衡条件下出行者交通选择行为的影响。

现实中 ,根据地铁站和出行者目的地位置 ,可能会出现两种情况: ( 1) 地铁出行不能直接到达目的地 ,这时节点  $\bar{12}$  和节点 12 位置不一致 ,两节点之间需添加一段步行弧; ( 2) 地铁出行能直接到达目的地 ,即节点  $\bar{12}$  和节点 12 位置一致。沿用前人研究中网络的设置方法<sup>[2-4]</sup> ,本文考虑第二种情况 ,采用图 1 网络进行算例分析。

表 2 换乘和地铁网络路段参数

Table 2 Parameters for links in network of transfer and metro

编号	换乘路段	$l_a / \text{m}$	$v_{\text{walk}} / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$t_t / \text{min}$	编号	地铁路段	$t_a^0 / \text{min}$
18	9 $\rightarrow$ 9	300	60	6	21	9 $\rightarrow$ 10	14
19	10 $\rightarrow$ 10	300	60	6	22	10 $\rightarrow$ 11	14
20	11 $\rightarrow$ 11	300	60	6	23	11 $\rightarrow$ 12	14

( 1) 路网降级程度和到达概率。其他参数的设置情况为 :路径价值函数 ( 1) 中  $m = n = 0.88$  ,  $\lambda = 2.25$  ,决策权重函数 ( 3) 中  $\gamma = 0.74$  。同时对到达概率和通行能力降级系数进行参数敏感性分析。设置高中低 3 种到达概率 ,分别对应  $p = 0.8$  ,  $p = 0.5$   $p = 0.3$  3 种情况;设置高中低 3 种通行能力降级系数 ,分别对应  $\theta_a = 0.8$   $\theta_a = 0.7$   $\theta_a = 0.6$   $\mu \in R$  ,综合下来 ,共 9 种情形。其结果如表 3 所示。

由表 3 可知 ,随着路网降级程度越严重 ,选择 P&R 出行方式的出行者越多 ,这是因为随着  $\theta_a$  的减小 ,小汽车网络出行费用均值和方差都将变大。此外 ,出行者更加倾向于选择离终点较远的地铁站点进行换乘 ,这是因为出行者换乘距离越长 ,获得地铁出行费用稳定性的优势越大。

此外 ,随着到达概率增加 ,选择 P&R 出行方式的出行者会增多 ,但并不显著。由式 ( 2) 和

表 3 不同参数下出行选择结果  
Table 3 Results of travel mode under different parameters

$\theta_a$	$p$	OD1					OD2			
		小汽车 方式	P&R 方式	节点 9 换乘	节点 10 换乘	节点 11 换乘	小汽车 方式	P&R 方式	节点 10 换乘	节点 11 换乘
0.8	0.3	1 220	280	121	97	62	981	219	144	76
	0.5	1 216	284	120	100	64	976	224	141	83
	0.8	1 210	290	115	102	73	967	233	141	93
0.7	0.3	1 138	362	160	123	80	921	279	177	102
	0.5	1 125	375	161	129	85	918	282	174	108
	0.8	1 114	386	155	134	98	909	291	169	121
0.6	0.3	1 052	448	201	144	104	849	351	216	135
	0.5	1 036	464	201	151	112	847	353	210	143
	0.8	1 028	472	193	156	123	837	363	205	158

(12) 可知,参照点会随到达概率  $p$  的取值变化而不同,对比参考文献[12]中累积前景理论下出行者的路径选择行为,出行者交通方式和换乘节点的选择行为参考点依赖效应并不显著。

(2) 收益和损失的敏感性  $m$  和  $n$ 。令  $p = 0.8$ ,  $\theta_a = 0.7$ ,  $\lambda = 2.25$ ,其他参数固定不变。设置  $m = n$ ,取值由低到高为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 和 0.88。由表 4 可知,出行者对于收益和损失的敏感性,对出行模式选择具有一定影响,且 OD 间距离(即 OD2) 越小,影响越大,其具体表现为:出行者对收益和损失越敏感,那么两种出行方式中,流量大的将越大,流量小的将越小。

表 4 不同  $m$  和  $n$  下的交通方式选择结果  
Table 4 Results of mode choice with variation of  $m$  and  $n$

$m = n$	OD1		OD2		pcu/h
	CAR	P&R	CAR	P&R	
0.40	1 089	411	779	421	
0.50	1 097	403	798	402	
0.60	1 102	398	816	384	
0.70	1 104	396	834	366	
0.80	1 106	394	850	350	
0.88	1 106	394	864	336	

(3) 出行者损失规避程度  $\lambda$ 。令  $p = 0.8$ ,  $\theta_a = 0.7$ ,  $m = n = 0.88$ ,其他参数固定不变。设置  $\lambda$  取值由低到高为 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2 和 2.25。由表 5 可知,出行者损失规避程度对于出行模式选择影响程度较弱,但从中也能发现:出行者损失规避程度越大,两种出行方式中,流量大的将越大,流量小的将越小,这与出行者对于收益和损失的敏感性参数分析结论是一致的。

综上所述,累积前景理论框架下出行方式的选择规律,与现有文献中路径选择规律有着一定的相似性,这是因为出行方式选择是广义路径选

表 5 不同  $\lambda$  下的交通方式选择结果

Table 5 Results of mode choice with variation of  $\lambda$

$\lambda$	OD1		OD2		pcu/h
	CAR	P&R	CAR	P&R	
1.00	1 093	407	847	353	
1.25	1 098	402	851	349	
1.50	1 101	399	855	345	
1.75	1 104	396	858	342	
2.00	1 105	395	861	339	
2.25	1 106	394	864	336	

择的集计过程。此外,组合交通出行模型还能够辨析出行者的交通方式和换乘节点的选择行为,比单一交通出行模型具有更广泛的应用价值。

## 5 结论

对组合出行网络交通分配模型和算法进行了研究。为了考虑不确定环境下,组合出行网络中出行者的观测误差和风险决策行为,基于累积前景理论和随机用户均衡条件,构建了相应的变分不等式模型,对模型解的存在性和等价性进行了分析,并提出了求解算法。最后通过构建包含小汽车网络和地铁网络的超级网络作为算例,对模型的参数进行了敏感度分析。算例结果表明:模型能够有效地描述出行者的交通方式和换乘站点的选择行为,此外,路网降级系数和出行者风险态度均会影响网络的均衡分配结果。本文的研究工作作为城市多模式交通规划提供了理论支持,能够应用到交通方式划分,停车换乘选址及停车场容量规划等工作中。

## 参考文献:

[1] FERNANDEZ E, DE CAE J, FLORIAN M, et al.



- Network equilibrium models with combined modes [J]. *Transportation science*, 1994, 28(3): 182-192.
- [2] 黄海军, 李志纯. 组合出行方式下的混合均衡分配模型及求解算法[J]. *系统科学与数学*, 2006, 26(3): 352-361.
- [3] 李志纯, 黄海军. 弹性需求下的组合出行模型与求解算法[J]. *中国公路学报*, 2005, 18(3): 94-98.
- [4] 李先进, 张国平, 张杰, 等. 组合出行模式下的随机交通平衡分配模型及算法[C]//第25届中国控制与决策会议论文集. 沈阳: 控制与决策编辑部, 2013.
- [5] 孟梦, 邵春福, 曾靖静, 等. 考虑出发时间的组合出行动态路径选择模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(10): 3676-3684.
- [6] 马庚华, 杜牧青, 张小丽. 不确定因素下的综合运输网络容量可靠性分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2018, 39(1): 1-6.
- [7] 孟梦, 邵春福, 曾靖静, 等. 降级路网组合出行交通流分配模型与算法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(2): 643-649.
- [8] SIMON H A. A behavioral model of rational choice [J]. *Competition policy international*, 2010, 6(1): 241-258.
- [9] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty [J]. *Journal of risk and uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.
- [10] 潘晓锋, 左志, 赵胜川. 基于前景理论的改进多路径交通分配模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2014, 14(2): 162-167.
- [11] 崔岩, 张子祥, 时新, 等. 考虑顾客时间紧迫的生鲜电商配送路径优化问题[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2017, 38(6): 59-63.
- [12] XU H L, LOU Y Y, YIN Y F, et al. A prospect-based user equilibrium model with endogenous reference points and its application in congestion pricing [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2011, 45(2): 311-328.
- [13] PRELEC D. The probability weighting function [J]. *Econometrica*, 1998, 66(3): 497-527.
- [14] CONNORS R D, SUMALEE A. A network equilibrium model with travellers' perception of stochastic travel times [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2009, 43(6): 614-624.
- [15] SUN C, CHENG L, ZHU S L, et al. Multiclass stochastic user equilibrium model with elastic demand: considering systematic and accidental delays [J]. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, 2015 (2497): 1-11.
- [16] SHEFFI Y. Urban transportation networks equilibrium analysis with mathematical programming methods[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.
- [17] XIE C, WANG T G, PU X T, et al. Path-constrained traffic assignment: modeling and computing network impacts of stochastic range anxiety [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2017, 103: 136-157.
- [18] LIAO F X, ARENTZE T, TIMMERMAN H. Application of supernetworks in modelling activity-travel behavior [J]. *Journal of the university of Shanghai for science and technology*, 2011, 33(3): 279-286.

## Traffic Assignment Model with Combined Modes Based on Cumulative Prospect Theory

ZHANG Xueyan, HE Feng

(Institute of National Defense Engineering, PLA Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The urban transportation network was an uncertain complex system with multiple traffic modes. Being the direct participants, travelers made choices of traffic modes and travel paths, which could affect the equilibrium state of transportation network. Based on cumulative prospect theory, travelers' perceived errors and risk-decision behavior were considered in the stochastic transportation network. The stochastic user equilibrium condition with combined modes were analyzed and the corresponding variational inequality model was proposed, and the equivalence of model and the existence of solutions were also analyzed. A path-based method of successive average algorithm was used to solve this problem. A super network was introduced as the example network to verify the proposed model and sensitive analysis of the input parameters was made. The results showed that, based on cumulative prospect theory, the traffic assignment model with combined modes could more effectively describe the travelers' choosing behaviors of traffic modes and transfer stations in uncertain transportation environment. This study could provide theoretical support to the urban traffic mode split and site selection of transfer stations.

**Key words:** traffic and transportation engineering; cumulative prospect theory; combined modes; traffic assignment; method of successive average

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(网络版)》(CAJ-N)
- 《中国学术期刊(光盘版)》(CAJ-CD)
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》(CSTJ)
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊网络出版总库》(CAJD)
- 《中国科技论文与引文数据库》(CSTPCD)
- 《万方数据系统》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《电子科技文摘》
- 《国家科技期刊开放平台》
- 《超星期刊域出版平台》

### 郑州大学学报(工学版)

Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)

双月刊 (1980年创刊)

第41卷 第3期 总第171期 2020年5月10日

### Journal of Zhengzhou University

(Engineering Science)

Bimonthly (Started in 1980)

Vol.41 No.3 Sum No.171 May 10, 2020

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》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 向 颀

印刷单位 山西同方知网印刷有限公司

发行范围 国内外公开发售

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 XIANG Sa

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