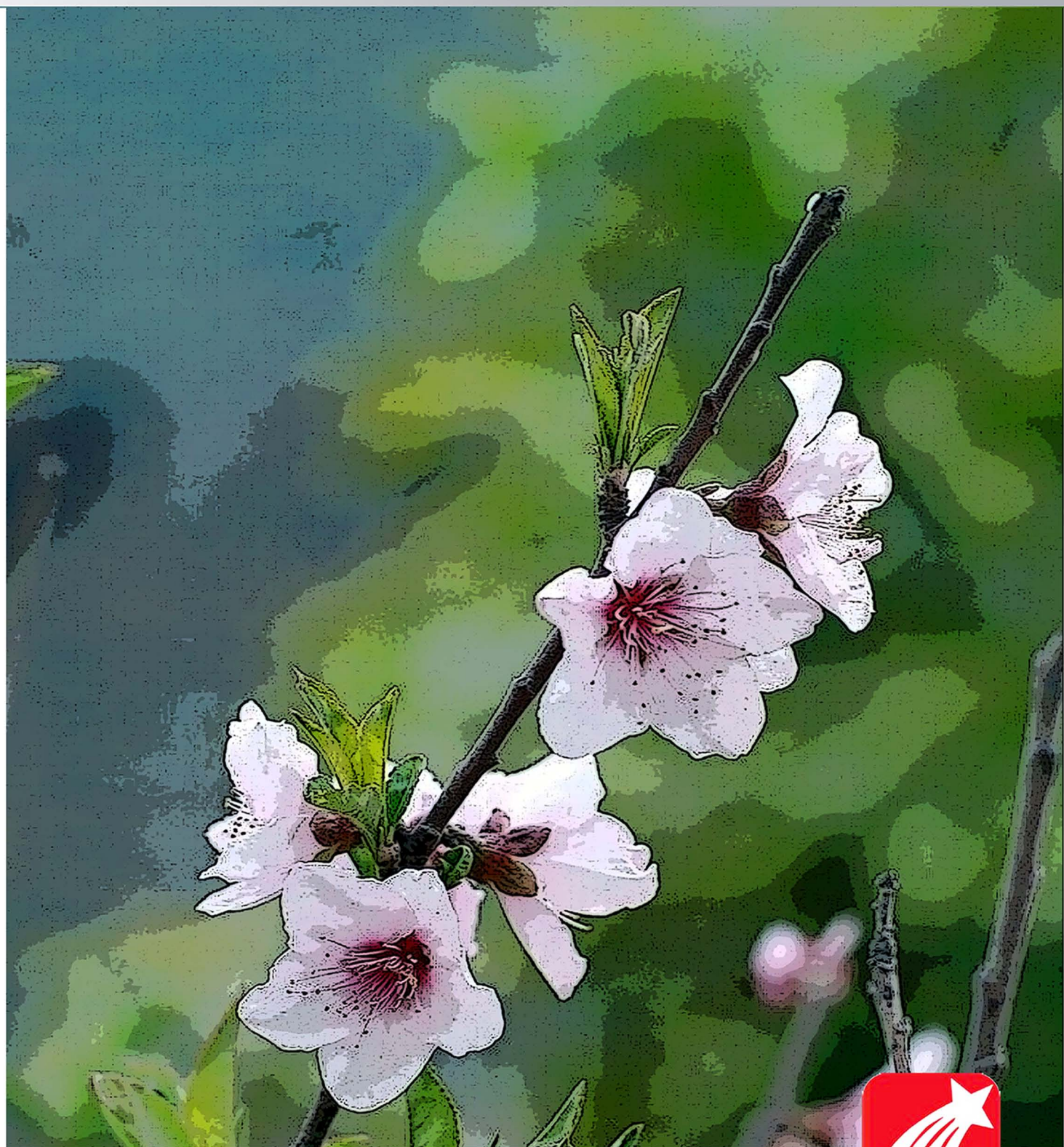


# 郑州大学学报(工学版)

2017年第2期



目 次

教育信息工程

高校智慧校园成熟度模型与评价指标体系研究·····	蒋东兴, 吴海燕, 袁 芳, 付小龙( 1 )
基于微信公众平台的校园移动信息服务建设方案研究 ·····	····· 龙新征, 欧阳荣彬, 李若森, 李庭晏, 王倩宜( 5 )
研究生管理信息系统应用效果评价研究·····	焦宝臣, 陈诗明, 刘振昌, 杨 阳, 张四海( 9 )
基于属性规则的 PRBAC 参数模型研究与实现 ·····	欧阳荣彬, 刘云峰, 龙新征( 13 )
基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型 ·····	胡 燕, 朱晓瑛, 马 刚( 17 )

交通工程与电气工程

基于高铁站区影响的城市空间研究·····	曹 阳( 21 )
高速列车隧道等速交会条件下人体舒适度分析·····	张运良, 张志成, 杨伟超, 丁铭鸿( 26 )
基于集对分析的城市道路交通安全性评价·····	张劲楠, 钱晓东( 30 )
基于 ARMA 和卡尔曼滤波的短时交通预测 ·····	杨高飞, 徐 睿, 秦 鸣, 郑凯俐, 张 兵( 36 )
改进蚁群算法在交通分配模型中的应用·····	常玉林, 汪小淳, 张 鹏( 41 )
信号交叉口禁左车流交通组织设计·····	李爱增, 贾俊波, 张亚飞, 李文权( 45 )
基于 PMU 的降阶二次状态估计算法研究 ·····	蒋建东, 杜耀恒, 燕跃豪, 鲍 薇( 50 )
基于双贝叶斯估计的动态威胁运动状态估计·····	刘 厂, 赵俊翔, 胡 海( 55 )
基于降维数据边界点曲率的变电站设备识别·····	窦本君, 纪 勇, 郑尚高, 冯冬青, 罗 勇( 61 )
双钢轮压路机的非线性建模及其传动干扰分析·····	沈培辉, 林述温( 66 )

材料与环境工程

填料对再生沥青胶浆黏弹响应的影响·····	陈华鑫, 牛昌昌, 况栋梁, 田俊壮, 杨 凯( 72 )
冻融循环作用下橡胶自密实混凝土力学性能研究·····	张卫东, 王振波, 何卫忠( 78 )
变截面波形钢腹板组合箱梁剪应力及剪力传递效率分析·····	武海鹏, 李 杰, 陈 淮( 83 )
氧化铜掺杂氧化锌气敏材料的制备及气敏性能研究 ·····	····· 宣天美, 孙健武, 葛美英, 尹桂林, 何丹农( 88 )
徐州北郊煤矿区优势植物调查及重金属富集特征研究 ·····	····· 张浩嘉, 刘汉湖, 肖 昕, 孙晓菲, 蔡成哲( 92 )

**CONTENTS**

**【Information Engineering】**

- Research on the Wisdom Campus Maturity Model and the Evaluation Indexes .....  
..... **JIANG Dongxing, WU Haiyan, YUAN Fang, FU Xiaolong** ( 1)
- The Research of Campus Mobile Information Service Construction Scheme Based on Wechat Public Platform .....  
..... **LONG Xinzheng, OUYANG Rongbin, LI Ruomiao, LI Tingyan, WANG Qianyi** ( 5)
- Research on the Application Effect Evaluation of the Graduate Management Information System .....  
..... **JIAO Baochen, CHEN Shiming, LIU Zhenchang, YANG Yang, ZHANG Sihai** ( 9)
- Implementation of Parameter Model of PRBAC Based on Attribute Rules .....  
..... **OUYANG Rongbin, LIU Yunfeng, LONG Xinzheng** ( 13)
- Location Prediction Model Based on K-Means Algorithm and Time Matching ... **HU Yan, ZHU Xiaoying, MA Gang** ( 17)

**【Traffic Engineering and Electrical Engineering】**

- Research on Urban Space Based on the Impact of High-speed Rail Station Area ..... **CAO Yang** ( 21)
- The Human Comfort Degree Analysis of High Speed Trains Intersection at the Same Speed in the Tunnel .....  
..... **ZHANG Yunliang, ZHANG Zhicheng, YANG Weichao, DING Minghong** ( 26)
- Safety Evaluation of Urban Traffic Based on SPA ..... **ZHANG Shaonan, QIAN Xiaodong** ( 30)
- Short-term Traffic Volume Forecasting Based on ARMA and Kalman Filter .....  
..... **YANG Gaofei, XV Rui, QIN Ming, ZHENG Kaili, ZHANG Bing** ( 36)
- Modified Ant Colony Algorithm and Its Application on Traffic Assignment Model .....  
..... **CHANG Yulin, WANG Xiaoting, ZHANG Peng** ( 41)
- Traffic Organization and Design of Left-turn Forbidden Traffic Flow on Signalized Intersections .....  
..... **LI Aizeng, JIA Junbo, ZHANG Yafei, LI Wenquan** ( 45)
- A Reduced-order Approach of State Estimation Based on PMU .....  
..... **JIANG Jiandong, DU Yaoheng, YAN Yuehao, BAO Wei** ( 50)
- Research on Motion Status Estimation of Dynamic Threat Base on Double Bayes Estimation .....  
..... **LIU Chang, ZHAO Junxiang, HU Hai** ( 55)
- Substation Equipment Identification Based on Boundary Curvature of Dimension-reduced Point Set .....  
..... **DOU Benjun, JI Yong, ZHENG Shanggao, FENG Dongqing, LUO Yong** ( 61)
- Nonlinear Modeling and Interference Analysis for Double-steel-wheel Vibratory Roller ... **SHEN Peihui, LIN Shuwen** ( 66)

**【Materials Engineering and Environmental Engineering】**

- Effects of Fillers on Viscoelastic Response of Recycled Asphalt Cement .....  
..... **CHEN Huaxin, NIU Changchang, KUANG Dongliang, TIAN Junzhuang, YANG Kai** ( 72)
- Study of Mechanical Properties of Rubberized Self-compacting Concrete Subjected to Freeze-thaw Cycle .....  
..... **ZHANG Weidong, WANG Zhenbo, HE Weizhong** ( 78)
- Analysis of Shear Behavior and Transfer Efficiency of Variable Cross-section Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs .....  
..... **WU Haipeng, LI Jie, CHEN Huai** ( 83)
- The Preparation of Cu-doped ZnO and Its Gas Sensing Properties .....  
..... **XUAN Tianmei, SUN Jianwu, GE Meiyang, YIN Guilin, HE Dannong** ( 88)
- Study on Dominant Plants and Enrichment Characteristics of Heavy Metal from a Coal Mine Area in Northern Xuzhou .....  
..... **ZHANG Haojia, LIU Hanhu, XIAO Xin, SUN Xiaofei, CAI Chengzhe** ( 92)



# 高校智慧校园成熟度模型与评价指标体系研究

蒋东兴<sup>1,2</sup>, 吴海燕<sup>1</sup>, 袁芳<sup>1</sup>, 付小龙<sup>1</sup>

(1. 清华大学 信息化技术中心, 北京 100084; 2. 华中师范大学 教育信息化协同创新中心, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 随着多种新兴信息技术在高校教育教学业务中的深度应用, 高校信息化的绩效导向、工作重点、建设与运行模式都发生重大改变, 高校信息化进入智慧校园建设阶段. 笔者分析了影响高校智慧校园建设与应用发展状态的关键因素, 并在此基础上提出了高校智慧校园成熟度模型及其评价指标体系, 以期引导高校智慧校园建设有序演进.

**关键词:** 智慧校园; 数字校园; 成熟度模型; 评价指标体系

**中图分类号:** TP309 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.001

## 0 引言

我国高校信息化经过近三十年的建设, 取得了长足的进步, 经历了以单机版信息系统为特征的电算化阶段、以网络建设为重心的校园网络建设阶段、以电子校务系统建设与集成为重点的数字校园建设阶段, 每个阶段都是十年左右. 最近两年, 我国高校信息化建设开始发生明显变化: 大数据、人工智能、物联网、移动互联、云计算、知识管理、社交网络、虚拟现实等新兴信息技术被广泛应用, 业务流程优化和服务整合、大数据支持科学决策得到普遍重视, 信息技术越来越深入地融入高校的教育教学业务中, 向教育教学全面信息化发展. 信息技术与教育教学的关系从组合、整合演进到融合创新, 高校信息化开始进入智慧校园建设阶段<sup>[1]</sup>.

智慧校园比数字校园对高等教育的影响更深更广. 可以预期, 高校智慧校园建设也将是一个更长期的发展过程. 为了引导智慧校园建设不断向更高水平发展, 帮助高校正确认识其智慧校园建设所处的发展阶段和发展水平, 推动高校智慧化进程有序推进, 需要建立智慧校园的推进模型, 即高校智慧校园成熟度模型<sup>[2]</sup>.

## 1 智慧校园成熟度影响因素

智慧校园是在数字校园的基础上为了支持高

校智慧教育发展而提出的解决方案, 是高校信息化发展的高级阶段. 智慧校园综合运用云计算、物联网、移动互联、大数据、人工智能、社交网络、知识管理、虚拟现实等新兴信息技术, 全面感知校园物理环境, 智能识别师生群体的学习、工作情景和个体特征, 在网络空间建立校园虚拟映像, 将学校物理空间和数字空间有机衔接起来, 通过网络空间的计算掌握校园运行规律并反馈、控制物理空间, 为师生建立智能开放的教育教学环境和便利舒适的生活环境, 改变师生与学校资源、环境的交互方式, 开展以人为本的个性化创新服务, 实现学校智慧运行, 支撑学校开展智慧教育<sup>[2]</sup>.

在高校智慧校园建设过程中, 诸多因素都是发展的重点, 如技术创新要素、业务驱动要素、服务要素以及可持续发展要素等. 这些驱动要素作为智慧校园发展的驱动源, 为学校智慧化发展提供了更加明确的方向. 从智慧校园在高校信息化的发展阶段定位与具体特征来看, 此阶段信息技术与教育教学业务的融合度越来越高, 信息技术与业务的关系进入融合创新时期. 因此, 我们着重从基于信息技术解构、优化、重组教育教学的新型教育模式——智慧教育提升的角度评价一个高校的智慧校园成熟度, 重点考虑智慧校园中信息技术的应用情况、信息技术支撑业务开展情况和基于信息技术的业务融合创新发展状况 3 个方面的影响因素.

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2017-01-18

作者简介: 蒋东兴(1970—), 男, 湖南望城人, 清华大学研究员, 主要研究方向为教育信息化, E-mail: jdx@tsinghua.edu.cn.

(1) 智慧类技术应用情况. 智慧校园综合运用云计算、物联网、移动互联、大数据、人工智能、社交网络、知识管理、虚拟现实等新兴信息技术, 这些信息技术已经从简单的工具应用逐渐深度融入到教学、科研、管理与服务的各项活动中. 因此, 需要重点关注这些新兴信息技术在学校中的使用情况, 包括使用的技术范围、应用模式以及应用的广度和深度.

(2) 智慧型应用开展情况. 智慧校园的作用与功能最终要体现在学校的各项业务之中, 要基于信息技术创新学校教育教学模式和管理模式, 从而充分发挥智慧校园整体效能. 因此, 需要关注主流的智慧型应用在学校开展情况, 如基于用户特征的推荐式学习交流系统、基于知识管理的科研协作系统、基于大数据的学生平安监测系统、基于物联网的建筑节能监管系统、基于商业智能和大数据技术的决策支持系统等, 重点关注这些智慧型应用覆盖的范围、影响程度以及开展效果.

(3) 智慧型业务融合情况. 高校信息化的目标是促进学校教育内容、教学手段和方法现代化, 创新人才培养、科研组织和社会服务模式, 推动文化传承创新, 促进高等教育质量全面提高. 智慧校园的发展目标是支撑高校四项基本职能与管理服务改革创新. 因此, 需要关注学校人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新及管理服务等主要业务在信息技术支持下的融合创新情况, 如智慧型人才培养、智慧型科学研究、智慧型社会服务、智慧型文化传承创新、智慧型管理决策、智慧型生活服务等, 重点关注学校智慧教育形态发展, 跨部门的业务融合, 以及利用大数据支持科学决策等.

## 2 智慧校园成熟度模型

目前国内外都没有合适的智慧校园成熟度模型可以直接参考, 相近的有能力成熟度模型(capability maturity model, CMM)<sup>[3]</sup>和智慧城市建设成熟度模型(maturity model of smart city construction, SCCMM)<sup>[4]</sup>.

CMM 是卡内基美隆大学为了科学评价软件开发单位的软件能力设计的成熟度等级, 帮助软件开发单位进行自检, 不断完善软件开发过程, 确保软件质量、提高软件开发效率而提出的一个阶梯式的改进框架, 已经成为各种成熟度模型的重要参考. CMM 将成熟度划分为 5 个等级: 初始级、可重复级、已定义级、已管理级、优化级.

SCCMM 与智慧校园成熟度模型更接近, 它从智慧基础设施建设、智慧创新生产、智慧产业发展、智慧公共服务、智慧可持续建设 5 个维度进行评价. 与 CMM 类似, 智慧城市的成熟度也划分为 5 个等级: 初始级、智慧起步级、智慧发展级、智慧成熟级、智慧提升级.

参考 CMM 和 SCCMM, 结合高校智慧校园的特点, 特别是考虑到智慧校园建设是在数字校园基础上的提升, 高校智慧校园成熟度模型从智慧类技术应用情况、智慧型应用开展情况和智慧型业务融合情况 3 个维度进行评价, 将智慧校园建设与发展状态划分为 4 个阶段: 萌芽阶段、集成阶段、融合阶段和创新阶段, 如图 1 所示.

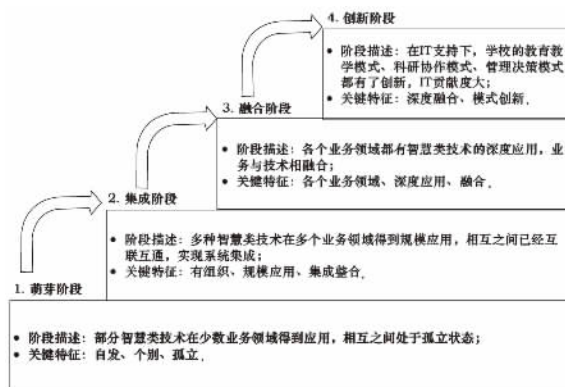


图1 高校智慧校园成熟度模型

Fig.1 Maturity model of wisdom campus

一般来说, 随着高校智慧校园建设的发展演进, 其成熟度也会不断提高. 在每一个成熟度等级, 智慧校园的发展状况和关键特征描述如下.

(1) 萌芽阶段. 在此阶段, 高校信息化总体上仍处于数字校园建设阶段, 智慧校园建设处于自发状态, 全校也没有成型的智慧校园整体建设方案. 部分智慧类技术在个别业务领域得到应用, 应用之间没有有机联系, 处于孤立状态.

(2) 集成阶段. 在学校有组织的推进下, 智慧校园建设由自发状态进入自觉状态. 在多个业务领域有多种智慧类技术得到规模化应用, 并且各智慧型应用之间实现了互联互通, 开始进行集成与整合.

(3) 融合阶段. 通过总体规划统筹推进, 学校开始智慧校园的全面建设, 智慧校园建设开始成熟. 智慧类技术在学校的各个业务领域得到了深度应用, 信息技术与教育教学业务不断融合, 智慧型应用已经成为学校信息化的主流应用.

(4) 创新阶段. 进入创新阶段的智慧校园开始充分发挥信息化对教育教学业务的优化与提升作用. 智慧类信息技术得到普遍而深入的应用, 信息技术与学校各项业务实现深度融合, 学校的教育教学模式、科研协作模式、管理决策模式都在智慧型应用的支撑下发生了重大变革与创新, 学校整体上实现智慧运行, 智慧教育的功效得到充分显现.

### 3 成熟度评价指标体系设计

为了对一个学校的智慧校园成熟度进行客观评价, 基于前述的发展阶段分析, 我们建立了由智慧类技术应用程度、智慧型应用开展程度和智慧型业务融合程度 3 个成熟度评价维度组成的评价指标体系. 高校智慧校园的成熟度由其在 3 个评价维度上的成熟度决定, 所处发展阶段和成熟度评价维度的关系如图 2 所示.

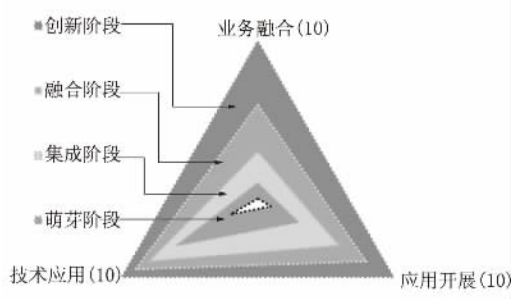


图2 高校智慧校园成熟度等级结构

Fig.2 Maturity level of wisdom campus

具体地, 每个维度都按照 10 分计算, 当智慧校园在技术应用维度评分达到 2、应用开展维度评分达到 1 时, 智慧校园进入萌芽阶段; 当智慧校园在技术应用维度评分超过 6、应用开展维度评分超过 3、业务融合维度评分超过 1 后, 智慧校园从萌芽阶段进入集成阶段; 当智慧校园在技术应用维度评分超过 8、应用开展维度评分超过 6、业务融合维度评分超过 3 后, 智慧校园从集成阶段进入融合阶段; 当智慧校园在技术应用维度评分超过 9、应用开展维度评分超过 8、业务融合维度评分超过 6 后, 智慧校园从融合阶段进入创新阶段(见表 1)。作为一个渐进模型, 智慧校园一般不会出现成熟度阶段的跨越情况, 这也符合高校信息化的发展规律.

对于每一个一级指标(评价维度), 设置若干个二级指标, 如智慧类技术应用程度可以设置计算技术、通信技术、智能感知技术、数据技术、智能

技术、虚拟现实技术等二级指标. 每一个二级指标再设置若干个观察点, 二级指标的观察点不固定, 随着智慧校园建设的发展而变化. 采用 5 级梯度评价对每一个观察点进行评价.

表 1 高校智慧校园成熟度等级分值表

Tab.1 Maturity level value of wisdom campus

维度	等级			
	萌芽阶段	集成阶段	融合阶段	创新阶段
技术应用	2	6	8	9
应用开展	1	3	6	8
业务融合	0	1	3	6

智慧类技术应用程度分为: 未使用、局部使用、大面积使用、全面使用、全面深度使用 5 个等级; 智慧型应用开展程度分为: 未开展、零星开展、有组织开展、全面开展、全面深度开展 5 个等级; 智慧型业务融合程度分为: 无影响、组合、整合、融合、创新 5 个等级.

由于确定智慧校园成熟度等级属于典型的需要进行定量分析的定性问题, 因此可以采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)<sup>[5]</sup>的计算思路来获得各指标的权值. 具体地, 对于每一个观察点, 规定 5 级梯度对应的分值分别为 0、1~3、4~5、6~8、9~10, 由专家独立打分; 二级指标及各个观察点的具体权重, 可预先采用德尔菲法(Delphi method)<sup>[6]</sup>对若干位专家进行问卷调查, 将专家的赋值情况进行整理得到. 在智慧校园建设的不同阶段, 观察点可能不同, 各二级指标和观察点的具体权重也可能不一样. 在当前阶段, 一个可供参考使用的高校智慧校园评价指标体系如表 2 所示.

### 4 结论

高校智慧校园建设是高校信息化的一项艰难使命, 它比以往的校园网络和数字校园建设都要艰巨、复杂, 由于融入并变革着传统的高等教育, 其影响也将更深远. 智慧校园成熟度模型事关高校信息化的发展方向, 其评价指标体系也将影响高校智慧校园建设与应用的节奏与进展, 因此在高校智慧校园建设的开始阶段提出成熟度模型实在是一件让人诚惶诚恐的事情. 愿业内行家不吝赐教, 共同携手, 一起完善智慧校园成熟度模型及其评价指标体系, 研究设计出每一个时期的指标权重, 以期能够真正指导高校信息化未来一二十年的发展.

表 2 高校智慧校园评价指标体系  
Tab.2 Evaluation index system of wisdom campus

一级指标	二级指标	观察点示例	一级指标	二级指标	观察点示例
智慧类 技术应用 程度	计算技术	IaaS、PaaS、SaaS	智慧型 业务融 合程度	人才培养	基于 IT 的教师协同备课
	通信技术	Wi-Fi、4G、物联网			基于学习大数据的个性化学习指导
	智能感知技术	智能手机、可穿戴设备、传感器			基于学习过程的智能教学评价
					基于学习历程的就业引导
	数据技术	大数据技术、主体虚拟映像、数据挖掘		基于大数据的学生行为分析	
	智能技术	人工智能、商务智能		科学研究	基于 IT 的科研协同与协作
	虚拟现实技术	VR、AR、MR			基于大数据的科研辅助
其他技术	知识管理、社交网络	智能仪器设备与自动实验			
智慧型 应用开展 程度	教学类应用	基于用户特征的推荐式学习交流系统	智慧型 业务融 合程度	社会服务	基于 IT 的服务社会新模式
		支持 O2O 模式的在线学习系统			基于在线教育的科普教育与人文教育
	科研类应用	基于知识管理的科研协作系统			基于大数据的智库建设
		管理类应用			基于大数据的学生平安监测系统
	基于 BI 和大数据技术的决策支持系统		文化传承 创新	多语言全媒体宣传	
	基于物联网的建筑节能监管系统			校园网络虚拟社区	
	服务类应用	面向新媒体环境的宣传平台	智慧型管 理决策	基于大数据的学校声誉评估管理	
O2O 模式的一门式公共服务系统		跨部门的管理协同			
		智慧型生 活服务		数据支持的科学决策	
			基于物联网的校园安全与环境监控		
			校园智能交通管理		
			智慧型校园餐饮服务		
			一站式校园生活服务		

## 参考文献:

- [1] 蒋东兴,刘臻,沈富可,等. 高校智慧校园建设呼唤 CIO 体系[J]. 中国教育信息化,2016(7):1-5.
- [2] 蒋东兴,付小龙,袁芳,等. 高校智慧校园技术参考模型设计[J]. 电化教育研究,2016(9):108-114.
- [3] 卡耐基梅隆大学软件工程研究所. 能力成熟度模型(CMM):软件过程改进指南[M]. 北京:电子工

业出版社,2001.

- [4] 王璐. 智慧城市建设成熟度评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学管理科学与工程学院,2013.
- [5] 潘峰. 基于 AHP 方法的区域教育信息化水平评价[J]. 沈阳大学学报,2008,20(3):89-91.
- [6] 宋卫星. 企业信息化成熟度模型及其评价体系研究[D]. 山东: 山东科技大学信息科学与工程学院, 2010.

## Research on the Wisdom Campus Maturity Model and the Evaluation Indexes

JIANG Dongxing<sup>1,2</sup>, WU Haiyan<sup>1</sup>, YUAN Fang<sup>1</sup>, FU Xiaolong<sup>1</sup>

(1. Information Technology Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Collaborative & Innovative Center for Educational Technology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** With the deepening application of emerging information technology in education business, the information technology performance-oriented, focus, construction and operation mode has begun a major change, and the informatization in universities has entered the stage of wisdom campus. This paper analyzes the key factors that affect the construction and application of the wisdom campus, and based on this proposes the maturity model and its evaluation index system to guide the orderly evolution of the wisdom campus.

**Key words:** wisdom campus; digital campus; maturity model; evaluation index system

文章编号: 1671-6833(2017)02-0005-04

# 基于微信公众平台的校园移动信息服务建设方案研究

龙新征, 欧阳荣彬, 李若森, 李庭晏, 王倩宜

(北京大学 计算中心, 北京 100871)

**摘要:** 针对校园移动信息服务内容和技术方面的不足, 提出基于微信公众平台的校园移动信息服务建设方案. 设计了由微信公众平台, 统一身份认证平台, 移动信息服务平台和开放服务平台4部分组成的校园移动信息服务总体架构, 核心部件采用基于“微服务”的思路实现. 基于微信公众平台的高级服务接口解决了用户绑定、网页授权、通知推送和微信支付等技术难点. 自校园移动信息服务上线以来, 得到了师生的广泛关注, 目前总关注人数25 000余人, 绑定用户人数为15 000余人, 日访问量2 000余次.

**关键词:** 微信公众平台; 移动信息服务; 开放服务接口; 微服务; 微信支付

**中图分类号:** TP315

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.002

## 0 引言

随着4G技术和智能终端的迅速发展及普及, 数字化校园进入新的阶段. 作为数字化校园的重要组成部分, 校园移动信息服务有助于促进信息共享, 增强信息系统与用户的交互, 提升服务资源的利用率, 进而为师生提供质量更高的信息化服务.

目前, 国内大多数高校的移动信息服务建设尚处于起步阶段, 无论是内容还是技术都面临诸多问题. 首先是供需不平衡, 推出的服务不能满足学生生活、娱乐, 尤其是交互的需求; 其次市场上的智能终端众多, 不同终端之间的差异性增加了建设和维护所需的技术、资金和人力成本. 因此, 建设校园移动信息服务, 需要在内容层面上有效整合分散庞杂的信息, 满足师生的学习生活需求; 在技术层面上要探索出一套合理的平台构建方案.

笔者以北京大学为例, 根据师生的校园信息需求状况, 借鉴国外高校的先进经验, 提出了基于微信公众平台, 以服务集成思路建设移动信息服务的方案. 与此同时, 分析了移动信息服务平台的需求, 设计了移动信息服务的总体架构, 并简要阐述了实现过程中的关键技术.

## 1 研究背景

国外的许多著名高校都已研发出校园移动平台. 2009年, 斯坦福发布了 istanford<sup>[1]</sup>, 用户可以

查找部门联系方式、查询校园地图、关注最新校园信息、查看课程内容和时间、了解自己的学习成绩、查看图书馆资源等. 同年, MIT也发布了校园移动平台<sup>[2]</sup>, 功能包括新闻、日历、班车信息、校园地图、课程信息以及人员查询. 2010年, 哈佛大学发布了校园移动平台<sup>[3]</sup>, 功能包括课程录像、球队、社交平台、人员查询、校园地图、新闻、课程、餐饮、校车以及图书馆等.

国内许多知名高校也根据自身特点, 积极采用移动技术手段增加信息化管理能力<sup>[4]</sup>. 2014年3月, 北京大学学生研发了一款校园移动应用“PKUHelper”<sup>[5]</sup>, 功能包括连网关、查成绩、选课、登邮箱、看通知、查看PM2.5指数等. “PKUHelper”完全由学生自主开发, 推出后反响强烈, 体现了学生对此信息渠道的迫切需求, 但该应用一直存在较严重的安全隐患. 2016年7月, 北京大学计算中心面向全校师生发布了手机版北京大学网关客户端, 受到用户的极大欢迎, 发布两个月已经下载一千多次. 但到目前为止, 北京大学的校级移动应用还没有与北大颇具规模的校务信息系统建立共享机制, 广大师生难以享受到更为便捷、丰富的移动体验.

## 2 技术选型

微信公众平台是基于微信的一个开放平台, 开发者可以在微信公众平台上创建微信公众号并

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-01-18

作者简介: 龙新征(1984—), 男, 湖南湘阴人, 北京大学工程师, 主要从事高校信息化研究, E-mail: longxinzheng@pku.edu.cn.



实现轻应用的部署与开发<sup>[6]</sup>. 与移动 APP 相比, 微信公众号在操作便捷性、交互多样性、开发难易性等方面具有明显优势, 如表 1 所示.

微信公众号分为订阅号、服务号、企业号. 订阅号每天都可以群发 1 条信息, 因此它适合传播信息, 为用户提供信息支持; 服务号虽然每月只有 4 次群发机会, 但消息推送效果好, 此外服务号还

具备语音识别、客服接口、OAuth2.0 网页授权等高级接口, 因此它适合为用户提供实用的服务功能; 企业号主要是面向企业内部员工的, 在安全机制方面启用了“白名单”机制, 只有经过许可的人才可以关注, 因此它更适合生产运营管理. 由于移动信息服务的目的是面向校内师生提供综合信息服务, 因此选择基于服务号实现.

表 1 两种开发方式对比

Tab. 1 Comparison of two development methods

对比项目	微信公众号	移动 App
操作便捷性	只需在微信中关注微信公众号即可	需要用户下载并安装 App
交互多样性	消息会话、公众号内网页	用户界面
开发难易性	基于微信公众平台提供的 API 搭建微信公众号	基于 android、IOS 等多种系统开发应用

微信公众号主要通过公众号消息会话和公众号内网页为用户提供服务.

消息会话. 消息会话是公众号与用户交互的基础, 主要有群发消息、被动回复消息、客服消息和模板消息 4 类.

公众号内网页. 许多复杂的业务场景需要通过网页形式来提供服务, 这需要通过 OAuth2.0 网页授权获取用户基本信息. 如果在网页中需要使用微信原生功能(如上传手机本地图片、拍照等)还要用到微信 JS-SDK.

### 3 设计方案

#### 3.1 需求分析

在微信公众号中最多可以创建 3 个一级菜单, 每个一级菜单下最多可以创建 5 个二级菜单, 因此须对功能模块进行合理规划. 笔者从信息使用量和需求量分析、信息需求状况访谈、国外高校移动应用对比 3 个方面对功能模块进行规划.

通过信息使用量和需求量分析发现: 成绩信息、网关服务、课程信息和校内通知最受师生关注.

通过访谈发现: ①学生对于讲座信息的需求很高, 但获取方式传统, 讲座信息提供不够全面; ②教学网目前无法满足学生对课程信息的需求, 希望移动信息服务能提供课程作业通知、教师与助教的联系方式; ③英语四六级考试、交流信息、放假通知等学校公共通知的推送十分有必要, 目前这些信息分别发布在学校不同网站上, 容易造成信息遗漏; ④学生对使用现有社交网络已形成习惯, 对于校园移动服务中的社交功能可能不会尝试, 因此不需要提供社交功能.

通过应用对比发现: 美国 5 大高校的移动平

台均加入了校园黄页、校园新闻与活动信息部分, 对校区地图、校车信息的采用度也较高. 因此结合北大的实际情况, 也选择了将校园黄页、校区地图和校园新闻作为功能模块.

综上, 选择 3 大类 15 个功能模块, 如图 1 所示.



图 1 校园移动信息服务平台的功能模块

Fig. 1 Function module of campus mobile information service platform

#### 3.2 总体架构

校园移动信息服务由微信公众平台、统一身份认证平台、移动信息服务平台、开放服务平台 4 部分组成, 如图 2 所示.

微信服务平台. 它是联系用户与移动服务平台的桥梁, 为移动服务平台提供微信高级服务接

目.

统一身份认证平台,协助移动服务平台完成用户绑定、网页授权等功能.

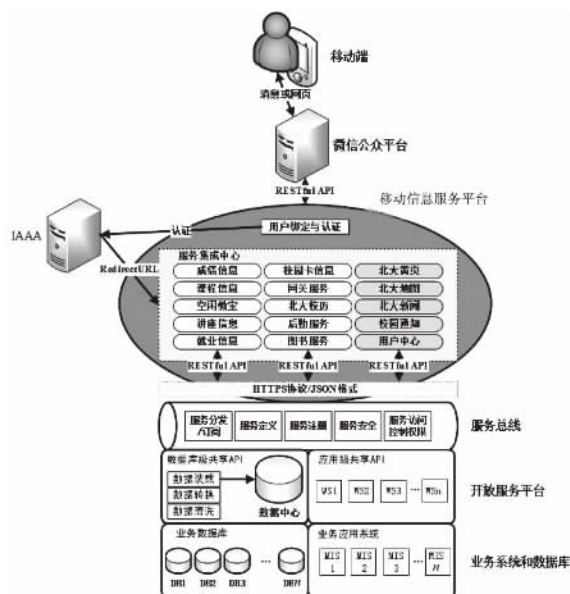


图2 校园移动信息服务总体架构

**Fig.2 The architecture of campus mobile information service**

移动服务平台. 整个架构的核心, 通过服务集成实现. 采用了“微服务”(microservices) 的思路进行构架<sup>[7]</sup>, 每一个功能模块都是单独的微应用, 只是在底层用了统一的工具包和统一的工作日志. 这样做的好处是不同的应用之间彼此独立, 互不影响, 每一个应用都可以单独进行部署. 当用户点击公众号内菜单时先通过网页授权获取用户身份, 再通过统一身份认证平台认证, 认证通过后即可跳转到相应微应用的首页面.

开放服务平台。移动服务平台不是直接与数据库或业务系统交互,而是通过访问开放服务平台的开放接口获取数据。开放服务平台由 3 部分组成: 服务总线、数据库级共享 API、应用级共享 API。服务总线完成对服务的注册、定义、访问权限、安全等管理; 数据库级共享 API 通过数据封装和整合,形成统一的数据中心对外提供服务; 应用级共享 API 对应用系统及第三方平台提供的服务进行封装。所有的开放接口均以基于 REST 机制的 API 对外发布。

## 4 关键技术

#### 4.1 基于带场景值的临时二维码用户身份绑定

微信公众号使用 OpenID 作为用户唯一身份标识,每个用户的公众号有一个唯一的 OpenID. 用户身份绑定就是将 OpenID 与校内统一身份账

号关联起来,绑定成功后即可通过公众号访问校内服务.一般来说,微信公众号采用的是网页绑定,即在微信公众号中打开网页,要求用户输入用户名和密码进行绑定.笔者提出了安全级别更高的基于带场景值的临时二维码绑定方式.

步骤 1 用户在计算机上登录校内信息门户,通过调用微信公众平台生成带场景值二维码的接口,在校内信息门户中生成临时二维码,时效半小时,临时二维码的场景值 SceneID 为全局唯一的随机码;场景值和用户名 UserID 的映射关系为 (SceneID, UserID)。

步骤2 用户通过微信扫描临时二维码,若二维码失效则提示刷新门户重新生成二维码;否则向微信公众器推送扫描二维码事件的消息,消息内容中包含 SceneID 和 OpenID 的映射关系 (SceneID, OpenID)。

完成以上两步即可得到 OpenID 和 UserID 的映射关系 (OpenID, UserID), 从而完成绑定.

## 4.2 基于 OAuth2.0 授权的网页授权

OAuth2.0 授权能让微信用户使用微信身份安全访问移动信息服务平台. 当用户在微信中访问公众号内网页时, 通过微信 OAuth2.0 授权接口可以获取当前用户的 OpenID, 实现网页授权访问.

步骤1 引导用户进入授权页面同意授权, 获取 CODE;

步骤2 通过 CODE 换取网页授权 access\_token 和 OpenID;

步骤3 通过 OpenID 获取 UserID,完成用户身份认证,访问移动信息服务平台中的应用获取信息。

### 4.3 基于模板消息的校园通知推送服务

利用微信公众平台的模板消息接口,移动信息服务平台可以主动向用户推送符合模板格式的校园重要通知.移动信息服务平台通过对微信公众平台的模板消息接口封装,对外发布校园通知推送服务.通知推送首先由业务系统主动触发,调用移动信息服务平台的通知推送接口,将消息推送到移动信息服务平台,然后移动信息服务平台再调用微信公众平台的消息模板接口将消息传到微信服务器,微信服务器最终解析消息,在微信服务号中显示.

目前可订阅和推送的校园通知有校园卡余额提醒、图书馆还书通知、日程安排提醒、成绩通知、账户操作通知、后勤报修提醒等。

#### 4.4 多商户场景下的微信支付

提供在线支付网费、网上订餐等功能,实现这

一功能的时候,没有使用微信公众平台原生的微信支付接口,而是通过调用第三方支付平台“聚合支付”的接口实现.因为原生接口下,单个微信公众号只支持单个商户号,但在实际业务中,网费支付、订餐服务的提供部门不同,因此商户号也不同.“聚合支付”平台下,一个微信公众号可以对应多个商户号,对于开发者来说,每一种新的支付方式只需在该平台上新建一个应用,就可通过这个应用的 APPID 访问无插件“聚合支付”接口完成支付,如图 3 所示.

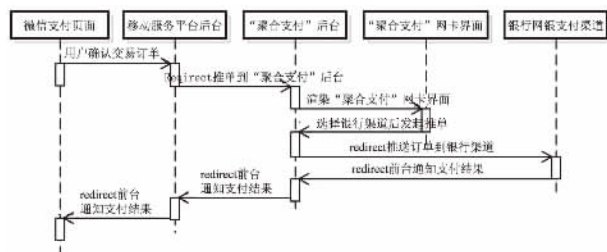


图 3 微信支付工作流程

Fig. 3 The workflow of wechat payment

## 5 结论

北京大学移动信息服务自 2014 年 10 月正式上线,关注人数、绑定人数和日访问量一直稳步攀升.截止 2016 年 8 月 31 日,微信服务号的总关注人数已达到 25 000 余人,绑定用户人数为 15 000 余人,日访问量 2 000 余次.

通过基于微信公众平台的移动信息服务建设,我们建成了一个以内容共享为导向,以用户为中心,面向服务,信息互通的移动服务平台,为用户提供多种校内信息服务,使用户能及时、准确、高效、随时随地地获取信息,满足各类用户的多种业务需要.下一阶段,我们将着眼于移动信息服务与校内教学、科研资源的结合,使其能够进一步为学校的教学和科研工作提供服务.

## 参考文献:

- [1] Stanford University University IT. Stanford mobile device services [EB/OL]. [2009]. <http://itservices.stanford.edu/service/mobile>.
- [2] Massachusetts Institute of Technology. MIT mobile Web home [EB/OL]. [2009]. <http://m.mit.edu/>.
- [3] The President and Fellows of Harvard College. Harvard mobile Web home [EB/OL]. [2010]. <http://m.harvard.edu/>.
- [4] 清华大学信息化技术中心. 清华大学信息门户(移动版) [EB/OL]. [2011]. <http://m.tsinghua.edu.cn/>.
- [5] 熊典. Introduction to PKUHelper Ver2. 0. 3/2. 0. 4. [EB/OL]. [2014-03-02]. <http://www.xiongdian-pku.com/applications/detail.php?id=2>.
- [6] 腾讯公司. 微信公众平台开发概述 [EB/OL]. [2012-08-23]. <https://mp.weixin.qq.com/wiki>.
- [7] Chris Richardson. Introduction to microservices [EB/OL]. [2015-05-19]. <http://nginx.com/blog/introduction-to-microservices/>.

## The Research of Campus Mobile Information Service Construction Scheme Based on Wechat Public Platform

LONG Xinzhen, OUYANG Rongbin, LI Ruomiao, LI Tingyan, WANG Qianyi

(Computer Center, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Aiming at the shortage in content and technical aspects of campus mobile information service, this paper proposed a construction scheme of campus mobile information based on wechat public platform. The cture of the campus mobile information service architecture composed of 4 components: wechat public platform, unified identity authentication platform, mobile information service platform, and open service platform. And the core components was implement based on microservices. In additional, this paper solved the key technical problems such as user binding, webpage authorization, notice push and wechat payment based on advanced service API of wechat public platform. The campus mobile information service was widely concerned by the teachers and students, the total number of people reached more than 25 000, the number of binding users reached 15 000, the number of daily traffic was more than 2 000.

**Key words:** wechat public platform; mobile information service; openAPI; microservices; wechat payment

文章编号: 1671-6833(2017)02-0009-04

# 研究生管理信息系统应用效果评价研究

焦宝臣, 陈诗明, 刘振昌, 杨 阳, 张四海

(南开大学 信息化建设与管理办公室, 天津 300071)

**摘 要:** 研究生管理信息系统作为高校研究生教育信息化的重要手段, 备受关注。目前许多高校已经开展了研究生系统的建设, 但缺乏对其应用效果的评价。笔者从实际使用角度提出了将不同种类用户的划分和使用情况作为研制指标体系的思路, 并构建了具有二层级应用效果评价指标。采用层次分析法, 通过专家打分的方式, 确定指标权重; 以南开大学为例进行了应用效果评价, 结果显示应用效果处于良好水平; 最终形成了一整套可行的研究生管理信息系统应用效果评价方案。通过应用效果评价, 不但可以直观地判断学校当前研究生系统应用水平, 也可为系统升级和发展提供重要的建设性意见。

**关键词:** 应用效果; 层次分析法; 评价指标体系; 研究生管理信息系统

**中图分类号:** TP311 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.003

## 0 引言

研究生教育是高校教育、科研工作的核心内容, 利用信息化手段来改善高校研究生教学管理水平备受各高校关注。其中建设研究生管理信息系统(以下简称为“研究生系统”)是重要的信息化手段。将传统的研究生教学、科研和管理工作, 通过构建业务系统以更加规范、高效的信息化形式展现出来, 这对于提高学校整体办学质量有重要的意义。

目前, 国内很多高校已经建设了研究生管理信息系统, 学术界也开展了广泛研究。这一领域的研究大多集中在对高校信息化水平或某一地域信息化水平进行评价, 也有从绩效角度对信息系统或高校信息化进行评价<sup>[1-5]</sup>。这些研究往往过多地关注整体信息化水平, 缺乏从应用效果角度提出有针对性的评价或建议。因此, 以研究生系统为突破口开展应用效果评价研究, 能够从实际使用的角度对信息系统的情况进行综合评价, 对系统未来发展给出更加直接的建设性意见。

研究生管理信息系统是典型的信息系统, 对其从实际使用角度开展应用效果评价研究, 可作为高校业务管理信息系统应用效果评价研究的范例。其评价思路、评价指标研制方法, 均对其他系统应用效果评价具有非常重要的借鉴价值。

## 1 评价思路

开展研究生系统应用效果评价, 通常首先是从经济学的角度分析系统的成本和收益情况<sup>[6-7]</sup>。这样能够获得较为直观的经济应用效果, 但并不能为系统进一步发展提供重要的改进方向。对研究生系统进行应用效果评价, 应坚持从实际使用角度来研究评价体系和办法, 这样才能对研究生系统进行更加有效的评价, 为其进一步发展和改进提供明确的意见或建议。

对研究生系统进行应用效果评价的具体步骤如下: ①分层级构建评价指标。从实际使用角度对研究生系统进行分析, 构建评价指标, 并进行分层级, 形成系统的评价指标; ②确定指标权重值。采用数学方法对不同层级指标进行权重分析, 形成评价指标体系; ③建立评语等级集。对指标建立评语等级, 形成问卷调查表; ④以某高校为例, 进行问卷调查, 利用已建立的评价指标体系进行分析, 最后得出评价结果。

## 2 评价指标的研制

### 2.1 构建一级指标

从实际使用角度对研究生系统进行应用效果评价研究, 就是从系统使用者的角度来分析评价指标。系统的使用者包括: 研究生(硕士、博士)、任课老师、导师、辅导员、研究生院从事管理的工

收稿日期: 2016-11-08; 修订日期: 2017-02-18

基金项目: 天津市教育信息化协会资助项目

作者简介: 焦宝臣(1982—), 男, 天津人, 南开大学工程师, 博士, 主要从事教育信息化建设研究, E-mail: bcjiao@nankai.edu.cn.



作人员、系统管理员、系统开发人员、系统维护人员. 以上人员可以分为 3 类, 如图 1 所示.

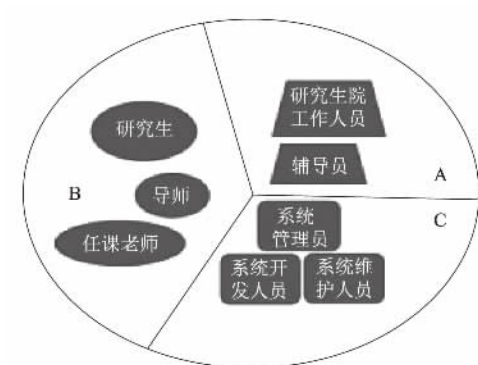


图 1 研究生系统相关人员示意图

Fig.1 Map of the coherent personnel of the graduate system

A 为研究生相关工作中从事管理类工作的人员, 包括: 研究生院工作人员和研究生辅导员. 这类人员主要从研究生院管理工作的角度来审视研究生系统应用情况.

B 为研究生相关工作中办理具体事务的人员, 包括: 研究生、任课老师、导师(硕士生导师、博士生导师). 相对于 A 类人员来说, 这一类人员

是被管理的对象, 是研究生相关工作的主体人员. 这类人员从具体办理研究生相关业务角度来审视研究生系统的应用情况.

C 为系统自身情况相关的人员, 包括: 系统管理员、系统开发人员、系统维护人员等. 这类人员更多的是从系统软件角度来审视研究生系统实际应用情况.

依据上述研究生系统实际使用人员的分类, 可以从 3 个方面来评价研究生系统应用效果, 也就是评价体系的一级指标, 分别是:

(1) “对研究生院管理工作改进效果”. 从研究生院管理工作角度来分析系统应用效果.

(2) “对业务办理工作改进效果”. 是指研究生系统的建设对要办理业务的普通使用者(普通老师和学生)办理相关业务的改进效果, 即从普通办理业务人员角度来分析系统应用效果.

(3) “研究生系统自身状况”. 这是从系统自身情况相关人员角度来分析系统应用效果.

## 2.2 二级指标

在得出上述 3 个一级指标的基础上, 分别研制出其所含的二级指标, 能直接表达系统的应用效果. 表 1 为具有二层级的研究生应用效果评价指标, 以及二级指标的说明.

表 1 研究生系统应用效果的二层级评价指标

Tab.1 The evaluation index of the graduate system application effect with double levels

一级指标	二级指标	二级指标说明
对研究生管理工作改进效果	研究生院管理工作效率提高	系统建设后改变了原有纸质办公的陈旧工作模式, 形成快捷便利的网上办公模式. 提升了研究生管理工作效率.
	业务流程的规范性	系统建设过程中会对原有业务进行梳理, 并进行流程再造. 流程再造是对原有业务的规范化. 规范的业务流程利于使用系统.
	管理功能完善度	系统中处于管理角色的人员, 办理研究生相关管理功能的完善度情况.
对业务办理工作改进效果	无纸化程度	最直接的效果是办事的人不用到业务部门现场来办理业务, 只需在网上就可以完成要做的业务, 对于普通用户具有最直接的应用影响.
	系统界面易理解度	系统的使用者通过页面布局、按钮、文字等信息, 在简单的说明书指导下, 能够顺畅使用业务系统. 系统界面非常容易被理解, 让人一看就明白自己要办的事情在该系统上如何操作. 这样就是具有非常好的效果, 更容易推广和使用.
	业务功能完善度	普通老师或学生能够在系统中完成要办业务的情况.
研究生系统自身状况	系统的兼容性	当前业务系统大多以 B/S 架构为基础来建设, 因此系统对不同浏览器的兼容性就显得尤为重要. 这会对系统的使用者(包括管理者、老师、学生、系统管理员等)实际使用的方便程度产生巨大影响.
	系统各角色和权限设置合理性	系统能够为系统管理员提供足够丰富的方案来完成对系统和用户的角色和权限管理.
	系统集成和接口建设完善情况	系统之间集成度好, 接口建设完全, 对于使用者具有直接的便利性, 不但对业务办理者也是对部门管理者有直接的便利性, 直接影响系统的实际使用效果.
	系统响应速度	系统使用者在浏览器中点击某个操作后, 系统对其的反应, 直接影响使用者的直观感受.

表 2 研究生系统应用效果评价指标及其权重  
Tab.2 The weights of the evaluation index of the graduate system application effect

一级指标	权重值	二级指标	权重值
对研究生管理工作改进效果	0.320	提高研究生院管理工作效率	0.192
		业务流程的规范性	0.064
		管理功能完善度	0.064
对业务办理工作改进效果	0.558	无纸化程度	0.301
		系统界面易理解度	0.166
		业务功能完善度	0.091
研究生系统自身状况	0.122	系统的兼容性	0.049
		系统各角色和权限设置合理性	0.039
		系统集成和接口建设完善情况	0.022
		系统响应速度	0.012

3 确定指标权重值

在分层级构建出评价指标后,采用合适的数学方法确定不同层级指标的权重值,形成完整的评价体系.常用确定分层级指标权重值的方法是层次分析法(analytic hierarchy process, AHP). AHP 在决策分析、产业结构研究、科技成果评价、发展战略规划、人才考核评价及发展目标分析的许多领域都取得了令人满意的成果<sup>[8]</sup>.其在计算指标权重值方面也有成熟的应用<sup>[2]</sup>,具体方法步骤如下:

- (1) 分层次的指标为同一指标下同一层级的指标,依据两两比较原则,构建调查表;
- (2) 研究生系统相关专家做问卷调查;
- (3) 依据问卷调查结果,构建判断矩阵;
- (4) 采用特征根法计算得出指标的权重值,具体运算过程可用软件 Expert Choice 实现<sup>[9]</sup>.

下面以南开大学为例,通过上述步骤构建研究生应用效果评价指标体系.表 2 为依据 AHP 法采用 Expert Choice 软件计算得到的南开大学研究生系统应用效果评价指标及其权重值.从表 2 中的一级指标及其权重中可以看出,“对业务办理工作改进效果”的权重值为 0.558,要明显大于“对研究生管理工作改进效果”的 0.320 和“研究生系统自身状况”的 0.122.说明从实际使用效果角度来看,“业务办理工作改进”对系统的使用具有决定性的影响,也就是说,研究生系统建设应更多地考虑办理实际业务的普通用户(研究生、导师)的切身感受.

在所有二级指标中“无纸化程度”的权重为 0.301,要明显高于其他二级指标.因此,在研究生系统建设或升级改造中,应更加注重实现网上办

公,尽量避免线下操作,从根本上实现无纸化办公.

通过上述分析,可以明确得知,在建设或升级研究生系统时应更多地从业务办理方面来下功夫,即更多地站在普通用户的角度来构建系统,这样才能使系统建成之后有更好的使用效果.此外,这种采用 AHP 法构建研究生应用效果评价指标体系的方式也可为其他信息管理系统应用效果评价研究提供可行的借鉴方案.

4 评价实例

南开大学现有在校研究生 1.1 万余人,研究生系统自 2007 年开始建设使用,至今已有近 9 年的时间,期间在 2014 年经过了一次升级.该系统有较广泛的使用和较成熟的用户,能够为应用效果评价研究提供良好的实例.

以南开大学为例确定了指标权重基础之后,通过建立评语等级,利用指标形成问卷调查表.采用四级评语来标识指标的等级.分别为“A”级对应 100 分;“B”级对应 85 分;“C”级对应 75 分;“D”级对应 60 分.将构建评价体系中的二级指标(如表 2)按照 A、B、C、D 4 级评语来标识,形成问卷调查表.随机抽取一定数量的用户(包括:研究生、导师、任课老师、辅导员和研究生院工作人员,等等)进行问卷调查.对每一项指标的调查结果求取平均值作为最后的结果,再与该指标对应的权重值作乘法,最后将结果求和作为研究生应用效果值.表 3 为按照上述方式得出的南开大学研究生系统应用效果评价结果.最后得到的应用效果值是 86.184,处于 B 级良好水平.

表 3 研究生系统应用效果评价结果  
Tab.3 The evaluation result of the graduate system application effect

二级指标	调查问卷结果	权重	加权求值	应用效果值
提高研究生院管理工作效率	90	0.192	17.280	86.184
业务流程规范	84	0.064	5.376	
管理功能完善	82	0.064	5.248	
无纸化程度	88	0.031	26.488	
系统界面易理解度	88	0.166	14.608	
业务功能完善度	80	0.091	7.280	
系统兼容性	80	0.049	3.920	
系统角色和权限设置合理性	82	0.039	3.198	
系统集成和接口建设完善情况	83	0.022	1.826	
系统响应速度	80	0.012	0.960	

## 5 结论

从实际应用角度对研究生系统应用效果进行评价,构建具有二层级的评价指标体系,采用 AHP 法确定指标权重;以南开大学研究生系统为例,进行问卷调查,最后得出系统应用效果值,从而形成了一套可行的研究生应用效果评价方案.该方案也可对相关信息系统应用效果评价研究提供借鉴,有广阔的应用前景.

虽然笔者对研究生系统应用效果评价进行了初步研究,在指标体系构建上形成了较为可行的思路方法.但是,由于 AHP 法本身采用专家打分的方式获得指标值,难免会受专家喜好的影响.因此从数学上寻找更加优良的方法,剔除人为的感性影响,尽量以定量的方式对系统进行应用效果评价是下一步努力的方向.

## 参考文献:

- [1] 谢幼如,常亚洁. 绩效导向的教育信息化评价模型的构建[J]. 中国电化教育, 2015(1): 56-61.
- [2] 李文光,范坤,赵莹. 深圳市基础教育信息化建设与应用评价指标体系的探索[J]. 中国电化教育, 2014(1): 40-44.
- [3] 李玉石. 高校信息化评价指标及应用研究[D]. 天津: 河北工业大学经济管理学院, 2007.
- [4] 谢忠新. 学校信息化应用评估模型的研究[D]. 上海: 华东师范大学教育学部, 2009.
- [5] 陈明选,汤巍楠. 中小学数字化校园建设与应用绩效的优化[J]. 中国电化教育, 2012(3): 30-36.
- [6] 宁东玲. 信息系统项目应用效果的评价研究[J]. 项目管理技术, 2012, 10(10): 52-55.
- [7] 张淑娜. 制造业信息化制造技术应用效果评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学经济管理学院, 2008.
- [8] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [9] 孔令波. 制造业管理型信息系统评价体系的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学机电工程学院, 2006.
- [1] 谢幼如,常亚洁. 绩效导向的教育信息化评价模型

## Research on the Application Effect Evaluation of the Graduate Management Information System

JIAO Baochen, CHEN Shiming, LIU Zhenchang, YANG Yang, ZHANG Sihai

(Office of Informatization Construction and Management, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** An increasing amount of attention was widely drawn to the Graduate Management Information system, which could be considered as an important means of the college graduate educational informatization. Currently, the construction of the graduate system was promoted in most of college. Nevertheless, it was deficient in the application effect evaluation of the graduate system. From the view of the practical application, a way of building the index system was proposed, which was according to the partition and application of the user. The evaluation index of the application effect with the double levels was constructed. The weight parameters were determined by analytic hierarchy process (AHP), through the expert evaluating method. As an example, the Nankai University was taken to proceed the application effect evaluation. The result showed that the application effect of the graduate system of Nankai University reached high level. A feasible project of the application effect evaluation was proposed in the Graduate Management Information system. Through the method of application effect evaluation, the application level could be estimated effectively and directly in the graduate system. Moreover, the indispensable suggestion could be presented for updating and developing the system.

**Key words:** application effect; analytic hierarchy process; evaluation index system; graduate management information system

# 基于属性规则的 PRBAC 参数模型研究与实现

欧阳荣彬, 刘云峰, 龙新征

(北京大学 计算中心, 北京 100871)

**摘 要:** PRBAC 模型可以实现细粒度的数据访问控制. 论文分析了以往有关 RBAC 数据权限的研究, 总结了具体的实践探索经验, 提出一种基于属性规则的 PRBAC 参数模型, 以实现通用的数据权限管理. 笔者阐述了模型的设计思路, 包括数据权限规则的形式组成、具体含义, 还阐述了模型的实现方案, 包括规则的实现形式、PRBAC 参数应用时机、规则校验的主要实现算法, 以及相关的技术要点. 论文还结合该模型在北京大学 IAAA 系统的应用实践阐述了模型的优势, 即数据权限规则设置具有较强的通用性, 灵活而便捷, 最后指出模型实现方案可以在规则冲突检验方面进一步完善.

**关键词:** 访问控制; 数据权限; PRBAC; 属性规则; 参数模型

**中图分类号:** TP315 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.004

## 0 引言

1992 年文献 [1] 提出了基于角色的访问控制模型 (role-based access control, RBAC), 之后有关 RBAC 的研究不断发展, 并形成了相关标准. NIST (The National Institute of Standards and Technology, 美国国家标准与技术研究院) 的标准定义了三类 RBAC 模型, 分别是基本模型 (core RBAC)、角色分层模型 (hierarchical RBAC)、角色限制模型 (constraint RBAC) [2].

目前, RBAC 模型已经成为一种广泛应用的访问控制模型, 其简洁、可扩展、易管理的特性被广泛认可. 在实际应用中, 当一批用户具有同等的功能权限, 他们被授予一个相同的角色, 但是这些用户可以操作的数据对象却可能是各不相同的, 即他们应当具有相应的数据权限. RBAC 标准模型并没有明确定义数据权限模型, 也没有给出建议的实现策略. 虽然从理论上来说, RBAC 标准模型可以通过细粒度的操作对象 (OBS) 划分实现数据权限, 但是在实际环境中, 细粒度的划分并形成更细粒度的权限 (PRMS), 势必需要大量的角色, 而且操作繁复.

PRBAC (parameterized RBAC) 模型是对 RBAC 基本模型的扩展, 能够完成细粒度的权限访问控制, 而且无需大量角色和繁复的操作. 在具

体应用的实现过程中, 如何设计参数才能有效地应对不同数据对象的访问控制呢? 笔者提出了一种基于属性规则的 PRBAC 参数模型, 将 PRBAC 中的参数设计为一组规则集, 规则集中定义了角色可以访问的数据对象, 及其应当满足的属性规则. 模型和规则可以灵活地适配于各类不同的数据对象.

笔者接下来首先回顾和总结了有关 PRBAC 和数据权限的研究, 然后具体阐述了基于属性规则的 PRBAC 参数模型, 并给出了具体的实现算法, 介绍了有关技术要点, 最后介绍了该模型在北京大学的应用实践.

## 1 相关研究

很多研究人员在 PRBAC 的细粒度权限控制方面做了不少有益的探索和研究.

文献 [3] 在 PRBAC 的基础上引入面向对象的概念, 提出了策略模板 (policy template) 和角色类 (role class), 即通过角色的实例化实现细粒度权限控制. 文献 [4] 提出参数化角色的设计, 即不同用户被授予同一个角色的时候有可能携带不同的参数. 文献 [5-6] 采用 Z 语言, 在 FRBAC (flat RBAC) 的基础上对 PRBAC 模型进行了规范化阐述. 文献 [7-8] 对 RBAC 的 Web Service 访问控制进行了论述, 其中的 Actor 概念和 PRBAC 目标

收稿日期: 2016-10-31; 修订日期: 2016-11-29

基金项目: 国家发改委 2011 国家信息安全专项资助项目

作者简介: 欧阳荣彬 (1979—), 男, 北京大学高级工程师, 主要从事教育信息化研究, E-mail: ouyang@pku.edu.cn.



相近,也是为了实现细粒度的权限控制.文献[9-12]引入了数据角色和数据权限规则的概念,旨在将数据权限与功能权限独立开来,以实现和数据访问的细粒度权限控制,然而数据角色的引入增加了管理的复杂性.

PRBAC 是对 RBAC 模型的扩展,在 RBAC 模型的各个部件中加入了参数(包括角色、对象、权限等)以实现权限尤其是数据权限的细粒度控制.用户在被赋予某个角色的时候可以携带一系列的参数,并将这些参数传递给模型中的各个部件.如此,不同参数的用户角色,其访问权限尤其是数据访问权限就会各不相同.

为了设计一种通用的参数,使其可以适配各种不同的数据对象,常见的做法是将 SQL 条件语句作为参数.但是,由于数据库类型多样,SQL 语句处理情况也多样,因此这种做法的通用性受到很大的限制.笔者将 PRBAC 中的参数设计为一组规则集,规则集中定义了角色可以访问的数据对象,及其应当满足的属性规则,可以灵活地与各类不同的数据对象适配.

## 2 PRBAC 参数模型

PRBAC 模型中引入参数的目的是为了更加精细的数据权限访问控制.为了实现参数模型的通用性,笔者将 PRBAC 中的参数具体设计为一组基于属性规则的数据权限规则集,规则集的主要内容正是访问控制的对象——数据对象及其属性.

### 2.1 数据权限规则

首先介绍数据权限规则 dpr.在形式上, dpr 由元素对( data, rule\_set) 表示,下面是对元素对各组成部分的描述.

data: 数据对象,由数据对象名( obj\_name) 和数据对象类型( obj\_type) 组成;

rule\_set: 属性规则集,形式上由元素对( relation, rules, rule\_sets) 表示,元素对中子元素描述如下:

- ①relation: 逻辑关系符,取值 OR 或 AND,表示 rules 中组成元素以及 rule\_sets 中组成元素之间的关系;
- ②rules: 属性规则 rule 的集合,每个 rule 为一个简单的比较运算表达式,形式上由元素对( attr\_name, comparator, value) 表示,其子元素分别表示对象属性名、比较符和右值;

③rule\_sets: 属性规则集 rule\_set 的集合.

基于上述描述, dpr 元素对( data, rule\_set) 可以构成一个由比较运算表达式和逻辑关系符组成的复杂的布尔表达式,逻辑关系符为 relation,每个比较表达式都由 rule 元素对( attr\_name, comparator, value) 中的子元素构成. data 元素也参与比较表达式的构成,主要是用于限制元素 attr\_name 的所属.具体示例会在第 3.1 节“规则实现形式”中解释.

### 2.2 动态属性规则

在形式上,属性规则 rule 元素对( attr\_name, comparator, value) 中的右值 value 可以有两种: 常量形式和变量形式. 常量形式为一具体的值,例如具体的院系代码“00082”.

变量形式时,其值则与用户会话相关,如采用 { USER. deptID} 表示当前会话中用户的单位编码.如此,PRBAC 的参数就具有了用户会话的属性,产生动态效果.形成了基于对象属性和用户会话属性的数据权限规则,使得数据权限的配置更加灵活.

## 3 实现方案

### 3.1 规则实现形式

在具体实现时,可以采用 XML 形式的属性规则,表 1 为属性规则示例.如果某个角色被赋予了表 1 所示的参数,那么这个角色可以(不是只可以,因为示例中还有其他规则集,而且关系符还是 OR) 访问院系单位为 00082 的人员基本信息(类型为 pku. model. PersonInfo) .

### 3.2 参数应用的时机

按 PRBAC 模型所述,用户登录系统进入会话之后,激活已经赋予了参数的用户授权角色,此时的参数为一组数据权限规则集,因为一个角色可能被赋予多个数据权限规则.同时,如果数据权限规则中的属性规则右值( value) 采用了变量形式,那么在用户登录之后需要将这些变量替换成实际的用户会话属性值.

文献[4]指出,被赋予了参数的权限( parameterized privileges),形式为(  $x \mid x\{a_1, a_2, \dots, a_n\}, m$  ), 其中:  $x$  为数据对象;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  为参数;  $m$  为访问操作.所以,应当是在用户进行数据访问操作的时候应用参数,校验数据权限规则,确保用户只能操作那些通过规则校验的数据,即具体的数据权限规则只对具体的用户访问操作生效,而不是对用户同类型数据的所有访问操作都生效.

表 1 属性规则示例

Tab.1 Sample of rules base on attributes

<pre>&lt; dpr &gt;   &lt; data &gt;     &lt; obj_name &gt; 人员基本信息 &lt; /obj_name &gt;     &lt; obj_type &gt; pku. model. PersonInfo &lt; /obj_type &gt;   &lt; /data &gt;   &lt; ruleset &gt;     &lt; relation &gt; OR &lt; /relation &gt;     &lt; rule &gt;       &lt; attr_name &gt; deptID &lt; /attr_name &gt;       &lt; comparator &gt; EQUAL &lt; /comparator &gt;       &lt; value &gt; 00082 &lt; /value &gt;     &lt; /rule &gt;   &lt; ruleset &gt; &lt; ! 一其他规则集 - - &gt; &lt; /ruleset &gt; &lt; /ruleset &gt; &lt; /dpr &gt;</pre>
--

由于一个角色可能被赋予了多个数据权限规则,这些规则可能都是针对同一类数据对象. 当一个用户角色具有多个数据权限规则时,这些规则之间的关系应该是 OR 的关系.

3.3 规则校验

参数应用的过程就是数据权限规则校验的过程. 过程 FilterWithDPRs 的功能是对数据对象集合依据数据权限规则集进行过滤,其算法描述如表 2 所示. 其中参数 data\_list 表示原数据对象集合,dpr\_list 表示用户在当前会话中的数据权限规则集. 算法中涉及的子过程 FilterWithRS 是将数据对象集合依据单个数据权限规则的属性规则集合进行过滤,其算法表述如表 3. 其他涉及的子过程功能描述如表 4.

表 2 基于 DPRs 的过滤

Tab.2 FilterWith DPRs

<pre>FilterWithDPRs( data_list, dpr_list) BEGIN   VAR ret;   VAR dpr = Next( dpr_list );   WHILE dpr &lt; &gt; NULL LOOP     IF MatchDataType( data_list,dpr) THEN       VAR rs = GetRuleSet( dpr );       VAR tmp_list = FilterWithRS( data_list,rs );       ret = Union( ret,tmp_list );     END IF     dpr = Next( dpr_list );   END LOOP   RETURN ret; END</pre>
--

表 3 基于 RS 的过滤

Tab.3 FilterWith RS

<pre>FilterWithRS( data_list, rs) BEGIN   VAR ret;   VAR rel = GetRelation( rs );   IF rel == 'AND' THEN     ret = data_list; /* AND 时,初始集合为全集* /   ENDIF   VAR sub_rs = NextRS( rs );   WHILE sub_rs &lt; &gt; NULL LOOP     VAR tmp_list = FilterWithRS( data_list,sub_rs );     IF rel == 'OR' THEN       ret = Union( ret,tmp_list );     ELSE       ret = INTERSECT( ret,tmp_list );     ENDIF     sub_rs = NextRS( rs );   END LOOP   VAR rule = NextRule( rs );   WHILE rule &lt; &gt; NULL LOOP     VAR tmp_list = FilterWithRule( data_list,rule );     IF rel == 'OR' THEN       ret = Union( ret,tmp_list );     ELSE       ret = Intersect( ret,tmp_list );     ENDIF     rule = NextRule( rs );   END LOOP   RETURN ret; END</pre>
---

表 4 相关子过程功能描述

Tab.4 Other functions

过程	功能描述
Next	取集合中的下一个元素
Union	取两个集合的并集
Intersect	取两个集合的交集
MatchDataType	判断 data_list 与 dpr 中的数据对象类型是否一致
GetRuleSet	获得 dpr 中的 ruleset
GetRelation	获得 ruleset 中的逻辑关系符
NextRS	获得 ruleset 中的下一个子 ruleset
NextRule	获得 dp 中的下一个属性规则 rule
FilterWithRule	遍历 data_list 中的数据对象,分别校验属性规则 rule,为真则通过过滤,否则不通过

3.4 Java 反射

在过程 FilterWithRule 中,需要校验单个属性规则. 然而,属性规则中的属性名都被配置成了文本,一般的做法是遍历所有可能属性名,然后调用相应的属性访问方法. 但是,一个数据对象一般都具有多个属性,而且数据对象的类型也不可能只有

少数几个,不同的应用系统都可以定义自己不同的数据对象类型.因此,不可能在 FilterWithRule 的具体实现中通过文本判断遍历所有的情况.

Java 语言中的反射机制能够通过文本的属性名获取到该属性的访问方法,并且可以通过程序触发运行,从而获得数据对象的属性值.实际上,Java 语言的反射机制对于本文基于属性规则的 PRBAC 参数模型的通用性有极为关键的作用,而且,其他的面对象语言中也都有类似的反射机制.

#### 4 应用实践

“北京大学统一身份认证和权限管理系统”(以下简称“IAAA 系统”)是北京大学电子校务环境下集成了用户管理、身份认证、权限管理和日志审计管理等功能的综合安全管理系统<sup>[13]</sup>.其中权限管理部分基于 PRBAC 模型设计和实现,在数据权限管理方面应用了笔者提出的 PRBAC 参数模型,实现了通用而且细粒度的数据权限管理.其简化的实现类图如图 1 所示.其中“对象约束属性”对应 2.1 节中阐述的属性规则 rule 元素对中的 attr\_name.

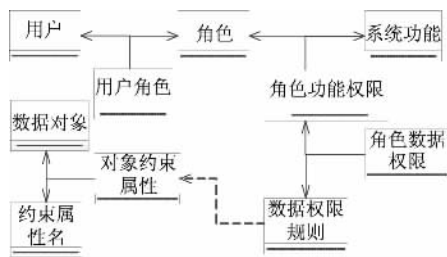


图 1 权限管理类图

Fig. 1 Class diagram of permission management

“IAAA 系统”目前共管理北京大学电子用户身份数据大约 21 万条,为 108 个应用系统提供统一身份认证服务,为 29 个应用系统提供统一权限管理服务(共有角色约 320 个),其中 10 个应用系统集成了数据权限管理服务.“IAAA 系统”面向全校的应用系统提供统一而分级的权限管理服务,应用系统的权限管理均由注册的应用系统安全管理员管理和配置,无需分别在应用系统中重复设计实现和管理.

实践表明,“IAAA 系统”能够合理而有效地实现数据权限管理,应用系统集成简便,规则配置灵活,满足了应用系统的权限管理需求.

#### 5 结论

笔者通过分析以往研究并总结具体的实践探

索经验,提出了基于属性规则的 PRBAC 参数模型.阐述了该模型的设计思路和实现方案,包括数据权限规则的形式组成、具体含义,以及规则的具体实现形式、参数的应用时机、规则校验的主要实现算法和相关的实现技术要点等.规则配置时对规则冲突的检验方面本文的实现方案并未涉及,还需要进一步完善.

最后,北京大学“IAAA 系统”的应用实践表明,笔者提出的基于属性规则的 PRBAC 参数模型可以合理而有效地实现数据权限管理,规则设置具有较强通用性,灵活而且便捷,满足了应用系统的权限管理需求.

#### 参考文献:

- [1] FERRAILOLO D, KUHN R. Role-based access control [C]// Proceedings of the NIST-NSA National( USA) Computer Security Conference. Piscataway: IEEE, 1992: 554 - 563.
- [2] ANSI. American National Standard for information technology-role based access control [M]. ANSI INCITS 359 - 2004. New York: American National Standards Institute, Inc. 2004.
- [3] EMIL L, MORRIS SM. Reconciling role based management and role based access control [C]//Proceedings of Symposium on Access Control Model and Technologies. New York: ACM. 1997: 135 - 141.
- [4] MEI G, SYLVIA L O. A design from parameterized roles [C]//Proceedings of Research Directions in Data and Application Security XVII. Laxenburg: IFIP, 2004: 251 - 264.
- [5] ETIENNE J K, ALI E A. A formal model for flat role-based access control [C]//Proceedings of ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Application. Piscataway: IEEE, 2003.
- [6] ALI E A, ETIENNE J K. A formal model for parameterized role-based access control [C]//Proceedings of Workshop on Information Technologies and Systems. Georgia: WITS, 2005: 233 - 246.
- [7] XU F, LIN GY, HUANG H, et al. Role-based access control system for web services [C]//Proceedings of Conference on Computer and Information Technology. Piscataway: IEEE, 2004: 357 - 362.
- [8] JONATHAN K A. A service-centric approach to a parameterized RBAC service [C]//Proc. of the 5th WSEAS International Conference on Applied Computer Science. Wisconsin: WSEAS, 2006.

(下转第 40 页)

## 基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型

胡 燕, 朱晓瑛, 马 刚

(北京邮电大学 信息网络中心, 北京 100876)

**摘 要:** 随着移动服务的发展,越来越多的移动端服务基于对象的位置进行推送和推荐,因此位置预测技术显得越来越重要. 由于对象位置信息存在采集不连续或对象行为不规律等因素,导致位置预测成为一项非常有挑战的工作. 为了提高位置预测的准确性,提出一种基于 K-Means 算法和时间匹配的位置预测模型. 该模型使用 K-Means 算法对历史位置点进行聚类,划分多个对象运动区域,针对对象运动区域进行预测. 按照对象的作息将一天时间划分为多个时间段,运用笔者提出的轨迹建模算法和轨迹更新算法形成用户运动轨迹,形成对象运动轨迹,再使用时间匹配原则进行位置预测. 笔者最后利用真实的数据实现该模型,实验证明:未使用该模型的位置预测准确率为 39.7%;使用该模型后算法和时间匹配的位置预测模型预测准确率达到 60.3%,准确率提高了 20% 左右.

**关键词:** 位置预测; K-Means 算法; 时间匹配; 聚类

**中图分类号:** TP311 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.005

### 0 引言

随着移动对象空间技术的快速发展,对象位置信息采集更加便捷,随之而来的移动位置服务也越来越重要. 为了使服务具有前瞻性,不仅要移动对象的位置进行分析,更要对其位置进行预测<sup>[1-2]</sup>. 对象位置信息可以通过多种方式采集,例如 GPS、WiFi、AP 等,这些位置信息和访问时间对应就能形成一个对象的轨迹信息. 然而,位置预测却是一项有难度的工作,例如位置信息采集总是不连续的或者存在盲点,一些重要位置信息无法采集到;已采集的数据通常无法直接进行对象位置预测,需要预处理工作;对象的行为存在不规律和不确定性,很难用一种算法进行预测,要综合考虑多种因素,以上这些原因导致位置预测比较困难.

位置预测通常有两种方法,第一种是根据对象的上一个访问位置点预测当前位置点,通过计算转移概率进行预测. 文献[3-5]中的马尔科夫和隐马尔科夫算法用于位置预测,同时结合对象社会关系和时间匹配,这种预测方式只与上一个位置到当前位置的转移概率有关. 其中,文献[3]将贝叶斯网络用于预测,并且考

虑多种因素来提高预测效率,将空间、时间、对象相似性等属性考虑到预测模型中. 文献[6-8]使用漫步算法和马尔科夫算法同时进行预测,对象访问路径和时间间隔也作为预测的影响因素. 第二种方式是收集历史位置点信息预测当前位置. 文献[1]和文献[9]对历史活动位置进行建模,并且将对象的运动趋势作为位置预测的重要因素.

笔者的位置预测属于第二种预测方式,即采用基于对象历史访问位置信息进行预测. 由于预测对象的精确位置较为困难,且移动服务推送总是面向某个区域的对象提供服务,因此笔者的预测模型也以区域为基础. 首先对对象的历史位置点用 K-Means 算法进行聚类,每一个聚类的结果就是一个对象活动区域,再基于以上区域的划分进行位置预测以提高预测的准确性,并且对对象所在位置区域的预测对移动服务提供者是有价值的. 最后基于时间匹配原则,将对象 24 h 的时间进行分段,并将每个时间段历史上出现概率最多的位置区域作为该时间段的热点位置. 热点位置与时间点结合就能形成对象一天的运动轨迹,根据对象运动轨迹中所对应的时间和位置就能进行对象位置预测.

收稿日期: 2016-10-27; 修订日期: 2017-01-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA014702)

作者简介: 胡燕(1982—),女,湖北武汉人,北京邮电大学工程师,主要研究方向为信息处理、大数据.



## 1 K-Means 算法及相关定义

### 1.1 K-Means 算法

K-Means 算法是用于解决聚类问题的经典算法,是在给定样本点集合和  $k$  值的前提下进行聚类的简单算法. 假设  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  是要进行聚类的样本点,  $x_i$  是其中任意一个样本. K-Means 算法将样本点划分为  $k$  个聚类, 定义为  $C = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ , 其主要思路是为每个聚类定义  $c_i$  个质心点. 首先, 在样本点中随机选取  $k$  个质心点, 然后计算样本点到该质心点的距离. 质心点到样本点的距离可以定义为:  $\|x_i - c_j\|^2 (i \in n, j \in k)$ . 计算每个样本点到质心点的距离, 将该样本点归到距离最近的质心点类里, 重复直到所有样本点都被归类.

然后根据上一步聚类结果重新计算  $k$  个质心点, 重复之前的步骤将所有样本点重新归类, 反复循环直到质心点没有变化. 以上过程可以表述为

$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2$ , 式中:  $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$  是样本带点  $x_i^{(j)}$  到质心点  $c_j$  的距离, 也就是到他们各自的聚类中心的距离.

### 1.2 相关定义

基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型与对象的历史位置信息、时间段、对象位置轨迹、预测准确率等概念相关, 因此对以上概念做如下定义.

**定义 1** 位置点. 假设  $L = (L_1, L_2, \dots, L_n)$  是所有对象的历史位置点集合, 对于任意的  $L_i$ , 其经纬度的位置信息可以记录为  $L_i = (x_i, y_i)$ .

**定义 2** 对象活动区域. 聚类的结果记为  $Cluster = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ , 其中  $k$  是给定的输入值. 聚类中每个位置点的最小和最大经度纬度形成运动区域, 记录为:

$$O = (X_{\min}, Y_{\min}, X_{\max}, Y_{\max}).$$

**定义 3** 时间段. 将一天 24 小时划分为多个不同的时间段, 描述为:  $T = ([t_i, t_j], [t_j, t_k], \dots, [t_n, t_i]) (0 \leq t_i < t_j < t_k < t_n \leq 24)$ .

**定义 4** 热点位置. 对象出现在某个历史位置点的概率可以描述为:

$$p_i = \frac{L_i}{\sum_{i=j}^n L_j} (1 \leq i \leq n).$$

在  $T_{ij} = [t_i, t_j]$  时间段内, 对象出现概率最大的位置点为热点位置, 记为  $M_p$ ,

$$M_p = \arg \max \frac{L_i}{\sum_{i=j}^n L_j} (1 \leq i \leq n).$$

**定义 5** 对象运动轨迹. 对象在一天的不同时间段内对应的位置序列称为对象位置轨迹, 其中某天的运动轨迹为:

$$S = ([T_1, L_1], [T_2, L_2], \dots, [T_n, L_n]).$$

**定义 6** 位置预测准确率. 以天为单位对对象位置进行预测, 对象在每天的每个时间段, 热点位置实际发生的位置与运动轨迹中预测的运动区域相同则认为预测准确. 根据定义 5, 将一天时间划分为  $n$  个时间段, 其中有  $m$  个时间段的热点位置预测准确, 位置预测准确率记为:

$$p_a = \frac{O_m}{\sum_{i=1}^n O_n} (1 \leq i \leq n, m \leq n).$$

## 2 基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型

笔者提出一种基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型, 预测过程主要分两个阶段. 第一阶段为轨迹建模阶段, 使用 K-Means 算法对历史访问位置点按照不同时间段进行聚类形式轨迹簇, 计算出每个时间段出现最频繁的位置点作为该时间段的热点位置, 形成对象每天的运动轨迹. 第一阶段中用 K-Means 对历史位置点进行聚类, 形成对象运动区域, 目的是提高预测的准确性, 同时对运动区域的预测不影响移动服务的推送和推荐. 第二阶段根据时间匹配原则对位置进行预测.

### 2.1 轨迹建模

轨迹建模阶段是对历史位置点进行聚类, 形成对象运动区域. 使用任意两个历史位置点之间的距离用 K-Means 算法进行聚类, 其距离表示为  $D_{ij} = \|x_i - y_i\|^2$ , 聚类过程如下:

输入: 所有历史位置点  $L_i = (x_i, y_i)$  和  $k$  值.

输出: 聚类结果.

①在历史位置点中随机选择  $k$  个样本点为初始质心.

②计算某个历史位置点到每个质心点的距离, 将该历史位置点归入距离最近的那个质心点. 历史位置点到所有质心点的最小距离可以表示为:

$$D_{ik} = \arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{x_i \in L_i} \|x_i - m_k\|^2.$$

③当所有的历史位置点被分配以后, 重新计算质心的位置.

④重复②和③直到质心点没有变化, 按照计算

最短距离的方式将所有的历史位置点进行聚类。

聚类的结果记为  $Cluster = (c_1, c_2, \dots, c_k)$ , 其中  $k$  是给定的输入值. 聚类完成后计算对象活动区域, 任意一个  $c_i$  的对象位置区域为:

$$O = (X_{imin}, Y_{imin}, X_{imax}, Y_{imax}).$$

由于每个对象出现的历史位置点都有对应的时间, 因此对象出现时间与对象位置预测是有紧密联系的. 假设  $O_i = (O_a, O_b, \dots, O_k)$  为对象在时间段  $T_i = [T_{ij}, T_{jk}, \dots, T_{ni}]$  的热点位置, 按照时间序列可以形成对象一天的历史轨迹, 即

$$S = \{ \langle T_{ij}, O_a \rangle, \langle T_{jk}, O_b \rangle, \dots, \langle T_{ni}, O_k \rangle \}, \\ (0 \leq t_i < t_j, \dots, t_n \leq 24, 0 < a, b, \dots, < k).$$

## 2.2 轨迹预测

通过轨迹建模阶段对对象位置数据进行处理, 使用轨迹建模算法得到的对象运动轨迹, 该模型由不同时间序列组成, 每个时间段的热点位置用概率估算的方法对对象未来的运动轨迹进行预测.

$$S' = \{ \langle T_{ij}, O_a \rangle, \langle T_{jk}, O_b \rangle, \dots, \langle T_{ni}, O_k \rangle \}, \\ (0 \leq t_i < t_j, \dots, t_n \leq 24, 0 < a, b, \dots, < k).$$

## 3 实验和结果

实验使用加利福尼亚大学发布的真实数据, 这些数据是从校园 AP 获取的对象位置信息. 数据包含 AP 信息和对象访问信息. AP 信息包含 AP 的经纬度、高度等信息. 对象访问信息是通过对象的终端设备软件采集, 当对象打开该软件时软件将会记录访问 AP 的信息, 包括 AP 编号、访问时间、信号强度等信息. 笔者从发布的数据中选取 50 个对象两个星期的访问信息作为历史位置信息, 其中前一个星期数据用于轨迹建模, 后一个星期的访问信息用于轨迹更新.

首先将所有历史记录中出现的 AP 使用 K-Means 聚类, 假设  $k = 8$ , 所有的 AP 按照位置聚类为 8 个类, 图 1 为聚类结果.

根据作息规律将一天 24 小时划分为 6 个时间段, 分别是  $t1 = [0am, 6am]$ 、 $t2 = [6am, 9am]$ 、 $t3 = [9am, 12am]$ 、 $t4 = [12am, 14pm]$ 、 $t5 = [14pm, 18pm]$ 、 $t6 = [18pm, 24pm]$ . 然后计算每个时间段访问次数最多的位置作为该时间段的代表位置. 这样就能按照时间段形成对象的位置轨迹, 并利用该对象一天的运动轨迹对对象位置进行预测.

实验选取 50 个采集信息较多的对象位置进行实验, 图 2 为不同时间段预测准确率的对比结果. 在  $t1$  时间段, 两种方式的预测准确率相同, 因为该时间段  $[0am, 6am]$  是对象睡觉时间, 因此

聚类前后准确率无变化.  $t2$   $[6am, 9am]$  时间段是早晨活动时间, 该时间对象的活动范围不太固定, 聚类后的预测准确率低于聚类前.  $t3 \sim t6$  时间为学习和晚间活动时间, 该时间段对象活动范围相对固定, 因此聚类后预测准确率高于聚类前. 实验结果证明校园对象在一定时间段内在固定区域内活动较多, 笔者提出的基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型适合针对校园对象进行位置预测. 使用模型前按照时间段对位置点预测, 不针对运动区域进行预测, 图 3 显示使用预测模型前的预测准确率为 39.7%, 使用预测模型后的预测准确率为 60.3%.

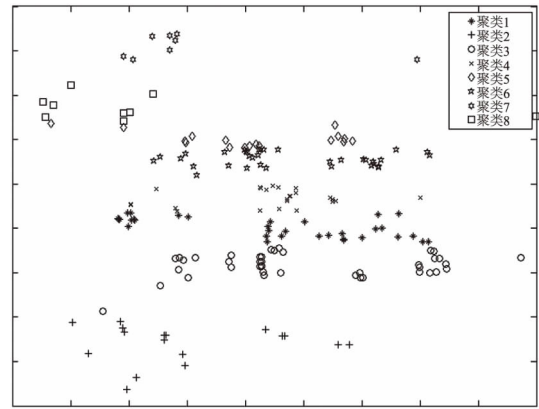


图 1 K-Means 算法聚类结果

Fig. 1 Cluster result with K-Means algorithm

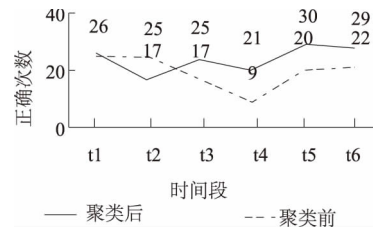


图 2 不同时间段预测准确率对比结果

Fig. 2 Results of comparison in different time segments

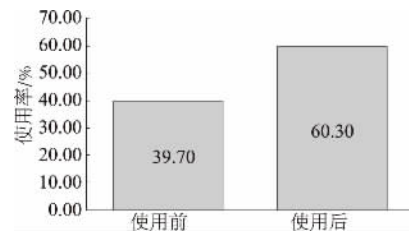


图 3 使用预测模型前和使用预测模型后预测准确率对比结果

Fig. 3 Prediction ratio before and after using model

## 4 结论

提出一种基于 K-Means 和时间匹配的位置预

测模型,该模型使用 K-Means 算法对历史位置点信息聚类,形成对象运动区域.在此基础上笔者又提出轨迹建模算法用于确定对象历史运动轨迹,并根据时间匹配原则按天对对象轨迹进行预测.为了实现该模型,使用加利佛利亚大学的真实数据进行试验.试验证明,该模型提高了位置预测的准确性.因此,基于 K-Means 和时间匹配的位置预测模型是较为准确、高效的.

### 参考文献:

- [1] 李雯,夏士雄,刘峰,等. 基于运动趋势的移动对象位置预测[J]. 通信学报, 2014, 35(2): 46-53.
- [2] 于瑞云,夏兴有,李婕,等. 参与式感知系统中基于社会关系的移动对象位置预测算法[J]. 计算机学报, 2015, 38(2): 374-385.
- [3] ROBARDS W M, SUNEHAG P. Semi-markov K-Means clustering and activity recognition from body-worn sensors[C]. 2009 Ninth IEEE International Conference on Data Mining. 2009.
- [4] YANG Y, WANG Z L, ZHANG Q, et al. A time based markov model for automatic position-dependent services in smart Home[C]. 2010 Chinese Control and Decision Conference. Beijing, 2010.
- [5] 赵杨,田国会,尹建芹,等. 家庭智能空间下基于 HMM 的人轨迹分析方法[J]. 模式识别与人工智能, 2015, 28(6): 542-549.
- [6] 彭曲,丁治明,郭黎敏. 基于马尔可夫链的轨迹预测[J]. 计算机科学, 2010, 37(8): 189-192.
- [7] 李婕,夏兴有,王兴伟,等. 机会认知网络中基于社会关系的节点位置预测算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(12): 1701-1705.
- [8] LI W, XIA S X, LIU F, et al. Markov location prediction algorithm based on dynamic social ties[C]. IEICE TRANS. INF. & SYST, 2015.
- [9] 赵雪涵. 基于密度聚类的用户轨迹预测算法研究[D]. 西安: 西安理工大学计算机等院. 2014.
- [10] FULOP P, SZABO S, SZALKAI T. Accuracy of random walk and markovian mobility models in location prediction methods[C]. 15th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks. 2007.
- [11] RACHURI K, MURTHY R C. Level biased random walk for information discovery in wireless sensor networks[C]. IEEE International Conference on Communications. 2009.
- [12] XU J H, LIU H. Web user clustering analysis based on K-Means algorithm[C]. International Conference on Information Networking and Automation (ICINA). 2010.

## Location Prediction Model Based on K-Means Algorithm and Time Matching

HU Yan, ZHU Xiaoying, MA Gang

( Network and Information Center, Beijing University of Posts and Communications, Beijing 100786, China)

**Abstract:** Location prediction was critical to mobile service because various kinds of applications were tightly combined with user's location. However, location prediction was a challenging work because location capturing was always not continuous and user's behavior were uncertain and irregular. To improve the location prediction accuracy rate, this paper proposed a location prediction model based on K-Means algorithm and time matching. For the mobile service always region oriented, we first clustered history location using K-Means algorithm to define several regions. Then we divided every day time into several segments and calculated the maximum probability location in every time segment. A trajectory of a user in one day was formed with trajectory model and trajectory updating model which proposed in this paper. We could predict user's location with time matching method. At last, we did experiments with real location data in campus which captured by APs. The prediction outcome with K-Means was compared to the outcome without model based on K-Means algorithm. The experiment result shows that accuracy rate of our model was higher than the prediction without new model. So, more location services could be provided to users with this new model.

**Key words:** location prediction; K-Means algorithm; time matching; cluster

文章编号: 1671-6833(2017)02-0021-05

# 基于高铁站区影响的城市空间研究

曹 阳

(郑州大学 建筑学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 为了实现高铁站区和城市空间的和谐发展, 分析站点及周边地区、城市、区域3个层级的空间变化特征, 将高铁站区和既有城市空间形态关系进行分类, 得到了各种城市空间形态关系之间的内在联系与相互转化的趋势. 研究结论为: 高铁站区引导下的城市空间良性发展需要结合城市自身要素、合理规划高铁站区的功能定位以及预先评估站区与原有城市中心的距离和区位关系等.

**关键词:** 高铁站区; 空间; 形态; 城市空间; 影响

**中图分类号:** TU984.2

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.006

## 0 引言

交通方式的每一次革新必然对城市的空间发展产生不同程度的影响, 成为城市转型的驱动因素. 从城市发展层面来看, 当高铁成为一种快速、便捷、安全性能好的大区域交通方式后, 会在一定空间尺度和运转周期范围内对城市空间未来发展方向和空间结构造成影响, 因此, 高铁站区对城市空间的影响成为当前城市规划领域的热点问题.

随着国内高铁的迅速发展, 高铁站区对城市空间影响的研究可以集中概括为3个层面: ①在宏观层面, 以对区域城市系统的影响、区域城市之间相互作用为主<sup>[1-3]</sup>; ②中观层面, 包括了高铁引导下城市空间发展的特征、影响机制以及城市空间结构演化等<sup>[4-5]</sup>; ③在微观层面, 以研究高铁站区的功能特点、站点周边地区规划建设等为主<sup>[6-8]</sup>. 此外, 还有学者以国外高铁开发建设为实例, 研究高铁站区对城市空间的推动作用, 试图为我国高铁规划建设提供一些经验<sup>[9]</sup>. 由于每一个城市受高铁站区的影响程度不同, 尤其是在空间层面会呈现不同的形态, 不少研究缺乏针对站区和城市空间形态关系的分析. 因此, 笔者试图从不同空间层次探讨其影响变化, 结合“高铁站区——既有城市空间”形态关系类型阐述高铁站

区对城市空间的影响, 并揭示其发展转化的规律. 笔者研究的城市空间侧重于各类高铁设站城市(特大城市、区域中心城市、中小城市等)外部的边界和城市内部的空间布局.

## 1 高铁站区对城市空间产生影响的根本原因分析

高铁站区作为城市交通网络中的节点, 既担负着城市交通运输功能, 又是所在城市的一个重要场所, 承担了城市功能. 因此, 站区具有“节点”和“场所”的双重性特征. 节点特征强调站区的交通枢纽功能, 场所特征反映站区的城市复合功能, 当高铁站区产生了新的业态活动、交通功能与复合的城市新功能共同存在并互相刺激时, 站区自身的发展模式和新的城市空间也开始逐步显现, 因此高铁站区对城市空间的影响是通过站区的交通节点功能与场所功能共同作用来体现的, 从根本上来说, 高铁的节点功能需要与场所功能互动并整合起来, 才能实现高铁在社会、经济、空间等方面的综合效应最大化<sup>[5]</sup>.

## 2 高铁站区影响城市空间变化分析

高铁站区具有人流集散快捷、大区域快速流通等特点, 使之与传统铁路和城市轨道交通对城市空间产生的影响有所不同. 笔者在探讨高铁对

收稿日期: 2016-10-30; 修订日期: 2017-01-19

基金项目: 2016年河南省科技厅科技攻关计划项目(162102210007); 2017年河南省教育厅人文科学研究指导计划(2017-ZDJH-224)

作者简介: 曹阳(1982—), 女, 河南固始人, 郑州大学建筑学院讲师, 主要从事城市设计方面研究, E-mail: caoyang1762@126.com.



城市空间产生的影响时,主要从站区层面、城市层面和区域层面 3 个方面进行分析。

### 2.1 站区层面

对于站点地区来说,节点和场所是动态集聚形成的两种功能空间形式。①从节点功能层面理解,高铁可以引导不同交通系统的一体化进程,其内外交通的可达性对物质流与非物质流产生巨大的吸引力,引起大规模的集聚。②从场所功能层面理解,高铁周边区域可完善城市职能和发展多样化的功能,从而形成具有成熟形态的城市新区域。在两者形成良好互动的条件下,站区同时承担了城市交通运输网络上的节点功能和提供市民发生较高频率活动行为的场所功能。站点周边区域的空间有 3 种变化方式:周边区域城市空间范围扩大、建筑密度增加;新的城市空间诞生,城市空间形态表现为从无到有,多种城市功能在该区域逐步显现;周边区域空间的结构肌理得到梳理和整合。前两种空间的变化呈现上升趋势。

### 2.2 城市层面

高铁站区的发展会带来城市功能板块、道路交通和中心体系等一系列城市结构调整,随着高铁枢纽地区综合交通换乘中心的形成将带来相应的城市空间集聚和分散。

(1) 节点交通功能引导下的整体性城市空间形成。高铁车站作为城市综合交通运输网络体系中重要的功能节点,担负着交通枢纽与城市其他交通方式衔接转换的功能,从而形成城市多数交通方式的换乘中心。高铁枢纽高效的出行方式带来了巨大的人流量,为站区及其周边区域引入投资,从而增强站区的交通和城市职能,这也是高铁交通节点功能的体现。其次,为了提高城市以及区域层级的公共交通联系,城市便围绕着高铁站区修建公共交通体系,高铁车站从简单的站点逐渐发展成为高铁枢纽(新型城市综合交通枢纽),成为城市中重要的客流集散和中转换乘中心。这些公共交通系统从不同层级建立连接,高铁客运站区与城市其他区域以及周边城市地区的联系更加紧密,便于人流、物流的快速集聚与扩散,这无形中提高了城市的整体性,使城市发展更加紧凑,也为城市空间的发展奠定了基础。

(2) 场所复合功能刺激下的城市空间集聚与分散。从城市层面来看,高铁站区的场所功能特征会实现城市内经济社会要素的流动、配置与组合方式。城市空间的发展首先是从经济集聚开始的,高铁可以刺激商家投资高速铁路车站区域,这种源于并直接作用于高铁站区的业态经济活动会刺

激当地的经济发展。经济发展也会随即带来城市空间对外扩张,并引导城市空间的跳跃式发展。高铁在拉近城市空间距离的同时也促成了区域间人流、资金流、信息流等生产要素的快速集聚,并消除了物流障碍,促进制造业向劳动力资本与土地价格低的地区扩张、帮助沿线城市的产业转移和升级。在这种双向关系中,城市空间的集聚在不同层级和同一空间范围内会呈现多种形式。

### 2.3 区域层面

从尺度更大的区域发展层面上看,高铁可以使区域发展的优势集中在设站城市,原本位于高速铁路沿线而未设站的城市,因为高铁的通车反而使其相对交通可达性变低,本可以流入该地区的物质流与非物质流,可能会被高铁设站城市吸收。这些差距越来越大,受设站城市的吸引,未设站城市的部分产业或人口也会被设站城市吸纳,自身发展要素外流,尤其是未进入高铁网络的边缘地区发展会更落后,原有城市功能也会被演替,城镇体系发展呈现两极分化、区域的不平衡发展,最终造成城市空间形态不同程度的削减和增加<sup>[10-11]</sup>。只有高铁两端城市的能级相当,人员、信息和资源的流动才会动态平衡;城市能级水平相差较大的区域,资源配置能力强、体量大的城市,高铁就会发挥吸铁石效应成为城市发展的引擎,导致区域内的优质资源集聚;相反对于资源贫乏的城市,高铁的开通恰好加速城市人员、信息、和资源向周边更高能级城市流动,这种情况与“马太效应”类同,最终导致强者越强,弱者越弱。

图 1 为物质流与非物质流的流动方向示意图。由图 1 可知,虽然存在物质流与非物质流的双向流动,但如果将流动方向按照流量方向绝对化,则可以看出:①区域内不设站的城市只供给不吸

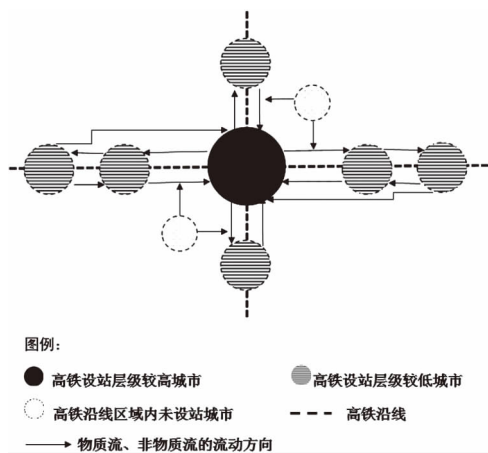


图 1 物质流与非物质流的流动方向示意

Fig. 1 Direction of material flow and non-material flow

纳,处于整个系统的最底层;②高铁沿线区域内设站城市有供给有吸纳,处于系统的上层,但是它们之间也有明显的不同;③不同设站城市之间供给与吸纳的作用力来自原有城市规模、城市等级、基础设施、高铁汇聚条数等等,一般来说这是对原有城市等级的一种固化。

### 3 基于“高铁站区——既有城市”空间形态关系的分类及特征分析

高铁站区会对城市空间产生影响,但由于设站城市的发展水平、规模等级、产业结构不同,每个城市受高铁的刺激程度可能存在差异<sup>[12]</sup>,从而导致不同站区在发展过程和原有城市空间关系存在着明显的差异,这也为关系类型的划分提供了依据,通过对高铁站区与城市空间关系特征的分析,本研究将其产生的空间形态分为以下4种类型。

#### 3.1 融合型

高速铁路车站项目中,一部分是在城市原有火车站基础上扩建或改造而来,例如北京西站、天津站、北京南站均依托原有的城市基础设施,通过对既有火车站的改造和扩建实现强化原有城市中心的目标。由于该火车站区域经过长时间的开发,已经融入原有城市空间中,新的高铁站区可以通过依附原有火车站区周边资源实现与城市的融合,如图2所示。这类空间关系的形成一般存在如下特征:①多为旧有车站改造,多种交通方式集聚,易形成交通枢纽,周边城市形态早已形成,用地较为紧张;②区位临近原有城市中心,与城市中心区易建立起便捷的交通连接,物质与非物质要素可以在两者之间充分流动,并最终形成正反馈,起到强化城市中心的作用;③站区自身功能与周边区域城市功能相对完善。由于新建或更新的高铁站区与城市原有中心相比在交通便利性、城市基础设施完备等方面具有优势,会在不同程度上造成竞争,城市空间内部发生某些功能的弱化或者强化,城市形态随之发生偏移。以上的特征也会受到其他因素的影响,在作用程度上、发生时间会有偏差,比如:铁路穿越城市的方式,或者车站作为一栋建筑物自身是否只强调交通功能即“节点”

作用,与城市融合的紧密程度等方面都会影响站区对城市中心的强化作用。

#### 3.2 嵌入型

对规模较大的城市,会出现区域公共交通都集中一个节点,土地利用等各方面的压力达到一个极限值的问题。城市高速铁路主要车站担负加重的同时导致周边区域的价值被削弱。当单中心的城市结构无法延续城市发展时,就需要新建城市发展源来平衡和引导城市的发展方向,如图3所示。我国很多城市采用了“多中心”的城市发展方式来重新梳理城市空间,以利于整个城市的运转。例如:选址位于广州市番禺区的广州南站的定位是形成以交通枢纽为中心功能的城市新中心,郑东新区通过引入高铁站点(郑州东站)和站区周边区域开发建设来带动新区的发展,实现城市多中心的发展模式。高铁站区成为新的城市发展源需要具有必要的条件和城市其他的因素配合:①开发方式一般为新建,周边有一定规模的城市建成区,站点及周边区域功能相对单一;②车站位置距离原有城市中心区有一定的距离,但是并没有完全脱离城市的原有形态范围,位于城市的边缘地区;③由于处于城市边缘,区位条件不仅可以为新城市中心的开发和空间扩展提供大量土地、拓展城市新的消费与生产空间,还可以避免发展初期与原有城市中心辐射范围过大发生冲突,便于高铁车站与原有城市中心区建立便捷的交通联系,这一条件有利于高铁站区承担较多的客流、吸纳原有城区的部分业态活动,提升新区的吸引力与容纳力。

这种方式形成的高铁站区易于引导城市形成新中心,刺激城市形态发展。如果设站城市的规模并不能支撑新中心的发展时,原有城市中心与站区之间的竞争反而会削弱彼此的集聚;由于城市边缘的原有城市功能较为单一,需要新的城市功能加入来强化,如果单纯将高铁车站视为“交通功能”至上,而忽略了其他城市功能属性,就会将车站与原有城市中心割裂开来,使车站更像是铁轨的附属物而不是城市的有机组成部分,两者之间会有一层隔膜,这会延长整个站区的发展周期。

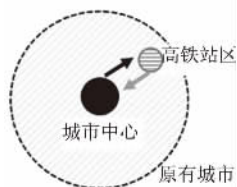


图2 融合型高铁站区

Fig. 2 Integrated high-speed railway station area

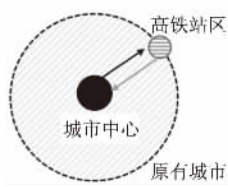


图3 嵌入型高铁站区

Fig. 3 Embedded high-speed railway station area

### 3.3 联合型

相对于嵌入型站区,联合型站区(如图4所示)距离城市中心距离较远、且脱离了城市中心,与原有城市中心的联系也没有嵌入型站区强。一些城市将高铁站区周边区域规划为远期城市发展的中心区域,此后期望成为区域性中心,也就是所谓的“高铁新城”概念。例如:上海市远期的发展规划意图是发展目前处于城市边缘的高速铁路周边区域,使其成为城市的中心城区(都市核),进而发展出西部的新城区,形成东西城区联合发展,围绕都市核发展的城市形态。上海这种城市空间多中心的形成正是由于城市新中心区域围绕“虹桥交通节点”生长带来的结果。但是虹桥站也具有自身的区位优势:这个节点是多种交通方式的交汇。这类站区的形成也具有自身的特点:①站点为新建,周边已有一定规模的建成区,城市功能较为齐全,但是规模不大、层级不高;②与原有城市较远,已经脱离了城市中心的形态边缘,一般位于中心城市周边的组团内;③交通优势比较明显,是该城市和区域公共交通枢纽;④由于远离城市中心,城市功能在其周边比较容易积聚,形成新的城市发展区域,容易形成区域的交通枢纽,是该城市和区域公共交通枢纽。

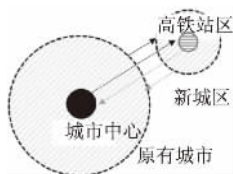


图4 联合型高铁站区

Fig. 4 Combined high-speed railway station area

这种方式适合超大城市拓展新的功能区,易于形成新的城市功能中心,由于高铁站区的影响,该组团内的城市功能将发生变化,要求站点距离中心城区的距离不能过远,否则就会抵消高铁带来的可达性优势。

### 3.4 分离型

分离型如图5所示。这种方式较为特殊,对于城市的发展目标来说将高铁车站周边区域定位为城市远期发展的中心区域,此后城市中心发展考虑向高速铁路车站区域转移,它的理想方式是嵌入型或者联合型,未来成为城市的分中心,但由于在规划初始阶段目标过于宏大或过高的估计了自身的发展能力,脱离了城市的实际情况,造成有站点无站区或站区无法形成有效的运转,其功能只剩下交通,也就是“节点”的功能,其余城市功能并不能真正的集聚,大大降低了高铁站区对城市

的带动作用。把高铁的选址放在距离城市中心区特别远、方向与城市扩张方向相反的区位,虽然设想高铁站区具有足够的吸引力带动高铁新城的发展,但是由于原规划可能会和市场需求存在较大的差距、高铁站区交通条件和周边基础设施欠缺,高铁站区只能成为人们交通换乘需求的城市节点;还有一种情况把高铁站点的选址放在过于边缘化的区域、希望高铁站区发展能够拉开城市发展的框架。可对于一些层级较低的城市,是否需要再建一个以住宅和商务办公为主的高铁新城值得考虑。例如:我国很多高铁设站的地方中心城市,虽然设想依托高铁站区带动高铁新城的发展,但是由于城市规模较小,经济发展水平有限,高铁站区周边发展缓慢,仅仅成为人们发生交通行为的场所。

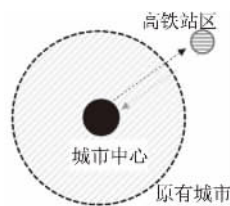


图5 分离型高铁站区

Fig. 5 Separate high-speed railway station area

## 4 各类空间形态关系之间的内在联系与相互转化

对于高铁网络中的设站城市而言,基于不同规模、不同层级的城市,高铁对其带来的效应在程度与规模上也不尽相同,这种效应反映在城市空间形态上,也会产生不同的影响效果。

融合型的关系能够产生积极的正反馈作用,如果能保证高铁带来的物质与非物质要素在一定强度下持续不断,那么站区周边土地等资源在一定程度上将无法继续提供支持。未来如果再有大型的高铁项目,城市边缘地区或周边组团将会是设站的选择,这也是超大型城市拥有多个火车站的原因。

嵌入型的关系决定了它在城市边缘地区会形成新的城市发展动力,城市空间会随之展开,经过一定的发展周期后,会融入到原有的城市空间中;还有一种情况是由于对自身的发展能力估计过高,虽然在城市边缘区域也进行了开发,但是由于缺乏内在动力,站区空间城市功能匮乏,无法形成良性互动,在这种情况下,也可视其为分离型。

联合型的存在必然是对超大城市,或者由于



地理因素无法设站与城市边缘的城市. 这种方式会对原有城市组团内部结构发生重组, 城市功能更加优化, 城市空间进一步拓展, 并会依托与中心城区之间的交通线路产生“指状”发展, 促进组团与城市中心区之间的空间对接, 久而久之也会产生嵌入型乃至融合型的趋势; 另一种理论上的极端情况是由于发展情况无法支撑新城区的拓展, 原有城市空间停滞或者萎缩, 产生分离型的趋势.

分离型产生的主要原因是规划预期远大与发展实际的矛盾, 如果有合适的外部条件刺激, 这种方式也会有向联合型乃至嵌入型发展的趋势, 虽然规模不可能很大, 但也会进入良性的发展循环中.

## 5 结论

高铁站区和城市空间在各自发展进程中相互作用、相互影响, 高铁引导了城市空间的演化, 反过来城市空间产生的变化也客观上影响了高铁站区的发展. 研究两者关系利于新时期下科学分析高铁对我国城市发展的推动作用, 进而更好地规划和管理城市, 促进城市的可持续发展. 笔者对高铁站区“节点”和“场所”功能特性影响下的各级城市空间变化进行梳理, 构建了高铁站区和既有城市空间关系分类的新研究视角和方法, 分析了各类空间形态特征站区的形成条件和自身特点, 进而预见性地提出各类空间形态发展过程中的内在联系和相互转化趋势. 研究结论为: 高铁站区与城市空间和谐的发展需要结合城市自身要素(城市能级、城市空间结构、交通条件等), 合理定位高铁站区的功能以及预先评估站区与原有城市中心的距离和区位关系等.

## 参考文献:

- [1] 王缉宪, 林辰辉. 高速铁路对城市空间演变的影响: 基于中国特征的分析思路[J]. 国际城市规划, 2011, 26(1): 16-23.
- [2] 姚如青. 沪杭高铁对于沪杭关系和杭州发展的影响研究[J]. 现代城市研究, 2010, 25(6): 16-19.
- [3] 王姣娥, 丁金学. 高速铁路对中国城市空间结构的影响研究[J]. 国际城市规划, 2011, 26(6): 49-54.
- [4] 王兰. 高速铁路对城市空间影响的研究框架及实证[J]. 规划师, 2011, 27(7): 13-19.
- [5] 李松涛. 高铁客运站站区空间形态研究[D]. 天津: 天津大学建筑学院, 2010.
- [6] 王兰, 王灿, 陈晨, 顾浩. 高铁站点周边地区的发展与规划——基于京沪高铁的实证分析[J]. 城市规划学刊, 2014(4): 31-37.
- [7] 窦迪. 城市高铁客运站周边区域开发策略研究[D]. 上海: 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 2012.
- [8] 林国治. 高铁站场地区开发理论与规划实践——以温岭高铁新区核心区城市设计为例[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2015.
- [9] 翟国方. 日本高铁站城发展及启示[J]. 规划师, 2016, 32(9): 42-43.
- [10] HUGO PRIEMUS. HST-railway stations as dynamic nodes in urban networks [C]. 3rd CPN Conference Proceeding, 2006: 101-121.
- [11] 日建设计站城一体开发研究会编著. 站城一体化开发——新一代公共交通指向型城市建设[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [12] 李传成. 高铁新区规划理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

## Research on Urban Space Based on the Impact of High-speed Rail Station Area

CAO Yang

(School of Architecture, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to realize the harmonious development of high-speed railway station area and urban space, by analyzing the spatial variation characteristics at three levels such as site and the surrounding areas, cities, and regions, this paper classified the relationship between high-speed railway station and existing urban spatial form, and found the internal relations and mutual transformation between various urban spatial forms. The conclusion of the study was that the benign development of urban space under the guidance of high-speed railway station should combine urban elements, locate the function of high-speed rail station area reasonably, and evaluate the location relationship between station area and the original city center beforehand and so on.

**Key words:** high-speed rail station area; space; morphology; urban space; function

## 高速列车隧道等速交会条件下人体舒适度分析

张运良<sup>1,2</sup>, 张志成<sup>1</sup>, 杨伟超<sup>1,2</sup>, 丁铭鸿<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 基于三维非定常黏性不可压缩 Navier-Stokes 方程和标准湍流模型, 利用 Fluent 流体计算软件, 建立高速列车隧道内等速交会数值计算模型. 模拟同样外形的两辆 CRH380HL 型高速列车以 4 种车速在隧道内交会时气动作用力的变化过程, 得出列车车体内外压力变化规律; 运用车体内部瞬变压力计算公式计算车厢内压力, 根据车厢内压力大小对乘客乘车舒适性做出评价.

**关键词:** 高速列车; 人体舒适度; 车内压力; 隧道等速交会

**中图分类号:** U25

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.007

### 0 引言

列车高速通过隧道或在隧道内交会时会产生剧烈、大幅和复杂的压力波动, 这些压力波动首先会造成高速运行列车的车厢外表面压力波动, 进而通过车体缝隙向车厢内传递, 造成车厢内压力急剧变化. 过大的车厢压力变化会导致乘客出现耳鸣、耳痛等不良症状, 严重条件下甚至会出现恶心、呕吐等问题. 车体压力与列车速度直接相关, 列车速度提高和车厢密封性能下降时, 这一问题将更加突出. 因此对车厢内的压力变化规律和乘坐环境的舒适度进行研究, 对我国高速铁路的发展具有重要意义.

车厢内人体舒适度与车体表面压力、车厢的密封性和个体敏感性等密切相关, 但本质是车厢内外压力的传递方法, 为此国内外很多学者就此问题展开研究. 文献[1-5]对列车高速驶入隧道时车体的表面压力进行了较深入的研究; 王建宇等<sup>[6]</sup>对车厢内外压力的对应关系进行了现场实测, 结果表明, 当列车以 200 km/h 通过隧道时产生的压力变化即可对车厢内的乘坐舒适性产生不良影响. 李玉洁等<sup>[7]</sup>根据气动力学的原理, 以德国和法国动车组气密性评价指标为例, 介绍了评价车辆气密性的时间常数法和等效泄漏孔面积法的物理模型及数学模型, 并开发了相关程序, 较好地处理了列车高速通过隧道时车厢内压力的计算问题. 但我国高速铁路大多数是单洞双线结构形

式, 列车在隧道内交会时靠近线路中线一侧车体压力远远大于另外一侧.

笔者运用 Fluent 流体计算软件, 对高速列车分别以 200、250、300、350 km/h 速度在 2 800 m 隧道内等速交会进行了针对性研究, 得到了列车在隧道内交会条件下车体表面压力的变化过程; 然后采用文献[8]的压力计算方法, 考虑车体两侧压力不相等的特性, 进一步推导出了车体左右两侧压力不平衡时的车厢内压力变化公式, 对高速列车隧道等速交会条件下车厢内的压力进行了计算, 得到了车厢内压力的变化规律和不同速度条件下车厢内压力峰值等影响乘坐舒适性的关键指标, 最后以此对不同列车速度下车厢内的人体舒适度进行了讨论和评价.

### 1 Fluent 计算理论与方法

#### 1.1 控制方程

当列车速度  $v \leq 360$  km/h 时, 相应的马赫数小于 0.3, 列车绕流问题可以采用三维黏性不可压缩非定常流动来处理. 笔者采用 N-S 方程和标准湍流流动处理. 设  $\phi$  为流场某一参数, 则对于任一控制容积  $P$ , 流场控制方程统一写成<sup>[5]</sup>

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S [\rho \phi U - \Gamma_{\phi} \text{grad} \phi] dS = \int_V S_{\phi} dV, \quad (1)$$

式中: 当  $\phi$  为 1、 $U$ 、 $e$ 、 $k$  和  $\varepsilon$  时, 式(1) 分别表示连续方程、动量方程、能量方程、湍动能方程和湍动

收稿日期: 2016-10-28; 修订日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51478474)

作者简介: 张运良(1963—), 男, 湖南湘潭人, 中南大学副教授, 硕士, 主要从事隧道与地下工程研究, E-mail: 296450764@qq.com.



能耗散率  $\varepsilon$  方程;  $\Gamma_\phi$  和  $S_\phi$  分别为广义扩散系数及广义源项;  $\rho$  为空气密度.

为了封闭方程组,引入完全气体状态方程

$$P = \rho RT, \quad (2)$$

式中:  $P$  为压力;  $R$  为气体热力学常数;  $T$  为空气热力学温度.

## 1.2 车内压力计算公式

假设空气从列车车体外部渗入到车体内部的速度与车内外压差成正比,利用 Clapeyron 方程式得微分方程

$$\frac{dP}{dt} = k \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\sum_{j=1}^m S_{ij} P_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}} \right) - 2kP. \quad (3)$$

对式(3)积分,引入初始条件  $t = 0, P = P_0$  得车内瞬变压力的计算公式

$$P = e^{-2kt} \left[ \sum_{i=1}^2 k \sum_{j=1}^m \left( \frac{S_{ij} P_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}} \right) e^{2kt} dt + P_0 \right], \quad (4)$$

式中:  $J$  为某一节车厢某侧第  $j$  个测区;  $m$  为一节车厢某侧测区个数,文中头车与尾车  $m = 1$ ,中间车  $m = 7$ ;  $k$  为表征车体密封程度的常数,是车厢密封指数  $\tau$  的倒数;  $P_{1j}, P_{2j}$  分别为车厢外部左右侧第  $j$  个测区的压强,是时间的函数;  $P_0$  为初始时刻车厢内压力.

若在一次试验中车体表面每个压力测区的贴片面积相等,公式(4)可简化为:

$$P = e^{-2kt} \left[ \frac{k}{m\omega} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^m P_{ij} e^{2kt} dt + P_0 \right]. \quad (5)$$

密封指数  $\tau$  物理意义为将车内外的压差降低到初始值的 38% 所需的时间,用于衡量车辆密封程度,密封性分级见表 1<sup>[8]</sup>. 笔者取  $\tau = 10$  s, 则  $k = 0.1 \text{ s}^{-1}$ .

表 1 车辆的密封程度

Tab.1 Seal extent of train

车辆类型	密封指数 $\tau$
不密封车辆,例如用于支线	$\tau < 1$ s
最低密封性,例如 Eurcity	$1 \text{ s} \leq \tau < 6$ s
密封较好,例如德国 ICE1、法国 TGV	$6 \text{ s} \leq \tau < 10$ s
密封很好,例如德国 ICE3、Transrapid	$\tau \geq 10$ s

## 2 仿真建模

### 2.1 计算模型

笔者运用 Fluent 流体计算软件,采用滑移网格技术来模拟列车在隧道内等速交会. 计算流场划分区域如图 1 所示. 一区为隧道壁及出入口附近区域; 二区为观测列车周围及行驶方向前后的区域;

三区为运动列车周围及行驶方向前后的区域.



图 1 流场分区示意图

Fig.1 The schematic of flow field partition

列车设置为 3 节车厢编组,长度为 60 m,车型为 CRH380HL. 计算流场中 A、B、C、D 断面边界条件均设置为压力出口边界,即压力等于初始大气压;两列车车体表面均设置为无滑移壁面,E、F 区域交界面设置为动态附着边界条件;地面设置为无滑移壁面条件;在  $x$  方向列车运动速度分别设为 200、250、300、350 km/h, $y$ 、 $z$  方向速度为 0.

### 2.2 测区布置

图 2 为观测列车右侧(观测列车与运动列车的交会侧)的测区布置图,各个断面左侧的测区与相对应的右侧测区处于同一高度. 图中 cty 为头车右侧测区, cxy1、cxy2、cxy3、cxy4、cxy5、cxy6、cxy7 为中间车右侧测区, cwy 为尾车右侧测区.

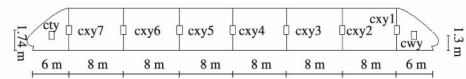


图 2 运动列车测区布置图

Fig.2 The layout of motion train surveyed area

### 2.3 网格划分

应用 ANSYS ICEM 划分结构化网格,共划分为 10 048 272 个单元,9 553 027 个节点,图 3 为车身和整体模型的网格划分示意图.



图 3 网格划分图

Fig.3 Meshing schematic

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 交会条件下车体表面压力特性

为研究列车运行过程中车体表面压力时程变化规律,笔者以列车 350 km/h 运行时头车和尾车交会侧测点(cty, cwy) 和非交会侧测点(ctz, cwz) 模型计算结果为例进行分析. 列车交会运行时,观测列车车厢外压力变化过程如图 4 所示.

根据图 4 分析可知: ①列车在进出隧道口及两车交会时,车体外部压力均会发生突变; ②列车交会之前,非交会侧测区压力大于交会侧,这是由于非交会侧测区比交会侧测区与隧道壁面间的距

离小;③列车交会过程中,交会侧测区压力明显大于非交会侧,头车最大差值为1 097.5 Pa,尾车最大差值为1 121.6 Pa;④列车的头车经过测点时,测点压力会突然增大,这是由于头车高速运行时,车头空气压缩,产生压缩波,使得测点附近压力发生急剧的升高;⑤列车的尾车经过测点时,测点压力会突然减小.这是由于列车高速运行时,车后空气来不及填充车体经过时所占据的空间,出现负压,产生膨胀波,使得测点附近压力急剧降低;⑥列车的车身经过测点时,测点的压力维持在某一稳定值附近;⑦尾车测区压力的最大值要大于头车,但是列车交会时压力幅值基本相等.

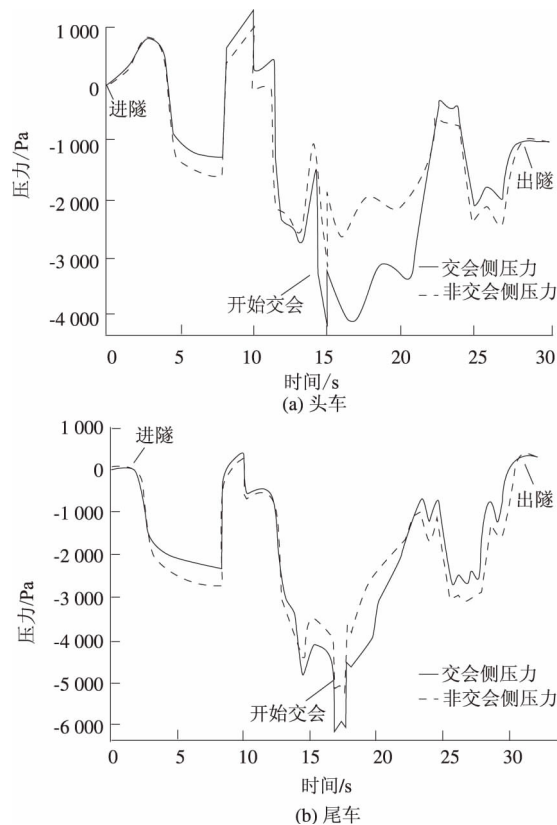


图4 车外压力时程图

Fig. 4 Time-history curves of train outside pressure

### 3.2 列车车内瞬变压力时程变化基本规律

为验证计算模型的正确性,笔者将计算结果与文献[6]中实测数据进行对比分析.车厢内部压力实测值结果与数值模型计算结果均为列车在线间距为5 m的双线轨道上以350 km/h等速会车时获得.车厢内部压力计算值与实测数据如图5所示.

从图5可知:车内瞬变压力计算值与实测值很接近,说明笔者的数值计算模型比较合理;列车交会时,车内瞬变压力的变化率会发生突变;车厢内部的密封性会缓解和滞后车内压力变化,使得车厢内部压力最大值并不是在车外压力峰值出现,并且车厢内压力波动幅值明显小于车外;头车

与尾车车内瞬变压力变化趋势基本相同,但尾车车内瞬变压力最大值要大于头车.

### 3.3 车内瞬变压力与速度关系

列车在不同速度运行条件下,通过计算得出车体内部瞬变压力幅值如图6所示.从图6分析可以得出,随着列车速度提高,车头、车尾及车身内瞬变压力幅值均呈非线性增长,压力幅值与速度接近二次方关系,如式(6)~式(8)所示.

头车车内压力:  $P = -0.044v^{1.842}$ ,  $R = 0.999$ ; (6)

尾车车内压力:  $P = -0.030v^{1.921}$ ,  $R = 0.998$ ; (7)

车身车内压力:  $P = -0.071v^{1.721}$ ,  $R = 0.999$ . (8)

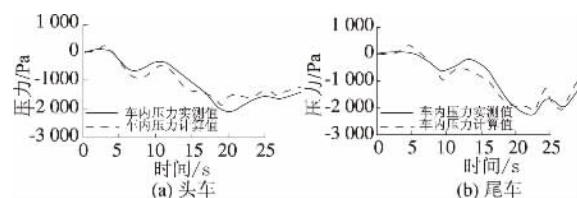


图5 车内压力计算与实测值

Fig. 5 Train interior pressure of calculation and measuring

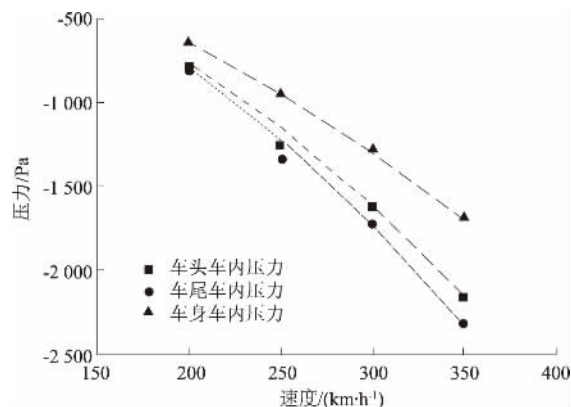


图6 不同速度车内压力幅值

Fig. 6 Inside pressure amplitude of different speeds

### 3.4 人体舒适度评价

目前,人体的舒适性评价有两种方法,第一种方法是以压力变化幅值和压力变化率指标进行评估;第二种方法是考核某个时间段内压力变化幅值,这一段时间是根据人耳对外界气压变化完成自我调整所需时间来确定.第二种方法不仅考虑了压力变化幅值和压力变化率,还考虑了人体的生理需求,所以被大多数国家采用,并制定了相应标准.我国人体舒适度评价标准为3 s内压力变化幅值不得超过1.25 kPa<sup>[8]</sup>.

笔者将计算出的车内瞬变压力时程值进行处理,找出任意3 s时间段内最大的压力差值,即为3 s内压力幅值.对不同速度条件下,头车、尾车及车身内3 s内压力幅值进行计算,并对乘客乘车舒适性做出评价,结果如表2所示.

表2 不同列车速度舒适性评价

Tab.2 The comfort evaluation of different train speed

列车速度/(km·h <sup>-1</sup> )	头车/(kP·s <sup>-1</sup> )	舒适性	车身/(kP·s <sup>-1</sup> )	舒适性	尾车/(kP·s <sup>-1</sup> )	舒适性
200	0.649	正常	0.458	正常	0.783	正常
250	0.886	正常	0.729	正常	0.923	正常
300	1.167	正常	1.055	正常	1.249	不舒适
350	1.369	不舒适	1.258	不舒适	1.524	不舒适

分析表2可以得出,列车速度为200、250 km/h时,3 s内压力幅值较小,车内瞬变压力对乘客乘车舒适性影响不大;当速度为300 km/h时,头车和车身3 s内压力幅值已经很接近人体舒适度临界值,尾车超过人体舒适度临界值,开始影响乘客的乘车舒适性;当列车速度为350 km/h时,整个列车内部3 s内压力幅值都超过人体的舒适度临界值,旅客会出现耳鸣现象,明显影响乘车舒适性。

#### 4 结论

(1) 车厢内部的密封性会缓解和滞后车内压力变化,使得车厢内部压力最大值并不是在车外压力峰值出现,并且车厢内压力波动幅值明显小于车外。

(2) 车内压力增长幅值与列车运行速度均接近二次方关系,车内压力幅值最大值出现在尾车。

(3) 当列车速度为300 km/h时,头车、车身3 s内压力幅值接近人体舒适度临界值,尾车超过人体舒适度临界值,开始影响乘客的乘车舒适性;当列车速度为350 km/h时,3 s内压力幅值已经超过人体的舒适度临界值,明显影响乘车舒适性。

#### 参考文献:

- [1] 费瑞振,彭立敏,施成华,等. 高速铁路双隧道列车风特性与人员安全分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2013,34(4):5-9.
- [2] 施成华,杨伟超,彭立敏,等. 高速铁路隧道列车风作用下接触网安全性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3652-3658.
- [3] 梅元贵,孙建成,许建林,等. 高速列车隧道隧道交会压力波研究[J]. 交通运输工程学报,2015,15(5):34-43.
- [4] 田红旗,许平,梁习锋,等. 列车交会压力波与运行速度的关系[J]. 中国铁道科学,2006,27(6):64-67.
- [5] 田红旗,贺德馨. 列车交会压力波三维数值的计算[J]. 铁道学报,2001,23(3):18-22.
- [6] 王建宇,吴剑,万晓燕. 车辆的密封性及瞬变压力向列车内传递规律[J]. 现代隧道技术,2009,46(3):17-21.
- [7] 李玉洁,梅元贵. 动车组车辆气密性指标的初步探讨[J]. 铁道机车车辆,2009,29(2):31-35.
- [8] 赵有明,马伟斌,程爱君,等. 高速铁路隧道气动效应[M]. 北京:中国铁道出版社,2012.

### The Human Comfort Degree Analysis of High Speed Trains Intersection at the Same Speed in the Tunnel

ZHANG Yunliang<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhicheng<sup>1</sup>, YANG Weichao<sup>1,2</sup>, DING Minghong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Center South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Laboratory of High Speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Based on the three-dimensional unsteady viscous incompressible Navier-Stokes equations and the standard turbulence model, using the Fluent computational fluid dynamics software, the situation that the high-speed train intersected in tunnel by the same speed was simulated. Two CRH380HL of same shape were arranged to intersect in the tunnel at four kinds of speed to simulate the changing process of aerodynamic forces, and the data of internal and external pressures of train body was collected. Using the formula to calculate the interior pressure of train body, this paper presented the passenger comfort evaluation of different train speeds.

**Key words:** high speed trains; human comfort degree; the internal pressure; intersection in the tunnel

# 基于集对分析的城市道路交通安全性评价

张劭楠, 钱晓东

(兰州交通大学 交通运输学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 传统评价方法对城市道路交通安全进行评价时, 只能对其中所包含的部分不确定信息进行处理, 而集对分析方法可以对不确定性因素引起的所有模糊性、不确定性信息做出统一的处理和描述, 本文采用集对分析方法对城市道路交通安全作出评价. 以城市道路交通系统为研究对象, 首先, 建立指标权重的集对分析模型, 对影响城市道路交通安全因素的权重进行分析; 其次, 将所评价城市的各实测指标值组成一个集合, 将城市道路评价标准所对应的指标值组成另外的一个集合, 使这两个集合组成一个集对进行评价. 由于评价标准等级不同, 所以构成的集对有多个. 通过计算这些集对联系度的大小, 选出联系度最大的等级作为此城市道路交通安全等级的最终评价结果. 通过实例分析验证该方法的可行性及现实价值.

**关键词:** 集对分析; 交通安全; 安全评价; 城市道路; 指标权重

**中图分类号:** X951 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.008

## 0 引言

集对分析方法是一种用联系数统一处理模糊、随机、中介和信息不完全所致不确定性问题的系统理论和方法<sup>[1]</sup>, 其特点是客观承认、系统描述、定量刻画、具体分析. 目前, 该方法已经在水质综合评价<sup>[2]</sup>、生态经济系统健康评价<sup>[3]</sup>、水资源系统评价<sup>[4]</sup>、粒子群优化算法<sup>[5]</sup>、公路评价<sup>[6]</sup>等方面得到了比较广泛的应用, 但是在城市道路交通安全评价中应用较少. 鉴于集对分析理论可以很好地解决系统中的随机性、模糊性和灰色性等不确定性问题, 而道路交通安全系统又恰好是一个包括随机性、模糊性、灰色性等不确定性的系统, 所以笔者采用集对分析方法对城市道路交通安全系统进行评价分析.

## 1 建立模型

### 1.1 集对分析的基本理论

集对分析的核心思想是把被研究的客观事物的确定性联系与不确定性联系作为一个确定不确

定系统来分析和处理<sup>[7]</sup>. 将两个事物的确定不确定关系从同、异、反3个方面进行刻画. 将两个集合的“同一性关系”、“差异性关系”、“对立性关系”用联系度 $\mu$ 来定量地刻画. 联系度 $\mu$ 的基本定义如下: 对于给定的两个集合组成的集 $H = (A, B)$ , 在具体研究问题的背景 $w$ 之下对集对 $H$ 的特性展开研究, 共得到 $N$ 个特性, 其中, 有 $S$ 个特性为集对 $H$ 中的两个集合所共有, 两个集合在其中的 $P$ 个特性上相互独立, 其余的 $F = N - S - P$ 个特性既不对立, 也不统一.

$$\mu = S/N + (F/N)i + (P/N)j. \quad (1)$$

式中:  $j$ 为对立度系数,  $j = -1$ ;  $i$ 为差异度系数,  $i \in [-1, 1]$ . 令 $S/N = a$ ,  $F/N = b$ ,  $P/N = c$ , 于是式(1)可以简化为

$$\mu = a + bi + cj. \quad (2)$$

式中:  $\mu$ 为联系度;  $a$ 为同一度;  $b$ 为差异度;  $c$ 为对立度. 将式(2)中的 $bi$ 拓展为 $bi = b_1i_1 + b_2i_2 + \dots$ , 可得多元联系度.

$$\mu = a + b_1i_1 + \dots + b_{k-2}i_{k-2} + cj. \quad (3)$$

式中:  $a + b_1 + b_2 + \dots + b_{k-2} + c = 1$ ;  $b_1, b_2, \dots, b_k$ 为

收稿日期: 2016-07-01; 修订日期: 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71461017)

作者简介: 张劭楠(1991—), 女, 甘肃兰州人, 兰州交通大学研究生, 主要从事道路交通安全研究, E-mail: 429159014@qq.com.

差异度分量;  $i_1, i_2, \dots, i_{k-2}$  为差异度分量系数.

## 1.2 城市道路交通安全评价的集对分析模型

影响城市道路交通安全的因素有路面状况、道路等级、道路线形、驾驶员能力与素质、车辆性能、交通环境、气象环境、安全管理、救援管理等<sup>[8]</sup>. 将这些影响因素构成一个评价指标体系, 评价指标体系中的各指标值组成一个集合, 再将此集合与给定的评价标准组成一个集对, 集对作为城市道路交通安全性的评价标准<sup>[9]</sup>.

### 1.2.1 指标权重的集对分析模型及其应用

首先设评委会由  $r$  个评委组成, 评价指标集  $X = \{x_k\} (k = 1, 2, \dots, n)$ . 每个评委将评价指标两两比较, 从而构成一个判断矩阵  $M_{zkl}$ , 表示第  $z$  个评委对两指标间相对重要性的看法. 取值采用 1-9 标度,

$$M_{zkl} = \begin{bmatrix} x_{z11} & \cdots & x_{z1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{znl} & \cdots & x_{znn} \end{bmatrix}, (z = 1, 2, \dots, r; k = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n). \quad (4)$$

对判断矩阵进行一致性检验, 不满足一致性的矩阵剔除. 各个评委对所有的指标进行评价时, 他们的意见极少会出现截然相反的情况. 所以我们采用  $\mu = a + bi$  的同异模型<sup>[10]</sup>.

利用联系度矩阵形式建立描述, 指标相对重要性关系的联系度模型  $\mu_{qkl}$ , 即:

$$\mu_{qkl} = A_{kl} + B_{kl}i = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{nl} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{nl} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix}i. \quad (5)$$

式中:  $A_{kl}$  为描述评委会对指标间的相对重要性的认识同一性矩阵;  $B_{kl}$  为描述评委会对各个指标之间的相对重要性的认识差异性矩阵.

$$a_{kl} = \begin{cases} \min\{x_{zkl}\}, x_{zkl} \geq 1 \\ \max\{x_{zkl}\}, x_{zkl} < 1 \end{cases} \\ (z = 1, 2, \dots, r; k = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, n); \\ b_{kl} = \begin{cases} |\max\{x_{zkl}\} - \min\{x_{zkl}\}|, x_{zkl} \geq 1 \\ (-1) |\max\{x_{zkl}\} - \min\{x_{zkl}\}|, x_{zkl} < 1 \end{cases}.$$

$a_{kl}$  为各个评委对指标间相对重要性所达成的共同认识. 当  $a_{kl} \geq 1$  时, 标度值  $\min\{x_{zkl}\}$  所对应的情况为最坏的情况, 所有  $x_k$  和  $x_l$  的关系都至少满

足  $\min\{x_{zkl}\}$  所对应的情况. 由此可知, 当  $a_{kl} < 1$  时, 因  $x_{zkl} = \frac{1}{x_{zlk}}$ , 所以,  $\max\{x_{zlk}\} = \frac{1}{\min\{x_{zkl}\}}$ ,  $a_{kl} = \frac{1}{a_{lk}}$ .

对同一性矩阵进行一致性检验, 以保证同一性矩阵的有效性. 通过采用相容矩阵法对此矩阵进行一致性处理, 这里令

$$d_{kl} = \sqrt[n]{\prod_{p=1}^n a_{kp} \cdot a_{pl}}. \quad (6)$$

得到确定权重向量的基础矩阵, 即相容矩阵为  $D_{kl} = (d_{kl})_{n \times n}$ .

这样得到指标权重

$$w_k = \frac{c_k}{\sum_{s=1}^n c_s} (k = 1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

其中:

$$c_s = \sqrt[n]{\sum_{l=1}^n d_{sl}}. \quad (8)$$

### 1.2.2 建立评价指标分级标准

等级评定标准应根据国家有关法律、标准、规范来确定. 对于可以量化的指标, 一般是以各种法规、规范和标准等要求的数据为依据; 对于一些定性指标, 很大程度上依靠主观判断, 评分标准是文字描述, 具体参考城市的实际条件.

笔者参考公安部 2012 年公布的《城市交通管理评价体系》, 建立了各因素分级评价标准, 如表 1 所示. 实测城市道路交通安全等级如表 2 所示.

### 1.2.3 基于集对分析的城市道路交通安全评价

第一步建立联系度. 将所评价城市的各实测指标值组成一个集合, 将城市道路评价标准所对应的指标值组成另外一个集合, 使这两个集合构成一个集对.  $N$  为评价指标的总个数;  $s$  为样本集合中处于级别 I 内的指标个数, 其对应的权重为  $u_1, u_2, \dots, u_s$ ;  $f$  为样本集合中处于级别 II 内的指标个数, 其对应的权重为  $t_1, t_2, \dots, t_f$ ;  $p$  为样本集合中处于级别 III 内的指标个数, 其对应的权重为  $v_1, v_2, \dots, v_p$ . 联系度  $\mu$  表达式<sup>[11]</sup>

$$\mu = \sum_{i=1}^s u_i + \sum_{k=1}^f t_k i_k + \sum_{j=1}^p v_j j. \quad (9)$$

其中:  $i_k$  表示实测指标值集合中权重为  $t_k$  的指标上所反映的两个集合的差异度系数.

第二步确定联系度系数  $i_k$  的值.  $s_{(1)}^k$  与  $s_{(2)}^k$  分别为 I 级和 II 级的限值.

$$\mu(x_k, b_1^k) = \frac{s_{(1)}^k s_{(2)}^k}{(s_{(1)}^k + s_{(2)}^k) x_k} +$$



$$\frac{(s_{(2)}^k - x_k)(x_k - s_{(1)}^k)}{(s_{(1)}^k + s_{(2)}^k)x_k} i + \frac{x_k}{s_{(1)}^k + s_{(2)}^k} j. \quad (10)$$

第三步计算联系度的数值.

$$\mu = \sum_{i=1}^s u_i + \sum_{k=1}^f t_k(a_k + b_k i + c_k j) + \sum_{j=1}^p v_j j. \quad (11)$$

由式(11)可知,当 $j = -1$ 时, $i$ 在 $[-1, 1]$ 内

表 1 各因素分级标准

Tab. 1 Various factors level standard

项目	优(80~100)	良(60~80)	差(60以下)
路面状况	$\geq 80$	$\geq 60$	$\geq 40$
道路等级	I	II	III
道路线形	道路线形圆顺平滑	直线和曲线的衔接较自然	有许多连续急弯的线形
驾驶员能力和素质	高	中	低
车辆性能	转向性能、制动性能、 行驶性能优秀	转向性能、制动性能、 行驶性能良好	转向性能、制动性能、 行驶性能差
交通环境	交通顺畅有序, 交通量不大	交通较拥挤, 交通量较大	交通拥挤严重 且秩序混乱,交通量大
气象环境	天气晴朗,能见度高	多云,有轻微的薄雾	有雨或雪,道路的 能见度非常低
安全管理	安全制度完善、规范、执行力强	安全制度较完善, 执行力不强	安全制度很不完善, 执行力差
救援管理	救援机制完善,出现问题 能在第一时间赶到现场	救援机制较完善, 执行力仍需提高	救援机制差,问题一旦出现, 不能得到及时的处理

表 2 道路交通安全实测等级表

Tab. 2 Actual level table

指标	路面状况	道路等级	道路线形	驾驶员能力 与素质	车辆性能	交通环境	气象环境	安全管理	救援管理
实际等级	75	70	80	85	80	55	90	85	82

取值,按照均分原则取 $i = 0$ ,最终得到联系度的取值.

## 2 实例分析

以兰州市某街道为例,使用集对分析方法对该街道安全性进行分析评价,对影响道路安全的主要因素进行分析,通过建立指标权重的集对分析模型,得出各影响因素的权重.将实测指标值组成一个集合 $A$ ;Ⅰ级标准指标值组成的集合为 $B_1$ ;Ⅱ级标准指标值组成的集合为 $B_2$ ;Ⅲ级标准指标值组成的集合为 $B_3$ .

### 2.1 指标权重的集对分析模型及其应用

笔者采用调查问卷的形式,邀请了3名研究交通安全方面的专家和3名该城市的交警对城市道路交通安全评价指标体系的指标进行两两比较.通过对这6张调查问卷的整理与计算,发现有2张调查问卷的计算结果不满足矩阵一致性检验,故将其剔除.根据剩下4张调查问卷的

结果构造判断矩阵,定义 $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$ 为4份调查问卷对评价指标两两打分所得到的矩阵.

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 5 & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 5 & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} \\ 2 & 4 & 1 & 2 & 3 & \frac{1}{2} & 4 & 2 & 5 \\ 3 & 3 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 & 6 & \frac{1}{3} \\ 6 & 3 & \frac{1}{3} & 3 & 1 & \frac{1}{4} & 5 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 4 & 1 & 4 & \frac{1}{4} & \frac{1}{6} \\ 5 & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ 2 & 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & 4 & 2 & 1 & \frac{1}{4} \\ 2 & 4 & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{2} & 6 & 3 & 4 & 1 \end{bmatrix};$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 1 \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 2 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 1 & 1 & 5 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{2} \\ 3 & 4 & \frac{1}{5} & 1 & 1 & \frac{1}{5} & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 1 & 2 & 5 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ 3 & \frac{1}{2} & 1 & 2 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad M_4 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ 3 & 1 & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} \\ 4 & 5 & 1 & 5 & 2 & 1 & 6 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} \\ 3 & 4 & \frac{1}{2} & 2 & 1 & \frac{1}{2} & 4 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 1 & 5 & 2 & 1 & 4 & \frac{1}{5} & \frac{1}{2} \\ 2 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & 3 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ 3 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{3} & 5 & 3 & 1 & \frac{1}{3} \\ 6 & 5 & \frac{1}{2} & 5 & \frac{1}{3} & 2 & 6 & 3 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据式(5)计算出各个专家对指标间的相对重要性的认识同一性矩阵  $A_{kl}$  和认识差异性矩阵  $B_{kl}$ .

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ 3 & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ 6 & 4 & 1 & 3 & 3 & \frac{1}{3} & 3 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{3} \\ 6 & 4 & \frac{1}{3} & 2 & 1 & \frac{1}{3} & 3 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 3 & 2 & 3 & 1 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 2 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 2 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ 4 & 4 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 3 & 4 & 1 & 1 \\ 4 & 4 & \frac{1}{2} & 3 & \frac{1}{2} & 3 & 4 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad A_{kl} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 \\ 3 & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} & 2 & 1 & 1 \\ 2 & 3 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & 1 & \frac{1}{2} \\ 3 & 3 & \frac{1}{2} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 3 & 3 & 2 \\ 2 & 2 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ 2 & \frac{1}{2} & 1 & 1 & \frac{1}{3} & 1 & 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{3} & 2 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & \frac{1}{2} & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_{kl} = \begin{bmatrix} 0 & -0.133 & -0.333 & 0 & -0.167 & -0.25 & -0.3 & -0.25 & -0.833 \\ 2 & 0 & -0.133 & -0.167 & -0.083 & -0.25 & 3 & -0.75 & -0.8 \\ 4 & 2 & 0 & 4 & 3 & -0.667 & 5 & 1 & 4 \\ 0 & 1 & -0.8 & 0 & -0.667 & -0.3 & -0.667 & 5 & -0.3 \\ 3 & 1 & -0.3 & 2 & 0 & -0.3 & 2 & 0 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 0 & 3 & -0.3 & -0.833 \\ 3 & -0.3 & -0.833 & 2 & -0.133 & -0.75 & 0 & -0.25 & -0.75 \\ 2 & 3 & -0.167 & -0.833 & 0 & 3 & 2 & 0 & -0.75 \\ 5 & 4 & -0.8 & 3 & -0.167 & 5 & 5 & 3 & 0 \end{bmatrix}.$$

其中:  $i \in [-1, 1]$ , 对  $i$  取中间值  $i = 0$ , 得到  $A_{kl} = A'_{kl}$ , 采用相容矩阵法对  $A'_{kl}$  进行一致性处理, 相

容矩阵为:

$$D_{kl} = \begin{bmatrix} 1 & 0.622 & 0.359 & 0.464 & 0.359 & 0.406 & 0.622 & 0.501 & 0.501 \\ 1.608 & 1 & 0.576 & 0.783 & 0.541 & 0.703 & 1 & 0.794 & 0.819 \\ 2.794 & 1.737 & 1 & 1.361 & 0.944 & 1.220 & 1.737 & 1.379 & 1.423 \\ 2.053 & 1.277 & 0.735 & 1 & 0.693 & 0.897 & 1.277 & 1.013 & 1.046 \\ 2.961 & 1.841 & 1.060 & 1.442 & 1 & 1.293 & 1.841 & 1.461 & 1.509 \\ 2.289 & 1.423 & 0.819 & 1.115 & 0.773 & 1 & 1.423 & 1.130 & 1.167 \\ 1.608 & 1 & 0.576 & 0.783 & 0.543 & 0.702 & 1 & 0.794 & 0.819 \\ 2.026 & 1.260 & 0.725 & 0.987 & 0.684 & 0.885 & 1.260 & 1 & 1.032 \\ 1.963 & 1.220 & 0.702 & 0.956 & 0.663 & 0.857 & 1.220 & 0.969 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据公式(7)可得指标权重为  $w_j = (0.054, 0.088, 0.153, 0.112, 0.162, 0.125, 0.088, 0.111, 0.107)$ . 由此可知, 车辆性能(0.162) > 道路路线(0.153) > 交通环境(0.125) > 驾驶员能力与素质(0.112) > 安全管理(0.111) > 救援管理(0.107). 车辆性能所占的权重最大, 因此要定期对车辆的性能进行检查, 关注车辆制动、转向等性能是否良好. 另外在进行道路规划时, 交通规划部门应该对道路进行综合考察以及合理的规划, 以减少交通事故.

## 2.2 城市道路安全性集对分析

根据各因素分级标准表实测城市道路交通安全等级, 如表2所示. 根据公式(5)得出

$$\mu(A, B_1) = 0.733 + 0.054i_1 + 0.088i_2 + 0.125j. \quad (12)$$

根据公式(6)和(7)得出

$$\mu(A, B_1) = 0.801 + 0.001i + 0.198j. \quad (13)$$

当  $i = 0, j = -1$  时,

$$\mu(A, B_1) = 0.603.$$

同理可得

$$\mu(A, B_2) = 0.082;$$

$$\mu(A, B_3) = -0.613.$$

通过对兰州某街道的道路交通实测指标值分别与等级 I 组成集合的联系度  $\mu(A, B_1)$ , 与等级 II 组成集合的联系度  $\mu(A, B_2)$ , 与等级 III 组成集合的联系度  $\mu(A, B_3)$  进行对比, 得出  $\mu(A, B_1) > \mu(A, B_2) > \mu(A, B_3)$ . 确定联系度最大的  $\mu(A, B_1)$  所对应的 I 级为此街道道路交通安全等级的最终评价结果, 由此可见该条道路的安全性良好, 安全等级是 I 级.

## 2.3 集对分析法与其他评价法的结果比较

### 2.3.1 集对分析法与模糊综合评价法的结果比较

将兰州道路交通安全评价指标分为 I 级(优秀)、II 级(良好)、III 级(差) 3 个等级, 依据兰州

道路交通安全评价指标现状评分结果, 构造每个评价指标相对于 3 个等级的隶属度矩阵  $R$ ,

$$R = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 \\ 0.9 & 0.1 & 0 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.8 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}.$$

为了验证城市道路安全集对分析模型的准确性, 设专家对于城市道路交通安全模糊综合评价模型中各层评判权重和城市道路交通安全集对分析模型中的权重相同. 最终得出兰州市该条道路交通安全评价分数为 80.785, 属于 I 级, 说明该条道路交通安全状况良好. 并且模糊综合评价结果与集对分析法评价结果安全等级相同.

### 2.3.2 集对分析法与灰色评价法<sup>[12-13]</sup>的结果比较

对该条道路的交通安全进行灰聚类评价,  $k = 1$  表示第一灰类—“好”, 说明交通安全状况良好;  $k = 2$  表示第二灰类—“中”, 说明交通安全状况中等;  $k = 3$  表示第三灰类—“差”, 说明交通安全状况较差. 计算可得该条道路的灰聚类序列  $\sigma_1 =$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ 0.931 & 0.663 & 0.427 \end{bmatrix}, \sigma_{1k} = \max\{\sigma_{11}, \sigma_{12},$$

$\sigma_{13}\} = 0.931 = \sigma_{11}. k = 1$ , 即该条道路的交通安全状况为第一灰类“好”. 灰色评价法评价结果与集对分析法评价结果相同. 通过这两种方法与集对分析方法评价结果的比较, 验证了该评价方法的有效性及其实用性.

结果表明, 该方法相比于模糊综合评价方法和灰色评价法, 其优越性在于可以把系统中的确定性和不确定性作为一个系统来进行处理, 以系统的角度来分析确定性和不确定性的相互作用,

并且计算简单.

### 3 结论

采用集对分析理论建立了城市道路交通安全性评价的集对分析模型. 此方法提出以联系度值的大小作为评价城市道路交通安全好坏的标准, 从根本上量化评价了城市道路交通安全性. 最后应用建立的城市道路交通安全性评价集对分析模型, 对兰州市某道路的交通安全进行评价, 得出的结论与实际的道路交通安全状况相吻合, 从而验证了该评价方法的实用性.

### 参考文献:

- [1] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 11 - 23.
- [2] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用 [J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257 - 262.
- [3] CHEN J F. Ecological and economic system health assessment based on fuzzy set pair analysis: a case study of northwest region, china [J]. Chinese journal of population resources & environment, 2012, 10(3): 107 - 115.
- [4] DU C Y, YU J J. Operating mechanism and set pair analysis model of a sustainable water resources system [J]. Frontiers of environmental science & engineering, 2015, 9(2): 288 - 297.
- [5] LIU J C, YAN S L, QI J X. A hybrid particle swarm optimization approach with neural network and set pair analysis for transmission network planning [J]. Journal of central south university of technology, 2008, 15(2 Supplement): 321 - 326.
- [6] 马士宾, 王选仓, 王朝辉, 等. 基于集对论的路面使用性能变权综合评价方法 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 31(6): 969 - 972.
- [7] 赵克勤. 集对分析中的不确定性理论 [J]. 大自然探索, 1995(4): 87 - 88.
- [8] 马辉. 路网环境下高速公路交通安全和运行效率保障技术研究 [D]. 西安: 长安大学汽车学院, 2013.
- [9] 李丽斌, 符铎砂. 基于集对分析的平面交叉口安全性评价 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(3): 542 - 544.
- [10] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006. 125 - 129.
- [11] 张薇薇. 基于集对分析和模糊层次分析法的城市系统评价方法 [D]. 合肥: 合肥工业大学土木与水利工程学院, 2007.
- [12] 牛会永. 基于灰色理论的城市道路交通安全评价研究 [J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(9): 92 - 95.
- [13] 蔺宏良, 余强. 基于模糊聚类的西安市区轿车行驶工况构建 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 96 - 99.

## Safety Evaluation of Urban Traffic Based on SPA

ZHANG Shaonan, QIAN Xiaodong

(School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The previous method in safety evaluation of urban traffic just proceed part of the uncertain information, while the SPA (Set Pair Analysis) theory was able to process and describe all the fuzzification and indeterminacy caused by uncertain factors uniformly. This paper adopted SPA to evaluate the safety of urban traffic. Taking urban traffic system as the object, the evaluation was conducted in the following two aspects. Firstly, it was to build the SPA model of index weight and to analyze the weight of influential factors; Secondly, it was to group the actual targeted value and the standard targeted value into two sets, which were consequently formed as one set pair. Due to the different evaluation criteria, there might be several set pairs. By calculating the connection degrees of those set pairs, the grade with the highest connection degree would be chosen as the final evaluation result. The feasibility and actual value of this method were verified by instance analysis.

**Key words:** set pair analysis; traffic safety; safety evaluation; urban road; index weight

文章编号: 1671-6833(2017)02-0036-05

## 基于 ARMA 和卡尔曼滤波的短时交通预测

杨高飞<sup>1</sup>, 徐睿<sup>1</sup>, 秦鸣<sup>1</sup>, 郑凯俐<sup>2</sup>, 张兵<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074)

**摘 要:** 交通预测是智能交通运输系统研究中的一个重要组成部分. 为了有效地获取短时交通流量预测数据, 保障交叉口畅通, 依据道路情况的不确定性以及交通流的非线性变化, 应用 ARMA 模型及卡尔曼滤波模型通过预测结果误差大小来组合预测路段短时交通流量. 实例表明, 组合模型预测结果达到较高的预测精度, 预测误差降低到了 5.79%, 并且比单一模型预测精度要高. 通过该组合模型可以更准确地预测短时交通流量, 同时也可以为交叉口信号配时提供必要的理论依据和技术指导, 对减小交通延误, 提高道路服务水平有一定的应用价值.

**关键词:** 智能交通; 短时交通预测; ARMA; 卡尔曼滤波; 预测误差

**中图分类号:** U491 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.009

### 0 引言

道路交通流量分析在智能交通高速发展的今天显得尤为重要. 短时交通流量预测<sup>[1]</sup>是交通流分析中的重要组成部分, 对减小交通延误, 提高道路服务水平有着非常重要的现实意义. 短时交通流研究一直是围绕如何提高预测精度来开展<sup>[2]</sup>. 短时交通流预测的方法主要有非参数回归法<sup>[3]</sup>、灰色理论<sup>[4]</sup>、神经网络<sup>[5]</sup>、时间序列<sup>[6]</sup>、小波算法<sup>[7]</sup>、贝叶斯网络模型<sup>[8]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[9]</sup>, 但是没有一种绝对好的模型, 而且单一模型预测的缺点也十分明显. 葛志鹏等<sup>[2]</sup>应用不同固定权重组合时间序列模型和 GSVMR 模型, 通过对比选出比较好的权重方案; 沈国江等<sup>[10]</sup>通过引入惯性因子来组合 Kalman 滤波模型和 RBF 神经网络模型; 邱世崇等<sup>[11]</sup>引入最小加权融合算法组合 ARIMA 模型和小波神经网络模型. 曾庆山等<sup>[12]</sup>运用 EMD 和组合模型来进行短时交通组合. 文献[13]利用遗传优化的神经网络方法进行非线性短期交通量预测. 文献[14]将线性回归、滑动回归和神经网络预测模型的预测效果进行对比, 得出神经网络在应用贝叶斯方法的模型中预测效果比回归模型更好的结论, 但是遗传算法处理规模小, 难以处理非线性约束; 神经网络模型收敛速度慢, 对样

本依赖性较大; 多元线性回归模型忽略了交通流的非线性特点. 为了避免这些缺点, 笔者通过应用时间序列中的 ARMA 模型和卡尔曼滤波模型组合来预测, 这样既可以解决 ARMA 在复杂道路情况下预测精度不高的缺点, 也可以弥补卡尔曼滤波预测无法适应交通流非线性变化的缺点, 这一组合模型可以使两种单一模型的优缺点互补, 提高预测精度.

### 1 ARMA 模型预测

ARMA 模型 (auto regressive moving average model) 是自回归滑动平均模型, 它是一种精确度较高的短时交通预测模型.

#### 1.1 ARMA 时间序列的定义

设  $\{X_t, t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$  是零均值的平稳序列, 模型如下:

$$X_t - \sum_{b=1}^p \varphi_b X_{t-b} = \varepsilon_t - \sum_{c=1}^q \theta_c \varepsilon_{t-c}, \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_t$  是零均值、方差  $\sigma_\varepsilon^2$  的平稳白噪声, 则称  $X_t$  是阶数为  $p, q$  的自回归滑动平均序列, 简记成 ARMA( $p, q$ ) 序列. 当  $q = 0$  时, 它是 AR( $p$ ) 序列; 当  $p = 0$  时, 它是 MA( $q$ ) 序列.

应用算子多项式  $\varphi(B), \theta(B)$ , 式(1)可以写成  $\varphi(B)X_t = \theta(B)\varepsilon_t$ .

收稿日期: 2016-09-10; 修订日期: 2016-12-01

基金项目: 江西省青年科学基金计划资助项目(20151BAB216024); 江西省交通运输厅科技资助项目(2014R0011)

通讯作者: 秦鸣(1956—), 女, 河北唐山人, 华东交通大学教授, 硕士生导师, 主要从事交通运输规划与管理、智能交通研究, E-mail: 330937804@qq.com.



## 1.2 ARMA 序列的相关特性

ARMA 包括自相关函数、偏相关函数,这些特性对序列建模起着主要作用.模型的类别可以用拖尾性和截尾性来判断.

## 1.3 ARMA 时间序列的建模与预报

首先要判断模型是 AR( $p$ )、MA( $q$ )、ARMA( $p, q$ ) 模型中的哪一种,并估计阶数  $p, q$ ,即模型的定阶问题.紧接着就要对模型参数  $\varphi = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p)^T$  及  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)^T$  进行计算并对模型进行检验.若这些检验可以通过,则 ARMA 的建模完成.

## 1.4 ARMA 时间序列的预报

根据  $\{X_k, X_{k-1}, \dots\}$  的取值对未来  $k+m$  时刻的随机变量  $X_{k+m}$  ( $m > 0$ ) 对时间序列的  $m$  步预报做出估计.估计量记作  $\hat{X}_k(m)$ ,即  $X_k, X_{k-1}, \dots$  的线性组合.对于 ARMA( $p, q$ ),有

$$\hat{X}_k(m) = \sum_{a=1}^p \varphi_a \hat{X}_k(m-a), m > p. \quad (2)$$

因此,如果知道  $\hat{X}_k(1), \hat{X}_k(2), \dots, \hat{X}_k(p)$ ,就可以得出  $\hat{X}_k(m)$ ,  $m > p$ .

ARMA 预测的主要步骤

- (1) 求交通量数据序列的自相关函数和偏相关函数;
- (2) 指定模型的结构;
- (3) 估计模型中的参数;
- (4) 应对各种可能的  $p, q$  值计算其 AIC,确定真阶  $p$  和  $q$ ;
- (5) 用  $\chi^2$  检验法对模型进行检验;
- (6) 计算预测值;
- (7) 计算平均误差、平均绝对误差.

## 2 卡尔曼模型预测

卡尔曼滤波模型是一种线性回归模型,该模型通过输入、输出观测数据,对系统状态进行最优估计.

如果被估计状态  $X_k$  和对  $X_k$  的观测值  $Z_k$  满足

$$\begin{cases} X_k = \alpha X_{k-1} + \beta X_{k-1} \\ Z_k = HX_k + V_k \end{cases} \quad (3)$$

系统过程噪声  $W_k$  和观测噪声  $V_k$  满足

$$\begin{cases} E[X_k] = 0 \text{ 或 } E[W_k] = \mu_w \\ E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj} \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{和 } \begin{cases} E[V_k] = 0 \text{ 或 } E[V_k] = \mu_v \\ E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj} \end{cases} \quad (5)$$

$Q_k$  非负定,  $R_k$  正定,则  $X_k$  的估计  $\hat{X}_k$  可按下述方程进一步预测误差方差阵:

$$P_{k,k-1} = \alpha_{k,k-1} P_{k-1} \alpha_{k,k-1}^T + \beta_{k,k-1} Q_{k-1} \beta_{k,k-1}^T, \quad (6)$$

估计误差方差阵

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} [I - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T = [I - K_k H_k] P_{k,k-1}, \quad (7)$$

式中:  $\alpha$  为  $n \times n$  维非奇异状态一步转移矩阵;  $\beta$  为  $n \times p$  维系统过程噪声输入矩阵;  $H_k$  为  $m \times n$  维观测矩阵;  $W_k$  为  $p$  维随机过程噪声序列;  $K_k$  为  $k$  时刻的卡尔曼增益.

卡尔曼滤波预测的主要步骤

- (1) 均方差阵赋初值;
- (2) 状态矩阵赋初值;
- (3) 记录状态误差协方差矩阵;
- (4) 表示状态矢量的估计值;
- (5) 得到模拟的实际状态值;
- (6) 计算误差、绝对平均误差.

## 3 应用实例

笔者给定的数据是南昌市八一大桥某天 24 h 中每隔 15 min 的交通量.

### 3.1 ARMA 方法预测

利用 Matlab 软件,画出原始数据的自相关函数曲线图、偏相关函数曲线如图 1、图 2 所示.

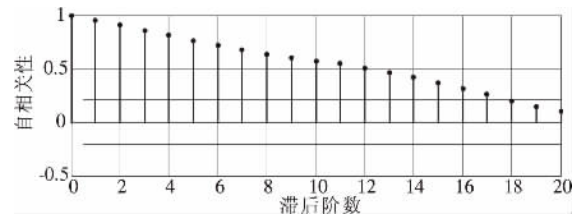


图1 自相关函数曲线图

Fig.1 Autocorrelation function curve

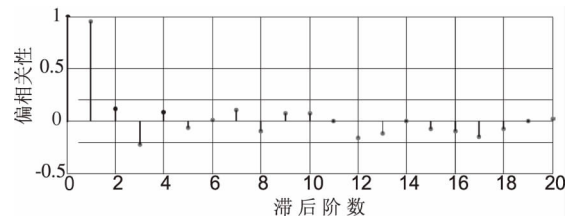


图2 偏相关函数曲线图

Fig.2 Partial correlation function curve

根据 AIC 准则确定  $p, q$ . 当  $p = 2, q = 1$  时, AIC 最小, 为 1 010.580 583, 所以 ARMA 模型的最优模型为 ARMA(2,1).

实际流量、预测流量图和误差图如图 3. 通过计算得出 ARMA 模型预测八一大桥短时交通流量平均误差为 3.29%, 平均绝对误差为 7.89%.

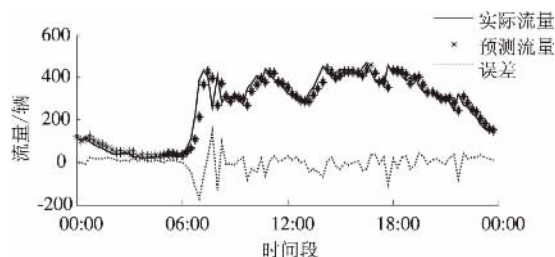


图3 实际流量、预测流量及误差图

Fig. 3 Actual flow, prediction flow and deviation map

### 3.2 卡尔曼滤波方法预测

卡尔曼滤波方法所得预测流量、实际流量和误差如图4所示. 通过计算得出卡尔曼滤波模型预测八一大桥短时交通流量平均误差为3.68%, 平均绝对误差为8.71%.

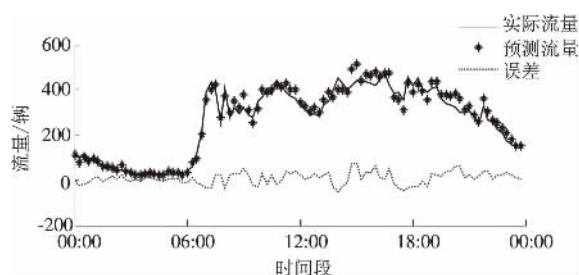


图4 实际流量、预测流量及误差图

Fig. 4 Actual flow, prediction flow and deviation map

## 4 模型组合

应用 ARMA 和卡尔曼滤波预测都会有一定的误差,为减小预测误差,可以将上述两种方法预测结果中误差小的结果组成一列数作为新的预测结果.

设 ARMA 预测结果为  $A_1, A_2, \dots, A_{i-2}, A_{i-1}$  ( $i \geq 4$ ),  $i$  为当前时刻,预测误差分别为  $a_1, a_2, \dots, a_{i-2}, a_{i-1}$ ; 且设  $c_i = \frac{a_{i-3} + a_{i-2} + a_{i-1}}{3}$  ( $i \geq 4$ ).

同理设卡尔曼滤波预测结果为  $B_1, B_2, \dots, B_{i-2}, B_{i-1}$  ( $i \geq 4$ ), 误差分别为  $b_1, b_2, \dots, b_{i-2}, b_{i-1}$  ( $i \geq 4$ ); 且设

$$d_i = \frac{b_{i-3} + b_{i-2} + b_{i-1}}{3} (i \geq 4).$$

ARMA 预测所占比重:  $\lambda_i = \frac{1/c_i}{1/c_i + 1/d_i} (i \geq 4)$ .

卡尔曼滤波所占比重:  $\beta_i = \frac{1/d_i}{1/c_i + 1/d_i} (i \geq 4)$ .

则最后预测结果:

$S_i = \lambda_i A_i + \beta_i B_i = \lambda_i A_i + (1 - \lambda_i) B_i, (i \geq 4)$ .  
预测结果如表1所示.

表1 原始数据及模型预测结果

Tab. 1 Original date and model prediction result 辆

原始调 查数据	ARMA 模型	Kalman 滤波	组合 模型	原始调 查数据	ARMA 模型	Kalman 滤波	组合 模型
118	—	—	—	324	369	351	334
103	—	—	—	316	354	325	332
119	—	—	—	289	325	306	293
95	111	105	101	295	310	303	297
86	118	99	94	284	291	291	287
74	105	86	85	331	288	316	315
68	88	68	72	352	285	355	348
52	82	64	58	393	318	360	372
43	72	59	55	448	349	391	387
38	61	47	43	429	379	418	411
44	49	54	52	402	436	405	408
39	46	45	42	417	425	425	425
40	49	42	41	437	395	440	425
21	47	29	33	432	407	431	419
28	45	23	26	437	428	438	430
16	31	29	26	429	425	433	424
24	32	30	29	415	426	430	427
25	27	28	27	445	422	422	443
23	28	29	25	466	408	450	457
27	34	24	30	423	431	465	439
36	29	37	38	385	456	389	402
31	34	38	35	389	420	369	399
28	42	34	29	356	380	352	362
31	39	26	33	458	380	394	399
41	35	35	37	416	356	407	415
64	38	58	56	452	432	424	439
111	89	85	99	405	424	412	408
225	194	178	185	386	429	382	383
387	366	329	377	403	412	405	405
432	413	392	423	412	372	414	413
399	367	424	412	360	398	387	385
252	226	304	262	336	402	369	357
406	394	351	386	334	362	348	342
278	268	313	288	320	329	343	329
319	368	339	328	301	331	324	305
294	311	307	303	301	317	302	302
322	288	323	317	304	299	303	307
289	311	304	312	279	296	295	295
276	302	285	289	244	301	267	281

续表 1

原始调 查数据	ARMA 模型	Kalman 滤波	组合 模型	原始调 查数据	ARMA 模型	Kalman 滤波	组合 模型
347	300	297	332	324	279	326	315
368	266	375	373	266	245	306	286
407	337	379	399	261	308	271	301
377	362	397	381	228	278	251	264
438	394	407	405	211	250	235	222
415	378	414	423	174	237	206	198
387	417	424	409	159	207	183	173
371	418	384	389	144	183	156	149
361	377	378	367	142	158	150	138

通过计算可得八一大桥短时交通流量平均误差为 1.24%, 平均绝对误差为 5.79%。

为验证本方法研究成果优于当前其他短时交通预测方法的研究成果,应用文献[9]中的模糊卡尔曼滤波方法进行预测,笔者方法预测结果与文献[9]方法预测结果如图5所示。

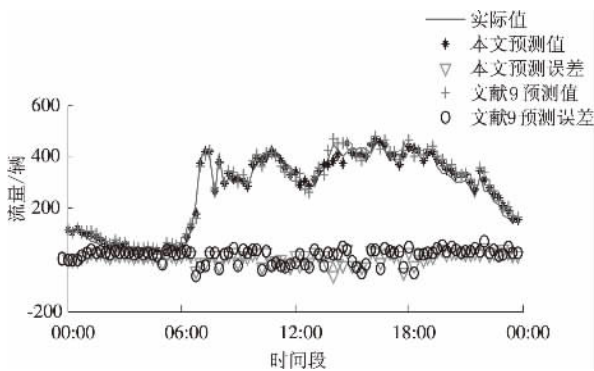


图5 预测流量、预测误差对比图

Fig.5 Prediction flow and deviation comparison map

运用 SPSS 软件对笔者方法和文献[9]方法预测结果进行参数检验,可得显著性  $\text{sig.} = 0$ ,可知笔者方法和文献[9]方法的预测结果不符合近似正态分布.因此可运用 SPSS 软件对预测结果进行非参数检验,然后根据输出结果可知文献[9]方法与笔者方法预测结果差异的中位数为 0,显著性  $\text{sig.} = 0.001 < 0.05$ ,故笔者方法比文献[9]方法有显著差异性.同时笔者方法预测结果平均误差为 1.24%,平均绝对误差为 5.79%.文献[9]中的模糊卡尔曼滤波方法预测结果平均误差为 1.83%,平均绝对误差为 7.57%.显然笔者方法的预测效果要好于文献[9].

## 5 结论

笔者通过 ARMA 和卡尔曼滤波方法来进行

短时交通量预测,ARMA 预测误差为 7.89%,卡尔曼滤波预测误差为 8.71%,为减小预测误差建立组合模型  $S_i = \lambda_i A_i + \beta_i A_i$ ,通过验证该模型预测误差为 5.79%,提高了预测精度。

该模型可以更准确的预测短时交通流量,同时也可以为交叉口信号配时提供必要的依据.对减小交通延误,提高道路服务水平有重要的现实应用价值。

## 参考文献:

- [1] 刘静,关伟. 交通流预测方法综述[J]. 公路交通科技,2004,21(3): 82-85.
- [2] 葛志鹏,李锐,张健. 基于时间序列与 GSVMR 模型的短时交通量组合预测[J]. 长安大学学报(自然科学版),2015,35(增刊): 222-225,234.
- [3] 梁秀霞,胡姗姗,李伟斌. 非参数回归算法在短时交通流预测中的应用[J]. 自动化仪表,2012,33(4): 21-23,26.
- [4] 王凤琴,柯亨进. 灰色系统的交通流量短期预测[J]. 湖北师范学院学报(自然科学版),2015,35(1): 20-24.
- [5] 刘洋,马寿峰. 基于聚类分析的非参数回归短时交通流预测方法[J]. 信息与安全,2013,31(2): 27-31.
- [6] 杨兆升,邴其春,周熙阳. 基于时间序列相似性搜索的交通流短时预测方法[J]. 交通信息与安全,2014,32(6): 22-26,43.
- [7] 王晓原,吴磊,张开旺. 非参数小波算法的交通流预测方法[J]. 系统工程,2005,23(10): 44-47.
- [8] 王建,邓卫,赵金宝. 基于改进型贝叶斯组合模型的短时交通流量预测[J]. 东南大学学报(自然科学版),2015,35(1): 20-24.
- [9] 郭海峰,方良君,俞立. 基于模糊卡尔曼滤波的短时交通流量预测方法[J]. 浙江工业大学学报,2013,41(2): 218-221.
- [10] 沈国江,朱芸,钱晓杰. 短时交通流组合模型预测[J]. 南京理工大学学报,2014,38(2): 246-251.
- [11] 邱世崇,陆百川,马庆禄. 基于时空特性分析和数据融合的交通流预测[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2015,37(2): 156-160,178.
- [12] 曾庆山,张晓楠. 基于 EMD 和组合模型的太阳黑子时间序列预测[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(3): 78-81.
- [13] VLAHOGINNI E I. Prediction of non-recurrent short-term traffic patterns using genetically optimized probabilistic neural networks[J]. Operational research, 2007,7(2): 171-184.
- [14] TERASVIRTA T. Correspondence[J]. International journal of forecasting, 2005,21(4): 781-783.

## Short-term Traffic Volume Forecasting Based on ARMA and Kalman Filter

YANG Gao<sup>1</sup>, XU Rui<sup>1</sup>, QIN Ming<sup>1</sup>, ZHENG Kaili<sup>2</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The traffic prediction was an important component in the intelligent transportation system. The effective short-term traffic flow prediction was conducive to ensure the intersection unimpeded and reduce the traffic delay. According to the uncertainty of road conditions and the nonlinear change of traffic flow, the ARMA model and kalman filter mode was combined through the error magnitude of predicting results to predict the short-term traffic flow in the road. The example indicated that the combined model could achieve the higher prediction precision and made the prediction accuracy up to 5.79 percent. Besides, the combined model had an advantage over the single model in the forecasting accuracy. The combined model can not only predict the short-term traffic flow more accurately, but provided the necessary theoretical basis and technical guidance for the intersection signal timing. Besides, it had definitely application value in reducing the traffic delay and improving the road service level.

**Key words:** intelligent transportation; short-term traffic volume forecasting; ARMA; Kalman filter; prediction error

(上接第 16 页)

- [9] LIANG Z H, HUANG X F, PAN L, et al. A design and implementation of data access control in digital campus systems using the RBAC method [C] // Proc. of the First IEEE International Symposium on Information Technologies and Applications in Education. Piscataway: IEEE, 2007: 274 - 277.
- [10] ZHANG D M, LU Z X. Strategy design of permission management and data access scope control in provincial centralized project [C] // Proc. of International Forum on Computer Science-Technology and Applications. Piscataway: IEEE, 2009: 396 - 398.
- [11] 王莉娟, 郭培辉. PLM 系统中数据权限控制研究 [J]. 电子设计工程, 2011, 19(3): 131 - 133.
- [12] 龚艺. 一种基于 RBAC 的数据权限模型的设计与实现 [J]. 网络安全技术与应用, 2012(8): 42 - 44.
- [13] 刘云峰, 欧阳荣彬, 来天平, 等. 面向职责的细粒度委托授权机制及其应用研究 [J]. 太原理工大学学报, 2012, 43(专辑): 150 - 154.

## Implementation of Parameter Model of PRBAC Based on Attribute Rules

OUYANG Rongbin, LIU Yunfeng, LONG Xinzhen

(Computer Center, Peking University, Beijing, 100871)

**Abstract:** PRBAC was always implemented to achieve fine-grained access control. This paper analyzed recent research on data permissions, summarized related experiences, and presented a parameter model of PRBAC based on attribute rules. It presented the model's design, including the rule's formal form and its components. It also described a general implementation scheme, including the rules' specification, rule's application time choice, algorithm of the rule's validation, and some key techniques of the implementation. With the practice on IAAA at PKU, it showed that the model was flexible and the rules' setting was convenient. This paper also pointed out that rules' conflict checking should be implemented in future.

**Key words:** access control; data permissions; PRBAC; attribute rules; parameter model

## 改进蚁群算法在交通分配模型中的应用

常玉林<sup>1,2</sup>, 汪小淳<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>1</sup>

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 东南大学 城市智能交通江苏省重点实验室, 江苏 南京 211189)

**摘 要:** 为了更加准确快速地搜索到最优路径, 通过分析车流经过信控交叉口的到达和驶离状况, 提出一种考虑交叉口信控延误的改进蚁群算法模型. 首先, 用交叉口的信控延误和路段行走时间对基本蚁群算法的信息素更新方程进行改进, 建立全新的信息素更新模型; 其次, 通过应用改进后蚁群算法对路网各路段的车流量进行分批分配, 设计考虑交叉口延误的路段增量分配流程; 最后, 基于 java 程序语言, 对路网的流量分配进行仿真, 并且和基本蚁群算法对路网运行质量进行对比分析. 结果表明, 改进后的蚁群算法能够降低路网中路段和交叉口使用率, 具有良好的寻优性, 并能有效均衡路网流量和缓解交叉口的通行压力.

**关键词:** 交通分配; 交叉口延误; 蚁群算法; 最优路径

**中图分类号:** U491.1<sup>+</sup>23

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.010

### 0 引言

交通分配作为四阶段法最后一步以及最重要一步, 通过精确计算把各个小区发生与吸引量合理地分配到实际交通路网. 蚁群算法的设计理念来源于自然界蚁群里蚂蚁个体的寻食行为, 是意大利学者 Dorigo 首先提出并且不断改进而得到的新型优化算法<sup>[1]</sup>. 与传统的数学规划原理相比, 该优化算法具有很好的稳定性, 拥有分布计算、反馈信息以及启发式搜索的特性, 并且能够动态响应和反馈路径选择过程中的外界影响. 传统蚁群算法的原理是通过遗留在路径上的信息素浓度选择最优路径, 表现形式是路径长度越短, 遗留的浓度越大. 以往的改进蚁群算法统一表现在信息素更新形式, 重要的突破是以行走时间代替距离要素作为信息素更新要素的改进模型<sup>[2-4]</sup>. 文献[5]提出改进的蚁群系统算法求解可装卸货物的车辆路径问题, 该算法通过使用多路径搜索原则, 搜索不同路径上的客户, 增大了搜索范围. 文献[6]从路径转移规则和局部搜索的改进方程出发, 提出一种能加快最优解收敛速度的改进蚁群算法, 对带容量约束的弧路径问题进行求解. 文献[7]通过使用 AS 模型对 30 个节点的 TSP 问题进行

研究, 总结了蚁群算法最优参数的设置方法. 宋方<sup>[8]</sup>通过在状态转移规则中加入扰动因子, 改进全局更新规则, 并将信息素更新算子引入基本蚁群算法, 提出一种改进蚁群算法求解城市道路权值仿真模型.

连续车流途经交叉口时的信控延误势必会影响信息素的更新, 最终影响交通分配的结果. 因此, 笔者将车辆的信控延误加入信息素更新要素中, 通过分析车流经过信号配时交叉口的到达和驶离状况, 综合考虑交叉口延误时间和路段行程时间, 提出了改进的、更加符合实际情况的、考虑交叉口延误的蚁群算法模型. 但是由于交叉口延误的影响因素非常多, 所以笔者在考虑交叉口延误时也做了一定的假设与妥协.

### 1 蚁群算法

#### 1.1 蚁群算法的基本原理

蚁群算法根据的原理是: 蚂蚁在寻找食物的过程当中, 会相互协同工作, 这中间起着关键作用的是蚂蚁自身分泌的一种激素——信息素<sup>[8-9]</sup>. 蚂蚁在寻找路径时, 总是倾向于选择信息素浓度大的路径作为下一个行进方向, 即信息素遗留越多、浓度越大的路径越容易被选中, 被选中的路径

收稿日期: 2016-05-01; 修订日期: 2016-09-02

**基金项目:** 江苏省高校自然科学基金资助项目(13KJB580003); 江苏省城市智能交通重点实验室开放研究经费资助项目(JTKF2014004); 江苏大学高级专业人才科研启动基金资助项目(12JDG056)

**作者简介:** 常玉林(1963—), 男, 江苏大学教授, 博士, 主要从事交通运输规划与系统优化技术研究, E-mail: ylchang@ujs.edu.cn.



又会增加其浓度,这就是所谓的正反馈机制.这种机制的一个好处就是蚂蚁对整个路径上的全部信息素的反馈要求降低,仅仅通过局部信息素的信息反馈就可以找出最短路径.整个蚁群的行为也会随外界环境的改变而改变,当有阻碍物出现在蚂蚁的行动路径上时,蚂蚁会快速地做出改变,并且重新找到另一条在当前环境下的最优路径.

## 1.2 基本模型

以经典 TSP(旅行商问题)作为例子,来阐述蚁群算法的相关模型.旅行商问题的实质是:已知所有目标地点的总数为  $n$ ,并且已知任意两个目标城市之间的距离<sup>[10-11]</sup>.旅行商以任选一点作为起点出发,要求确定一条最短路径,并且这条最短路径只经过每个旅行地一次.

在最初  $t=0$  时刻,各条路的信息素浓度都为常数,设为  $\tau_{ij}(t_0)=C$ ,式中  $\tau_{ij}(t_0)$  表示  $t_0$  时刻路段  $(i,j)$  上的信息素浓度,  $C$  为常数.

在进行路径选择时,  $m$  只蚂蚁根据每条路径上留有的信息素浓度和自己的判断决定转移方向,在  $t$  时刻蚂蚁的转移概率

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & s \in allowed \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\eta_{ij}$  为能见度因数,以两点之间的距离作为变量,距离越大  $\eta_{ij}$  越小;  $\alpha$  为路径上的信息素总量对蚂蚁行为的影响程度;  $\beta$  为路径长度对蚂蚁行为的影响程度;  $allowed_k = \{C - tabu_k\}$ , 表示除掉禁忌列表剩下的城市,即可以被选择的的城市集合.人工蚂蚁具有真实蚂蚁不具备的特点,在进行选择时会增加一个禁忌列表.所有在本次循环中被选择过的城市都会被记录到禁忌列表里,避免被反复选择,禁忌列表里的城市会在循环结束后被释放,在下一次循环开始时,蚂蚁又能够从所有城市中进行选择.

经过  $n$  个时刻,当  $m$  只蚂蚁遍历完所有城市后,各条路径上的信息素根据下式进行调整:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+1). \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1). \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为信息素随着时间推移的挥发程度,  $\rho \in (0, 1)$ ;  $\Delta \tau_{ij}^k$  为蚂蚁  $k$  本次循环遗留在路径  $(i, j)$  上的信息素总量;  $\Delta \tau_{ij}$  是一次循环完成后路径  $(i, j)$  上的信息素增量总量.

文献[12]针对  $\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1)$  提出了3种不同的模型:蚁密系统(ant-density system)、蚁量系统

(ant-quantity system)、蚁环系统(ant-cycle system),最根本的区别在于  $\Delta \tau_{ij}^k$ .前两个系统模型中使用的信息是局部信息,属于局部更新;而蚁环系统中使用的是全局信息,属于全局更新.由于蚁环系统的更新策略更加符合蚂蚁的真实行为,并且其性能在试验中已经得到了验证,因此通常使用蚁环系统的数学模型作为基本模型<sup>[13]</sup>:

$$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁经过路径}(i, j) \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Q$  为每只蚂蚁在这次循环中释放的信息素量,是常数;  $L_k$  表示蚂蚁  $k$  在此次循环中经过的所有路段加起来组成的路径长度.

## 2 改进蚁群算法

笔者在传统蚁群算法模型的基础上,再加上交叉口延误,建立考虑交叉口延误的蚁群算法模型.引入交叉口延误的蚁群算法模型信息素更新方程为:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \frac{Q}{T}. \quad (5)$$

式中:  $Q$  为信息素常数;  $T$  为路段总花费时间,是路段行走时间和车辆在交叉口的信控延误之和,即  $T = t_{ij}(q_{ij}) + d_{ij}(q_{ij})$ .

信息素更新改进模型如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t+1). \quad (6)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1). \quad (7)$$

其中信息素更新方程为:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \frac{Q}{t_{ij}(q_{ij}) + d_{ij}(q_{ij})}; \quad (8)$$

$$t_{ij}(q_{ij}) = t_{ij}(0) \left[ 1 + \alpha \left( \frac{q_{ij}}{e_{ij}} \right) \beta \right]; \quad (9)$$

$$d_{ij} = d_{ij1} + d_{ij2}; \quad (10)$$

$$d_{ij1} = 0.5 \cdot C \frac{(1 - \frac{g}{c})^2}{[1 - \min(1, X) \frac{g}{c}]}; \quad (11)$$

$$d_{ij2} = 900T \left[ (X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{cT}} \right]. \quad (12)$$

式中:  $d_{ij}(q_{ij})$  为城市  $i$  和  $j$  之间最短路径上交叉口处在流量  $q_{ij}$  时的延误时间;  $k=0.5$ ;  $I=1$ .

## 3 基于改进的蚁群算法增量分配模型

(1) 初始化. 蚂蚁个数  $m$ ; 最大循环次数  $NC$ ; 循环次数  $n=1$ ;  $\tau_{ij}=C$  ( $C$  为边  $(i, j)$  上的信息素量

初始值),  $Q$ ;  $\Delta\tau_{ij}=0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  等. 取出起点  $g$  和终点  $h$  以及相应需求分配交通量.

(2) 将总共  $m$  ( $m = n \times m_0$ ) 只人工蚂蚁放置在起点  $g$  上, 采用分批分配方法以  $m_0$  ( $m_0 = PA$ ) 只蚂蚁为一批, 分配批次  $n = 1$ .

(3) 分批分配. 让第一批人工蚂蚁随机选择路径, 并保证每只蚂蚁完成一次循环选择, 计算各路段蚂蚁数并更新总行驶时间  $t_{ij}$  和路段上的信息素轨迹  $\tau_{ij}$ .

(4) 从第  $n$  ( $n \geq 2$ ) 批开始, 将各蚂蚁的初始出发点置于当前解集中. 每一批次的每一只蚂蚁  $k$  都通过选择概率  $P_{ij}^k(t)$  来计算任意相邻路段的行走概率并转移到下一节点  $j$ ; 将  $j$  置于当前解集. 计算第  $r$  批人工蚂蚁中各只蚂蚁的目标函数值  $t_{ij}^k$ , 并且记录最优解, 同时更新  $\tau_{ij}$  和  $\Delta\tau_{ij}$ .

(5) 计算目标函数值, 找出各  $OD$  点对之间的最优解, 计算各路段  $q_{ij}(t)$  和  $t_{ij}(t)$ .

(6)  $n = n + 1$ , 若  $m$  只人工蚂蚁全部循环一次结束, 转至(7), 否则转至(4).

(7) 满足条件, 即  $n = NC$ , 结果无退化行为, 即在本次循环中得到的最优解等于  $N$  个循环之前的解, 则循环结束并输出结果, 否则转至(2).

## 4 案例分析

### 4.1 初始计算

图1为网络结构图, 是常州武进区常武路为主要道路的一个  $4 \times 4$ , 总共 16 个交叉口的道路网, 根据对所选路网中 16 个各交叉口间的 24 个交叉口连接路段的实地皮尺测量和雷达测速以及跟车驾驶等方法, 得到交叉口之间的距离  $d_{ij}$  (m) 和车辆行驶速度 (km/h) 以及初始行驶时间  $\tau_{ij}^0$  (s).

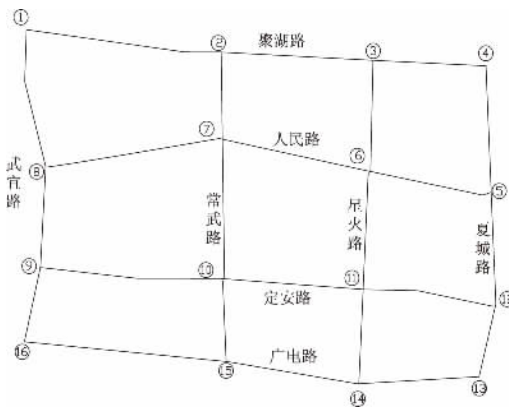


图1 选用道路网络结构图

Fig. 1 The structure diagram of selected road network

基于下述路网的  $OD$  分配量, 对其进行数据

筛选获得符合实际路网的交通  $OD$  表, 并借助互联网地图及 AutoCAD 同比例缩放功能, 以交叉口 7 为坐标原点, 求得各个交叉口的相对坐标点. 根据各交叉口间距、车辆行驶速度、初始行驶时间、每个交叉口的信号周期、信号绿信比、交叉口通行能力, 计算得到各转向车道上车辆的延误时间和交叉口的延误时间.

### 4.2 程序仿真

采用 java 语言, 在基本蚁群算法程序基础上, 编入交叉口延误数据, 并用 MyEclips 软件实现改进蚁群算法的功能.

对基本蚁群算法选择概率函数的各参数进行初始值设置:  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 4$ ,  $\rho = 0.5$ , 最大迭代次数 200 次, 信息素  $Q = 100$ , 蚂蚁数 30. 设置信息素更新方程的路段行驶阻抗函数参数:  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 4$ . 在程序内输入交叉口坐标数据表、 $OD$  矩阵表、初始行驶时间表、延误对比表, 运行程序得到各路段分配结果, 如图 2 所示.

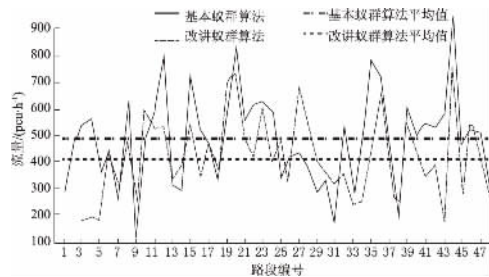


图2 蚁群算法改进前后的流量对比图

Fig. 2 Flow comparison of the basic ant colong aligrthm and the improved ant colony algorithm

试验结果表明, 采用改进蚁群算法分配路段交通流量, 各路段的平均流量为 411.4 pcu/h, 方差为 2 190.7; 采用基本蚁群算法对各路段流量进行分配, 各路段平均流量为 485.2 pcu/h, 方差达到 3 096.4. 在改进蚁群算法下, 车次总延误时间为 642 446.17 s, 基本蚁群算法车次总延误时间为 772 387.09 s. 比较可得, 改进算法比基本算法车均延误减少 55.649 s.

基本蚁群算法并没有考虑交叉口的延误, 实际情况中交叉口延误影响较大, 所以笔者用基本蚁群算法, 再运用公式计算对应流量下的延误时间, 以两者时间之和作为基本蚁群算法的车辆行驶时间. 通过对上万辆车的实测数据筛选结果, 得出车辆实际行驶的时间, 如表 1 所示.

没考虑交叉口延误的影响时, 路段行驶时间是主要因素, 而考虑交叉口延误之后, 交叉口延误就成为了影响车辆行驶时间的主要因素. 总车次

上,改进蚁群算法同样小于基本蚁群算法.而总车次反映的是车均经过交叉口数的大小,这也反映了改进蚁群算法在路径寻优时更加具有方向性.

本次的实例应用,主要的是缓解常武路路段上的拥堵情况,如表 2 所示.

通过对改进蚁群模型、基本蚁群模型和实测数

表 1 车均行驶时间对比表

Tab.1 The comparison table of each vehicle running time

	相关参数	总车数	总车次	总时间/s	平均时间/s
改进蚁群算法	$\alpha = 2, \beta = 4, \rho = 0.5, Q = 100$	2 335	23 290	794 226.90	340.14
基本蚁群算法	$\alpha = 2, \beta = 4, \rho = 0.5, Q = 100$	2 335	19 749	878 847.30	376.38
实测数据	—	2 335	—	956 322.60	409.56

表 2 常武路交叉口使用率对比表

Tab.2 The comparison table of intersection using rate of Changwu Road

	交叉口 2/使用率	交叉口 7/使用率	交叉口 10/使用率	交叉口 15/使用率	平均使用率/%
改进蚁群算法	566/88.76%	735/89.02%	603/91.40%	668/89.98%	89.79
基本蚁群算法	656/102.82%	829/100.48%	630/95.45%	793/92.86%	97.90
实测数据	645/101.10%	893/108.24%	749/113.48%	854/114.94%	109.44

据的分析可知,虽然基本蚁群算法也能够缓解交叉口通行压力,使交叉口使用率从 109.44% 下降到 97.90%,但是改进蚁群模型在缓解交叉口使用率,从而缓解交叉口拥堵方面能够比基本蚁群算法效果更好,在基本蚁群算法的基础上,再下降 8.11 个百分点至 89.79%.

## 5 结论

在基本蚁群算法的基础上,通过将交叉口延误时间和行驶时间之和引入信息素更新方程中,即用车辆在交叉口的延误时间和在路段的行驶时间之和替代路段长度对信息素进行更新.试验表明,改进后的蚁群算法相比基本蚁群算法在路径选择时更具方向性,并且能够更好地做到均衡分配,能够将车流尽可能地分配到整个路网上,使得整体流量限制在了一个比较小的区间内,减轻 OD 点量大的路段上的负担.

## 参考文献:

- [1] MULLEN R J, MONEKOSSO D, BARMAN S, et al. A review of ant algorithms [J]. Expert system with applications, 2009, 36(6): 9608 - 9617.
- [2] ATTIRATANASUNTHRON N, FAKCHAROENPHOL J. A running time analysis of an ant colony optimization algorithm for shortest paths in directed acyclic graphs [J]. Information processing letters, 2008, 105(3): 88 - 92.
- [3] 吴斌,史忠植. 一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法 [J]. 计算机学报, 2001, 24(12): 1328 - 1333.
- [4] 林泉,许伦辉,唐德华. 改进蚁群算法在动态交通分配中的应用研究 [J]. 科学技术与工程, 2009, 9(18): 5410 - 5414.
- [5] GAJPAL Y, ABAD P L. An ant colony system(ACS) for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup [J]. Computers and operations research, 2009, 36(12): 3215 - 3223.
- [6] LUIS S, JOAO C R, JOHN R C. An improved ant colony optimization based algorithm for the capacitated arc routing problem [J]. Transportation research part B: methodological, 2010, 44(2): 246 - 266.
- [7] 詹士昌,徐婕,吴俊. 蚁群算法中有关算法参数的最选择 [J]. 科技通报, 2003, 19(5): 381 - 386.
- [8] 宋方,汪镭. 改进蚁群算法在智能交通中的应用 [J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(3): 66 - 72.
- [9] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [10] 温惠英,徐建闽. 基于改进型蚁群算法的车辆导航路径规划研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26(1): 125 - 129.
- [11] SOLNON C. Combining two pheromone structures for solving the car sequencing problem with ant colony optimization [J]. European journal of operational research, 2008, 191(3): 1043 - 1055.
- [12] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE transaction on systems man and cybernetics part B, 1996, 26(1): 29 - 41.
- [13] HUTCHINSON T P. Delay at a fixed time traffic signal-II: numerical comparisons of some theoretical Expressions [J]. Transportation science, 1972, 6(3): 286 - 305.
- [14] 吴兵,李晔. 交通管理与控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- [15] MISRA S, OOMMEN B J. An efficient dynamic algorithm for maintaining all-pairs shortest paths in stochastic networks [J]. IEEE transactions on computers, 2006, 55(6): 686 - 702.

(下转第 49 页)

文章编号: 1671-6833(2017)02-0045-05

# 信号交叉口禁左车流交通组织设计

李爱增<sup>1</sup>, 贾俊波<sup>1</sup>, 张亚飞<sup>1</sup>, 李文权<sup>2</sup>

(1. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036; 2. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 合理组织禁左车流能够减少左转车辆的绕行延误. 考虑城市道路双向机动车间为隔离栏的情况, 采用排队论和概率论方法研究了“右转—掉头—直行”和“直行—掉头—右转”两种间接左转模式下掉头开口距离交叉口停车线距离的计算方法, 得到“右转—掉头—直行”模式下右转车辆与相交道路直行车辆协调控制与不协调控制时掉头开口距离交叉口停车线距离的计算模型; 得到“直行—掉头—右转”模式下路段设置信号灯与交叉口信号协调控制以及路段不设置信号灯时掉头开口距离交叉口停车线距离的计算模型; 提出了协调控制时路段信号的“早断早启”技术及“早断早启”时间的计算方法. 实例分析表明: 间接左转交通组织方案可行, 对于改善交叉口运行状况效果明显.

**关键词:** 禁左车流; 排队论; 概率论; 交通组织设计; 协调控制; 信号交叉口

**中图分类号:** U491.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.011

## 0 引言

交叉口禁左既有利于提高交叉口的通行能力, 又有利于交通安全, 但现实生活中左转车辆绕行严重, 延误增加. 为此, 许多学者对交叉口左转车流间接左转的方法进行了研究, 目前主要的间接左转方法有“右转—掉头—直行”和“直行—掉头—右转”两种, 其中“右转—掉头—直行”也有学者称之为“右转+U型弯”. 现有文献主要从交通安全<sup>[1-2]</sup>、通行能力<sup>[3]</sup>、设置条件<sup>[2]</sup>、延误<sup>[4]</sup>和经济<sup>[5]</sup>等方面进行了分析. 针对具体的掉头车道设计, 张国华<sup>[6]</sup>提出“右转+U型弯”模式下中央分隔带的宽度要求, 以及转换车道与交叉口之间的距离要求, 但没有给出该距离的具体确定方法. 王富<sup>[7]</sup>提出了“右转+U型弯”模式下中央隔离带回转开口与主交叉口距离、中央开口半径和通道宽度的计算方法, 但没有考虑车辆交织的影响. 文献[8]从安全和通行效率的角度, 分析了“右转+U型弯”模式下, 不同道路条件的掉头开口距上游支路出口应保证的最短距离. 文献[9]研究了“直行—掉头—右转”模式下车辆转弯半径及中央分隔带的开口形式、宽度要求, 并采用

HCM2000 中高速公路 C 型交织理论研究了中央分隔带的开口距离要求. 从现有研究成果来看, 学者主要分析了双向机动车之间为分隔带时掉头车道的设置方法. 但在城市道路中, 由于用地的制约, 大部分道路的双向机动车之间是隔离栏而不是分隔带, 因此现有研究成果使用条件受限. 另外, 隔离带开口距离交叉口的距离也需要结合城市道路交通流的具体特征进行深入分析.

笔者将研究双向机动车之间为隔离栏时, “右转—掉头—直行”和“直行—掉头—右转”的间接左转设置方法, 从而保证间接左转车辆即不对路段车辆产生过大影响, 又能使其快速通过.

## 1 间接左转交通组织方案

城市道路交叉口禁左时, 左转车流可采用两种模式实现间接左转, 如图 1 所示.

## 2 “右转—掉头—直行”交通模式

这种交通组织模式下, 根据右转车辆与相交道路直行车辆的相位设计, 可分为两种情况.

### 2.1 右转车辆与相交道路直行车辆协调控制

右转车辆与本向直行车辆同时放行, 当相交

收稿日期: 2015-06-14; 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA11Z210); 国家自然科学基金资助项目(50978057)

作者简介: 李爱增(1972—), 男, 河南汝州人, 河南城建学院副教授, 博士, 主要从事交通流理论与通行能力研究,

E-mail: liaizeng@163.com.

道路直行车辆放行时,右转车辆与本向直行车辆禁止通行.该模式下,右转车辆中的左转车可以方便地由道路外侧车道移动到内侧车道的掉头开口处.此时,掉头开口距离停车线的距离为相交道路

进口道直行车辆排队长度、掉头后待直行的左转车辆排队长度、路段隔离栏处左转车辆掉头时所需的回转长度,以及掉头开口的合理长度 4 部分的和.

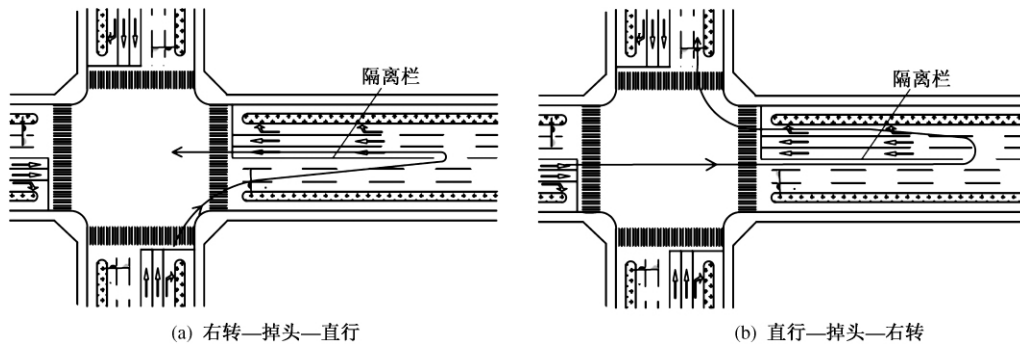


图 1 间接左转组织方案

Fig. 1 Organization modes of indirect left-turn traffic flow

①直行车辆排队长度  $L_{11}$ . 记一个周期内直行车辆的红灯时间为  $t_{tr}$ , s; 直行绿灯启亮后启动波追上停车波的时间为  $t_{tw}$ , s; 直行绿灯启亮后的启动波波速为  $V_{tw}$ , m/s; 直行车辆到达率为  $q_t$ , veh/s; 直行车辆停车时的停车间距为  $h_{ts}$ , m; 交叉口进口道直行车道数为  $n_t$ . 则

$$L_{11} = q_t (t_{tr} + t_{tw}) h_{ts} / n_t = (t_{tr} + L_{11} / V_{tw}) q_t h_{ts} / n_t; \quad (1)$$

$$h_{ts} = h_1 \cdot p_{11} + h_2 \cdot p_{12} + h_3 \cdot p_{13}, \quad (2)$$

式中:  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  为小型车、中型车、大型车停车时的停车间距, m;  $p_{11}$ 、 $p_{12}$ 、 $p_{13}$  为直行车道中小型车、中型车、大型车所占比例.

由式(1)、式(2)可得

$$L_{11} = q_t t_{tr} h_{ts} V_{tw} / (n_t V_{tw} - q_t h_{ts}). \quad (3)$$

②左转车辆排队长度为  $L_{12}$ . 计左转车辆的到达率为  $q_l$ , veh/s; 启动波在左转排队车辆中的传递时间为  $t_{lw}$ , s; 左转车辆停车时的停车间距为  $h_{ls}$ , m. 则

$$L_{12} = q_l (t_{tr} + t_{lw} + t_{tw}) h_{ls} / n_l = (t_{tr} + L_{11} / V_{tw} + L_{12} / V_{tw}) q_l h_{ls} / n_l; \quad (4)$$

$$h_{ls} = h_1 \cdot p_{11} + h_2 \cdot p_{12} + h_3 \cdot p_{13}. \quad (5)$$

则由式(4)、式(5)可得

$$L_{12} = (q_l t_{tr} h_{ls} V_{tw} + q_l h_{ls} L_{11}) / (n_l V_{tw} - q_l h_{ls}). \quad (6)$$

式中:  $p_{11}$ 、 $p_{12}$ 、 $p_{13}$  为左转车中小型车、中型车、大型车所占比例; 其它符号意义同前.

③左转车辆掉头时的回转长度为  $L_h$ . 如果双向机动车之间为隔离栏, 在满足大型车顺利回转的情况下, 可取  $L_h$  为 12 m<sup>[9]</sup>.

④掉头开口长度  $L$ . 掉头开口长度大小会影响城市道路的通行能力<sup>[3]</sup>. 根据城市道路交通状况,  $L_0$  可取 8 m<sup>[9]</sup>.

⑤掉头开口距离停车线距离  $L_1$ .

$$L_1 = L_{11} + L_{12} + L_h + L_0 = L_{11} + L_{12} + 20. \quad (7)$$

## 2.2 右转车辆与相交道路直行车辆不协调控制

该情况下, 右转车辆中的左转掉头车辆可以利用本向直行绿灯时间或相交道路绿灯时间由道路外侧车道横移到内侧车道.

### 2.2.1 利用本向直行绿灯时间变换车道

此时, 掉头开口距交叉口停车线距离的计算公式与式(7)相同, 计该距离为  $L_{21}$ , 则  $L_{21} = L_1$ .

### 2.2.2 利用相交道路绿灯时间变换车道

该情况下, 掉头左转车辆需由道路最外侧车道寻找左侧相邻车道上的车辆间隙逐步向内侧车道合流. 当车辆转移到最内侧车道掉头后, 可随相交道路直行车辆在绿灯时间内通过交叉口.

①等待汇入段长度为  $L_d$ . 先分析掉头车辆由最外侧车道向外侧 2 车道合流时的合流段长度. 此时, 外侧 2 车道的车头时距分布是影响车辆合流的一个重要因素. 对于城市道路, 可用 M3 分布对车头时距进行描述<sup>[10-13]</sup>, 对于 M3 分布

$$P(h \geq t) = \begin{cases} 1, & t < t_m \\ \phi e^{-\gamma(t-t_m)}, & t \geq t_m \end{cases}, \quad (8)$$

式中:  $\phi$  为自由车流比例;  $\gamma$  为衰减常量;  $t_m$  为最小车头时距, s. 这几个参数之间存在着如下关系:  $\gamma = q\phi / (1 - qt_m)$ , 其中,  $q$  为车道流量, veh/s.

记掉头车辆能够汇入外侧 2 车道的临界间隙



为  $t_c$ , 则以  $t_c$  作为判断标准, 在外侧 2 车道的  $n$  个车头时距中大于等于临界间隙  $t_c$  的车头时距个数  $X$  服从参数为  $n, p_c$  的二项分布, 即  $X \sim b(n, p_c)$ . 则

$$p_k = p\{X=k\} = C_n^k p_c^k q_c^{n-k}, k=0, 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

式中:  $p_c$  为车头时距  $h$  大于等于临界间隙  $t_c$  的概率;  $q_c = 1 - p_c$ .

当外侧 2 车道车头时距服从 M3 分布时,

$$p_c = P(h \geq t_c) = \phi e^{-\gamma(t_c - t_m)}. \quad (10)$$

由二项分布定义, 当  $k=0$  时,  $p_0$  为外侧 2 车道的  $n$  个车头时距中出现了 0 个车头时距大于等于  $t_c$  的概率, 则  $\sum_{k=1}^n p_k = 1 - p_0$  为外侧 2 车道  $n$  个车头时距中允许车辆完成合流的概率. 令

$$\sum_{k=1}^n p_k = 1 - p_0 \geq \alpha, \quad (11)$$

$\alpha$  为能使掉头车辆成功汇入外侧 2 车道的概率, 可取较大的值. 将上述计算的  $p_c, q_c$  代入式 (11), 即可得到掉头车辆成功汇入外侧 2 车道时所需的外侧 2 车道的车头时距个数  $n$ .

$$n = \ln(1 - \alpha) / \ln[1 - \phi e^{-\gamma(t_c - t_m)}]. \quad (12)$$

则由车速  $V$  (km/h) 及流量  $Q$  (veh/h), 可得

$$L_d = 1000nV/Q. \quad (13)$$

②掉头车辆换车道距离  $L_s$ . 取掉头车辆的换车道时间  $t_s$  为  $2 \sim 3$  s<sup>[14-15]</sup>, 则

$$L_s = Vt_s/3.6. \quad (14)$$

③掉头车辆交织段总长度  $L_j$ . 假设路段车道数为  $n'$ , 则

$$L_j = (n' - 1)(L_d + L_s). \quad (15)$$

④掉头开口距离停车线距离  $L_{22}$ . 取左转车辆掉头时的回转长度  $L_h$  为  $12$  m<sup>[9]</sup>; 取掉头开口长度  $L_o$  为  $8$  m<sup>[9]</sup>. 另外, 不协调控制时考虑掉头车辆右转时受相交道路非机动车的影响, 结合城市道路设计要求, 总长度中加上影响段长度  $10$  m. 得

$$L_{22} = L_j + L_h + L_o + 10 = (n' - 1)(L_d + L_s) + 30. \quad (16)$$

不进行协调控制时掉头开口距离停车线的距离为  $L_2$ ,

$$L_2 = \max(L_{21}, L_{22}). \quad (17)$$

### 3 “直行—掉头—右转”交通模式

根据掉头开口处是否设置路段信号灯与交叉口信号灯协调控制, 该模式可分为两种情况.

#### 3.1 设置信号灯协调控制

该情况下的交通组织模式如图 2 所示.

该模式下, 当交叉口直行车辆放行时, 路段信

号灯也放行; 当交叉口直行红灯时, 路段信号灯也红灯. 但为了保证掉头车辆在尽可能短的距离内实现掉头右转, 并不影响路段直行车辆正常通过交叉口, 路段信号灯绿灯需采取“早断早启”技术. 早断时间应保证绿灯末尾由路段停车线驶向交叉口的车辆到达交叉口时能赶上交叉口绿灯末尾通过; 早启时间应保证路段停车线处车辆由停车线驶向交叉口时, 交叉口绿灯刚好开启.

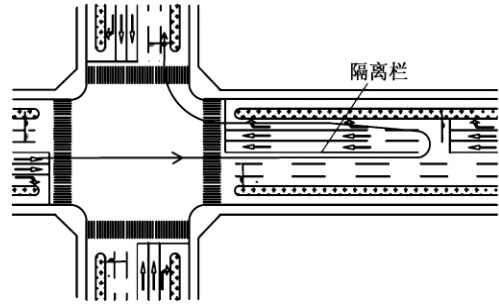


图2 路段信号协调控制图

Fig. 2 Coordination-control diagram of road median-opening signal

#### 3.1.1 掉头开口距离交叉口停车线距离 $L_3$

①左转车辆排队长度  $L_{31}$ . 协调控制时, 绿灯期间随直行车辆一起通过交叉口的左转车辆需在隔离栏开口处排队等待

$$L_{31} = t_{lg} q_1 h_{ls}, \quad (18)$$

式中:  $t_{lg}$  为一个信号周期内直行车辆的绿灯时间, s; 其它符号意义同前.

②掉头开口距交叉口停车线距离  $L_3$ . 取左转车辆掉头时的回转长度  $L_h$  为  $12$  m<sup>[9]</sup>; 取掉头开口长度  $L_o$  为  $8$  m<sup>[9]</sup>. 则

$$L_3 = L_{31} + L_h + L_o = t_{lg} q_1 h_{ls} + 20. \quad (19)$$

#### 3.1.2 路段信号“早断早启”时间 $t_e$

$$t_e = L_3 / V_a. \quad (20)$$

式中:  $V_a$  为交叉口处车辆车速, m/s, 根据《城市道路工程设计规范》 $V_a$  可取路段车速的  $0.5 \sim 0.7$  倍.

#### 3.2 不设置信号灯控制

此时, 左转车辆回转掉头后需不断地由对向内侧车道交织至外侧车道, 交织过程与“右转—掉头—直行”模式中车辆的交织过程相同.

①车辆掉头后的交织段长度  $L_{41}$ . 同“右转—掉头—直行”模式分析方法,

$$L_{41} = (n' - 1)(L_d + L_s). \quad (21)$$

②掉头开口距离停车线的距离  $L_4$ . 取左转车辆掉头时的回转长度  $L_h$  为  $12$  m<sup>[9]</sup>; 取掉头开口长度  $L_o$  为  $8$  m<sup>[9]</sup>. 另外, 考虑掉头车辆右转时受交叉

口非机动车的影响,总长度中加上影响段长度 10 m. 得

$$L_4 = L_{d1} + L_o + L_h + 10 = (n' - 1)(L_d + L_s) + 30. \quad (22)$$

#### 4 算例分析

以平顶山市长安大道与和谐路交叉口为例. 该交叉口东西向长安大道为城市主干道,双向 8 车道;南北向和谐路为城市次干道,双向 4 车道. 该交叉口采用三相位信号控制,信号相位及配时分别为:南北直左,绿灯 43 s;东西直,绿灯 53 s;东西左,绿灯 20 s;黄灯均为 3 s;右转常绿;周期总长度 125 s. 该交叉口现状:东、南、西、北 4 个进口的左、直、右交通量分别为:140、817、80; 93、114、210; 125、834、188; 42、93、122 veh/h.

根据该交叉口现状,在东西进口采取“直行—掉头—右转”的间接左转方式. 经调查,路段平均车速为 35 km/h,  $t_c$  为 3.44 s,  $t_m$  为 2.20 s. 经计算,当路段不设置信号灯协调控制及设置信号灯协调控制时,东西进口掉头开口距交叉口停车线的距离分别为 166 m 和 174 m, 36 m 和 38 m. 协调控制时,东西进口路段信号灯绿灯“早断早启”时间分别为 6.17 s 和 6.51 s. 间接左转后该交叉口采用两相位控制,信号相位及配时分别为:南北直左,绿灯 32 s;东西直,绿灯 62 s;黄灯均为 3 s;右转常绿;周期总长度 100 s.

对交叉口间接左转前后的车辆延误利用 Webster 公式进行计算. 经计算,间接左转前,交叉口平均延误为 23.2 s,间接左转后,不进行信号协调控制和协调控制时,交叉口平均延误比现状分别减少了 7.2 s 和 11.2 s,效果明显.

#### 5 结论

(1) “右转—直行—掉头”模式. 当右转车辆与相交道路直行车辆协调控制时,采用排队论方法得到掉头开口距停车线距离的计算方法. 右转车辆与相交道路直行车辆不协调控制时,分别采用排队论和概率论方法得到右转车辆利用本向直行绿灯时间和相交道路绿灯时间变换车道时掉头开口距停车线距离的计算方法,进而得到不协调控制时掉头开口距停车线距离的计算方法.

(2) “直行—掉头—右转”模式. 当路段开口设置信号灯与交叉口信号灯进行协调控制时,采用排队论方法得到掉头开口距交叉口停车线距离的计算方法,并提出路段信号“早断早启”技术及“早断早启”时间的计算方法. 当路段开口不设置信号灯时,采用概率论方法得到掉头开口距交叉

口停车线距离的计算方法.

#### 参考文献:

- [1] MALLAH M T. Development of a conflict rate prediction model at unsignalized intersections [D]. Tampa: College of Engineering University of South Florida, 2003.
- [2] YANG X K. CORSIM-based simulation approach to evaluation of direct left turn vs. right turn plus U-turn from driveways [D]. Tampa: College of Engineering University of South Florida, 2001.
- [3] LIU P, LU J J, HU F X, et al. Capacity of U-turn movement at median openings on multilane highways [J]. Journal of transportation engineering, 2008, 134 (4): 147 - 154.
- [4] 马万经, 杨晓光. 信号控制交叉口群左转交通协调设计方法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 1507 - 1511, 1525.
- [5] 陈宽民, 罗志忠. 平面交叉口左转车流特性分析及对策研究 [J]. 公路交通技术, 2006 (2): 114 - 118.
- [6] 张国华. 信号交叉口设计及微观仿真研究 [D]. 北京: 北方交通大学交通运输学院, 2000.
- [7] 王富, 李杰, 石永辉. 左转远引交叉口交通组织与几何参数研究 [J]. 中国市政工程, 2010 (2): 1 - 3, 74.
- [8] ZHAO R L, FAN J J, LIU P. Selection of optimal U-turn locations for indirect driveway left-turn treatments on urban streets [J]. Journal of southeast university, 2010, 26(4): 628 - 632.
- [9] 闫志蕊. 远引左转掉头中央分隔带开口间距的研究 [D]. 西安: 长安大学公路学院, 2014.
- [10] 邵长桥. 平面信号交叉口延误分析 [D]. 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2002.
- [11] KYTE M, KITTELSON W, ZHONG T Z, et al. Analysis of traffic operations at all-way stop-controlled intersections by simulation [J]. Transportation research record, 1996(1555): 65 - 73.
- [12] BUNKER J M, TROUTBECK R J. Microscopic modeling of traffic within freeway lanes [J]. Transportation research record, 1995(1510): 19 - 25.
- [13] SULLIVAN D P, TROUTBECK R J. An exponential relationship for the proportion of free vehicles on arterial roads [J]. Transportation research part A, 1997, 31 (1): 21 - 33.
- [14] 吴建. 城市道路平面交叉口进口交织段车辆特性研究 [D]. 南京: 东南大学交通学院, 2007.
- [15] 郑弘, 荣建, 任福田. 基于效用选择的换车道模型 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 88 - 91.

## Traffic Organization and Design of Left-turn Forbidden Traffic Flow on Signalized Intersections

LI Aizeng<sup>1</sup>, JIA Junbo<sup>1</sup>, ZHANG Yafei<sup>1</sup>, LI Wenquan<sup>2</sup>

( 1. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Reasonable organization of left-turn forbidden traffic flow could effectively reduce the left-turn vehicles delay through signalized intersection. There are barriers between two-direction vehicles, through the queuing and probability theory, the distance of two indirect left-turn modes from the road turn-around position to the intersection stop line was studied. To “right-turn, turn-around and through” mode, considering coordination-control or not for right-turn signal and intersecting-road through signal, the distance calculation model was established. To “through, turn-around and right-turn” mode, taking the two condition weather setting road median-opening signal to coordinate intersection signal into account, the distance calculation model was obtained too. To the “through, turn-around and right-turn” mode, when the coordination-control policy was adopted, the technique of “early-startup and early-stop” of road median-opening signal was put forward, and the calculation method of the time of “early-startup and early-stop” was put forward as well. The case study indicated that the indirect left-turn organization scheme was feasible, and had obvious effect on improving the operation of the signalized intersections.

**Key words:** left-turn forbidden traffic flow; queuing theory; probability theory; traffic organization and design; coordination-control; signalized intersections

( 上接第 44 页)

[16] 靳凯文, 李春葆, 秦前清. 基于蚁群算法的最短路径搜索方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 128-130, 134.

[17] 唐亮, 靖可, 何杰. 网络化制造模式下基于改进蚁群算法的供应链调度优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1267-1275.

## Modified Ant Colony Algorithm and Its Application on Traffic Assignment Model

CHANG Yulin<sup>1,2</sup>, WANG Xiaoting<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>

( 1. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;  
2. Jiangsu Key Laboratory of Urban ITS, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** In order to more quickly and accurately search for the optimal path, an improved ant colony algorithm was established through analyzing the process of car arriving and departure in the signalized intersection. First of all, a new pheromone update model was put forward by improving properly the pheromone update function in traditional ant colony algorithm, which used signal control delay in the intersection and the travel time of vehicles in the road section as pheromone update operators. Then, road section incremental allocation process considering intersection delays, which was through partial distributing traffic flow in the network, was designed based on improved ant colony algorithm. Finally, flow distribution in the road network was simulated based on computer language, and the network running quality was compared with traditional ant colony algorithm. The experimental results showed that the improved ant colony algorithm, which could reduce road section and intersection using rate, was of good optimization ability, and could effectively balance the network traffic and alleviate the pressure of intersections.

**Key words:** traffic assignment; intersection delay; ant algorithm; optimal path

## 基于 PMU 的降阶二次状态估计算法研究

蒋建东<sup>1</sup>, 杜耀恒<sup>1</sup>, 燕跃豪<sup>2</sup>, 鲍薇<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国家电网 郑州供电公司, 河南 郑州 450006)

**摘 要:** 针对当前电力系统中同步相量测量单元(PMU)测量点少、无法直接进行状态估计的问题,提出一种新的状态估计算法。考虑到 PMU 系统量测精度比 SCADA 系统高,为了扩大高精度量测信息对状态估计结果的影响,算法将状态变量分成 PMU 可观测变量和 PMU 不可观测变量,并分别进行状态估计。对于 PMU 可观测变量,利用 PMU 量测量进行线性状态估计;对于 PMU 不可观测变量,利用线性状态估计的结果结合 SCADA 量测量进行降阶的快速分解状态估计。这种解耦的算法相对于传统混合状态估计算法计算更加简洁,并且有较高的数值稳定性。最后,利用多个 IEEE 标准测试系统对算法进行验证,通过与基本加权最小二乘法和快速分解算法对比,证明该算法在数值稳定性和精度上有很大优势。

**关键词:** 电力系统; 状态估计; 同步相量测量单元; 降阶算法

**中图分类号:** TM744 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.012

### 0 引言

电力系统的安全稳定运行需要实时准确地监控系统状态。在现代电力系统中状态估计作为能量管理系统(EMS)的重要组成部分,从软件的角度对各种量测去伪存真,为电力系统的许多在线应用、计算分析提供可靠的数据基础<sup>[1]</sup>。

随着同步测量技术的发展,同步相量测量单元(PMU)为状态估计提供了新的量测信息,然而受到经济技术条件限制,全网安装 PMU 还不能实现,因此有必要研究利用数量采集与监控系统(SCADA)量测数据与同步相量测量系统量测量进行混合状态估计<sup>[2-4]</sup>。文献[5-9]使用量测变换的方法先将 PMU 量测转换为其他形式的伪量测量或修正方程,再进行状态估计。这种方法简单易行,对现有的状态估计程序改动小,缺点是伪功率量测的传递误差比较大,按照误差传递公式计算后的权重较小,对估计精度贡献较小。文献[10]提出一种基于混合量测的状态估计方法,该方法利用 PMU 量测方程为线性方程的特点,将 SCADA 量测方程分解为两步线性化方程,实现 PMU 和 SCADA 混合量测状态估计的非迭代计算,提高了计算效率。文献[11]提出一种在极坐

标下引入 PMU 支路电流量测的快速分解状态估计方法。采用旋转量测变换法,将电流量测转化为旋转量测,实现了状态量在极坐标下的解耦。文献[12]提出一种完全基于 PMU 量测数据的线性加权最小二乘状态估计方法。该方法将联络节点的零注入电流作为虚拟量测,实质是通过量测冗余度提高状态估计精度。文献[13]通过求积分卡尔曼滤波(QKF)进行电力系统的状态估计,该算法从统计线性回归的角度,运用高斯-厄米特积分,使得估计精确度大幅提高。

笔者借鉴状态变量解耦的方法<sup>[14]</sup>,提出降阶二次算法。在对状态变量解耦的同时对量测量进行分离,引入高压电网的简化假设条件,实现了信息矩阵常数化。此外,算法借鉴了对时间不同步误差的处理方法,将估计误差归算为量测误差,通过降低部分量测权重,解决了二次估计算法中 SCADA 量测权值需要逐次迭代的问题。算例分析表明该算法具有较高的数值稳定性和数值精度。

### 1 降阶二次状态估计算法

降阶二次算法的核心是对状态变量进行分离,分别利用 PMU 量测量和 SCADA 量测量进行估计,避免量测变换。

收稿日期: 2016-04-28; 修订日期: 2016-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507155); 中国博士后科学基金资助项目(2013M541990); 河南省基础与前沿技术研究计划资助项目(152300410046); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A470002)

作者简介: 蒋建东(1975—),男,河南南阳人,郑州大学教授,博士,主要从事电能质量分析与控制方面的研究, E-mail: jdjiang@zzu.edu.cn.

### 1.1 线性状态估计

PMU 的出现为状态估计提供了新的实时量测数据,主要包括节点电压的幅值、相角量测和支路电流的幅值、相角量测.这些量测量在直角坐标系与状态变量呈线性关系.因此,PMU 量测量的数学模型可以表示为:

$$z_1 = h(x) + \xi_1 = H \cdot x + \xi_1. \quad (1)$$

式中:  $z_1$  为 PMU 量测量;  $H$  为量测矩阵;  $x$  为系统状态变量,  $x = [f_2, \dots, f_n, e_1, \dots, e_n]^T$ ,  $f_i$  和  $e_i$  分别为节点  $i$  电压的虚部和实部;  $\xi_1$  为 PMU 量测误差.

据此,可以对 PMU 可观测变量和 PMU 不可观测变量进行定义.用  $\alpha_1, \dots, \alpha_{2n-1}$  表示式(1)中量测矩阵  $H$  的列向量,当且仅当  $\alpha_i \neq 0$  时,状态变量  $f_i$  或  $e_i$  为 PMU 可观测变量,其余均为 PMU 不可观测变量.

由于 PMU 可观测变量仅取决于 PMU 的安装位置和量测类型,所以可以根据 PMU 的安装位置定义一个行初等变换矩阵  $\Pi$ ,对状态变量进行重新排序,实现变量分离,即

$$\Pi x = [x_1^T x_2^T]^T. \quad (2)$$

式中:  $x_1$  为 PMU 可观测变量;  $x_2$  为 PMU 不可观测变量.

已知  $\Pi^T \Pi = I$ ,对式(1)做进一步推导

$$z_1 = H \Pi^T \Pi x + \xi_1 = [H_{11} H_{12}] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \xi_1. \quad (3)$$

根据 PMU 可观测变量的定义可知,  $H_{12}$  为零矩阵,  $H_{11}$  的行秩不小于列秩. PMU 量测量的数学模型可以改写为

$$z_1 = H_{11} x_1 + \xi_1. \quad (4)$$

利用线性最小二乘法计算 PMU 可观测变量  $x_1$  的估计值  $\hat{x}_1$

$$\hat{x}_1 = [H_{11}^T R_1^{-1} H_{11}]^{-1} H_{11}^T R_1^{-1} z_1. \quad (5)$$

式中:  $R_1$  为 PMU 量测量的方差矩阵.

### 1.2 非线性状态估计

SCADA 量测量通常包含节点电压幅值、节点注入功率和支路潮流功率,这些量测量与状态变量间通常为非线性关系,即:

$$z_2 = g(v) + \xi_2. \quad (6)$$

式中:  $z_2$  为 SCADA 量测量;  $g(v)$  为量测函数矩阵;  $\xi_2$  为 SCADA 量测误差;  $v$  为极坐标下状态变量,  $v = [\theta_2, \dots, \theta_n, |v_1|, \dots, |v_n|]^T$ .

根据 PMU 可观测变量的定义,同样可以用行初等变换矩阵  $\Pi$  对极坐标下的状态变量  $v$  重新

排序:

$$\Pi v = [v_1^T v_2^T]^T. \quad (7)$$

式中:  $v_1$ 、 $v_2$  分别为极坐标下 PMU 可观测变量和 PMU 不可观测变量,  $v_1$  的估计值可以由  $\hat{x}_1$  经过坐标变换  $f$  得到,即  $\hat{v}_1 = f(\hat{x}_1)$ .

将 PMU 可观测变量估计值代入式(6),并进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} z_2 &= g(\hat{v}(j)) + G(\hat{v}(j)) \Delta v(j) + \xi_2 = \\ &g(\hat{v}(j)) + G(\hat{v}(j)) \Pi^T \Pi \Delta v(j) + \xi_2 = \\ &g(\hat{v}(j)) + G_{22}(j) \Delta v_2(j) + G_{21}(j) \Delta v_1 + \xi_2. \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\Pi^T \Pi \Delta v(j) = [\hat{v}_1^T \hat{v}_2^T(j)]^T$ ;  $G(\hat{v}(j))$  为雅各比矩阵,  $G(\hat{v}(j)) \Pi^T = [G_{21}(\hat{v}(j)) \ G_{22}(\hat{v}(j))]$ .  $G_{21}(\hat{v}(j))$ 、 $G_{22}(\hat{v}(j))$  分别简记为  $G_{22}(j)$ 、 $G_{21}(j)$ .

由于 PMU 可观测变量估计值已知,且估计误差很小,可以将  $G_{21}(j) [v_1 - \hat{v}_1(j)]$  作为 SCADA 量测误差的一部分,即:

$$z_2 - g(\hat{v}(j)) = G_{22}(j) \Delta v_2(j) + \tilde{\xi}_2. \quad (9)$$

其中,  $\tilde{\xi}_2 = G_{21}(j) \Delta v_1 + \xi_2$ .

修正 SCADA 量测误差方差矩阵<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_2(j) &= R_2 + G_{21}(j) \times \text{diag} [G_{11}^T R_1^{-1} G_{11}] - \\ &1) G_{21}^T(j). \end{aligned} \quad (10)$$

由此可以得到 PMU 不可观测变量的估计方程,即:

$$\begin{aligned} v_2(j+1) &= v_2(j) + [G_{22}^T(j) \tilde{R}_2^{-1}(j) G_{22}(j)]^{-1} \times \\ &G_{22}^T(j) \tilde{R}_2^{-1}(j) (z_2 - g(\hat{v}(j))). \end{aligned} \quad (11)$$

上述推导过程实现了 PMU 不可观测变量仅由 SCADA 量测量进行状态估计的目标,为了进一步降阶,并实现信息矩阵常数化,考虑引入高压电网中的两项简化假设<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{\partial g_a}{\partial v} \approx 0, \frac{\partial g_r}{\partial \theta} \approx 0; \\ \frac{\partial g_a}{\partial \theta} \approx -v_0^2 B_a, \frac{\partial g_r}{\partial v} \approx -v_0 B_r. \end{cases}$$

式中:  $B_a$  为有功类常数雅克比阵,取支路电抗倒数;  $B_r$  为无功类常数雅各比矩阵,取支路导纳的虚部.由此可以得到常数雅各比矩阵,对应分量如下式:

$$G_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_c}{\partial \theta_1} & \frac{\partial g_c}{\partial v_1} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

$$G_{21} = \begin{bmatrix} -v_0^2 B_{a21} & 0 \\ 0 & -v_0 B_{r21} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

$$G_{22} = \begin{bmatrix} -v_0^2 B_{a22} & 0 \\ 0 & -v_0 B_{r22} \end{bmatrix}. \quad (14)$$



对 SCADA 量测量进行权重分离

$$\tilde{\mathbf{R}}_{2a} = \mathbf{R}_{2a} + v_0^4 \mathbf{B}_{a21} \times \text{diag}\left(\left[\frac{\partial \mathbf{g}_c^T}{\partial \boldsymbol{\theta}_1} \mathbf{R}_1^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}_c}{\partial \boldsymbol{\theta}_1}\right]^{-1}\right) \mathbf{B}_{a21}^T. \quad (15)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{2r} = \mathbf{R}_{2r} + v_0^2 \mathbf{B}_{r21} \times \text{diag}\left(\left[\frac{\partial \mathbf{g}_c^T}{\partial v_1} \mathbf{R}_1^{-1} \frac{\partial \mathbf{g}_c}{\partial v_1}\right]^{-1}\right) \mathbf{B}_{r21}^T. \quad (16)$$

进而可得到解耦的迭代公式,即

$$\boldsymbol{\theta}_2(j+1) = \boldsymbol{\theta}_2(j) - v_0^{-2} [\mathbf{B}_{a22}^T \tilde{\mathbf{R}}_{2a}^{-1} \mathbf{B}_{a22}]^{-1} \times \mathbf{B}_{a22}^T \tilde{\mathbf{R}}_{2a}^{-1} (\mathbf{z}_{2a} - \mathbf{g}_{2a}(\hat{\mathbf{v}}(j))). \quad (17)$$

$$v_2(j+1) = v_2(j) - v_0^{-1} [\mathbf{B}_{r22}^T \tilde{\mathbf{R}}_{2r}^{-1} \mathbf{B}_{r22}]^{-1} \times \mathbf{B}_{r22}^T \tilde{\mathbf{R}}_{2r}^{-1} (\mathbf{z}_{2r} - \mathbf{g}_{2r}(\hat{\mathbf{v}}(j))). \quad (18)$$

迭代结束后,由  $\mathbf{v} = \mathbf{I}^T [v_1^T v_2^T]^T$  恢复状态变量初始顺序。

## 2 算法的实现过程

(1) 输入系统的参数;

(2) 根据 PMU 量测位置及量测类型,形成初等行变换矩阵  $\mathbf{I}$ ;

(3) 利用 PMU 量测量计算 PMU 可观测变量在直角坐标系下的估计值  $\hat{\mathbf{x}}_1$ ;

(4) 根据系统参数形成 SCADA 量测函数有功类常数雅各比矩阵  $\mathbf{B}_a$  及无功类常数雅各比矩阵  $\mathbf{B}_r$ ;

(5) 求 PMU 量测函数在极坐标系下  $\hat{\mathbf{v}}_1$  处雅各比矩阵;

(6) 计算 SCADA 量测量的方差矩阵  $\tilde{\mathbf{R}}_2$ , 并进行权重分离;

(7) 利用公式(17)、(18)对 PMU 不可观测变量进行交替更新;

(8) 若  $\max(|\boldsymbol{\theta}(j+1) - \boldsymbol{\theta}(j)|) < \zeta$  且  $\max(|v(j+1) - v(j)|) < \zeta$ , 迭代结束, 否则转向(7)。

## 3 算法特性分析

为了验证算法的有效性,利用 Matlab 对 IEEE 14 节点、IEEE 30 节点、IEEE 57 节点、IEEE 300 节点 4 个系统进行测试。量测数据来源:PMU 量测量为所在节点电压相量和与之相连的支路电流相量;SCADA 量测量为节点电压幅值、节点注入功率及支路两端潮流;所有的量测值均由潮流计算真值叠加随机误差产生;为了使量测数据更加真实,量测误差均服从均值为 0 的正态分布,标准差为:

$$\sqrt{R} = \frac{aS_i + bS_f}{3}, \quad (19)$$

式中:  $S_i$ 、 $S_f$  分别为量测值、满刻度值;  $a$ 、 $b$  为与之相关的误差系数<sup>[1-2]</sup>,取值如表 1 所示。

表 1 误差系数  $a$  和  $b$  的取值

Tab. 1 Values of error coefficients  $a$  and  $b$

量测类型	SCADA 量测量		PMU 量测量	
	功率 ( $P$ 或 $Q$ )	电压 / $V$	电压 ( $e$ 或 $f$ )	电流 ( $I_r$ 或 $I_i$ )
$a$	0.02	0.003	0.003	0.005
$b$	0.003 5	0.003	0.000 3	0.001

为了使算例具有典型的代表性,利用线性优化配置算法对 PMU 的安装位置进行设置<sup>[15]</sup>。PMU 节点设置如表 2 所示。

### 3.1 数值稳定性分析

状态估计算法的数值稳定性体现了算法对误差的处理能力,其最主要的评价标准是信息矩阵条件数。

算例 1 以 4 个 IEEE 标准系统为例,将笔者所提算法与基本最小加权二乘法、快速分解状态估计算法进行对比,侧重点在于条件数的相对大小,如表 3 所示。算例 2 以 IEEE 30 节点为例,对比不同 PMU 可观测变量占比对降阶二次算法信息矩阵条件数的影响,如表 4 所示。

表 2 PMU 的安装位置

Tab. 2 Installation position of PMU

节点数	PMU 安装位置	PMU 可观测变量占比/%
14	1,4	50.00
30	1,6,10,15,27	76.00
57	1,4,10,15,20,24,32,37,41	64.91
300	1,2,3,4,5,7,8,9,11,12,13,14,15,16,18,19,20,21,22,23,24,25,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,257,266,267,268,269,270,271,272,273,274,276,291,294	34.67

表3 不同算法条件数

Tab.3 Condition numbers of different algorithms

节点数	最小二乘法	快速分解法		降阶二次算法	
	$Cond(\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})$	$Cond(\mathbf{A})$	$Cond(\mathbf{B})$	$Cond(\mathbf{A}_2)$	$Cond(\mathbf{B}_2)$
14	1 304	1.337 9e+03	186.461 9	77.958 9	4.806 8
30	13 738	1.339 0e+04	660.435 5	46.940 4	3.927 8
57	49 436	4.399 5e+04	833.413 9	1.355 9e+03	52.982 2
300	5.036 4e+08	4.023 5e+08	1.226 4e+05	2.967 7e+06	6.759 0e+04

注:  $Cond(\cdots)$  为条件数取值函数.  $\mathbf{A} = \mathbf{v}_0^4 \mathbf{B}_a^T \mathbf{R}_a^{-1} \mathbf{B}_a$ 、 $\mathbf{B} = \mathbf{v}_0^2 \mathbf{B}_r^T \mathbf{R}_r^{-1} \mathbf{B}_r$ 、 $\mathbf{A}_2 = \mathbf{v}_0^4 \mathbf{B}_{a22}^T \mathbf{R}_{2a}^{-1} \mathbf{B}_{a22}$ 、 $\mathbf{B}_2 = \mathbf{v}_0^2 \mathbf{B}_{r22}^T \mathbf{R}_{2r}^{-1} \mathbf{B}_{r22}$ .

表4 不同PMU可观测变量占比对条件数的影响

Tab.4 Impact of different observable variable ratios on condition number

占比 条件数	33.3%	46%	76%	83.3%
$Cond(\mathbf{A}_2)$	6.450e+03	716.0	47.756	12.219
$Cond(\mathbf{B}_2)$	51.346	7.669	3.305	1.456

从表3可以看出,3种算法的数值稳定性从低到高依次是最小二乘法、快速分解算法、降阶二次算法.其中对比最小二乘法和快速分解法的信息矩阵条件数发现,当采用有功无功解耦运算时,伴随着量测矩阵阶数的降低,信息矩阵的条件数也有所减少.降阶二次算法在快速分解算法的基础上进一步实现了状态变量的分离,这使得信息矩阵条件数降低更显著.

从表4可以看出,随着PMU可观测变量的增加,信息矩阵的条件数逐渐降低.进一步说明了通过减少状态变量、降低信息矩阵阶数,可以提高系统的数值稳定性.

### 3.2 估计精度分析

算例3为基本加权最小二乘法、快速分解法和降阶二次算法在4个测试系统下的结果分析,评价标准为状态估计结果的不准确度  $S_x$  [16-17],如式(20)所示.结果均为10次随机量测样本的均值.

$$S_x = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{i,t} - v_{i,t}^*)^2}. \quad (20)$$

式中:  $T$  为随机测试系统样本数;  $v_{i,t}$  为第  $t$  次样本的状态量估计值;  $v_{i,t}^*$  为第  $t$  次样本的状态量真值;  $n$  为状态变量个数.

算例4以IEEE 57节点为例,研究不同PMU可观测变量占比对降阶二次算法估计精度的影响,如表6所示.

状态估计不准确度  $S_x$  越小说明状态估计结果与真值越接近.从表5、6可以看出,降阶二次算法具有较高的估计精度.因为PMU量测量的精度

比SCADA量测量高,利用高精度的PMU量测量进行线性状态估计,扩大了高量测量对状态估计结果的影响,使得  $S_x$  明显降低,而且随着PMU数量及可观测范围的增加,估计误差将进一步降低.

表5 状态估计结果对比

Tab.5 Results comparison of state estimation

节点数	基本加权 最小二乘法	快速分解 算法	降阶二次 算法
14	0.005 6	0.005 5	0.001 4
30	0.006 6	0.006 9	0.001 5
57	0.007 4	0.007 5	0.001 3
300	0.017 5	0.019 0	0.001 6

表6 不同PMU可观测变量占比对估计精度影响

Tab.6 Impact of different observable variable ratios on estimation accuracy

占比	17.54%	45.61%	64.9%	77.1%
$S_x$	4.7e-03	2.3e-03	1.3e-03	8.968e-04

## 4 结论

利用PMU量测量和SCADA量测量组成混和量测系统,提出基于解耦思想的降阶二次状态估计算法.此算法经过两次解耦过程,降低了信息矩阵阶数,提高了数值稳定;通过引入高压电网简化假设条件实现了信息矩阵和权重矩阵常数化.理论分析和算例验证表明,该算法具有计算过程简洁、编程简单、估计精度高的特点,能够满足混和量测实时状态估计的要求.值得注意的是,该算法通用性强.当PMU在系统中实现完全可观时,该算法会自动由降阶算法过渡到线性算法.

## 参考文献:

- [1] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [2] 鞠萍. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. 7.
- [3] DE L R J, CENTENO V, THORP J S, et al. Syn-

- chronized phasor measurement applications in power systems [J]. IEEE transactions on smart grid, 2010, 1 (1): 20–27.
- [4] 卢志刚, 许世范, 史增洪, 等. 部分电压和电流相量可测量时电压相量的状态估计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 42–44.
- [5] 卓亮. 基于 PMU 的电力系统动态状态估计研究[D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2012.
- [6] BI T S, QIN X H, YANG Q X. A novel hybrid state estimator for including synchronized phasor measurements [J]. Electric power systems research, 2008, 78(8): 1343–1352.
- [7] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 计及 PMU 的混合非线性状态估计新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 28–32.
- [8] 林桂华, 安天瑜, 周苏荃, 等. 计及 PMU 量测信息的量测量变换状态估计[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 37–40.
- [9] 赵红嘎, 薛禹胜, 汪德星, 等. 计及 PMU 支路电流相量的状态估计模型[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 37–40.
- [10] 厉超, 卫志农, 倪明, 等. 计及 PMU 量测的分步线性状态估计模型[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1700–1704.
- [11] 颜磊, 艾欣, 王尧, 等. 一种将 PMU 支路电流量测引入非线性状态估计的方法[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2816–2821.
- [12] 陈亮, 赵思涵, 索志刚, 等. 一种计及零注入电流的 PMU 量测线性状态估计方法[J]. 电力科学与工程, 2016(2): 26–31.
- [13] 闫丽梅, 崔佳, 徐建军, 等. 基于 PMU/SCADA 混合量测的电力系统求积分卡尔曼滤波的状态估计[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 79–84.
- [14] KASHYAP N, WERNER S, HUANG Y F, et al. Power system state estimation under incomplete PMU observability—a reduced-order approach [J]. IEEE Journal of selected topics in signal processing, 2014, 8(6): 1051–1062.
- [15] 鲍威, 蒋雪冬, 陈利跃, 等. 考虑观测冗余度最大的 0–1 线性规划电力系统 PMU 最优配置[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2051–2056.
- [16] 丁军策, 蔡泽祥, 王克英. 基于广域测量系统的混合量测状态估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 58–63.
- [17] 王克文, 蒋德珑, 孙栗. 电力系统状态估计算法的模糊综合评价与分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(3): 85–89.

## A Reduced-order Approach of State Estimation Based on PMU

JIANG Jiandong<sup>1</sup>, DU Yaoheng<sup>1</sup>, YAN Yuehao<sup>2</sup>, BAO Wei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Zhengzhou Electric Power Supply Company, Zhengzhou 450006, China)

**Abstract:** At present, the phase measurement units were not sufficient for static state estimation in most existing power systems. A novel method was proposed to solve the problem in this paper. Realizing that PMU measurements were more accurate than SCADA ones, the proposed approach estimated PMU unobservable states and PMU observable states separately so as to expand the effect of PMU measurements on the result. For the PMU observable states, they were estimated by PMU measurements using a linear estimator. And the PMU unobservable states were estimated by conventional measurements in a reduced-order nonlinear estimator. When compared with conventional approaches the proposed decoupled method features reduced computational complexity and greater numerical stability. In the end, this method was verified that it had more advantages than weighed least square method and fast decomposition algorithm by simulations on standard IEEE test systems.

**Key words:** power systems; state estimation; PMU; reduced-order method

## 基于双贝叶斯估计的动态威胁运动状态估计

刘 厂<sup>1</sup>, 赵俊翔<sup>2</sup>, 胡 海<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 空间物理重点实验室, 北京 100076;  
3. 中国核动力研究设计院, 四川 双流 610213)

**摘 要:** 现有的水下动态威胁运动状态估计主要采用单级估计方法, 该方法将动态威胁的速度分解到三个坐标轴分别进行估计, 没有考虑运动体速度的整体性. 本文提出了一种双贝叶斯估计方法, 首先利用自适应贝叶斯估计方法对水下动态威胁的速度大小和方向进行估计, 再以此为输入, 利用无迹贝叶斯估计方法估计其位置. 与传统方法相比, 双贝叶斯估计方法充分考虑了水下动态威胁速度的整体性, 其有效性和精确性在仿真试验中得到验证.

**关键词:** 双贝叶斯估计; 水下动态威胁; 运动状态

**中图分类号:** TP181

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.013

### 0 引言

水下潜器在航行过程中不可避免地遇到一些动态威胁, 对动态威胁的运动状态进行准确估计才能实现有效规避<sup>[1]</sup>. 现有的运动状态估计往往采用单级估计方法, 通过无迹卡尔曼、容积卡尔曼、自适应卡尔曼等方法完成目标跟踪的任务. 这些方法将水下动态威胁的运动分解为三个坐标轴上的运动并分别进行估计<sup>[2-3]</sup>. 该分解方法对水下动态威胁的运动模型适应性不佳, 不能完全把握水下动态威胁的运动趋势<sup>[4-5]</sup>, 无法适应快速机动的威胁状态变化. 因此, 笔者提出了一种双贝叶斯运动状态估计方法, 该方法针对动态威胁的运动模型, 首先利用自适应贝叶斯估计方法<sup>[3,6]</sup>对水下动态威胁的速度大小和方向进行估计, 进而利用无迹贝叶斯估计方法<sup>[7-8]</sup>估计动态威胁的位置. 仿真试验表明, 相对于传统的估计方法, 该方法更加贴近水下动态威胁的运动模型<sup>[9-10]</sup>, 具有较高的精确性.

### 1 动态威胁运动方程和观测方程

为了使水下动态威胁的状态估计更加贴近真实的运动状态首先根据实际运动情况建立水下动态威胁的运动方程和观测方程. 对于水下动态威

胁的观测一般通过声学传感器来完成, 因此得到的观测数据大多为极坐标下的数据, 即水下动态威胁相对于观测点的距离  $R$ 、平面偏向角  $A$  和垂直偏向角  $E$ . 结合观测点自身坐标, 可以得到观测方程:

$$\begin{cases} \xi = R \cos E \cos A + x \\ \eta = R \sin E + y \\ \zeta = R \cos E \sin A + z \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $(\xi, \eta, \zeta)$  为水下动态威胁的世界坐标系坐标;  $(x, y, z)$  为观测点位置坐标.

建立水下动态威胁的运动模型应当结合观测方程进行. 由观测方程可以看出, 对水下动态威胁的观测信息仅限于动态威胁与观测点的相对位置, 通过观测方程无法获得水下动态威胁自身的姿态角. 因此, 由于观测信息不足, 水下动态威胁的转动在建立运动方程时应该被忽略. 但是由于动态威胁运动的连续性, 在某一时刻的位置信息不能完全反应其运动情况, 为了更全面地把握动态威胁的运动状态, 通过相邻两个时刻的观测信息可以解算得到动态威胁在两个时刻间速度大小和方向的平均值. 在双贝叶斯运动状态估计方法中, 将速度作为整体看待, 不将其投影至三个坐标轴.

记水下动态威胁的速度大小为  $v$ , 速度方向

收稿日期: 2016-10-07; 修订日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379069); 中央高校基础科研业务费支持项目(HEUCF160410)

作者简介: 刘厂(1982—), 男, 山东济宁人, 哈尔滨工程大学讲师, 博士, 主要从事水下运载器智能导航技术研究,  
E-mail: liuchang407@hrbeu.edu.cn.

与  $\eta E\xi$  平面的夹角为  $\varphi$ , 速度方向与  $E\xi$  轴正方向夹角为  $\theta$ , 可以得到水下动态威胁的运动方程

$$\begin{cases} \dot{\xi} = v \cos \varphi \cos \theta \\ \dot{\eta} = v \sin \varphi \cos \theta \\ \dot{\zeta} = v \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\xi, \eta, \zeta$  为水下动态威胁在世界坐标系下的坐标;  $\dot{\xi}, \dot{\eta}, \dot{\zeta}$  为其变化量。

## 2 水下动态威胁速度和位置的处理

为了实现对水下动态威胁的状态估计, 需要解算水下动态威胁的速度大小及其方向, 速度方向包括水下动态威胁的纵倾角和偏航角。文中的纵倾角和偏航角指的是水下动态威胁的速度方向与水平面  $\eta E\xi$  和  $E\xi$  轴正方向的夹角, 而不是水下动态威胁的姿态角。解算方程如下:

$$\begin{cases} \phi_{k-1} = \arctan \frac{\Delta \xi}{\Delta \eta} \\ \theta_{k-1} = \arctan \frac{\Delta \zeta}{\sqrt{\Delta \xi^2 + \Delta \eta^2}} \\ v_{k-1} = \frac{\sqrt{\Delta \xi^2 + \Delta \eta^2 + \Delta \zeta^2}}{\Delta t} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta \xi = \xi_k - \xi_{k-1}$ ,  $\Delta \eta = \eta_k - \eta_{k-1}$ ,  $\Delta \zeta = \zeta_k - \zeta_{k-1}$ ;  $\phi_{k-1}$  为其  $k-1$  时刻的纵倾角;  $\theta_{k-1}$  为其  $k-1$  时刻的偏航角;  $v_{k-1}$  为其  $k-1$  时刻的速度大小。

## 3 对速度的自适应贝叶斯估计

在实际运动过程中, 水下动态威胁的速度和加速度均会发生变化, 通常采用的 CT 模型和 CV 模型无法完全匹配其运动, 而模型失配往往会导致估计发散。自适应估计方法在经典估计方法的基础上, 能够充分发挥观测信息的作用, 对自身模型进行校正, 从而连续校正预测值。因此, 采用自适应估计的方法, 通过观测结果对模型进行调整, 以适应加速度变化的运动模型。笔者将加速度的变化量视作噪声, 通过 Sage-husa 噪声估计器对其均值进行估计。

根据前两节的运动分析, 得到水下动态威胁速度大小和方向的状态转移方程和观测方程:

$$\begin{pmatrix} \phi_k \\ \dot{\phi}_k \\ \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ v_k \\ \dot{v}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{k+1} \\ \dot{\phi}_{k+1} \\ \theta_{k+1} \\ \dot{\theta}_{k+1} \\ v_{k+1} \\ \dot{v}_{k+1} \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{\phi_k} \\ w_{\theta_k} \\ w_{v_k} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} \phi_k \\ \theta_k \\ v_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{k+1} \\ \dot{\phi}_{k+1} \\ \theta_{k+1} \\ \dot{\theta}_{k+1} \\ v_{k+1} \\ \dot{v}_{k+1} \end{pmatrix} + V_k \quad (5)$$

记:

$$x_k = \begin{pmatrix} \phi_k \\ \dot{\phi}_k \\ \theta_k \\ \dot{\theta}_k \\ v_k \\ \dot{v}_k \end{pmatrix}, \Phi = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$W_k = \begin{pmatrix} w_{\phi_k} \\ w_{\theta_k} \\ w_{v_k} \end{pmatrix}; E(W_k) = \begin{pmatrix} E(w_{\phi_k}) \\ E(w_{\theta_k}) \\ E(w_{v_k}) \end{pmatrix} = q_k; \Gamma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}; z_k = \begin{pmatrix} \phi_k \\ \theta_k \\ v_k \end{pmatrix}; E[V_k] = r_k; E[W_k V_k^T] = 0; E[W_k W_k^T] = Q_k \delta_{kj}; E[V_k V_k^T] = R_k \delta_{kj} \quad (8)$$

基于以上方程, 使用自适应贝叶斯估计方法, 设计自适应贝叶斯估计器。

预测

$$\hat{x}_{k|k-1} = \Phi \hat{x}_{k-1} + \Gamma u(W_{k-1}) \quad (9)$$

在获得  $k+1$  时刻的数据后, 对参数进行更新, 需要注意的是, 在  $k+1$  时刻, 由于观测值为水下动态威胁的坐标, 所以解算出的水下动态威胁速度信息是  $k$  到  $k+1$  时刻之间的平均值, 由于间隔时间较小, 将此平均值作为  $k$  时刻水下动态威胁的速度信息。

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k \hat{Z}_k \quad (10)$$



$$\hat{Z}_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1} - \hat{r}_k. \quad (11)$$

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + \hat{R}]^{-1}. \quad (12)$$

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \hat{Q}_{k-1}. \quad (13)$$

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1}. \quad (14)$$

噪声估计:

$$\hat{r}_k = (1 - d_{k-1}) \hat{r}_{k-1} + d_{k-1} (Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}). \quad (15)$$

$$\hat{R}_k = (1 - d_{k-1}) \hat{R}_{k-1} + d_{k-1} (\tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T - H_k P_{k,k-1} H_k^T). \quad (16)$$

$$\hat{q}_k = (1 - d_{k-1}) \hat{q}_{k-1} + d_{k-1} (\hat{X}_k - \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}). \quad (17)$$

$$\hat{Q}_k = (1 - d_{k-1}) \hat{Q}_{k-1} + d_{k-1} (K_k \tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T K_k^T + P_k - \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T). \quad (18)$$

在 Sage-husa 自适应贝叶斯估计方法中,遗忘因子  $b$  是十分关键的参数,估计精度是否发散与其相关. 本文中,使用预报残差法求取遗忘因子. 量测残差:

$$\tilde{Z}_{k+1}^T \tilde{Z}_{k+1} \leq \lambda \text{tr}\{E[\tilde{Z}_{k+1} \tilde{Z}_{k+1}^T]\}. \quad (19)$$

式中:  $\lambda$  为可变的储备系数,能够依据系统的需要变换适当的数值. 当  $\lambda = 1$  时估计效果最好. 即:

$$\tilde{Z}_{k+1}^T \tilde{Z}_{k+1} \leq \text{tr}\{E[\tilde{Z}_{k+1} \tilde{Z}_{k+1}^T]\}. \quad (20)$$

又有:

$$E[\tilde{Z}_{k+1} \tilde{Z}_{k+1}^T] = H_{k+1} [\Phi_{k+1} b_{k+1} P_k \Phi_{k+1}^T + Q_k] H_{k+1}^T + R_{k+1}. \quad (21)$$

代入,有:

$$b_k = \frac{\tilde{Z}_{k+1}^T \tilde{Z}_{k+1} - \text{tr}[H_{k+1} Q_k H_{k+1}^T + R_{k+1}]}{\text{tr}[H_{k+1} \Phi_{k+1} P_k \Phi_{k+1}^T H_{k+1}^T]}. \quad (22)$$

通过以上各式,即可得到对水下动态威胁速度大小和方向的估计结果.

#### 4 对位置的无迹贝叶斯估计

获得水下动态威胁的速度大小和方向的估计信息后,下一步是对运动体的未来位置进行估计. 不可避免地,由于水下动态威胁的机械误差和环境影响,水下动态威胁的行进过程仍是一个存在过程噪声的动态过程,因此需要使用贝叶斯估计方法对运动体位置进行进一步的预测. 由于此时状态方程仍为非线性,传统估计方法无法满足要求. 无迹贝叶斯估计方法根据“利用一组确定性的点对概率分布函数的近似要比直接近似非线性函数更容易”的思想,通过无迹变换获得确定性采样点,在非线性的估计中能够取得良好的效果.

因此,采用无迹贝叶斯估计方法进行运动体位置的估计. 建立水下动态威胁的状态方程和观测方程

$$X_{k+1} = f(X_k, \phi, \theta, v) + W_k; \quad (23)$$

$$y_k = H X_k + V_k, \quad (24)$$

式中:

$$X_k = \begin{pmatrix} \xi_k \\ \eta_k \\ \zeta_k \end{pmatrix}, Y_k = \begin{pmatrix} \xi_k \\ \eta_k \\ \zeta_k \end{pmatrix}, f(X_k, \phi, \theta, v) =$$

$$\begin{cases} \dot{\xi}_k = v \cos \phi \cos \theta \\ \dot{\eta}_k = v \sin \phi \cos \theta; H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ \dot{\zeta}_k = v \sin \theta \end{cases}$$

$E[W_k] = q_k; E[V_k] = r_k; E[W_k V_j^T] = 0; E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj}; E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj}$ . 基于此,设计对水下动态威胁的无迹贝叶斯估计器.

计算 Sigma 点:

$$\chi_k = [\hat{x}_k \hat{x}_k + (\sqrt{(n+\lambda)P_k})_i \hat{x}_k - (\sqrt{(n+\lambda)P_k})_i]. \quad (25)$$

预测:

$$\chi_{k+1|k} = f_k(\chi_k), \quad (26)$$

$$\hat{x}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \chi_{i,k+1|k}, \quad (27)$$

$$P_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\chi_{i,k+1|k} - \hat{x}_{k+1|k}) (\chi_{i,k+1|k} - \hat{x}_{k+1|k})^T + Q_k. \quad (28)$$

这样,我们就得到了水下动态威胁位置的最终估计值,在  $k+1$  时刻,获取运动体位置的观测值之后,根据观测量对参数进行更新

$$\gamma_{k+1|k} = h(\tilde{\chi}_k), \quad (29)$$

$$\hat{y}_{k+1|k} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^m \gamma_{i,k+1|k}, \quad (30)$$

$$P_{y_{k+1}} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\gamma_{i,k+1|k} - \hat{y}_{k+1|k}) (\gamma_{i,k+1|k} - \hat{y}_{k+1|k})^T + R_k. \quad (31)$$

$$P_{x_{k+1|ky_{k+1}}} = \sum_{i=0}^{2n} w_i^c (\chi_{i,k+1|k} - \hat{x}_{k+1|k}) (\gamma_{i,k+1|k} - \hat{y}_{k+1|k})^T, \quad (32)$$

$$K_{k+1} = P_{x_{k+1|ky_{k+1}}} P_{y_{k+1}}^{-1}, \quad (33)$$

$$P_{k+1} = P_{k+1|k} - K_{k+1} P_{y_{k+1}} K_{k+1}^T, \quad (34)$$

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1|k} + K_{k+1} (y_{k+1} - \hat{y}_{k+1|k}), \quad (35)$$

式中:  $\lambda$  为点集产生的尺度参数,每个点的权值因采样策略的不同而稍有差异. 笔者采用标度采样:

$$\begin{cases} w_0^m = \frac{\lambda}{n + \lambda} \\ w_0^c = \frac{\lambda}{n + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta \\ w_i^m = w_i^c = \frac{1}{2(n + \lambda)} \quad i = 1, \dots, 2n \end{cases} \quad (36)$$

式中:  $w_i^m$  和  $w_i^c$  分别对应均值和方差 Sigma 点的权值,且满足  $\sum w_i = 1$ ; 其中尺度参数  $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$ ;  $\alpha$  和  $\kappa$  为两个决定点集分布程度的参数;  $\kappa$  可取为  $\kappa = 3 - n$ ,但通常情况下应确保后验协方差的半正定性; 参数  $\beta$  可以提高协方差的近似程度,在高斯分布中其最佳取值为 2.

## 5 仿真试验

为了验证上述方法的有效性,设计水下动态威胁在三维空间中进行变加速运动,模拟观测数据作为估计算法的输入. 分别利用双贝叶斯估计方法和单级贝叶斯估计方法对动态威胁的运动路径进行估计,通过对比估计结果与水下动态威胁实际航路的误差验证双贝叶斯估计方法的有效性. 其中,单级贝叶斯估计采用自适应的无迹贝叶斯估计方法,将速度投影至三个坐标轴,直接对水下动态威胁的世界坐标系坐标进行估计. 其状态方程为:

$$\begin{pmatrix} \xi_k \\ \dot{\xi}_k \\ \eta_k \\ \dot{\eta}_k \\ \zeta_k \\ \dot{\zeta}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_{k-1} \\ \dot{\xi}_{k-1} \\ \eta_{k-1} \\ \dot{\eta}_{k-1} \\ \zeta_{k-1} \\ \dot{\zeta}_{k-1} \end{pmatrix} + W_k \quad (37)$$

### 5.1 水下动态威胁运动路径设计

设计动态威胁从(200,250,1 000)点出发,先进行 5 s 的匀速直线运动,在随后的 95 s 中,做速度大小和方向不断变化的变速曲线运动. 具体运动情况如下.

1~5 s. 做速度为 5 m/s 的匀速直线运动.

5~10 s. 速度俯仰角突变为 0.429 7,角加速度为 -0.05 rad/s,航向角突变为 0.707 1,角加速度为 0.05 rad/s,加速度为 0.05 m/s<sup>2</sup>.

10~25 s. 水下动态威胁改变航向,速度俯仰角突变为 0.729 7,角加速度为 0.05 rad/s,航向角突变为 1.407 1,角加速度为 -0.07 rad/s,加速度为 -0.05 m/s<sup>2</sup>.

25~40 s. 速度俯仰角突变为 0.829 7,角加速度为 -0.01 rad/s,航向角突变为 0.507 1,角加速度为 0.05 rad/s,加速度为 -0.05 m/s<sup>2</sup>.

40~60 s. 水下动态威胁突然回转并加速行进,速度俯仰角突变为 0.829 7,角加速度为 -0.01 rad/s,航向角突变为 0.607 1,角加速度为 0.05 rad/s,加速度为 0.1 m/s<sup>2</sup>.

60~80 s. 再次改变航向,速度俯仰角突变为 1.329 7,角加速度为 -0.03 rad/s,航向角突变为 0.607 1,角加速度为 -0.03 rad/s,加速度为 0.05 m/s<sup>2</sup>.

80~100 s. 水下动态威胁速度俯仰角突变为 0.929 7,角加速度为 0.01 rad/s,航向角突变为 1.007 1,角加速度为 0.01 rad/s,加速度为 -0.05 m/s<sup>2</sup>.

在 100 s 后运动体消失. 在此过程中,水下动态威胁的最高速度达到 11 m/s,最大角加速度为 0.07 rad/s,最大加速度为 0.1 m/s<sup>2</sup>.

水下动态威胁运动路径如图 1 所示.

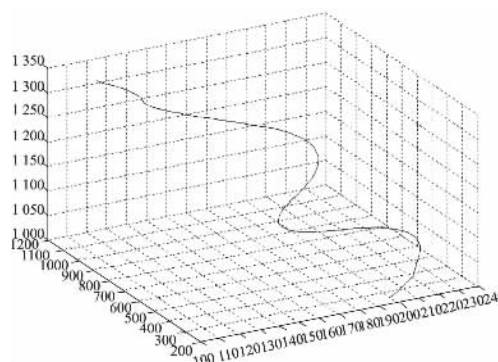


图1 水下动态威胁的模拟航路

Fig.1 The simulated route of underwater dynamic threat

### 5.2 仿真结果

设观测误差为 1(单位: m),方差为 1,取无迹贝叶斯滤波中  $\lambda$  为 1,分别采用单级贝叶斯方法和笔者设计的双贝叶斯估计方法(取无迹贝叶斯滤波中  $\lambda$  为 1)得到的仿真结果如图 2~5 所示.

通过比较可以发现,在观测噪声较大的条件下,将速度投影至三个坐标轴分别进行估计的单贝叶斯估计方法不能很好地把握运动特征,估计误差较大,在航路附近有较大波动. 由于双贝叶斯估计充分考虑到水下动态威胁的运动状态,先对水下动态威胁的速度大小及其方向进行估计,更充分地利用了观测信息,因此,双贝叶斯估计能够更好地消除观测噪声对估计的影响,在观测噪声

均值较大的情况下,即使对动态目标的位置估计出现了误差,对于动态目标的运动趋势估计依旧较为精确,也得到了较高精度的估计值。

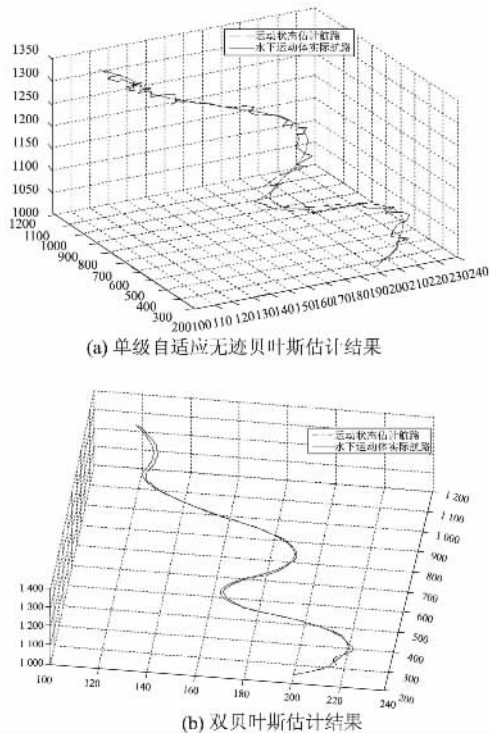


图2 水下动态威胁航路估计结果

Fig.2 The estimated route of underwater dynamic threat

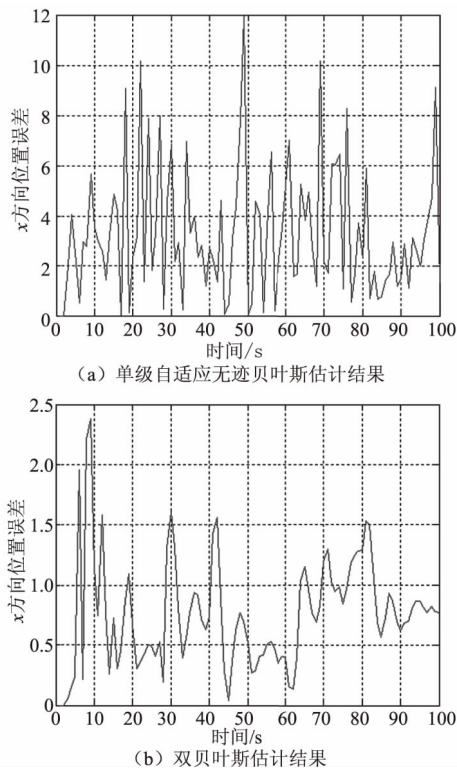


图3 x方向估计误差

Fig.3 The error in x direction

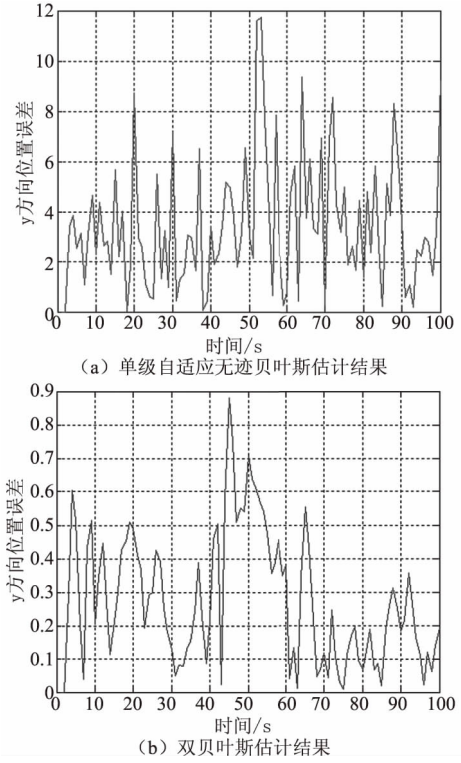


图4 y方向估计误差

Fig.4 The error in y direction

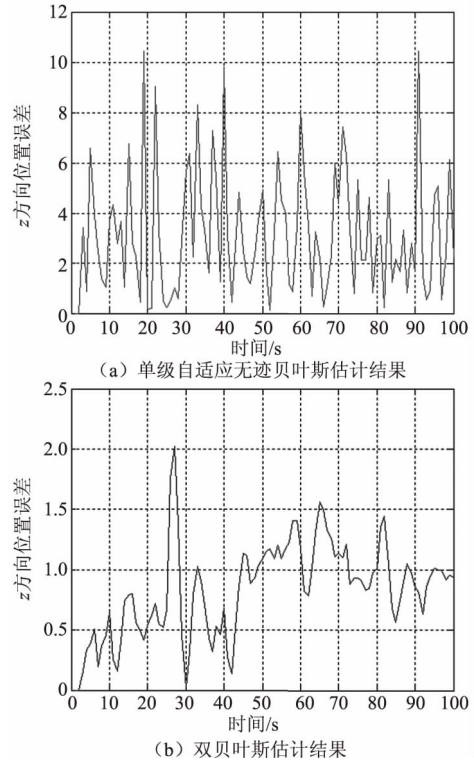


图5 z方向估计误差

Fig.5 The error in z direction

## 6 结论

提出了一种基于双贝叶斯估计的水下动态威胁运动状态估计方法. 首先建立了水下运载体的

运动模型,通过自适应贝叶斯估计对动态威胁的速度大小和方向进行估计,再以此为输入,通过第二级无迹贝叶斯估计进行运动体位置估计. 仿真试验证明,相对于传统的单级估计方法,双贝叶斯估计方法在进行水下动态威胁运动状态估计时能够更好地贴合运动模型,得到较高的估计精度,并能准确地给出水下动态威胁的运动趋势.

### 参考文献:

- [1] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 961-967.
- [2] 高晓光, 李青原, 邸若海. 基于 DBN 威胁评估的 MPC 无人机三维动态路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2199-2205.
- [3] 李峰. 自主水下航行器目标跟踪方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2013.
- [4] 邸若海, 高晓光. 模糊离散动态贝叶斯网络的目标威胁等级评估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(4): 14-17.
- [5] GAO M, JIANG J, MING N K, et al. Cooperative path planning for UAVs with UAV loss considerations [C]//Proc. of computational intelligence for security and defense applications, 2013: 38-44.
- [6] 张召友. 非线性 Bayesian 滤波及其在 SINS/GPS 紧耦合导航中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2013.
- [7] 张宏启. 新型自适应 kalman 滤波算法在组合导航中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学自动化学院, 2012.
- [8] 王克文, 蒋德珑, 孙栗. 电力系统状态估计算法的模糊综合评价与分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2011, 32(3): 85-89.
- [9] 张恒艳, 高中文, 李文龙, 等. 不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制器设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 15-19.
- [10] 范文兵, 郭云, 王振义, 等. 一种 MIMO 时间相干信道下的有限反馈新方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 43-46.

## Research on Motion Status Estimation of Dynamic Threat Base on Double Bayes Estimation

LIU Chang<sup>1</sup>, ZHAO Junxiang<sup>2</sup>, HU Hai<sup>3</sup>

(1. College of Automatic, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of space physics, Beijing 100076, China; 3. Nuclear Power Institute of China, Shuangliu 610213, China)

**Abstract:** For the issue of motion estimation of underwater dynamic threat, single-stage estimation method is utilized extensively in which velocity is decomposed to three coordinate axes for independent calculation. In order to consider the integrity of the speed, a double Bayesian estimation method is proposed in this paper. In the first stage of the improved approach, the velocity and direction of underwater dynamic threat are estimated by the adaptive Bayesian estimation, and then the position is estimated by the unscented Bayesian estimation in the second stage with the joint efforts of the estimated results in the first stage. Simulation results are provided to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** double Bayes estimation; underwater dynamic threat; motion status

# 基于降维数据边界点曲率的变电站设备识别

窦本君<sup>1</sup>, 纪 勇<sup>2</sup>, 郑尚高<sup>2</sup>, 冯冬青<sup>1</sup>, 罗 勇<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南腾龙信息工程有限公司, 河南 郑州 450007)

**摘 要:** 为了对变电站三维仿真模型进行快速重建, 针对变电站设备三维数据量过大, 不能快速识别的问题, 通过对设备的三维数据做降维处理, 减少数据处理量, 研究利用降维后的数据对设备进行快速精确识别的方法. 通过分析降维数据点集的特征, 笔者提出一种利用降维数据边界点曲率进行识别的方法, 其中边界点提取采用基于 Alpha Shapes 原理的滚圆法, 边界点的曲率通过点到弦的距离累积来计算, 最后利用边界点的曲率来识别不同的设备. 仿真实验表明, 该识别方法简洁高效, 大大降低了计算量, 并且能够有效地识别不同设备.

**关键词:** 三维数据; 识别; 降维; 边界点; 曲率; 仿真

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.014

## 0 引言

随着地理信息系统向三维领域的逐渐发展, 三维数字化电网的研究快速升温, 其中对三维对象的快速建模渐渐成为研究的热点. 想要对变电站进行三维模型重构, 就必须对变电站里的设备进行识别, 以便区分设备种类. 传统三维模型的重建, 主要靠人眼对采集的三维点云数据进行识别辨认, 然后在 3dmax 模型库找到相匹配的模型, 再用于建模, 这消耗大量的人力, 效率很低, 影响整个建模的进程. 目前还没有一种很好的可以自动识别点云数据的方法.

针对三维物体的识别, 文献 [1] 引入自旋图像 (spin-image) 的特征, 对物体的三维特征进行描述, 进而达到识别和定位的目的, 但该方法计算量太大. RUSU 等 [2] 提出的 viewpoint feature histogram (VFH) 算法, 通过目标区域的三维点云数据计算它的 VFH 特征并进行匹配, 但是这种方法对数据的空间分辨率有很高的要求, 而且不能满足实时性的要求. 文献 [3] 定义了一个最大一致形状片, 并且将它组织成一个无向图, 然后使用分层的图同构方法来识别三维物体, 但是该方法在处理物体的遮挡问题时比较困难. 郭裕兰等 [4] 提出采用“点云”正交表面投影特征来进行模型的快速预选, 然后利用 ICP 算法把目标和模板的“点云”进行精确匹配. 三维点云数据可以比较准确

地表示物体的外形信息, 研究人员将利用点云数据对设备进行识别, 但是设备的三维数据量很大, 直接用于识别计算量很大, 所以笔者提出一种基于设备投影平面点集边界点曲率的识别方法, 从而实现变电站设备的快速保真识别 [5-6].

## 1 提取降维数据边界点

投影平面点集边界点的提取是变电站设备识别非常关键的一步. 笔者采用基于 Alpha Shapes 原理 [7] 的滚圆法对变电站设备降维数据的边界点进行提取.

### 1.1 滚圆法基本原理

对于任意一个点集, 我们可以用钉在平面上的钉子来表示. 假如用一个半径为  $\alpha$  的圆环从边界靠近这个钉群, 然后让这个圆环围绕钉群滚动一圈, 当  $\alpha$  足够大时, 每次滚动, 这个圆环都会被两个钉子卡住, 这样滚动一圈所接触到的钉子就是这个钉群的边界, 也就是这个点集的外边界点. 利用滚圆法提取边界点的示意图如图 1 所示.

**模型判断条件:** 在点集  $S$  内, 任意选取两点  $P_1, P_2$ , 过这两点绘制半径为  $\alpha$  的圆, 若这个圆内不包含别的点, 点  $P_1, P_2$  就被认为是边界点.

### 1.2 滚圆法提取设备二维点集边界点步骤

#### (1) 点云数据降维

将设备的点云数据分别向  $xoy, yoz, xoz$  平面投影, 得到设备在 3 个平面的二维数据点集.

收稿日期: 2016-07-08; 修订日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61473266); 河南省产学研合作项目 (152107000058)

通讯作者: 冯冬青 (1958—), 男, 广东佛山人, 郑州大学教授, 主要从事智能控制理论与应用、图像处理、模式识别等研究, E-mail: dqfeng@zzu.edu.cn.



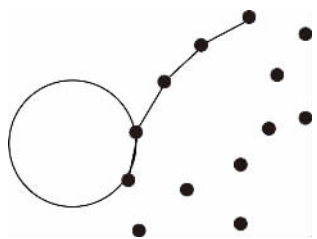


图1 滚圆法提取边界点示意图

Fig. 1 Boundary points extraction using rolling method

(2) 提取投影平面点集的边界点

①首先选取点集  $S$  中  $y$  坐标最小(假如  $y$  值相同则取  $x$  值最大)的点为起始边界点  $P_1$ .

②选定半径  $\alpha$ , 搜索距离  $P_1$  点小于  $2 \times \alpha$  的点构成的子集  $S_2^{[8]}$ , 在  $S_2$  中任取一点  $P_2$ , 求出经过  $P_1, P_2$  且半径为  $\alpha$  的圆的圆心  $O$ .

已知两点坐标和半径  $\alpha$ , 求该圆圆心的步骤如下:

假如两点坐标分别为  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ , 所给半径为  $\alpha$ , 圆心坐标为  $(x, y)$ . 列出如下方程组

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = \alpha^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = \alpha^2 \end{cases} \quad (1)$$

求解方程组(1)就可以得到圆心的坐标  $(x, y)$ . 但是直接对该方程组求解比较麻烦, 我们可以用测绘学中的距离交汇法来求圆心坐标<sup>[9]</sup>.

$$\begin{cases} x = x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2} + H(y_2 - y_1) \\ y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{2} + H(x_1 - x_2) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中: } H = \pm \sqrt{\frac{\alpha^2}{S^2} - \frac{1}{4}} \quad (3)$$

$$S^2 = (x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 \quad (4)$$

当两点的距离小于  $2\alpha$  时, 能求得两个过这两点且半径为  $\alpha$  的圆<sup>[10]</sup>,  $H$  的取值有正负两种情况, 所求得的圆心分别为  $O$  和  $O'$ , 如图2所示.

③在点集  $S_2$  中, 分别求出(除去  $P_1, P_2$  外)所有点距离圆心  $O$  的长度  $L$ .

假如所有  $L$  都大于半径  $\alpha$ , 则认为点  $P_1, P_2$  是边界点; 假如有  $L$  小于半径  $\alpha$ , 则停止此步运行, 转去执行第④步. 由步骤②可知经过距离小于  $2\alpha$  的两点且半径为  $\alpha$  的圆有两个, 所以我们要考虑两种情况, 只要存在一个圆, 且圆内没有别的点时, 我们认为  $P_1, P_2$  是所求的边界点.

④对  $S_2$  中的下一个点进行②~③步判断, 直到把  $S_2$  中的所有点都进行一次边界点判断.

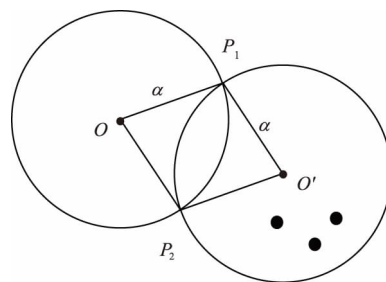


图2 距离交汇法求圆心示意图

Fig. 2 Get the centre of circle using distance intersection method

⑤将②~③步得到的边界点  $P_2$  重新当作起始边界点, 重复②~④步判断. 每次搜索边界点时都会得到两个不同的边界点, 如果搜索到的新边界点与已经得到的边界点相同, 则不保存, 只保存不同的边界点. 直到重新搜索到第一个边界点, 则搜索结束.

## 2 计算边界点曲率

### 2.1 相关研究

曲率表示曲线在一点的弯曲程度, 从曲线的曲率图上, 可以知晓曲线的凹凸部分, 并由此得到曲线的大致形状. 不过平面离散曲线一般都不是连续的, 而且不可导, 很难求得它的曲率. 利用尺度空间理论<sup>[11]</sup>和圆弧拟合算法<sup>[12]</sup>可以求得离散曲线的曲率, 但是这两种方法计算量较大. 彭铁根<sup>[13]</sup>利用一条固定不动的弦, 然后求得曲线段上每一点到弦的距离, 最后求出一点的距离累积. 该算法计算量较小, 且具有较好的鲁棒性能.

### 2.2 点到弦的距离累积

假设封闭的散曲线  $C$  由  $n$  个点  $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  组成, 其中  $P_i = (x_i, y_i)$ ,  $1 \leq i \leq n$ . 为了衡量  $P_i$  点的凹凸程度以及曲率的变化, 在该点前后各取  $L$  个数据点, 然后分析这一个曲线段. 这个曲线段的两个端点分别为  $P_{i-L}$  (若  $(i-L) < 1$ , 则  $P_{i-L} \leftarrow P_{n+(i-L)}$ ) 和  $P_{i+L}$  (若  $(i+L) > n$ , 则  $P_{i+L} \leftarrow P_{(i+L)-n}$ ), 将它们连接起来, 并且取向量  $\vec{A} = \vec{P}_{i+L} - \vec{P}_{i-L}$ . 如果  $P_j$  ( $(i-L) < j < (i+L)$ ) 在向量  $\vec{A}$  的左侧, 则定义该点到弦的距离符号为正, 否则为负. 点到弦的距离如图3所示.

在此, 距离符号可以利用一个判别矩阵的行列式值来进行判断, 设如下判别矩阵

$$M_{j,L}(i) = \begin{pmatrix} x_{i+L} - x_{i-L} & y_{i+L} - y_{i-L} \\ x_j - x_{i-L} & y_j - y_{i-L} \end{pmatrix} \quad (5)$$

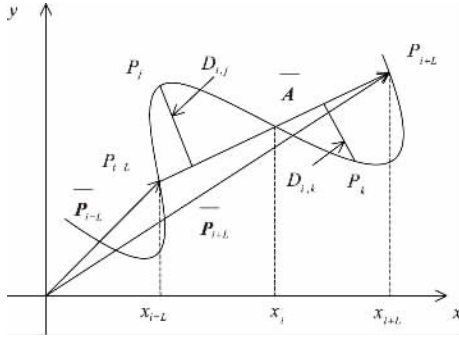


图3 点到弦的距离

Fig.3 Distance of point to chord

则有

$$|M_{j,L}(i)| = \begin{cases} >0 & \text{sgn}(i,j,L) = 1 \\ =0 & \text{sgn}(i,j,L) = 0 \\ <0 & \text{sgn}(i,j,L) = -1. \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\text{sgn}(i,j,L)$  表示  $P_j$  点到向量  $\bar{A}$  的距离符号.

在  $P_{i-L}$  到  $P_{i+L}$  的离散曲线段上, 可以用  $D_{i,j}$  来表示点  $P_j$  到向量  $\bar{A}$  的距离, 那么得到

$$D_{i,j} = \left| \frac{y_{i+L} - y_{i-L}}{x_{i+L} - x_{i-L}} x_j - y_j + y_{i-L} - \frac{y_{i+L} - y_{i-L}}{x_{i+L} - x_{i-L}} x_{i-L} \right| / \sqrt{\left( \frac{y_{i+L} - y_{i-L}}{x_{i+L} - x_{i-L}} \right)^2 + 1}. \quad (7)$$

设  $P_i$  点的距离累积和为  $S_L(i)$ , 则有

$$S_L(i) = \sum_{j=i-L}^{j=i+L} \text{sgn}(i,j,L) D_{i,j}. \quad (8)$$

对于具有封闭特性的离散曲线, 按照式(8)沿

顺时针方向环绕曲线一周, 就可以获得所有点的点到弦的距离累积值  $S_L(i)$ . 我们可以用一点的距离累积来近似代表曲线上该点的曲率<sup>[14]</sup>.

### 2.3 曲率分布直方图相似度比较

求出边界点曲率以后, 再求曲率分布直方图. 用直方图匹配方法来进行相似度比较, 采用欧氏函数  $M_E(Q, D)$  对直方图间的距离进行衡量,

$$M_E(Q, D) = \sqrt{\sum_{i=1}^L [H_Q(i) - H_D(i)]^2}. \quad (9)$$

$$H(k) = \frac{n_k}{N}, k=0, 1, \dots, L-1. \quad (10)$$

式中:  $k$  代表曲率相应分段取值;  $L$  是曲率分段的个数;  $n_k$  是图像中相应曲率段内点的个数;  $N$  是图像边界点总数.

## 3 实验与仿真

试验数据为2014年在郑州-嵩山500 kV变电站采集, 选用10种设备作为模板, 编号ID为0~9. 首先计算10种设备在3个投影平面的边界点曲率分布, 并存入模型数据库. 被测样本选取20组, 每种设备选取不同位置的两组数据. 求边界点曲率时, 参数  $L=5$ , 绘制直方图时, 分别求出10种设备在3个平面边界点曲率  $\rho$  的最小值和最大值, 离散区间数  $num = (\rho_{\max} - \rho_{\min}) / 0.06$ . 10种模板设备点云数据的三维视图, 如图4所示.

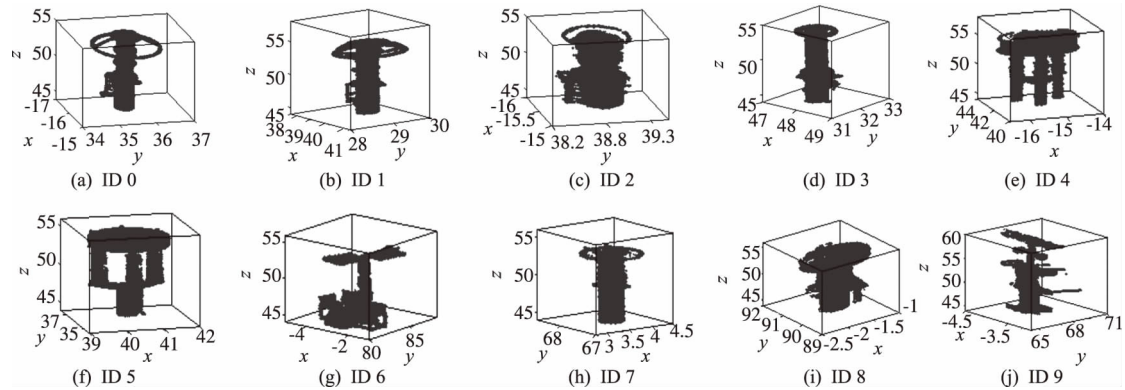


图4 模型数据库设备的三维视图

Fig.4 3D view of objects in the model database

选取00号样本进行试验, 将设备向3个平面投影, 利用滚圆法提取投影平面点集的边界点, 结果如图5所示. 其中图5(a)、图5(b)、图5(c)分别为样本在  $xoy$ 、 $yozy$ 、 $xozy$  平面投影点集的边界点. 由图5可知, 不管设备的投影图像是否规则, 滚圆法都可以比较精确的提取点集的外边界点.

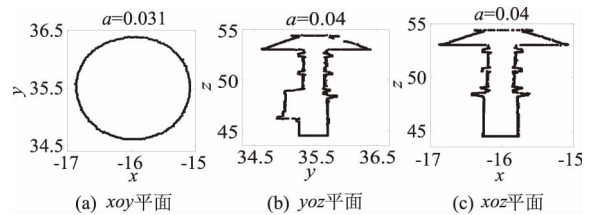


图5 边界点提取

Fig.5 Extraction of boundary points

根据公式(5)~(8),依次求得样本设备在3个投影平面二维点集边界点的曲率,曲率值如图6所示,并用曲率的频率分布直方图来表示,如图7所示.利用相同的方法求出其他样本设备的边界点曲率,并求出曲率分布.

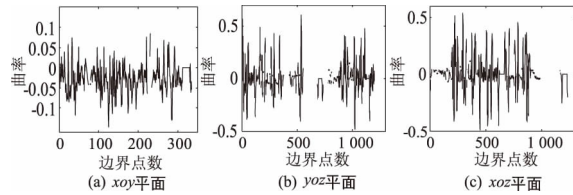


图6 样本设备在3个投影平面的边界点曲率

Fig.6 Boundary curvature of sample equipment under three projection planes

利用公式(9)和(10),将20组样本数据在3个投影平面边界点的曲率分布与模型数据库中比较,并将3个平面的比较结果求平均,得到表1,其中横向ID为模板,竖向为测试样本.

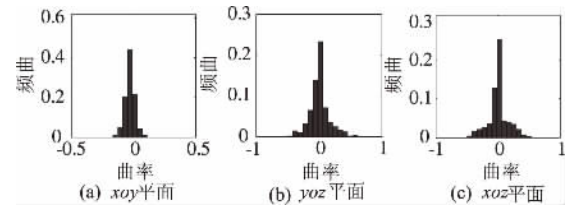


图7 样本设备在3个投影平面边界点曲率分布直方图

Fig.7 Boundary points curvature distribution histogram of sample equipment under three projection planes

表1 20组待测样本与模型库在3个平面投影点集边界点曲率分布直方图相似性比较

Tab.1 Boundary points curvature distribution histogram similarity comparison between 20 samples and model base under three projection planes

样本ID	模型库中10类模板ID									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
00	0.001 4	0.521 3	0.797 9	0.848 2	0.968 3	0.886 5	0.936 2	0.886 4	0.934 7	0.942 6
01	0.001 3	0.571 5	0.781	0.850 5	0.896 2	0.927 3	0.910 5	0.897 3	0.926 3	0.937 2
10	0.597 9	0.004 4	0.861 2	0.839 3	0.879 2	0.915 8	0.884 3	0.847 3	0.903 5	0.884 3
11	0.202 5	0.377 1	0.871 4	0.869 9	0.894 7	0.847 5	0.895 2	0.783 6	0.894 2	0.879 2
20	0.849 3	0.837 5	0.001 2	0.895 0	0.794 2	0.801 4	0.843 7	0.790 5	0.839 2	0.901 7
21	0.861 7	0.884 7	0.002 5	0.850 3	0.785 1	0.837 1	0.854 3	0.809 2	0.815 2	0.897 2
30	0.795 2	0.836 2	0.604 6	0.352 1	0.886 3	0.847 3	0.902 1	0.886 4	0.257 9	0.874 5
31	0.806 1	0.837 8	0.547 2	0.002 5	0.875 2	0.895 3	0.890 5	0.879 2	0.895 3	0.885 4
40	0.896 4	0.876 6	0.889 3	0.887 3	0.001 5	0.607 3	0.884 3	0.890 6	0.875 3	0.894 5
41	0.887 4	0.902 3	0.897 2	0.879 4	0.001 2	0.584 2	0.857 2	0.864 7	0.883 5	0.879 6
50	0.890 5	0.807 2	0.865 7	0.857 3	0.658 3	0.001 5	0.885 9	0.890 5	0.884 3	0.849 5
51	0.886 3	0.795 8	0.854 9	0.863 5	0.584 9	0.001 3	0.894 3	0.870 3	0.857 0	0.879 3
60	0.887 4	0.814 7	0.884 7	0.892 5	0.857 3	0.795 8	0.002 5	0.901 3	0.889 4	0.902 5
61	0.874 8	0.859 4	0.885 2	0.879 4	0.886 2	0.826 9	0.002 3	0.893 5	0.857 3	0.895 7
70	0.858 2	0.860 5	0.893 7	0.901 5	0.890 6	0.795 8	0.806 2	0.001 5	0.806 9	0.883 7
71	0.849 3	0.857 2	0.885 3	0.889 4	0.854 7	0.825 4	0.793 8	0.001 7	0.836 2	0.863 8
80	0.873 9	0.847 3	0.869 2	0.906 1	0.283 7	0.873 6	0.802 8	0.814 7	0.321 3	0.901 7
81	0.882 7	0.850 6	0.902 5	0.897 3	0.865 3	0.897 2	0.857 3	0.845 9	0.001 8	0.884 9
90	0.869 3	0.880 6	0.912 8	0.885 6	0.864 7	0.857 4	0.869 2	0.857 2	0.890 6	0.001 5
91	0.847 2	0.872 6	0.891 7	0.859 3	0.832 9	0.849 3	0.874 8	0.901 6	0.854 7	0.001 2

已知样本00、01与模板0是同种设备,其他样本命名类似.由表1可以看出,20种待测样本中,除11、30、80号样本外,其他均能得到有效的匹配,识别率为85%,其中11号样本识别成了0号模型,30号样本识别成了8号模型,80号样本识别成了4号模型,这是由于采集的点云数据不完整造成的,数据足够完整时,识别率将更高.

为了验证本算法的效率,与文献[14]相比较,平台为Intel(R) Core(TM) Duo CPU 2.0GHz处理器,笔者通过提取二维平面点云数据边界点,计算边界点曲率并匹配,识别单个物体总共需要10 s左右.而文献[14]通过找到最近点时间,找到对应匹配曲面对并验证,总共需要50 s左右.因此可以看出笔者的算法具有很高的效率.

## 4 结论

笔者通过将设备在三个平面进行投影,减少数据处理量,然后求取三个投影平面的点集的边界点曲率并用于识别. 其中边界点提取所采用的滚圆法以及求曲率时所采用的点到弦的距离累积近似,都大大减小了计算量. 该识别方法简单高效,可以快速地采集的三维点云数据进行识别,加快了变电站三维模型的重建.

## 参考文献:

- [1] LIU Y, MA J, ZHAO J. Three dimensional automatic target recognition based on spin-images [J]. *Infrared and laser engineering*, 2012, 41(2): 543–548.
- [2] RUSU R B, BRADSKI G, THIBAU R, et al. Fast 3d recognition and pose using the viewpoint feature histogram [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei: IEEE Conference Publications, 2010: 2155–2162.
- [3] DORAI C H. COSMOS: A framework for representation and recognition of 3d free-from objects [D]. Dissertation: Michigan State Univ, 1997.
- [4] GUO Y L, LU M, TAN Z G. Fast target recognition in laser using projection contour features [J]. *Chinese journal of lasers*, 2012(2): 200–205.
- [5] GRAHAM R L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set [J]. *Information processing letters*, 1972, 1(4): 132–133.
- [6] SAMPATH A, SHAN J. Building boundary tracing and regularization from airborne LiDAR point clouds [J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2007, 73(7): 805–812.
- [7] EDELSBRUNNER H, KIRKPATRICK D, SEIDEL R. On the shape of a set of points in the plane [J]. *IEEE information theory society*, 1983, 29(4): 551–559.
- [8] 沈蔚, 李京, 陈云浩, 等. 基于 LIDAR 数据的建筑轮廓线提取及规则化算法研究 [J]. *遥感学报*, 2008, 12(5): 692–698.
- [9] 张宏, 温永宁, 刘爱利, 等. 地理信息系统算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 王宗跃, 马洪超, 徐宏根, 等. 海量点云的边缘快速提取算法 [J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(36): 213–215.
- [11] MOKHTARIAN F, MACKWORTH A. Scale-based description and recognition of planar curves and two-dimensional shapes [J]. *IEEE transaction pattern analysis and machine intelligence*, 1986, 8(1): 34–43.
- [12] YANG X N, WANG G Z. Planar point set fairing and fitting by arc splines [J]. *Computer-aided design*, 2001, 33(1): 35–43.
- [13] 彭铁根, 吴惕华. 基于负曲率极值点的零件识别与检测技术研究 [J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(11): 3058–3062.
- [14] 魏永超, 刘长华, 杜冬. 基于曲面分割的三维点云物体识别 [J]. *光子学报*, 2010, 39(12): 2268–2273.

## Substation Equipment Identification Based on Boundary Curvature of Dimension-reduced Point Set

DOU Benjun<sup>1</sup>, JI Yong<sup>2</sup>, ZHENG Shangao<sup>2</sup>, FENG Dongqing<sup>1</sup>, LUO Yong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Tenglong Information and Engineering Company, Zhengzhou 450007, China)

**Abstract:** In order to build 3D simulation model of transformer substation, the device should be identified quickly. But the 3D data of substation equipment was so large that it was difficult to identify quickly. This paper used dimension reduction to reduce the amount of data. It provided a method to identify equipment quickly using the dimension-reduced data. After analyzing the characteristic of the dimension-reduced data, a method using boundary curvature of dimension reduction point set was proposed. In the process, a rolling method based on principle of Alpha Shapes to extract the boundary points was proposed. The curvature of the boundary point was acquired by point-to-chord distance accumulation. Then equipment was identified by using boundary curvature. The simulation results showed that the method was concise and efficient. It could identify different equipment and reduce the amount of calculation greatly.

**Key words:** 3D data; identify; dimension-reduced; boundary points; curvature; simulation

# 双钢轮压路机的非线性建模及其传动干扰分析

沈培辉<sup>1</sup>, 林述温<sup>2</sup>

(1. 福建船政交通职业学院 机械工程系, 福建 福州 350007; 2. 福州大学 机械及自动化学院, 福建 福州 350002)

**摘 要:** 根据双钢轮振动压路机的整机结构特点和双激振工作特性, 充分考虑前后随振土对压实系统的非线性振动耦合, 建立了7自由度动力学跳振模型, 基于周期内连耦—脱耦—再连耦的分解思路, 以YZC12型压路机为算例, 分析在平稳接触、轻微碰撞和强烈碰撞3种不同压实工况下系统的非线性振动响应。结果表明, 前后轮跳振产生的运动偏移量是产生传动干扰的主要原因, 随着代表不同密实度的压实进程土壤参数变化, 系统时域波形出现简谐波式畸变, 一阶、二阶和四阶频谱出现分数倍亚谐波和高次超谐波非线性响应直至进入混沌, 同时行驶速度主要影响前后随振土的力学参数, 进而影响前后轮的运动差异。通过主动控制机架与振动轮的一级减振系统参数可以明显弱化系统的非线性振动响应和前后轮的压实传动干扰。

**关键词:** 双钢轮振动压路机; 非线性跳振模型; 随振土; 传动; 干扰

**中图分类号:** TU663

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.015

## 0 引言

振动压实机械广泛应用于公路、港口和建筑等密实工程中<sup>[1-3]</sup>。土壤振动压实过程分析中存在不可避免的非线性动力学问题。文献[4]首先根据连耦和跳振两个代表性压实工况提出了分段线性跳振模型, 之后文献[5-7]发展了该模型并应用于压实的全过程动力学跳振分析, 但都是以忽略随振土质量为前提讨论的。然而, 跳振之后再次耦合振动时, 随振土并非静止等待振动钢轮的再次接触连耦, 而是周期内作单自由度的自由衰减运动, 再次连耦属典型的动力学碰撞问题。文献[8]明确指出, 随振土质量是影响压实系统振动稳定性的重要因素, 但该文献没有进一步分析跳振过程中的碰撞问题。到目前为止, 针对双钢轮压路机的整体跳振模型研究鲜见报道。

长安大学刘本学等<sup>[9-10]</sup>通过试验发现双钢轮压路机在压实过程中存在特有的拍振现象和减振系统动态性能远比单钢轮压路机复杂, 但没有建立整体的非线性跳振模型。现有单钢轮跳振模型未能很好地解释双钢轮振动压路机作业过程中存在的整体跳振碰撞非线性问题, 更难以描绘前

后两轮之间的传动干扰动力学特性, 使得双钢轮振动压路机的研究与应用缺乏很好的理论支撑。因此, 笔者在充分考虑随振土质量的前提下, 提出了7自由度的双钢轮振动压路机整体跳振非线性模型, 并系统分析在压实行进中不同土壤参数变化时前后轮的碰撞及其相互干扰的传动非线性特性, 且探索一级、二级减振系统参数的主动控制效果。

## 1 建模与分析

### 1.1 非线性动力学模型的建立

建立整车7自由度动力学振动模型, 如图1所示。基本假设: ①假设前后振动轮、机架、驾驶室质量分别为 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$ ; 考虑前后随振土质量 $m_{s1}$ 、 $m_{s2}$ 对耦合振动的影响, 参考文献[8]取振动轮质量的20%分析。②假设前后轮与机架之间的减振块具有相同的线性刚度和阻尼分别为 $k_3$ 、 $c_3$ , 驾驶室与机架之间的二级减振块刚度和阻尼分别为 $k_4$ 、 $c_4$ , 考虑到前后随振土具有本征差异的集中刚度和阻尼为 $k_1$ 、 $c_1$ 和 $k_2$ 、 $c_2$ 。③假设前后振动轮偏心块产生的激振力只以垂直方向的分量 $F_{e1}$ 、 $F_{e2}$ 作用在模型上, 以静平衡为系统零点, 建立动力学方程如下:

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2016-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175086); 福建省高校杰出青年科研人才培养计划资助项目(JA11299); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01186)

作者简介: 沈培辉(1977—), 男, 福建诏安人, 福建船政交通职业学院副教授, 博士, 主要从事工程机械研究, E-mail: shenph315@163.com.



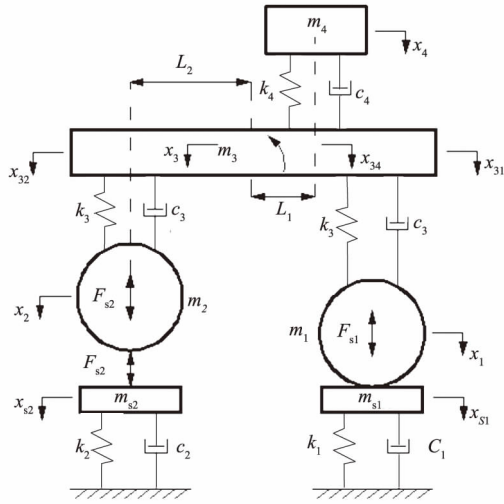


图1 7自由度动力学跳振模型

Fig.1 Seven-degrees-of-freedom jump model

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_{31}) + k_3(x_1 - x_{31}) + F_{s1} = F_{e1} \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_{32}) + k_3(x_2 - x_{32}) + F_{s2} = F_{e2} \cos(\omega_2 t + \phi_2) \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + k_3(x_3 - x_1) + c_3(\dot{x}_{32} - \dot{x}_2) + k_3(x_{32} - x_2) + c_4(\dot{x}_{34} - \dot{x}_4) + k_4(x_{34} - x_4) = 0 \\ m_4 \ddot{x}_4 + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_{34}) + k_4(x_4 - x_{34}) = 0 \\ J\ddot{\theta} + c_3(\dot{x}_{32} - \dot{x}_2)L_2 + k_3(x_{32} - x_2)L_2 - c_4(\dot{x}_{34} - \dot{x}_4)L_1 - k_4(x_{34} - x_4)L_1 - c_3(\dot{x}_{31} - \dot{x}_1)L_2 - k_3(x_{31} - x_1)L_2 = 0 \\ m_{s1} \ddot{x}_{s1} + c_1 \dot{x}_{s1} + k_1 x_{s1} - F_{s1} = 0 \\ m_{s2} \ddot{x}_{s2} + c_2 \dot{x}_{s2} + k_2 x_{s2} - F_{s2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: 前后轮、机架、驾驶室位移分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ ; 前后轮和驾驶室处的机架位移为  $x_{31}$ 、 $x_{32}$ 、 $x_{34}$ ; 机架绕质心的转动惯量和转角为  $J$ 、 $\theta$ ; 驾驶室和前后轮到机架中心的距离为  $L_1$ 、 $L_2$ ; 前后轮的激振频率和相位初角分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  和  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 。

## 1.2 系统响应分析

当前后轮与随振土连耦时,由方程(1),  $m_1$ 、 $m_{s1}$ 和  $m_2$ 、 $m_{s2}$ 可视为一整体,即  $x_1 = x_{s1}$ 、 $x_2 = x_{s2}$ ,由振动理论可得系统的稳态响应<sup>[11]</sup>

$$x_2(t) = q_{20} \cos(\omega_2 t - \phi_{20}), \quad (2)$$

式中:

$$q_{20} = \frac{Q_{20}}{\omega_{20}^2} \cdot \frac{1}{\left[ \left\{ 1 - \left( \frac{\omega_2}{\omega_{20}} \right)^2 \right\}^2 + \left( 2\zeta_2 \frac{\omega_2}{\omega_{20}} \right)^2 \right]^{1/2}}; \\ \phi_{20} = \arctan \frac{2\zeta_2 \frac{\omega_2}{\omega_{20}}}{1 - \left( \frac{\omega_2}{\omega_{20}} \right)^2}. \text{ 其中: } Q_{20}、\omega_{20} \text{ 和 } \zeta_2 \text{ 分别为}$$

后振动轮的广义力矢量、第2阶固有频率和固有模态阻尼比,可由式(1)化为矩阵获得。

由于随振土不能提供拉力,所以当压实反力

$F_{s2} = m_{s2} \ddot{x}_{s2} + c_2 \dot{x}_{s2} + k_2 x_{s2} > F_{e2} \cos(\omega_2 t + \phi_2) - m_2 \ddot{x}_2 - c_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_{32}) - k_3(x_2 - x_{32})$  时,振动轮跳离随振土向上运动。假设发生在  $t_0$  时刻,并在  $t_1$  时刻重新接触随振土,同时后振动轮的激振力与跳振前滞后相位角  $\phi_{F2}$ ,则该脱耦时段内的系统响应分解为两个独立运动: ①对于后振动轮:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_3(\dot{x}_1 - \dot{x}_{31}) + k_3(x_1 - x_{31}) + F_{s1} = F_{e1} \cos(\omega_1 t + \phi_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_3(\dot{x}_2 - \dot{x}_{32}) + k_3(x_2 - x_{32}) - m_2 g = F_{e2} \cos(\omega_2(t - t_0) + \phi_2 + \phi_{F2}) \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + k_3(x_3 - x_1) + c_3(\dot{x}_{32} - \dot{x}_2) + k_3(x_{32} - x_2) + c_4(\dot{x}_{34} - \dot{x}_4) + k_4(x_{34} - x_4) = 0 \\ m_4 \ddot{x}_4 + c_4(\dot{x}_4 - \dot{x}_{34}) + k_4(x_4 - x_{34}) = 0 \\ J\ddot{\theta} + c_3(\dot{x}_{32} - \dot{x}_2)L_2 + k_3(x_{32} - x_2)L_2 - c_4(\dot{x}_{34} - \dot{x}_4)L_1 - k_4(x_{34} - x_4)L_1 - c_3(\dot{x}_{31} - \dot{x}_1)L_2 - k_3(x_{31} - x_1)L_2 = 0 \\ m_{s1} \ddot{x}_{s1} + c_1 \dot{x}_{s1} + k_1 x_{s1} - F_{s1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

②对于后随振土:

$$m_{s2} \ddot{x}_{s2} + c_2 \dot{x}_{s2} + k_2 x_{s2} - m_{s2} g = 0. \quad (4)$$

略去重力项的常值分量,式(3)在  $t_0 \rightarrow t_1$  时段内的解可表示为:

$$x_2'(t) = q_{20}' \cos(\omega_2(t - t_0) - \phi_{20}' + \phi_{F2}). \quad (5)$$

式中,  $q_{20}' = \frac{Q_{20}'}{\omega_{20}'^2} \cdot \frac{1}{\left[ \left\{ 1 - \left( \frac{\omega_2}{\omega_{20}'} \right)^2 \right\}^2 + \left( 2\zeta_2' \frac{\omega_2}{\omega_{20}'} \right)^2 \right]^{1/2}},$

$$\phi_{20}' = \arctan \frac{2\zeta_2' \frac{\omega_2}{\omega_{20}'}}{1 - \left( \frac{\omega_2}{\omega_{20}'} \right)^2}. \text{ 其中: } Q_{20}'、\omega_{20}' \text{ 和 } \zeta_2' \text{ 分别为}$$

跳振后的后轮(不含随振土)的广义力矢量、第2阶固有频率和固有模态阻尼比。而式(4)在  $t_0 \rightarrow t_1$  时段内的后随振土为单自由度带阻尼响应:

$$x_{s2}'(t) = e^{-\zeta_2 \omega_{s2} t} \left\{ \frac{x_{s2}(t_0) \cos \sqrt{1 - \zeta_2^2} \omega_{s2} t + \frac{\dot{x}_{s2}(t_0) + \zeta_2 \omega_{s2} x_{s2}(t_0)}{\sqrt{1 - \zeta_2^2} \omega_{s2}} \sin \sqrt{1 - \zeta_2^2} \omega_{s2} t \right\}. \quad (6)$$

式中:  $\omega_{s2} = \sqrt{c_2/k_2}$ ;  $\zeta_2 = c_2/\sqrt{m_{s2}k_2}$ 。

当  $t_1$  时刻振动轮重新接触随振土再次连耦振动时,则需  $x_2'(t_1) = x_{s2}'(t_1)$ ,但此时  $\dot{x}_2'(t_1) \neq \dot{x}_{s2}'(t_1)$ 。分别以代表压实初期、压实中期和压实后期的3种典型情况分析: ①  $\dot{x}_2'(t_1) \geq \dot{x}_{s2}'(t_1)$ ,平稳接触连耦; ②  $|\dot{x}_2'(t_1)| \geq |\dot{x}_{s2}'(t_1)|$ ,但  $\dot{x}_2'(t_1)$  与  $\dot{x}_{s2}'(t_1)$  反向,轻微碰撞; ③  $|\dot{x}_2'(t_1)| < |\dot{x}_{s2}'(t_1)|$ ,且  $\dot{x}_2'(t_1)$  与  $\dot{x}_{s2}'(t_1)$  反向,强烈碰撞。这3种情况下都会对前轮产生一个运动干扰  $h_{F2}$ ,每种情况下的运动干扰量均不同,应采用数值模拟计算。

## 2 实例分析

根据图1的动力学模型,以厦工YZC12型双



钢轮压路机为仿真样机,参数如表 1 所示.参考文献 [12-14],根据施工经验估算前后随振土的参

数差异系数  $\beta = 1.2$ ,选取参数如表 2 所示.

表 1 压路机参数

Tab.1 Parameters of roller

参数	$m_1/\text{kg}$	$m_2/\text{kg}$	$m_{s1}/\text{kg}$	$m_{s2}/\text{kg}$	$m_3/\text{kg}$	$m_4/\text{kg}$	$L_1/\text{m}$	$L_2/\text{m}$	$k_3/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_3/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_4/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_4/(\text{Ns}\cdot\text{m}^{-1})$
数值	3 000	3 000	$3\,000 \times 0.2$	$3\,000 \times 0.2$	5 750	550	0.53	1.64	$1.7 \times 10^5$	$1.1 \times 10^3$	$1.2 \times 10^4$	$0.8 \times 10^2$

表 2 随振土参数

Tab.2 Parameters of apparent soil

不同阶段的模型参数选取	压实初期				压实中期				压实后期			
	$k_1/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_2/(\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_1/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_2/(\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_1/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1})$	$k_2/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-1})$	$c_2/(\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1})$
	( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$ )	( $\text{kNs}\cdot\text{m}^{-1}$ )
数值	2.2	70	$2.2 \times 1.2$	70/1.2	6.3	38	$6.3 \times 1.2$	38/1.2	11	9	$11 \times 1.2$	9/1.2

## 2.1 压实进程中的系统响应演变

采用式(1)~式(6)仿真,在前后轮使用  $F_{e1} = F_{e2} = 168 \text{ kN}$  和  $\omega_1 = 2\pi \times 25$ 、 $\omega_2 = 2\pi \times 30$ 、 $\phi_1 = \phi_2 = 0$ ,采用压实初期的前后随振土参数获得如图 2 所示的系统响应.由图 2(a)的驾驶室时域图和图 2(b)的频域图可以看出,驾驶室的振动响应为规律的拍振运动,与文献[9]试验结果吻合;图 2(c)的驾驶室相图比单自由度近圆复杂,图 2(d)为进一步采用周期取点频闪法分析的拍振 poince 截面,体现出规律的单周期特性;图 2(e)和图 2(f)为前后轮的相图,同样呈现出近圆的单周期振动,说明前后振动轮均尚未脱离随振土.

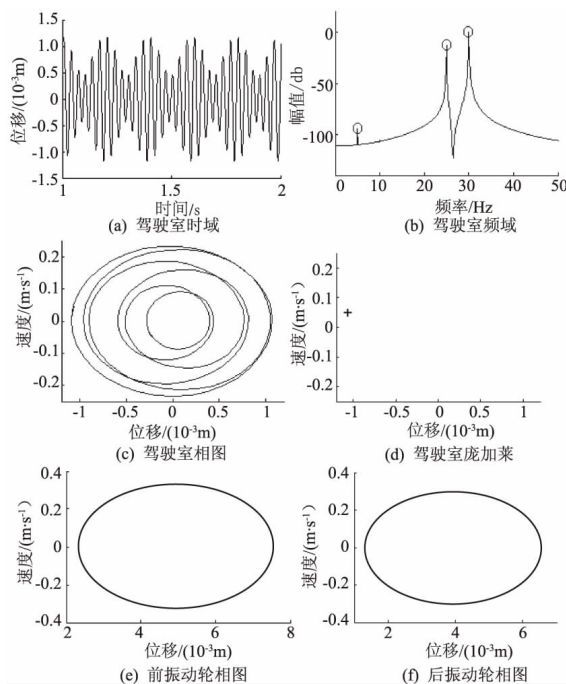


图 2 压实初期系统响应

Fig.2 Response of initial compaction system

图 3 为采用压实中期参数获得的仿真效果图.从图 3(e)和图 3(f)可明显看出,前后轮同时呈现出双周期分叉跳振特性;同时图 3(a)比图 2(a)复杂,这说明压实中期驾驶室在前后轮跳振及随振土的耦合振动影响下,拍振运动的时域特性开始模糊,图 3(c)和图 3(d)也表明拍振截面已进入近混沌振动,而图 3(b)在发现明显激振频率 25 Hz 与 30 Hz 基频特性的同时,含有丰富的 1/2 及其高次的亚谐波成分,拍频 ( $30 - 25 = 5 \text{ Hz}$ ) 首先进入连续谱响应.

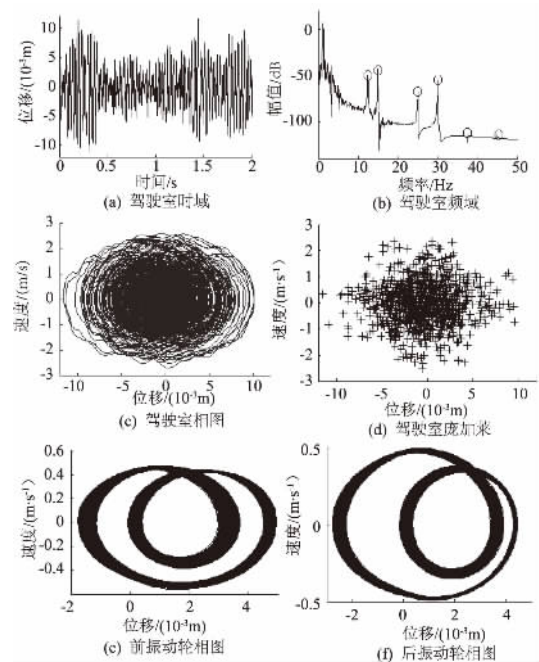


图 3 压实中期系统响应

Fig.3 Response of middle compaction system

采用压实后期的参数可获得如图 4 所示的系统响应.从图 4(a)发现已无固定的极差再现;图

4(c) 含有奇怪吸引子和图 4(d) 也体现出典型混沌振动特性; 图 4(e) 和图 4(f) 产生激烈的跳振, 并进入混沌运动; 图 4(b) 已成全频率段的连续谱。

## 2.2 系统响应的主动控制

当系统进入混沌运动时, 现有单钢轮模型研究一般采取减小激振力和提高激振频率, 但由于激振力和激振频率等工艺参数往往受施工质量和效率限制, 这里探索采用减振参数的主动控制方法。

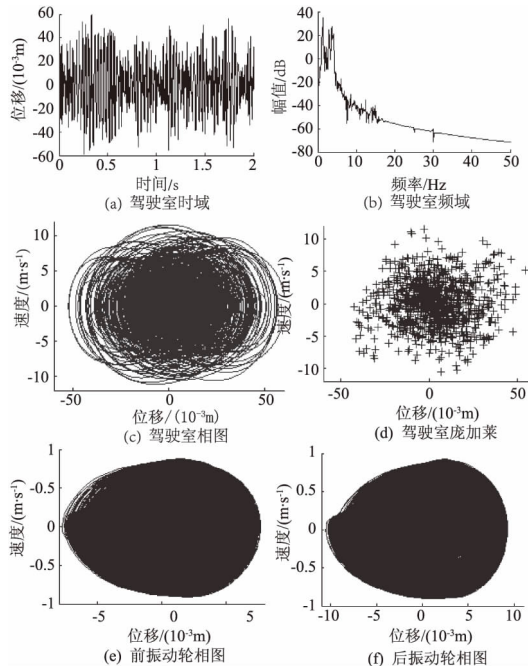


图4 压实后期系统响应

Fig. 4 Response of later compaction system

首先提高 YZC12 的机架与振动轮减振系统参数为  $k_3 = 3.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $c_3 = 0.5 \times 10^3 \text{ Ns/m}$ , 获得改善后的系统响应如图 5 所示。图 5(e) 由原来的混沌态回归为多周期分叉的带式相图; 图 5(f) 也回归为“心”形多周期分叉特性; 且图 5(e) 和图 5(f) 的正向位移均大于负向位移, 利于深度压实; 图 5(c) 在前后轮非线性分叉的耦合振动下仍然含有奇怪吸引子, 图 5(d) 发现, 驾驶室运动属局部双周期分叉拍振响应(是两片“云”截面, 而不是杂乱无章的); 由图 5(a) 可见, 拍振的相对极差有明显减小的趋势, 整体的振动幅值也相应地减小, 驾驶员将获得较好的舒适度; 图 5(b) 回归为多频率成分的弱非线性响应, 具体为双激振频率及其分数倍亚谐波和超谐波成分(12.5、15、37.5、45 Hz), 以及拍频及其分数倍亚谐波和超谐波成分(2.5、7.5、10 Hz), 主动控制效果有效。

因此, 压实后期应适当增加一级减振块的硬

特性参数, 减小其软特性参数, 以获得更好的压实质量和驾驶舒适度。当主动控制二级减振系统参数时, 压实系统的非线性响应特性基本保持不变。

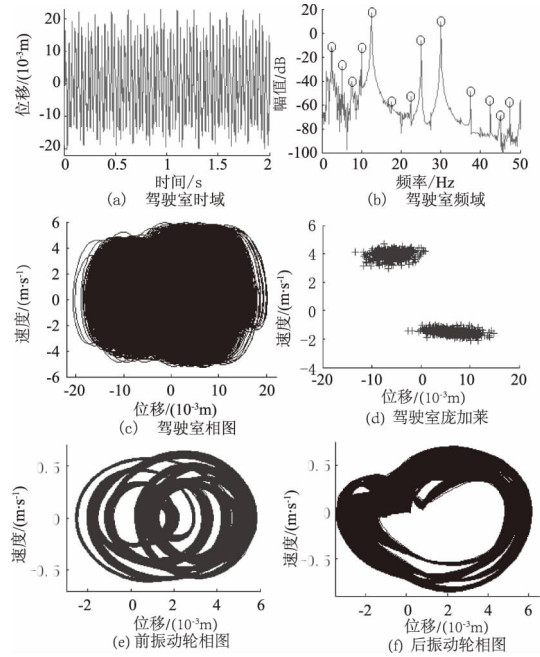


图5 主动控制后的系统响应

Fig. 5 System response after active control

## 3 系统传动干扰分析

上述分析表明, 前后轮跳振是驾驶室进入混沌振动的主要缘由, 同时前后振动轮在进入下一个完整运动周期时的连耦碰撞必然相互干扰, 会影响连续压实技术的密实度在线准确检测, 值得进一步深入研究。根据现场经验, 后轮由于较易进入跳振模式而显示出更为复杂的非线性, 限于篇幅, 这里只分析后振动轮对前振动轮的运动干扰。前后随振土的模型参数差异与压实施工行驶速度成反比, 为了更显著地描绘前后振动轮的相互干扰机理, 不失一般性, 可假定较慢的行驶速度参数, 即估算  $\beta = 1.8$ 。

### 3.1 不同压实进程的传动干扰特性

选取前振动轮跳振临界点时的随振土系数为  $k_1 = 4.8 \text{ MN/m}$ ,  $c_1 = 52 \text{ kNs/m}$ , 前后随振土的参数差异系数  $\beta = 1.2$  时, 获得如图 6(a) 所示的前振动轮在运动干扰前的单周期相图响应(干扰前的后振动轮相图与前振动轮相似, 这里略, 下同), 当选定较大的差异系数  $\beta = 1.8$  时, 后振动轮在较大刚度和较小阻尼系数的压实反力作用下产生明显的双周期分叉跳振, 如图 6(b) 所示“心”形相图, 这时前振动轮的运动特性在后振动轮的强烈干扰下由原来的线性单周期响应演变为轻微跳振的拟单周期分叉, 如图 6(c) 所示。

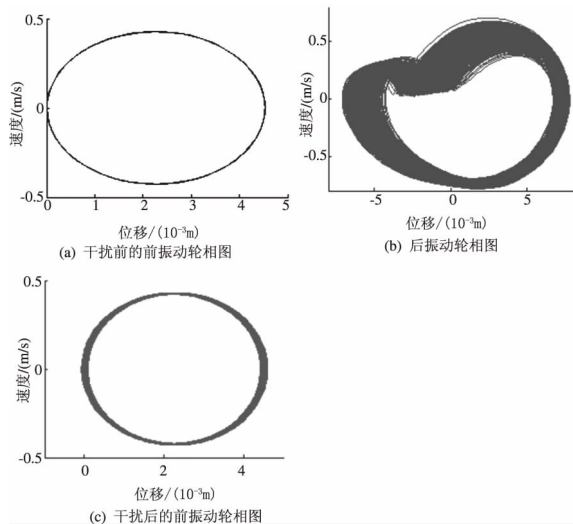


图6 后轮双周期分叉跳振对前轮的影响

Fig. 6 Double-bifurcation effect of rear wheel on front wheel

当选取压实中后期系数  $k_1 = 8.2 \text{ MN/m}$ ,  $c_1 = 26 \text{ kNs/m}$ ,  $\beta = 1.2$  时, 获得前振动轮在干扰前的类“心”形双周期分叉跳振相图, 如图 7(a) 所示。当选  $\beta = 1.8$  时, 由图 7(b) 可发现, 后振动轮进入混沌, 同时前振动轮的相图在后振动轮的激烈跳振干扰下继续非线性强化, 并出现如图 7(c) 的逐渐通往混沌之路特性。

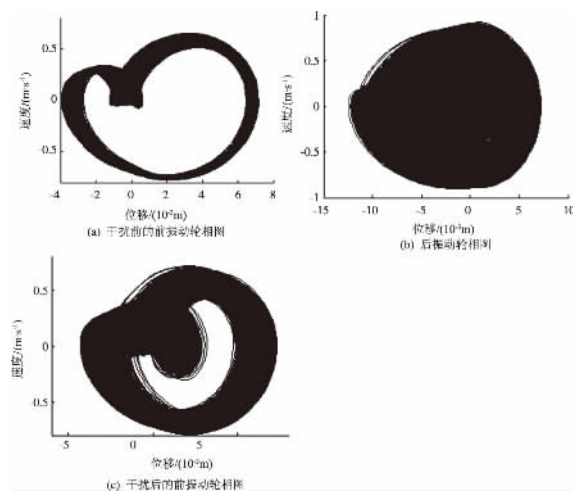


图7 后轮激烈跳振对前轮的影响

Fig. 7 The strong-jump effect of rear wheel on front wheel

当  $k_1 = 18 \text{ MN/m}$ ,  $c_1 = 3 \text{ kNs/m}$ ,  $\beta = 1.2$  时, 获得如图 8(a) 的前振动轮在干扰前的强非线性“心”形双周期分叉跳振相图。当选  $\beta = 1.8$  时, 图 8(b), 形成混沌吸引子运动。由于后振动轮在周期内不只一次的强烈碰撞, 使得前振动轮在周期内受到多次干扰偏移量叠加, 导致前振动轮周期紊乱, 最终形成如图 8(c) 的混沌相图响应。

### 3.2 传动干扰的主动控制

同理在图 8 的基础上其他模型参数保持不变

时, 选取  $k_3 = 1.3 \times 10^5 \text{ N/m}$ ,  $c_3 = 1.5 \times 10^3 \text{ Ns/m}$ , 获得主动控制后的前振动轮相图如图 9 所示。

由图 9 可知, 主动控制后, 前振动轮相图回归为接近于干扰前的“心”形双周期分叉跳振特征, 同时负向幅值也相应地减小, 跳振激烈程度有所缓解, 这说明适当减小一级减振系统的硬特性和增加其软特性时, 后轮对前轮的干扰特性明显弱化。主动控制二级减振系统参数时, 前后轮的相互干扰特性几乎没有变化。

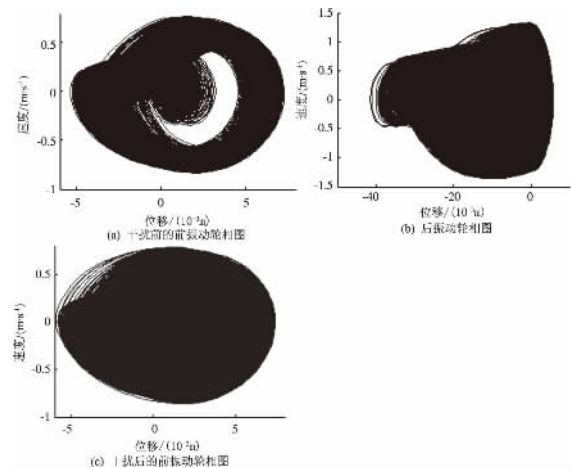


图8 后轮刚性跳振对前轮的影响

Fig. 8 The rigid-jump effect of rear wheel on front wheel

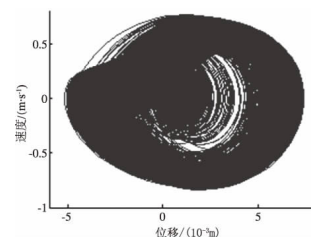


图9 主动控制后的前振动轮相图

Fig. 9 Phase diagram of the front wheel after active control

## 4 结论

(1) 振动轮随着土壤逐渐密实, 由单周期发展为双周期分叉直至混沌运动, 而驾驶室在前后轮综合传动耦合下拍振截面首先进入非线性运动直至混沌, 且双激振频率的分数倍亚谐波响应和高次超谐波共振是压实系统进入混沌行为的非线性演变必由之路。

(2) 前后轮跳振碰撞及土壤参数差异所引起的振动偏移量是压实系统非线性传动的主要缘由, 选择不同行驶速度对系统的动力学响应有着重要的影响。主动控制设计隔振装置的力学参数可以兼顾振动压实深度和施工操作舒适性。

## 参考文献:

- [1] 陈金刚,张树勋,张景飞,等. 非全充填裂隙的动态变形模量实验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 90-93.
- [2] COMMURI S, ANH T, ZAMAN M. Neural network-based intelligent compaction analyzer for estimating compaction quality of hot asphalt mixes[J]. Journal of construction engineering and management, 2011, 137(9): 634-644.
- [3] MURO T, TRAN D T. Effects of vertical exciting force of a tracked vehicle on the dynamic compaction of a high lifted decomposed granite[J]. Journal of terramechanics, 2006, 43(4): 365-394.
- [4] ANDEREGG R, KAUFMAN K. Intelligent compaction with vibratory rollers: Feedback control systems in automatic compaction and compaction control[J]. Journal of the transportation research board, 2004, 1868(1): 124-134.
- [5] BEAINY F, COMMURI S, ZAMAN M, et al. Viscoelastic-plastic model of asphalt-roller interaction[J]. International journal of geomechanics, 2013, 13(5): 581-594.
- [6] 沈培辉,林述温. 基于混沌识别的振动压实系统动态设计分析[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1232-1241.
- [7] BEAINY F, COMMURI S, ZAMAN M. Dynamical response of vibratory rollers during the compaction of asphalt pavements[J]. Journal of engineering mechanics, 2014, 140(7): 1-12.
- [8] SUSANTE P J, MOONEY M A. Capturing nonlinear vibratory roller compactor behavior through lumped parameter modeling[J]. Journal of engineering mechanics, 2008, 134(8): 684-693.
- [9] 刘本学,冯忠绪,董秀辉. 双频振动在振动压实中的应用及试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(3): 50-54.
- [10] 侯劲汝,冯忠绪,徐倩,等. 压路机双轮振动对整机减振性能的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2010, 31(6): 69-72.
- [11] SINGIRESU S R 著. 机械振动[M]. 李欣业,张明路,编译. 北京:清华大学出版社, 2009.
- [12] SINGH D, BEAINY F, COMMURI S, et al. Application of intelligent compaction technology for estimation of effective modulus for a multilayered asphalt pavement. ICSCI 2014 [C]//International Conference on Sustainable Civil Infrastructure, Konya: ASCE, 2014: 51-58.
- [13] RONALD Y S, JERAMY C. A fundamental dual-zone continuum theory for dynamic soil-structure interaction[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 2011, 40(9): 1011-1025.
- [14] FENG H, PETTINARI M, STANG H. Study of normal and shear material properties for viscoelastic model of asphalt mixture by discrete element method[J]. Construction and building materials, 2015, 98(15): 366-375.

## Nonlinear Modeling and Interference Analysis for Double-steel-wheel Vibratory Roller

SHEN Peihui<sup>1</sup>, LIN Shuwen<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** According to the structural characteristics and double-excitation mode of the double-steel-wheel vibratory roller, a seven-degrees-of-freedom jump-vibration model was established fully considered the nonlinear coupling of apparent soil to the compacted system. Taking YZC12 compactor as an example and basing on the decomposition idea of coupling-decoupling-recoupling, the nonlinear vibration response of the system was analyzed in the three representative compaction conditions of smooth contact, slight impact and strong collision. Results showed that, the kinetic offsets between the front and rear wheels were the main reason of the transmission interference. With the change of soil parameters representing different density, the time domain waveform of system became harmonic distortions. The first order, second order and fourth order frequency would generate sub-harmonics and ultra-harmonics until into continuous spectrum of chaos the compaction process. In addition, driving speed mainly affected the vibratory parameters of the front back apparent soils, and then affected the movement interference of the front and rear wheels. Through active controlling the damping system parameters of the frame and the two wheels, the nonlinear vibration responses of the system could be obviously weakened, as well as the transmission interference of the front and rear wheels.

**Key words:** double-steel-wheel vibratory roller; nonlinear jump-vibration model; apparent vibratory soil; transmission; interference



文章编号: 1671-6833(2017)02-0072-06

## 填料对再生沥青胶浆黏弹响应的影响

陈华鑫, 牛昌昌, 况栋梁, 田俊壮, 杨 凯

(长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 笔者通过布氏黏度试验和重复蠕变试验, 对再生沥青和3种再生沥青胶浆的黏弹特性进行了研究, 分析不同填料对再生沥青胶浆黏度、 $\Delta E\eta$  (黏流活化能)、GV值 (蠕变劲度的黏性部分) 和累计应变  $\gamma_{acc}$  的影响. 研究表明: 沥青和沥青胶浆的黏度恢复水平具有很大差异, 再生系数从大到小依次为: 矿粉沥青胶浆 > 水泥沥青胶浆 > 消石灰沥青胶浆 > 沥青; 再生沥青的黏流活化能比原样沥青低, 而3种再生沥青胶浆的黏流活化能与相应原样沥青胶浆相比均有不同程度的增大; 再生沥青和再生沥青胶浆的GV值以及  $\gamma_{acc}$  的恢复水平同样具有很大的差异性. 综合上述指标来看, 3种填料对老化沥青胶浆黏弹特性的恢复具有不同程度的积极影响, 且影响程度为: 矿粉 > 水泥 > 消石灰.

**关键词:** 再生沥青胶浆; 填料; 黏弹特性; 黏流活化能; GV值;  $\gamma_{acc}$

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.016

### 0 引言

国内外学者对旧路面沥青混合料再生进行了大量的研究<sup>[1-4]</sup>, 研究重点集中在RAP和旧沥青的再生恢复性能, 老化沥青胶浆的再生鲜有探究. 根据现代胶浆理论, 胶浆决定了沥青混合料的路用性能和服役寿命<sup>[5-6]</sup>. 文献[7]研究了熟石灰、石灰石矿粉和波特兰水泥对沥青玛蹄脂黏度的影响, 发现不同填料沥青玛蹄脂的黏度与填料掺量呈良好的线性相关性. 文献[8]研究发现消石灰显著提高沥青胶浆的抗剪切应力和车辙因子  $G^* / \sin \delta$ , 且沥青胶浆的黏度和软化点随着消石灰掺量的增加而大幅提高. 徐波等<sup>[9]</sup>研究了不同填料和不同粉胶比对橡胶沥青胶浆高、低温性能的影响, 进而优选填料及粉胶比.

综合各类研究发现, 老化和再生沥青胶浆的研究较少. 笔者从沥青胶浆的角度出发, 对不同填料再生沥青胶浆的黏弹性能进行研究, 并与再生沥青黏弹性能进行比较, 得出沥青、沥青胶浆以及不同填料沥青胶浆之间的再生差异.

### 1 试验材料

选用兰炼90#基质沥青, 其基本技术指标见表1. 选用普通石灰石矿粉、P·O42.5水泥及消石

灰3种填料, 100℃烘箱中保温2h后测试性能指标, 具体结果见表2. 再生剂选用施工现场提供的A再生剂, 基本指标见表3.

表1 沥青技术指标

Tab.1 The technical indications of asphalt

测试指标	原样	TFOT
针入度(25℃)/0.1mm	83.3	58.4
软化点/℃	48.2	52.6
延度(5℃, 1mm/min)/cm	12.5	7.1

### 2 试验方案

#### 2.1 试验样品制备

制备粉胶比为1的不同填料沥青胶浆, 矿粉沥青胶浆中填料全部为矿粉; 水泥沥青胶浆中的填料全部为水泥; 消石灰沥青胶浆中填料30%为消石灰, 其余70%为矿粉. 沥青编号O<sub>1</sub>, 矿粉沥青胶浆编号K<sub>1</sub>, 水泥沥青胶浆编号S<sub>1</sub>, 消石灰沥青胶浆编号X<sub>1</sub>.

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》TFOT试验规程, 将O<sub>1</sub>、K<sub>1</sub>、S<sub>1</sub>和X<sub>1</sub>进行短期老化, 得到相应的O<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>和X<sub>2</sub>.

向O<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>和X<sub>2</sub>中加入沥青质量5%的再

收稿日期: 2016-10-30; 修订日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978031)

作者简介: 陈华鑫(1973—), 男, 安徽太湖人, 长安大学教授, 工学博士, 主要从事沥青路面材料研究, E-mail: CH@gl.chd.edu.cn.

生剂,加热搅拌 20 min,分别得到 O<sub>3</sub>、K<sub>3</sub>、S<sub>3</sub> 和 X<sub>3</sub>.

表 2 不同填料基本技术指标  
Tab.2 Properties of different fillers

填料 种类	$\rho/$ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	<0.075 mm 含量	亲水 系数	SA/ ( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )
矿粉	2.736	91.5	0.88	0.682
水泥	2.984	93.1	0.79	1.112
消石灰	2.422	90.2	—	2.209

表 3 A 再生剂基本技术指标  
Tab.3 Properties of A regenerative agent

测试指标	测试结果
60 ℃黏度/cSt	575
闪点/℃	>220
饱和分/%	24.4
芳香分/%	73.8
TFOT 前后黏度比	1.4
TFOT 前后质量变化/%	0.1

2.2 试验方法

笔者采用布氏黏度计测试各个试样在不同温度条件下的布氏黏度. 将试样加入盛样筒中,并与转子一起放入 110 ℃烘箱中保温 1.5 h 左右,然后取出转子与盛样筒安装在黏度计上开始测试,温度选取 110、125、140 和 155 ℃.

采用 Bohlin Gemini II 型动态剪切流变仪对上

述试样进行 MSCR 试验. 将待测样品制成一定厚度的直径为 25 mm 的试样,并置于上下夹板之间,待温度升至试验温度后,使上压板下压直至样品厚度为 2 mm 时停止,刮除多余样品后进行重复蠕变试验. 试验温度 64 ℃,应力水平选为 10 Pa,蠕变模式为加载 1 s,卸载 9 s,共计进行 100 次循环.

3 试验结果与分析

3.1 布氏黏度试验

各试样黏度试验结果见表 4. 笔者将沥青胶浆老化后的黏度与原样黏度的比值定义为老化系数,原样黏度与再生沥青胶浆黏度的比值定义为再生系数. 从表 4 中可以看出,沥青和不同填料沥青胶浆的布氏黏度经过老化后迅速增加,经过再生后布氏黏度呈现不同程度的降低,但是变化幅度并不一致,随着温度升高,同类沥青胶浆老化再生前后黏度的差异性逐渐减小. 图 1 为 110 ℃时不同沥青胶浆黏度的老化系数和再生系数的差异. 从图 1 可看出,与沥青相比,沥青胶浆的老化系数和再生系数均较以高. 不同填料沥青胶浆相比较,老化系数与再生系数呈现一致差异性,均是矿粉沥青胶浆最大,水泥沥青胶浆次之,消石灰沥青胶浆最小.

表 4 布氏黏度试验结果  
Table.4 The results of brookfield viscosity

试样类别	试验温度/℃				拟合方程	相关系数
	110	125	140	155		
O1	1.40	0.54	0.25	0.13	$y = 1.8E + 14x - 6.916$	0.997
O2	2.01	0.78	0.35	0.15	$y = 6.3E + 14x - 7.104$	0.999
O3	1.42	0.54	0.26	0.13	$y = 3.2E + 13x - 6.565$	0.999
K1	3.61	1.46	0.66	0.35	$y = 3.8E + 14x - 6.872$	1.000
K2	5.40	1.99	0.88	0.43	$y = 1.1E + 16x - 7.512$	1.000
K3	3.42	1.48	0.67	0.35	$y = 1.1E + 14x - 6.619$	0.999
S1	6.21	2.95	1.30	0.64	$y = 3.4E + 15x - 7.183$	1.000
S2	9.15	3.45	1.46	0.78	$y = 1.3E + 16x - 7.420$	0.999
S3	6.01	2.86	1.28	0.63	$y = 1.0E + 15x - 7.012$	1.000
X1	8.58	3.24	1.45	0.74	$y = 3.6E + 15x - 7.169$	0.998
X2	12.38	4.54	1.95	0.9	$y = 2.0E + 16x - 7.463$	1.000
X3	8.37	3.19	1.43	0.73	$y = 1.5E + 15x - 6.980$	0.998

图 2 为 3 种填料的微观形貌. 从图 2 中可以看出: ①同种微观尺寸下,矿粉粒径明显大于水泥颗粒和消石灰颗粒; ②矿粉颗粒表面规则平整,存在明显的棱角,另外两种颗粒形状不规则,表面存在凹陷,尤其是生石灰存在大量的裂痕,所以在相同粉胶比条件下,矿粉颗粒与沥青之间的物理吸附作用最弱. 另外,生石灰中含有大量碱性物质,沥青中的酸性组分在高温条件下能够很好地渗透

进生石灰裂缝内部,产生强烈的化学反应,生成更多的结构沥青,使消石灰沥青胶浆体系内部更加稳定,能够更好地抵抗沥青的热氧老化,同时再生剂分子也更难扩散进入消石灰沥青胶浆体系,故消石灰沥青胶浆的老化及再生系数最小,水泥沥青胶浆次之,矿粉沥青胶浆最大. 温度介于 110 ~ 160 ℃,沥青胶浆的表观黏度对温度的依赖性服从阿伦尼乌斯方程:



$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E_{\eta}}{RT} \quad (1)$$

式中:  $\eta$  为表观黏度;  $R$  为摩尔气体常量;  $T$  为热力学温度;  $A$  为指前因子;  $\Delta E_{\eta}$  为黏流活化能, 表征沥青胶浆在黏流态时的流动能力对温度依赖性的大小. 对  $1/T - \ln \eta$  进行拟合, 发现  $\ln \eta$  与  $1/T$  具有很好的线性相关性, 通过公式 (1) 求得沥青和不同沥青胶浆的  $\Delta E_{\eta}$ .

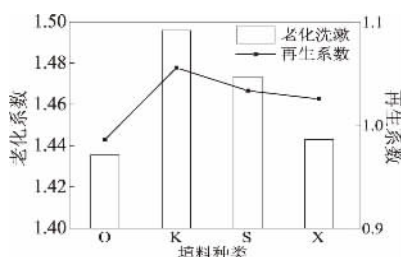


图1 填料对老化再生系数影响

Fig.1 The effect of fillers on regeneration and aging coefficients

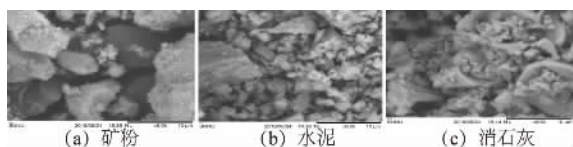


图2 不同填料微观形貌

Fig.2 The microstructures of different fillers

图3为沥青及沥青胶浆黏流活化能. 分析图3可以看出, 经过老化后, 沥青和沥青胶浆的黏流活化能显著增加. 再生沥青的  $\Delta E_{\eta}$  比原样低1%, 而3种再生沥青胶浆的  $\Delta E_{\eta}$  与原样沥青胶浆相比均出现不同程度的增大, 其中再生矿粉沥青胶浆  $\Delta E_{\eta}$  同比增加0.7%, 再生水泥沥青胶浆  $\Delta E_{\eta}$  增加1.2%, 再生消石灰沥青胶浆  $\Delta E_{\eta}$  增加2.1%, 说明再生沥青的温度敏感性增强, 而再生沥青胶浆的温度敏感性减弱. 由表1黏度结果看出, 再生沥青黏度未恢复至原样沥青水平, 而再生沥青胶浆黏度已经低于原样沥青胶浆黏度, 这表明同等再生条件下, 沥青黏度恢复滞后于温度敏感性恢复, 沥青胶浆温度敏感性恢复滞后于黏度恢复.

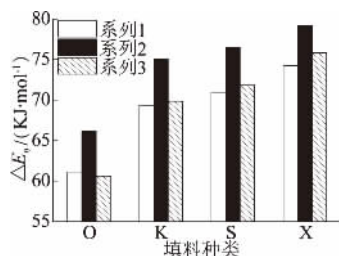


图3 沥青及沥青胶浆黏流活化能

Fig.3 The viscous flow activation energies of asphalt and asphalt cements

### 3.2 重复蠕变试验

Burgers 模型由 Maxwell 模型 ( $G_0, \eta_0$ ) 和 Kelvin 模型 ( $G_1, \eta_1$ ) 组成, 其中  $G_0, G_1$  代表弹性部分,  $\eta_0, \eta_1$  代表黏性部分, 具体见图4. 沥青及沥青胶浆作为典型的黏弹性材料, 其在剪切蠕变荷载作用下, 最先产生瞬时变形  $\gamma_e$ , 表征了材料的弹性响应; 随着时间的延续, 材料产生连续变形  $\gamma_{de}$ , 此部分变形表征材料黏弹性响应, 包括延迟弹性变形  $\gamma_{de}$  和黏性流动变形  $\gamma_v$ . 卸去荷载后, 瞬时弹性变形  $\gamma_e$  得到瞬间恢复, 而延迟弹性变形则随着时间逐渐恢复, 但是黏性变形却无法恢复, 成为永久性变形<sup>[11]</sup>, 沥青蠕变恢复过程中应变-时间曲线见图5. Burgers 模型具体的本构方程如下:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1} [1 - e^{-t/\eta_1}] + \frac{\tau_0}{\eta_0} t = \gamma_e + \gamma_{de} + \gamma_v \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  为剪应变;  $t$  为蠕变时间;  $\tau_0$  为恒定剪应力;  $G_0, \eta_0$  为 Maxwell 模型中弹性模量和黏性系数;  $G_1, \eta_1$  为 Kelvin 模型中弹性模量和黏性系数.

式(2)两边同时除以  $\tau_0$  可以得到

$$J(t) = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} [1 - e^{-t/\eta_1}] + \frac{t}{\eta_0} = J_E + J_C + J_V \quad (3)$$

式中:  $J_E$  为瞬时弹性变形模量;  $J_C$  为延迟弹性变形模量;  $J_V$  为黏性流动变模量.

SHRP 计划将蠕变劲度的黏性成分  $G_v = 1/J_V$  作为沥青基材料高温性能的评价指标, 很多学者也通过室内试验论证了  $G_v$  与车辙因子  $G^* / \sin \delta$  相比较而言, 前者与沥青混合料的动稳定度  $D_s$  具有更好的相关性<sup>[10]</sup>.

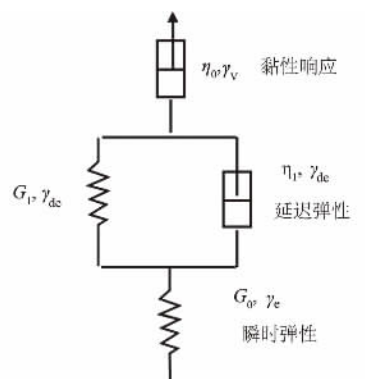


图4 Burgers 模型

Fig.4 Burgers mode

#### 3.2.1 Burgers 模型参数拟合

通过 Origin 对各个试样的第50次、51次蠕变试验结果进行拟合, 并取平均值作为最终结果, 相关系数达到0.99以上, 说明 Burgers 模型能够很好的反映沥青及不同填料沥青胶浆老化及再生前后的蠕变过程, 具体拟合结果汇集于表5.

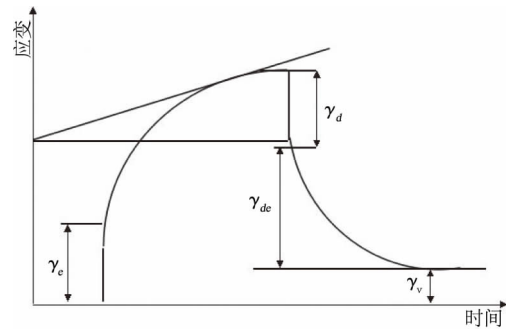


图 5 沥青蠕变恢复过程中应变-时间曲线

Fig. 5 Strain-time relationship curve of asphalt in creep-recovery phase

图 6 为蠕变柔量实测值与拟合值. 图 6 显示不是沥青及沥青胶浆老化再生前后,蠕变柔量实测值与通过 Burgers 模型四参数拟合值差异性很小,蠕变柔量曲线基本重合,表明运用 Burgers 模型对沥青及沥青胶浆老化再生前后的蠕变柔量进行拟合具有科学准确性.

3.2.2  $G_V$  值

由表 5 中 Burgers 参数,根据公式  $J_V = t/\eta_0$  以及  $G_V = 1/J_V$  可以计算  $G_V$  值,沥青及不同沥青胶浆的  $t - \lg(G_V/1\ 000)$  曲线见图 7. 分析图 7 可以看出,  $G_V$  值在蠕变初期迅速降低,随着蠕变时间的进一步延续,  $G_V$  值下降幅度逐渐减缓并最终趋于平稳,表明沥青及沥青胶浆的高温稳定性能在荷载作用初期即出现很大损失,并随着荷载时间的延长而进一步劣化.

表 5 沥青及不同沥青胶浆 Burgers 模型参数拟合

Fig. 5 Burgers model fitting parameters for asphalts and different asphalt mortars

试样类型	$G_0/\text{Pa}$	$G_1/\text{Pa}$	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\eta_1/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
O <sub>1</sub>	100 000	1 000	310	3 399
O <sub>2</sub>	100 000	1 000	342	2 002
O <sub>3</sub>	100 000	1 000	384	2 484
K <sub>1</sub>	100 000	1 000	871	4 650
K <sub>2</sub>	100 000	1 000	2 227	9 514
K <sub>3</sub>	100 000	1 000	618	2 654
S <sub>1</sub>	100 000	1 000	1 138	5 000
S <sub>2</sub>	100 000	1 000	2 895	3 481
S <sub>3</sub>	100 000	1 000	841	4 328
X <sub>1</sub>	50 000	1 000	991	7 940
X <sub>2</sub>	100 000	1 000	3 645	5 000
X <sub>3</sub>	100 000	1 000	712	2 497

对第 50 和 51 个蠕变周期内加载 0.5 s 时的  $G_V$  平均值进行分析(具体  $G_V$  值见图 8). 显而易见,老化作用使,不同填料沥青胶浆的  $G_V$  值显著

增大,老化后消石灰沥青胶浆延续并进一步扩大了其在 3 种原样沥青胶浆中的优势. 3 种再生老化沥青胶浆的  $G_V$  值显著降低并低于对应的原样沥青胶浆,再生沥青的  $G_V$  值与原样沥青  $G_V$  值相差不大. 说明在同等再生条件下,单一老化沥青的恢复能力低于胶浆体系中老化沥青的恢复能力. 主要因为老化沥青与再生剂比例一定时,填料的存在增加了老化沥青与再生剂的接触空间,降低再生剂分子的扩散阻力,沥青胶浆具备更强的再生恢复能力.

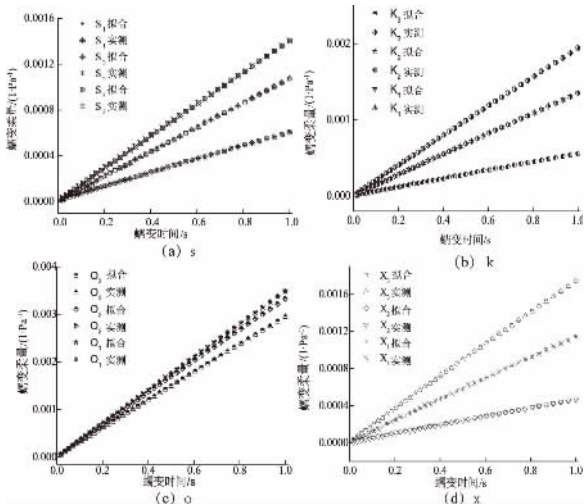


图 6 蠕变柔量实测值与拟合值

Fig. 6 Measured and predicted results of creep compliance

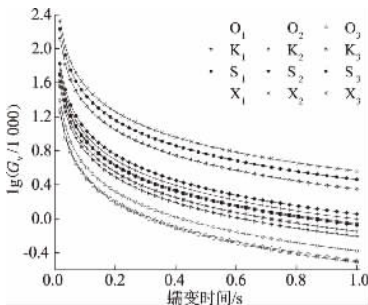


图 7 沥青及沥青胶浆  $t - \lg(G_V/1\ 000)$  曲线

Fig. 7 The  $t - \lg(G_V/1\ 000)$  relationship curve of asphalt and asphalt cements

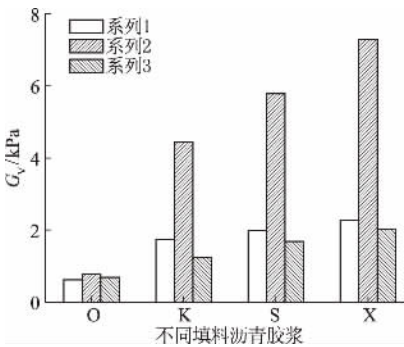


图 8 沥青及不同沥青胶浆胶浆  $G_V$  值

Fig. 8 The  $G_V$  of asphalt and different asphalt cements

### 3.2.3 累计应变

图9为第50次蠕变的应变变化曲线.从图9可以看出,基质沥青及其胶浆在9s的卸载时段内,应变恢复量很小,这说明它们的弹性恢复能力较差,永久变形量较大.另外,填料的引入显著降低了沥青的蠕变变形量,其中消石灰改善效果最优,其次为水泥,矿粉改善效果最低.经过短期老化后,矿粉沥青胶浆应变量下降最多,达到62.6%,其次为水泥沥青胶浆为58%,消石灰沥青胶浆仅为43.2%,这说明老化作用对消石灰沥青胶浆的影响最小.经过再生,沥青及3种沥青胶浆的应变量大为增加,其中矿粉沥青胶浆和水泥沥青胶浆提高幅度更大,应变量分别增加了2.5倍和2.7倍,而消石灰沥青胶浆应变量仅仅增加1.3倍.

从图9中可以看出,二者累积应变发展速率相近.相比矿粉颗粒,水泥颗粒碱组分含量更多,比表面积更大,而且颗粒不规则度更高,水泥颗粒具有更强的吸附活性,但是相对较小的粒径弱化了水泥颗粒对沥青的体积增强作用<sup>[12]</sup>,所以二者的高温稳定性差距不是很显著.

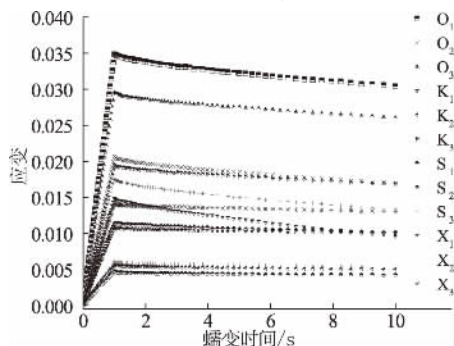


图9 单蠕变周期内应变—时间曲线

Fig.9 Strain-time relationship curve in single creep-recovery cycle

消石灰更大的比表面积显著增强了消石灰颗粒与沥青间的物理与化学吸附作用.另外,消石灰中含有大量的CaO,强碱性赋予了其较高的化学吸附能,较小的分子量也促进了沥青中的羧酸及亚砷等与CaO反应生成不可溶钙盐,因此消石灰与沥青能够产生物理和化学的协同作用<sup>[13]</sup>,生成更多的结构沥青,弱化了由于粒径小而引起的体积增强作用衰减影响.老化过程中,消石灰沥青胶浆中轻质组分损失相对更少,同样地,再生剂更难扩散进入消石灰沥青胶浆.

图10为100次蠕变循环周期内各个试样的累计应变发展曲线.从图10可以看出,发展速率大致分为三块区域,3种不同填料沥青胶浆老化后的累积应变发展速率最小,其次为原样沥青胶浆以及再生沥青胶浆,沥青的累积应变发展速

率最大.再生沥青胶浆累积应变发展速率均超过原样沥青胶浆,尤其是再生矿粉填料沥青胶浆,提升幅度最大.说明再生剂的引入,能够很好地渗透溶解老化沥青,并有效填充大分子之间的间隙,削弱相互禁锢作用,增强了分子间的相互运动,胶浆体系中的老化沥青性能得到很好地恢复.由于矿粉与沥青之间的物理吸附作用相对较小,胶浆体系对老化沥青分子的束缚能力较弱,从而使得老化矿粉沥青胶浆的再生恢复能力更好.

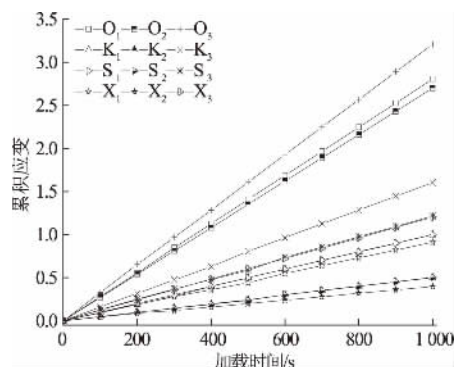


图10 累计应变随时间变化规律

Fig.10 Accumulative strain varying with time

## 4 结论

(1) 对不同填料沥青胶浆老化再生前后的蠕变曲线进行非线性拟合,拟合曲线与实测曲线具有优异的相关性,表明Burgers模型对沥青胶浆在荷载作用下的蠕变行为的适用性不受填料以及体系老化状态的影响.

(2) 同等再生条件下,老化沥青胶浆的黏度、 $G_V$ 值和 $\gamma_{acc}$ 恢复水平均高于老化沥青,沥青胶浆温度敏感性的恢复滞后于黏度的恢复,而沥青温度敏感性的恢复超前于黏度的恢复.

(3) 填料增加了老化沥青与再生剂的接触空间,减小了再生剂分子的扩散阻力,对于黏弹响应而言,在同等再生条件下,老化沥青胶浆比老化沥青具备更高的再生恢复能力.

## 参考文献:

- [1] DURRIEU F, FARCAS F, MOUILLET V. The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging [J]. Fuel, 2007, 86(10): 1446-1451.
- [2] HE G, WONG W. Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials [J]. Construction and building materials, 2007, 21(8): 1809-1819.
- [3] 郝培文, 蒋鹤, 王宏, 等. 水泥对泡沫沥青冷再生混合料强度影响机理 [J]. 功能材料, 2016, 47(3): 3090-3096.
- [4] 许培俊, 刘建飞, 丛培良, 等. 基于室内模拟老化试

- 验对沥青性能的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 94-97.
- [5] MILJKOVIC M, RADENBERG M. Fracture behaviour of bitumen emulsion mortar mixtures [J]. Construction and building materials, 2014, 62: 126-134.
- [6] ALHDABI A, AI N H, RUDDOCK F, et al. Development of sustainable cold rolled surface course asphalt mixtures using waste fly ash and silica fume [J]. Journal of materials in civil engineering, 2013, 26(3): 536-543.
- [7] MWANZA A D, WANG H, HAO P W. Effects of type and content of mineral fillers on the consistency properties of asphalt mastic [J]. Journal of testing and evaluation, 2012, 40(7): 1-9.
- [8] MA L X, LI Z D, HUANG J F. Characterization of asphalt binders modified with hydrated lime and lime-stone dust [C]. Materials science forum. trans tech publications, 2011.
- [9] 徐波, 刘运新, 王英. 填料对橡胶沥青胶浆高低温性能的影响[J]. 功能材料, 2016, 47(1): 1106-1109.
- [10] 张肖宁, 孟勇军, 邹桂莲. 基于重复蠕变的改性沥青高温指标[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 23-28.
- [11] 秦先涛, 祝斯月, 李祖仲, 等. 基于重复蠕变试验的阻燃沥青胶浆高温性能[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 21-27.
- [12] 李平, 孙鸿伟, 张争奇, 等. 水泥与消石灰对沥青胶浆性能影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2007, 28(3): 40-43.
- [13] 柳浩, 李晓民, 张肖宁, 等. 消石灰与矿粉沥青胶浆流变性能比较[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(11): 1506-1511.

## Effects of Fillers on Viscoelastic Response of Recycled Asphalt Cement

CHEN Huaxin, NIU Changchang, KUANG Dongliang, TIAN Junzhuang, YANG Kai

(School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** In this paper, brookfield viscosity test and repeated creep test were adopted to investigate the viscoelastic properties of recycled asphalt and 3 recycled asphalt cements, the viscosity,  $\Delta E_{\eta}$  (viscous flow activation energy),  $G_v$  (the viscous part of creep stiffness) and cumulative strain  $\gamma_{acc}$  of recycled asphalt cements with different fillers were analysed. The experimental results indicated that the recovery levels of viscosity of asphalt and asphalt mastics showed great difference. The regeneration factors in decreasing order were slag asphalt cement > cement asphalt mortar > lime mortar asphalt > asphalt; the viscous flow activation energies of 3 kinds of recycled asphalt cements were increased to varying degrees as well as the corresponding asphalt cements. But the viscous flow activation energy of recycled asphalts were lower than virgin asphalt, the recovery levels of  $G_v$  and  $\gamma_{acc}$  also showed great differences between the recycled asphalt and recycled asphalt cements. Based on the above indicators, 3 kinds of fillers showed different degrees of positive impact on the restoration of viscoelastic properties of aging asphalt mortar, and the order of influences was slag > cement > lime.

**Key words:** recycled asphalt cement; filler; viscous flow activation energy;  $G_v$ ;  $\gamma_{acc}$



文章编号: 1671-6833(2017)02-0078-05

# 冻融循环作用下橡胶自密实混凝土力学性能研究

张卫东<sup>1</sup>, 王振波<sup>2</sup>, 何卫忠<sup>1</sup>

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 221009)

**摘 要:** 通过橡胶自密实混凝土的快速冻融试验, 研究了不同橡胶取代率下橡胶自密实混凝土力学性能随冻融循环次数的变化规律. 试验结果表明: 在相同冻融循环次数下, 橡胶取代率对橡胶自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度影响较大, 但与取代率不成比例关系; 在相同橡胶取代率的情况下, 立方体抗压强度及劈裂强度均显示出随冻融循环次数增加而下降的趋势. 通过对相关数据的分析研究, 给出了橡胶自密实混凝土拉压比随冻融循环次数变化的规律, 回归立方体抗压强度、劈裂强度与冻融循环次数间的简明关系式.

**关键词:** 橡胶自密实混凝土; 冻融循环; 取代率; 立方体抗压强度; 劈裂强度

**中图分类号:** TU528.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.017

## 0 引言

为了提高混凝土浇筑施工的效率, 降低振捣噪音, 保证形状复杂、配筋密集构件的浇筑质量, 降低施工难度, 上个世纪 80 年代日本东京大学冈村教授研究团队提出了自密实混凝土(SCC), 经过近十年的发展, 自密实混凝土得到了普遍认可, 被大量运用在实际工程项目中<sup>[1-2]</sup>.

为解决混凝土自重大及动力性能、延性偏差的问题, 拓展废弃轮胎等橡胶制品的二次利用途径, 尝试将废旧橡胶制成橡胶粉或颗粒加入混凝土中制成橡胶混凝土, 此方面的研究较多且已形成了相应的研究成果<sup>[3-5]</sup>. 关于橡胶自密实混凝土物理力学性能等方面的研究较少. 马昆林等<sup>[6]</sup>研究了橡胶集料体积分数对 SCC 抗压强度的影响, 其试验结果显示两者之间存在较好的线性关系, 并针对抗压强度下降原因进行了详细的分析, 建议了最佳橡胶集料体积分数; 文献[7]研究了橡胶体积取代率对 SCC 收缩性能、电阻及力学性能的影响, 并拟合了相关参数之间的关系式; 文献[8]表明随着橡胶取代率的增加, 自密实混凝土的抗冲击性能有所提高, 但其强度及弹性模量有所下降; 文献[9]表明膨胀土、橡胶的存在明显降低了自密实混凝土的力学性能及动弹性模量, 同时降低了氯离子渗透系

数; 文献[10]研究了橡胶取代率对新拌自密实混凝土流变特性的影响.

鉴于此, 课题组从橡胶自密实混凝土的力学性能出发, 通过改变冻融循环次数及橡胶取代率, 研究了自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度及拉压比的影响, 探讨了立方体抗压强度、劈裂强度与冻融循环次数之间的关系式, 为类似研究提供参考.

## 1 试验

### 1.1 试验材料

水泥(C)采用“海螺”牌 P·O42.5 普通硅酸盐水泥; 砂(S)为中粗河砂, 其细度模数为 2.6; 石子(G)为连续级配碎石, 粒径为 5~20 mm; 粉煤灰(FA)为南京嘉琪粉煤灰公司生产的 I 级粉煤灰; 减水剂(SP)为江苏博特的 PCA(I) 羧酸高效减水剂; 搅拌水(W)为当地自来水; 橡胶(RP)为粒径为 350  $\mu\text{m}$  的硫化橡胶粉.

### 1.2 试验设计

为了系统研究橡胶体积取代率、冻融循环次数对自密实混凝土力学性能的影响, 设计制作了 150 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件, 其中 75 个用于研究橡胶取代率及冻融循环次数对橡胶自密实混凝土立方体抗压强度的影响,

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-07-19

基金项目: 江苏省高校“青蓝工程”优秀骨干教师基金资助项目; 淮安市科技计划基金资助项目(HAS2014021-3)

作者简介: 张卫东(1981—), 男, 江苏南通人, 淮阴工学院副教授, 主要从事新型建筑材料性能研究, E-mail: jsntzwd@163.com.

剩下 75 个用于研究两者对劈裂强度的影响. 以 C40 自密实混凝土配合比为基准,具体如表 1 所

示. 按照等体积原则,橡胶粉取代河砂的体积取代率分别为 5%、10%、15% 和 20%.

表 1 自密实混凝土配合比

Tab. 1 Self-compacting concrete mix ratio

编号	水胶比	配合比/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )						
		C	S	G	FA	RB	W	SP
SCC	0.38	350	740	930	150	0.0	190	2.82
RSCC-5	0.38	350	703	930	150	14.8	190	2.82
RSCC-10	0.38	350	666	930	150	29.7	190	2.82
RSCC-15	0.38	350	629	930	150	44.5	190	2.82
RSCC-20	0.38	350	592	930	150	59.4	190	2.82

注: SCC 表示自密实混凝土; RSCC- $y$  中 RSCC 表示橡胶自密实混凝土,  $y$  表示橡胶体积取代率.

### 1.3 试验方法

为了保证橡胶粉能与粗细骨料及水泥彼此均匀混合,先将其倒入搅拌 30 s,然后在搅拌过程中慢慢注水搅拌 4 min. 具体试验步骤按照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》<sup>[11]</sup> 中具体规定执行,每个冻融循环周期约为 4 h,试件中心最低和最高温度分别控制在  $-18 \pm 2$  °C 和  $5 \pm 2$  °C. 为了研究冻融循环次数对橡胶自密实混凝土力学性能的影响,待冻融循环次数达到 25、50、75、100 次后,分别从冻融箱中取出立方体试件,自然晾干后依照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T50081—2002)<sup>[12]</sup> 中规定方法进行立方体抗压强度及劈裂强度试验.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 橡胶取代率的影响

橡胶取代率( $y$ )对自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度影响的关系曲线分别见图 1、图 2.

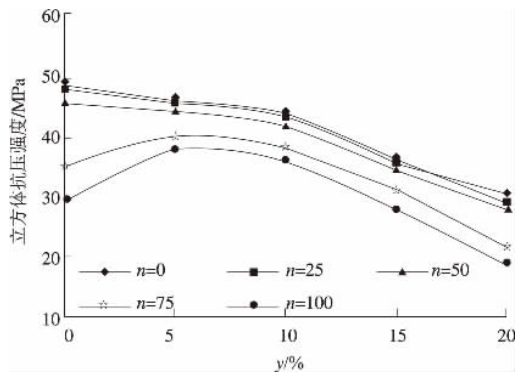


图 1 橡胶取代率与立方体抗压强度关系

Fig. 1 Relation between compressive strength and replacement rate of rubber

由图 1 可知,橡胶取代率与立方体抗压强度关系明显. 当冻融循环次数分别为 0、25、50 次时,随着橡胶取代率的提高,橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度均呈下降趋势. 对试验数据的分析

可知,当冻融循环次数为 25 次时,橡胶取代率分别为 5%、10%、15%、20% 的自密实混凝土的立方体抗压强度相应为 45.5、43.2、35.6、28.7 MPa,为基准自密实混凝土立方体强度(47.8 MPa)的 95.19%、90.38%、74.48%、60.04%,可见随着取代率升高呈现出前期下降较缓慢,后期下降较快的趋势.

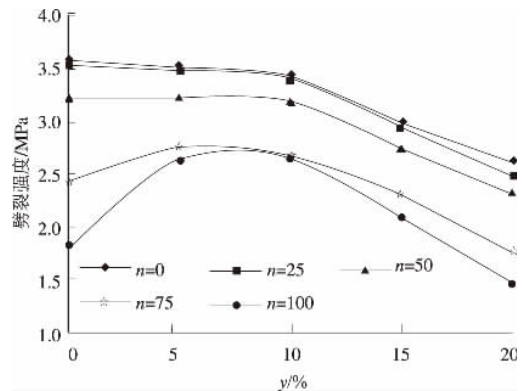


图 2 橡胶取代率与劈裂强度关系

Fig. 2 Relation between split strength and replacement rate of rubber

随着橡胶取代率的增加,冻融循环次数为 75 次、100 次的橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度的变化情况基本保持一致,呈先上升后下降的发展趋势. 当冻融循环次数为 75 次时,橡胶取代率为 5%、10%、15%、20% 的自密实混凝土的立方体抗压强度分别为 39.8、37.9、31.2、21.8 MPa,为同样冻融条件下基准自密实混凝土立方体强度(35.1 MPa)的 113.4%、108.0%、88.9%、62.1%,这表明橡胶取代率 5% 为立方体抗压强度先上升后下降的拐点,但橡胶取代率为 10% 的橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度比基准混凝土高. 表明在冻融循环次数较高的情况下,橡胶的存在可以有效地提高自密实混凝土的立方体抗压强度,但取代率以不超过 10% 为宜.



由图2可知,橡胶取代率与劈裂强度关系明显.当冻融循环次数为0、25、50次时,随着橡胶取代率的提高,橡胶自密实混凝土的劈裂强度均呈下降趋势;当冻融循环次数为75、100次时,随着橡胶取代率的增加,橡胶自密实混凝土的劈裂强度呈先上升后下降的发展趋势,拐点同样位于橡胶取代率5%处.表明在一般冻融环境下,橡胶的存在不利于提高自密实混凝土抗劈裂强度,但冻融循环次数较高(如100次),合理控制橡胶取代率可以有效提高橡胶自密实混凝土的劈裂强度.

通过对比分析可知,一方面橡胶弹性模量及强度较低,加上橡胶憎水且周围易吸附气泡进而降低橡胶与水泥基体间结合性能,随着橡胶取代率增加导致初始微裂缝及孔隙增多,进而降低橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度及劈裂强度;另一方面增多的微裂缝、孔隙及橡胶的易变形性有利于缓解冻融循环导致的损伤.当前者的不利作用起主导作用时,某些冻融条件下混凝土抗压及劈裂强度随取代率上升而下降;当两者交互起主导作用时,某些冻融条件下橡胶自密实混凝土立方体抗压强度及劈裂强度随取代率增加呈现先增大后下降趋势.

## 2.2 冻融循环次数的影响

冻融循环次数对不同橡胶取代率的自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度影响的关系曲线分别见图3、图4.

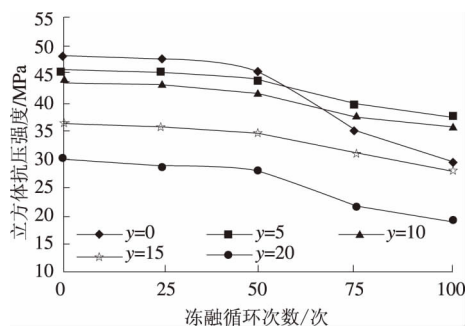


图3 冻融循环次数与立方体抗压强度关系

Fig.3 Relation between compressive strength and freeze-thaw cycles

由图3可知,随着冻融循环次数的增加,基准自密实混凝土及不同橡胶取代率的自密实混凝土立方体抗压强度均下降,但下降速度不同.通过对不同橡胶取代率的自密实混凝土的抗压强度随冻融循环次数变化情况分析可知,以50次冻融循环为界,抗压强度下降呈现前缓后快的趋势,5%取代率的橡胶自密实混凝土的总体变化速度较为缓慢,每递增25次冻融循环,立方体抗压强度约为

基准自密实混凝土强度的99.13%、96.08%、86.71%及81.14%.

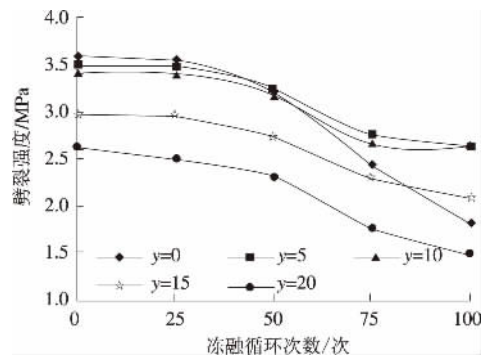


图4 冻融循环次数与劈裂强度关系

Fig.4 Relation between split strength and freeze-thaw cycles

由图4分析可知,随着冻融循环次数的增加,基准自密实混凝土及不同橡胶取代率的自密实混凝土的劈裂强度均随之下降,且下降速度明显快于立方体抗压强度的下降速度.通过对不同橡胶取代率的自密实混凝土的抗压强度随冻融循环次数变化情况分析可知,当循环次数位于50~75次时,橡胶自密实混凝土劈裂强度下降最为迅速,波动范围为92.02%~78.35%;超过75次后,下降速度减缓明显,波动范围仅为78.35%~74.93%.

结合冻融循环条件下橡胶对立方体抗压强度的影响分析可知,橡胶的存在会降低自密实混凝土的基本力学性能,且对劈裂强度影响较大,但同时也表明控制橡胶取代率,可降低冻融循环对自密实混凝土力学性能的影响,进一步提高其抗冻耐久性能.

## 2.3 拉压比

拉压比是反映混凝土脆性的主要指标之一.橡胶自密实混凝土拉压比(劈裂强度/立方体抗压强度)与冻融循环的关系曲线见图5.

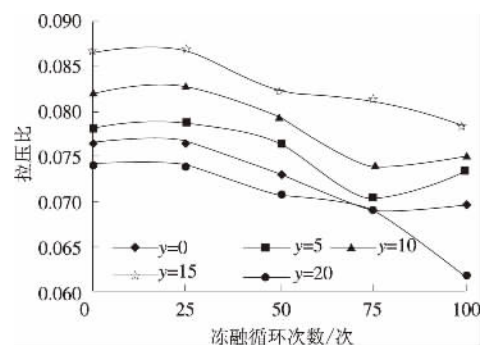


图5 冻融循环次数与拉压比关系

Fig.5 Relation between freeze-thaw cycles and tension compression ratio

由图5可知,在相同冻融循环次数下,橡胶自密实混凝土的拉压比均随橡胶取代率的增加而增大,这表明橡胶取代部分细骨料有利于提高自密实混凝土的塑性;橡胶取代率相同条件下,橡胶自密实混凝土的拉压比随冻融循环次数大体呈下降趋势,但取代率低于15%时,冻融循环次数为100的自密实混凝土拉压比却高于循环次数为75的自密实混凝土的拉压比。由于研究所限,未进行橡胶取代率为20%的橡胶自密实混凝土在更高冻融循环次数下的力学试验,无法反映该取代率下自密实混凝土的拉压比变化情况。结合普通自密实混凝土在冻融作用下拉压比比值变化情况,可知橡胶取代细骨料能提高处于冻融作用下的自密实混凝土的拉压比比值,且提高其塑性。

#### 2.4 关系曲线

为了解橡胶自密实混凝土与冻融循环次数的关系,笔者根据最小二乘法,回归得到了不同橡胶取代率的橡胶自密实混凝土立方体抗压强度 $f_d'$ 、劈裂强度 $f_t'$ 与冻融循环次数 $N$ 的关系曲线,如图6、图7。

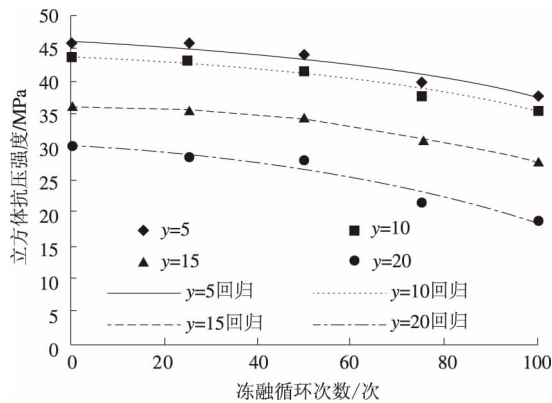


图6 立方体抗压强度与冻融循环次数拟合关系

Fig.6 Regressive relation between compressive strength and freeze-thaw cycles

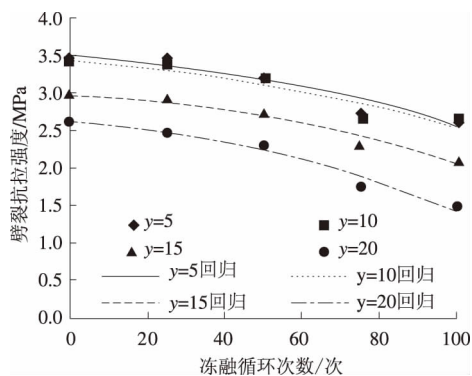


图7 劈裂强度与冻融循环次数拟合关系

Fig.7 Regressive relation between freeze-thaw cycles and split strength

橡胶取代率为5%的 $f_d'$ 与 $N$ 的拟合关系式如式(1)所示,45.9为该橡胶自密实混凝土在冻融循环次数为零条件下的立方体抗压强度试验值 $f_d$ 。

$$\begin{cases} y=5: f_d' = 45.9 - 0.0087N - 0.0008N^2 \\ R^2 = 0.9667 \\ f_d' = f_d - 0.0087N - 0.0008N^2 \end{cases} \quad (1)$$

其余 $f_d'$ 、 $f_t'$ 与 $N$ 的关系式同理可得,具体如表2所示。

表2 橡胶自密实混凝土力学性能与冻融循环次数关系式

Tab.2 Relation between freeze-thaw cycles and mechanical properties of rubberized self-compacting concrete

取代率/ $y$	关系式	$R^2$
$y=5$	$f_d' = f_d - 0.0087N - 0.0008N^2$	0.9667
$y=10$	$f_d' = f_d - 0.0229N - 0.0006N^2$	0.9759
$y=15$	$f_d' = f_d + 0.0004N - 0.0009N^2$	0.9955
$y=20$	$f_d' = f_d - 0.0215N - 0.0011N^2$	0.9548
$y=5$	$f_t' = f_t - 0.0034N - 0.00006N^2$	0.9538
$y=10$	$f_t' = f_t - 0.0038N - 0.00005N^2$	0.8988
$y=15$	$f_t' = f_t - 0.0017N - 0.00008N^2$	0.9690
$y=20$	$f_t' = f_t - 0.0034N - 0.00008N^2$	0.9760

注:由于笔者研究的冻融循环次数有限,故 $0 \leq N \leq 100$ 。

由式(1)及表2可知,立方体抗压强度、劈裂强度两者与冻融循环次数的相关性较好,且反映出两者随冻融循环次数的变化规律。

### 3 结论

(1) 橡胶取代率对橡胶自密实混凝土立方体抗压、劈裂强度影响明显,但不成比例关系。当冻融循环次数为0、25及50次时,随着取代率的增加,两强度呈现出下降趋势。而循环次数为75及100次时却呈现先上升后下降趋势,表明在较高冻融循环次数下,合理控制橡胶取代率有助于提高自密实混凝土的力学性能。

(2) 随着冻融循环次数的增加,立方体抗压强度、劈裂强度随之下降,表明橡胶自密实混凝土损伤越严重。橡胶取代率为5%时,橡胶自密实混凝土的立方体抗压强度、劈裂强度受冻融循环影响最小,变化速率相对缓慢。

(3) 相同取代率条件下,橡胶自密实混凝土拉压比随冻融循环次数增加大体呈下降趋势;相同冻融条件下,橡胶自密实混凝土拉压比随橡胶取代率增加而增大,显示出橡胶的存在有助于提高冻融状态下自密实混凝土的抗裂性能。

(4) 通过对试验数据的统计回归,给出了橡

胶自密实混凝土立方体抗压强度、劈裂强度与冻融循环次数之间的关系式,且相关性较好,为橡胶自密实混凝土的抗冻耐久性研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 王国杰. 自密实混凝土圆环约束收缩试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(12): 173-180.
- [2] 阎培渝, 余成行, 王强, 等. 高强自密实混凝土的减缩措施[J]. 硅酸盐学报, 2015(4): 363-367.
- [3] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate[J]. Journal of materials in civil engineering, 1993, 5(4): 478-496.
- [4] GANJIAN E, KHORAMI M, MAGHSOUDI A A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete[J]. Construction and building materials, 2009, 23(5): 1828-1836.
- [5] 张卫东, 相军, 王成武. 废橡胶对再生混凝土力学性能影响的试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(2): 49-52.
- [6] 龙广成, 马昆林, 谢友均. 橡胶集料对混凝土抗压强度的降低效应[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 758-762.
- [7] YUNG W H, YUNG L C, HUA L H. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete[J]. Construction and building materials, 2013(41): 665-672.
- [8] KHALIL E, ABD-ELMOHSEN M, ANWAR A M. Impact resistance of rubberized self-compacting concrete[J]. Water science, 2015, 29(1): 45-53.
- [9] LI N, LONG G C, ZHANG S S. Properties of self-compacting concrete incorporating rubber and expanded clay aggregates[J]. Key engineering materials, 2014, 629: 417-424.
- [10] GÜNEYISI E, GESOGLU M, NAJI N, et al. Evaluation of the rheological behavior of fresh self-compacting rubberized concrete by using the herschel-bulkley and modified bingham models[J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2016, 16(1): 9-19.
- [11] 中国建筑科学研究院. GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 中国建筑科学研究院. GB/T 50081—2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

## Study of Mechanical Properties of Rubberized Self-compacting Concrete Subjected to Freeze-thaw Cycle

ZHANG Weidong<sup>1</sup>, WANG Zhenbo<sup>2</sup>, HE Weizhong<sup>1</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

**Abstract:** Through the freezing and thawing tests, the influence of replacement rate of rubber on mechanical properties of rubberized self-compacting concrete (RSCC) under different cycle times of freeze-thaw were studied. The results showed that the replacement rate of rubber had great influence on cubic compressive strength and split strength of RSCC under the same freeze-thaw cycle time, but not in proportional relation; cubic compressive strength and split strength of RSCC under the same replacement rate of rubber decreased with the freeze-thaw cycle times increasing. Based on the analysis of the test data, the change law between tension-compression ratio and freeze-thaw cycle times was given, and the relevant simple formula were regressed between cubic compressive strength, split strength and freeze-thaw cycle times. This study could serve as a reference for durability of RSCC under freezing and thawing environment.

**Key words:** rubberized self-compacting concrete; freeze-thaw cycle; replacement rate; cubic compressive strength; split strength

文章编号: 1671-6833(2017)02-0083-05

## 变截面波形钢腹板组合箱梁剪应力及剪力传递效率分析

武海鹏, 李 杰, 陈 淮

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 依据变截面波形钢腹板组合箱梁特点, 考虑梁高、底板厚度的变化, 从弹性微元段的受力平衡出发, 推导钢腹板剪应力计算公式, 结果表明, 箱梁剪力由混凝土顶、底板和波形钢腹板共同承担, 变截面波形钢腹板梁中的剪应力除了由截面剪力引起外, 还包括有截面弯矩和轴力引起的附加剪应力; 通过与等截面计算公式和有限元数值计算结果对比验证, 表明笔者给出的计算公式具有较高计算精度; 最后在此基础上考虑3种荷载工况, 给出一变截面波形钢腹板箱梁的剪力传递效率。

**关键词:** 变截面; 波形钢腹板; 组合箱梁; 剪应力; 剪力传递效率

**中图分类号:** U442.5

**文献标志码:** A

**doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.018

### 0 引言

波形钢腹板组合箱梁采用波形钢板置换混凝土腹板, 使箱梁成为由钢筋混凝土和波形钢腹板组成的组合结构, 其最显著的特点是用波折形钢板取代混凝土腹板。波形钢腹板组合箱梁是一种经济、合理、高效的桥梁结构形式<sup>[1]</sup>。从已有的研究可知, 在与钢板梁桥类似的波形钢腹板组合桥中, 弯曲剪切力大部分由钢腹板负担<sup>[2-3]</sup>, 一般做法是认为波形钢腹板承担全部弯曲剪力, 通过比较设计剪力与设计剪切抗力进行截面设计和验算<sup>[4]</sup>, 这其中可能存在不合理、不经济。大量的试验和数值分析证明了波形钢腹板与混凝土顶、底板共同承担剪力<sup>[5-8]</sup>, 相关研究表明混凝土顶板和底板承担大部分弯矩, 波形钢腹板主要承担剪力, 且剪力沿波形板高度方向均匀分布<sup>[9]</sup>; 一些研究针对波形钢腹板组合结构在预应力作用下的加载效率规律进行了模型梁测试, 并利用空间有限元分析方法进行对比验证, 此外在这些研究中明确了波形钢腹板对截面轴向刚度和抗弯刚度的贡献可以忽略, 弯曲正应变分布符合“拟平截面假定”<sup>[10]</sup>, 而且变截面梁的剪应力分布规律与等截面梁之间存在较大差异<sup>[11]</sup>。

笔者依据变截面波形钢腹板组合箱梁特点, 考虑梁高、底板厚度的变化(顶板厚度一般不发

生变化), 从弹性微元段的受力平衡出发, 计入弯矩和轴力引起的附加剪应力, 推导变截面波形钢腹板组合箱梁的腹板剪应力计算公式, 通过与等截面计算公式(又分为考虑混凝土顶、底板与否)和有限元数值分析对所推导的公式进行验证对比, 说明变截面梁和等截面梁在腹板剪应力计算定量上的差异, 并为工程应用提出实用计算方法, 在此基础上进一步分析波形钢腹板的剪力传递效率。

### 1 计算公式推导

#### 1.1 忽略顶、底板承剪的腹板剪应力

传统的波形钢腹板组合箱梁桥的腹板剪应力计算假定钢腹板承担所有剪力且剪应力沿腹板高均匀分布, 该计算方法简单却偏于保守。具体计算时可根据截面所承担的实际剪力, 直接除以波形钢腹板的剪切面积, 得到钢腹板上的平均竖向剪应力, 即:

$$\tau = \frac{Q}{A_w} = \frac{Q}{nt_w h} = \frac{Q}{bh} \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为波形钢腹板的竖向平均剪应力;  $Q$  为截面上钢腹板和混凝土共同承受的竖向剪力;  $A_w$  为波形钢腹板承剪面积;  $n$  为截面上波形钢腹板的数量;  $t_w$  为波形钢腹板的厚度;  $h$  为混凝土顶、底板之间波形钢腹板的净高度;  $b$  为截面上波形钢

收稿日期: 2016-05-25; 修订日期: 2016-10-20

基金项目: 河南省基础与前沿技术研究项目(162300410264)

通讯作者: 李杰(1974—), 男, 陕西宝鸡人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事桥梁结构理论研究, E-mail: lijie2007@zzu.edu.cn.



腹板总的厚度, 计算波形钢腹板剪应力时有  $b = nt_w$ .

### 1.2 考虑混凝土顶、底板承剪的等截面梁腹板剪应力计算

忽略轴力作用, 考虑混凝土顶、底板参与抗剪, 等截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力为:

$$\tau = \frac{QS_a}{bI} = \frac{Q'}{A_w} = \frac{Q'}{bh}. \quad (2)$$

式中:  $Q$  为截面总的剪力;  $Q'$  为截面上波形钢腹板承担的剪力;  $S_a$  为混凝土顶板(或底板)面积  $A_a$  对形心轴的静矩;  $I$  为截面的惯性矩. 计算  $S_a$  时忽略了波形钢腹板的面积矩, 计算  $I$  时忽略了波形钢板的纵桥向抗弯惯性矩.

### 1.3 考虑顶、底板承剪的等截面梁腹板剪应力

考虑混凝土顶、底板承剪时, 将剪力传递效率定义为波形钢腹板承担的剪力比例  $\zeta$ , 则  $\zeta$  为式(2)和式(1)的比值.

$$\zeta = \frac{Q'}{Q} = \frac{S_a h}{I}. \quad (3)$$

在一般的等截面箱梁设计中, 波形钢腹板组合箱梁的剪力传递效率  $\zeta$  一般为 0.75 左右, 即波形钢腹板承剪比例为 75% 左右, 混凝土承剪比例为 25% 左右<sup>[7]</sup>.

### 1.4 考虑顶、底板承剪的变截面梁腹板剪应力

#### 1.4.1 公式推导

取波形钢腹板箱梁剪应力计算典型截面, 如图 1 所示.  $b_1$ 、 $t_1$  分别表示混凝土顶板的宽度和厚度,  $b_2$ 、 $t_2$  分别表示混凝土底板的宽度和厚度, 这里由于要对变截面梁的剪应力计算公式进行推导, 混凝土底板沿着纵桥向为变厚度, 故将  $t_2$  用变量  $t$  来表示.

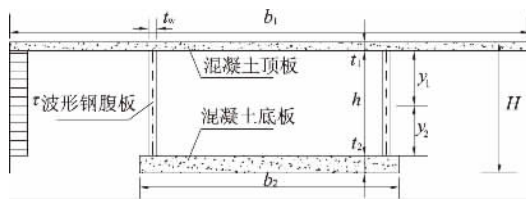


图 1 波形钢腹板箱梁剪应力计算典型截面

Fig. 1 Shear stress calculation of box girder with corrugated steel webs typical sections

取变截面梁的一个长为  $dx$  的微段来进行分析, 如图 2 所示. 微段的两端受力如图 2(a) 所示, 在截面的两端分别受到弯矩  $M$ , 竖向剪力  $Q$  以及水平轴力  $N$  的作用,  $\alpha$  为变截面形心连线上  $x$  处形心的倾角;  $\beta_1$  为混凝土底板截面形心连线上  $x$  处形心的倾角;  $\beta_2$  为底板厚度的变化角;  $d$  表示微

段上截面特性的增量或力的增量.

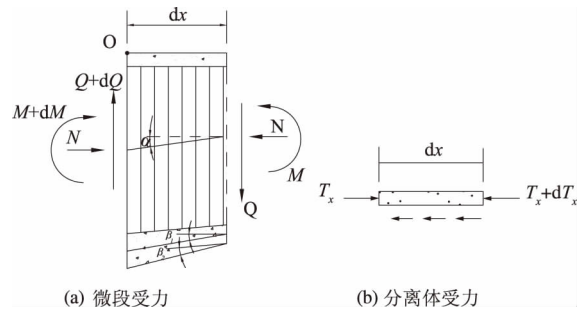


图 2 变截面波形钢腹板剪应力计算

Fig. 2 Shear stress analysis of variable cross-section with corrugated steel webs

由材料力学知识可知, 截面上距梁顶  $y$  位置处的正应力为:

$$\sigma_x = \frac{N}{A} + \frac{M}{I}(y_c - y), \quad (4)$$

式中:  $A$  为截面面积;  $I$  为截面惯性矩;  $y$  为截面形心到梁顶的距离; 由于波形钢腹板截面积较小, 计算  $A$  时只计入混凝土顶板和底板的截面积, 同时由于波形钢腹板的“手风琴效应”, 计算  $I$  时也只计入顶、底板的抗弯贡献. 为了计算波形钢腹板上的剪应力, 先求任意位置处的水平剪应力, 取微段上与腹板相连顶板的分离体进行受力分析, 如图 2(b) 所示. 由水平方向受力平衡条件可得:

$$\tau = -\frac{1}{b} \frac{dT_x}{dx}, \quad (5)$$

式中:  $T_x$  为水平剪应力计算点以上部分的水平合力, 由于波形钢腹板几乎不承受轴力, 因此在图 2(b) 中将  $T_x$  的作用点直接作用在顶板分离体截面中心处, 其值为:

$$T_x = \int_0^y \sigma_x b(y) dy, \quad (6)$$

将式(4)代入式(6), 不妨将剪应力计算点取在波形钢腹板和混凝土顶板交界处, 则  $b(y)$  为混凝土顶板宽度  $b_1$ ,  $y$  为混凝土顶板厚度  $t_1$ , 则上式变为:

$$\begin{aligned} T_x &= \frac{N}{A} \int_0^{t_1} b_1 dy + \frac{M}{I} \int_0^{t_1} (y_c - y) b_1 dy \\ &= \frac{NA_a}{A} + \frac{MS_a}{I}. \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $A_a$  为混凝土顶板(或底板)的面积;  $S_a$  为  $A_a$  对形心轴的静矩. 在图 2(a) 所示的微元段中, 对  $O$  点取矩, 由力矩平衡可得:

$$\frac{dM}{dx} = -Q + N \tan \alpha. \quad (8)$$

将式(7)代入式(5)得:

$$\begin{aligned}\tau &= -\frac{1}{b} \cdot \frac{dT_x}{dx} = -\frac{1}{b} \left[ N \left( \frac{1}{A} \cdot \frac{dA_a}{dx} - \frac{A_a}{A^2} \cdot \frac{dA}{dx} \right) + \right. \\ &M \left( \frac{1}{I} \cdot \frac{dS_a}{dx} - \frac{S_a}{I^2} \cdot \frac{dI}{dx} \right) + \frac{S_a}{I} \cdot \frac{dM}{dx} \left. \right], \text{代入式(8)} \\ \tau &= \frac{QS_a}{bI} - \frac{M}{b} \left( \frac{1}{I} \cdot \frac{dS_a}{dx} - \frac{S_a}{I^2} \cdot \frac{dI}{dx} \right) - \frac{N}{b} \left( \frac{1}{A} \cdot \frac{dA_a}{dx} - \right. \\ &\left. \frac{A_a}{A^2} \cdot \frac{dA}{dx} + \frac{S_a}{I} \tan \alpha \right). \quad (9)\end{aligned}$$

式(9)即为变截面波形钢腹板剪应力计算公式,可以看出,在变截面波形钢腹板梁中,剪应力除了由截面剪力 $Q$ 引起外,还包括有截面弯矩 $M$ 和轴力 $N$ 引起的附加剪应力。

#### 1.4.2 变截面几何参数的微分表达式

式(9)中剪应力的表达式中含有4个微分项,分别是 $\frac{dA}{dx}$ 、 $\frac{dI}{dx}$ 、 $\frac{dA_a}{dx}$ 、 $\frac{dS_a}{dx}$ ,由图2(a)所示的微元段几何参数尺寸,分别给出它们的表达式。截面面积 $A$ 沿纵桥向的变化率为:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{d}{dx} (b_1 t_1 + b_2 t) = 0 + b_2 \frac{dt}{dx} = b_2 \frac{dt}{dx}, \quad (10)$$

其中 $\frac{dt}{dx} = \tan \beta_2$ 。

截面惯性矩 $I$ 沿纵桥向的变化率为:

$$\begin{aligned}\frac{dI}{dx} &= \frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{12} b_1 t_1^3 + b_1 t_1 \left( y_c - \frac{1}{2} t_1 \right)^2 + \frac{1}{12} b_2 t^3 + b_2 t \right. \\ &\left. \left( H - y_c - \frac{1}{2} t \right)^2 \right] = a_1 \frac{dy_c}{dx} + a_2 \frac{dt}{dx} + a_3 \frac{dH}{dx}. \quad (11)\end{aligned}$$

其中:

$$a_1 = 2b_1 t_1 \left( y_c - \frac{1}{2} t_1 \right) - 2b_2 t \left( H - y_c - \frac{1}{2} t \right);$$

$$a_2 = b_2 \left[ \frac{1}{4} t^2 + \left( H - y_c - \frac{1}{2} t \right) \left( H - y_c - \frac{3}{2} t \right) \right];$$

$$a_3 = 2b_2 t \left( H - y_c - \frac{1}{2} t \right); \quad \frac{dH}{dx} = \tan \beta_1;$$

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{1}{A} \left[ b_2 \left( H - y_c - t \right) \right] \frac{dt}{dx} + \frac{b_2 t dH}{A dx} = \tan \alpha,$$

也即有

$$\begin{aligned}\frac{dI}{dx} &= a_1 \frac{dy_c}{dx} + a_2 \frac{dt}{dx} + a_3 \frac{dH}{dx} = a_1 \tan \alpha + a_2 \tan \beta_2 + \\ &a_3 \tan \beta_1. \quad (12)\end{aligned}$$

在计算腹板剪应力的时候,剪应力计算点取

在腹板上,此时

$$A_a = b_1 t_1; \quad \frac{dA_a}{dx} = 0;$$

$$S_a = A_a \left( y_c - \frac{1}{2} t_1 \right); \quad \frac{dS_a}{dx} = b_1 t_1 \frac{dy_c}{dx} = b_1 t_1 \tan \alpha. \quad (13)$$

#### 1.4.3 变截面几何参数的微分表达式

对于工程中遇到的变截面波形钢腹板组合箱梁结构,梁底曲线多为1.5~2.0次抛物线;底板厚度根据受力要求变化,一般设计为某一节段过渡,也可以设计为线性或非线性渐变;波形钢腹板依据梁底曲线变高;顶板厚度一般不变化。由于箱梁截面结构尺寸的变化,公式(9)的应用存在一定困难,考虑到工程结构建造特点,特别是悬臂浇筑施工的每一梁段是通过整块模板的调整形成最终的截面和成桥线形,因此在剪应力计算公式(9)的具体应用时,可先求出 $i$ 截面的 $I$ 、 $S_a$ 、 $A_a$ 、 $A$ 、 $y_c$ 具体数值,然后分别求出 $i-1$ 、 $i+1$ 两个截面与 $i$ 截面对应物理量的线性变化率,再取二者平均值作为该截面的各参数微分值。

## 2 公式验证及剪力传递效率

下面以桃花峪黄河大桥跨大堤桥为例进行波形钢腹板剪应力计算。该桥跨径布置为75+135+75 m,一个主墩采用墩梁固结的刚构墩,另一主墩为设置支座的连续墩。主梁为单箱单室,波形钢腹板为直腹板,箱梁根部梁高为7.5 m,跨中梁高为3.5 m。

#### 2.1 变截面波形钢腹板剪应力计算公式验证

为了验证波形钢腹板剪应力实用计算方法的准确性和可靠性,采用板单元、实体单元等建立大桥精细有限元模型,选择连续墩跨的中跨和边跨截面 $C'-C'$ 、 $D'-D'$ 、 $E'-E'$ 、 $F'-F'$ 、 $G'-G'$ 、 $H'-H'$ (如图3所示)。限于篇幅,以下仅给出自重作用下腹板剪应力计算结果的验证对比,如表1所示。由表1可以看出,笔者给出的波形钢腹板剪应力公式(9)与有限元计算结果基本一致,误差最大3.7%,具有较高的计算精度,而且简化后的实用计算方法非常方便工程应用。

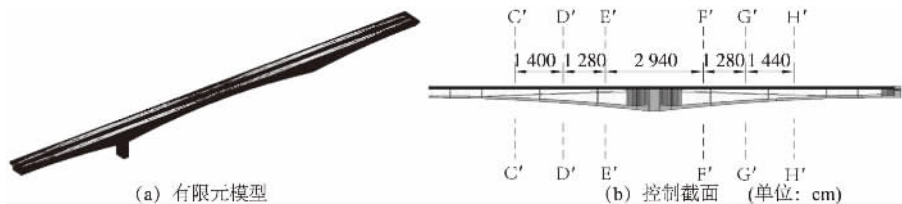


图3 有限元模型及控制截面

Fig.3 Finite element model and control section



表1 截面剪应力验证

Tab.1 Shear stress test of each section

计算方法及验证截面	C'-C'	D'-D'	E'-E'	F'-F'	G'-G'	H'-H'
式(9)计算	52.7	51.6	50.6	-42.1	-39.2	-34.7
有限元数值分析	54.7	53.4	51.1	-42.2	-40.3	-35.8
误差1%	3.7	3.4	1.0	0.2	2.7	3.1

MPa

## 2.2 变截面波形钢腹板组合箱梁剪力传递效率

为了分析变截面波形钢腹板剪力传递效率,分别按照忽略顶、底板承剪式(1)、考虑顶、底板承剪按照等截面计算抗剪式(2)、考虑顶、底板承剪按照变截面计算抗剪式(9)和有限元方法,对该实桥算例的剪力传递效率进行分析,其中波形钢腹板组合箱梁的剪力传递效率定义见式(3)。采用以上4种方法,图4给出了自重作用下C'-C'、D'-D'、E'-E'、F'-F'、G'-G'、H'-H'截面的剪力传递效率。

利用4种方法求各控制截面剪力传递效率,从图4可以看出,按照等截面公式计算的剪力传递效率相对较大,忽略顶、底板承剪时的计算结果总是最大,且过于保守。剪力传递效率与截面位置有关系,在C'-C'截面处,考虑顶、底板承剪时的等截面公式计算结果比变截面公式和FEA结果要小。这是由于自重作用下C'-C'截面和D'-D'截面剪力同号,而弯矩异号。C'-C'截面和D'-D'截面弯矩异号引起的附加剪应力不同,造成C'-C'截面处等截面公式和FEA剪应力结果较大,这也进一步说明按照等截面公式计算的结果不可靠,而按照计入变截面效应考虑混凝土承剪的变截面公式具有较好的适用性。此外,从图4还可以看出,在自重作用下连续墩跨的波形钢腹板组合箱梁各控制截面的剪力传递效率介于55%~82%之间,这与目前设计中的偏保守认为波形钢腹板承担全部剪力的认识有较大差异。在自重、自重+预应力、满布活载3种工况下,考虑变截面效应和混凝土分担剪力,该波形钢腹板组合箱梁的剪力传递效率见表2。

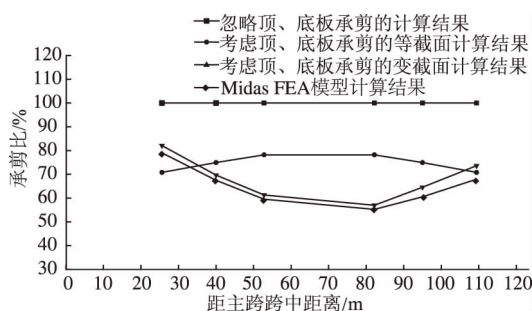


图4 4种计算方法下各个截面剪力传递效率

Fig.4 Each section shear transfer efficiency under four calculation methods

表2 3种工况下剪力传递效率

Tab.2 Shear transfer efficiency of three load cases

截面	剪力传递效率/%		
	自重	自重+预应力	满布活载
C'-C'	82.1	53.2	76.0
D'-D'	69.0	58.1	65.4
E'-E'	60.1	52.3	54.5
F'-F'	55.3	49.2	43.4
G'-G'	62.1	52.4	50.5
H'-H'	70.1	52.6	54.4

通过表2可以进一步看出,剪力传递效率与所选取的截面位置、荷载作用方式和大小有关系,在进行波形钢腹板组合梁桥的剪力计算时,如果只是简单地认为剪力完全由波形钢腹板承担的做法偏于保守,不适合变截面波形钢腹板连续体系组合箱梁桥的剪力计算。实际上混凝土顶、底板也要承受一定的剪力,尤其在变截面连续体系组合箱梁桥中分担剪力更为显著。考虑到波形钢腹板箱梁的剪应力分布受梁高变化的影响,通常设计中随着梁高的增加,波形钢腹板的厚度会相应增加,以便于钢腹板能够承担更多的剪力,但即使这样,截面上的剪力还是会分担一部分到混凝土顶、底板上,从而使得波形钢腹板所承担的剪力减小。

## 3 结论

(1) 变截面波形钢腹板组合箱梁的剪力由混凝土顶、底板和波形钢腹板共同承担,且变截面波形钢腹板组合箱梁与等截面波形钢腹板组合箱梁的剪应力计算公式存在较大差异,变截面波形钢腹板梁中的剪应力除了由截面剪力 $Q$ 引起外,还包括有截面弯矩 $M$ 和轴力 $N$ 引起的附加剪应力。

(2) 通过与精细有限元模型的分析结果验证,笔者所推导的公式(9)具有较高的精度;考虑到实际结构悬臂浇筑施工中每一梁段是通过整块模板的调整形成最终的截面和成桥线形,在公式(9)的具体应用时,可先求出 $i$ 截面的 $I$ 、 $S_a$ 、 $A_a$ 、 $A$ 、 $\gamma_c$ 具体数值,然后分别求出 $i-1$ 、 $i+1$ 两个截面与 $i$ 截面对应物理量的线性变化率,再取二者平均值作为该截面的各参数微分值,具体应用时还可以编制小程序以提高计算效率。

(3) 按照等截面公式计算的剪力传递效率相对较大,且忽略顶、底板承剪时的计算结果过于保守;剪力传递效率与截面位置有关系,弯矩、剪力等内力异号会引起附加剪应力不同,进而使得等截面公式计算出的结果不可靠。

(4) 剪力传递效率与所选取的截面位置、荷载作用方式和大小有关,简单地认为剪力完全由波形钢腹板承担的做法偏于保守,算例连续墩跨3种荷载工况作用下的波形钢腹板组合箱梁各控制截面的剪力传递效率介于43%~82%之间,这与目前设计中的偏保守认为波形钢腹板承担全部剪力的认识有较大差异,因此对于变截面波形钢腹板组合箱梁的精细设计或设计优化应考虑剪力传递效率问题。

#### 参考文献:

- [1] 王东炜,张奇伟,王用中. 基于模态分析的郾城黄河公路大桥优化设计[J]. 郑州大学学报(工学版),2010,31(6):1-5.
- [2] 陈宝春,牟廷敏,陈宜言,等. 我国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展及工程应用[J]. 建筑结构学报,2013,34(S1):1-10.
- [3] 万水,李淑琴,马磊. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J]. 建筑科学与工程学报,2009,26(2):15-20.
- [4] 陈宜言,王用中. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,2009.
- [5] 刘志才. 波形钢腹板组合箱梁抗剪及抗弯分析[D]. 长沙:湖南大学土木工程学院,2007.
- [6] 聂建国,李法雄. 考虑腹板剪切行为的波形钢腹板梁理论模型[J]. 中国公路学报,2011,24(6):40-48.
- [7] 李准华,董萌,崔冰. 考虑混凝土承剪和变截面效应的波纹钢腹板剪应力计算[J]. 土木工程学报,2012,45(2):85-89.
- [8] 周绪红,孔祥福,侯健,等. 波形钢腹板组合箱梁的抗剪受力性能[J]. 中国公路学报,2007,20(2):77-82.
- [9] 李立峰,刘志才,王芳. 波形钢腹板PC组合箱梁抗弯承载力的理论与试验研究[J]. 工程力学,2009,26(7):89-96.
- [10] 苏俭,刘钊. 波形钢腹板箱梁桥考虑剪切变形影响的挠度计算方法[J]. 中外公路,2010,30(3):143-147.
- [11] 苏俭,刘钊. 变截面波形钢腹板组合箱梁剪应力计算及分布规律研究[J]. 结构工程师,2010,26(6):32-36.

## Analysis of Shear Behavior and Transfer Efficiency of Variable Cross-section Composite Box Girder with Corrugated Steel Webs

WU Haipeng, LI Jie, CHEN Huai

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

**Abstract:** Based on characteristics of the variable cross-section box girder with corrugated steel webs, considering girder height and bottom plate from the force equilibrium of thickness, the elastic element, the web's shear stress formula was derived. It was shown that shear stress of variable cross-section composite box girder with corrugated steel webs was sheared by top and bottom concrete plate and corrugated steel webs. It was concluded that the variable cross-section composite box girder's shear was caused by the section's shear force, in addition, also including additional shear stress which was produced by bending moment and axial force. Through comparing of the formula solutions section and variable's formula and FEA results of constant section, it is indicated that the shear stress calculation formula has higher calculation precision. Finally, based on testing the formula, taking into account three load cases, variable cross-section box girder with corrugated steel webs shear force transfer efficiency was given.

**Key words:** variable cross-section; composite box girder; corrugated steel webs; shear stress; shear transfer efficiency

文章编号: 1671-6833(2017)02-0088-04

# 氧化铜掺杂氧化锌气敏材料的制备及气敏性能研究

宣天美<sup>1</sup>, 孙健武<sup>1</sup>, 葛美英<sup>2</sup>, 尹桂林<sup>2</sup>, 何丹农<sup>1,2</sup>

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240; 2. 纳米技术及应用国家工程研究中心, 上海 200241)

**摘 要:** 本文利用水热法制备氧化铜掺杂的碱式碳酸锌, 并经过高温得到尺寸均匀的多孔氧化铜掺杂氧化锌纳米材料. 用 XRD、SEM 等测试手段对材料的结构和形貌进行表征, 并研究了掺杂前后多孔纳米材料对硫化氢的气敏性能. 结果表明, 氧化铜掺杂可以提升材料对硫化氢气体响应的灵敏度、选择性和稳定性, 材料对  $H_2S$  的最佳响应温度降低至  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 对  $10\text{ mg/L}$  硫化氢的灵敏度可以达到 60, 对其他气体响应相对较弱, 说明材料具有非常好的选择性. 该氧化铜掺杂多孔氧化锌可适用于硫化氢气敏传感器.

**关键词:** 氧化铜掺杂; 水热法; 硫化氢; 气敏传感器; 选择性

**中图分类号:** TB383.1

**文献标志码:** A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.019

## 0 引言

硫化氢是一种广泛应用于工业的易燃酸性气体, 无色, 低浓度时有臭鸡蛋气味, 剧毒. 它对动物或人体的上呼吸道有刺激和腐蚀作用, 常被吸附在皮肤黏膜和眼结膜上, 从而产生刺激和炎症, 严重时危及生命. 目前监测硫化氢的气敏传感器主要有半导体气敏传感器、电化学气敏传感器等<sup>[1-4]</sup>. 金属氧化物半导体是最早应用于硫化氢传感器的材料之一, 其中金属氧化物  $ZnO$  对环境敏感度高, 且成本低廉, 易于加工, 制作简单, 这些优异的特性使其在气敏传感器方面得到广泛的应用, 尤其是纳米  $ZnO$ <sup>[5-7]</sup>. 然而, 氧化锌的灵敏度、选择性和稳定性难以同时满足工业使用要求, 通过掺杂可有效增加材料表面的活性点, 以提高气敏性能<sup>[8-10]</sup>. 常见的掺杂包括贵金属掺杂, 稀土元素掺杂, 金属氧化物掺杂等<sup>[11-12]</sup>. 由于贵金属元素价格昂贵且易污染环境, 所以本实验选择廉价的氧化铜作为掺杂物. 笔者用简单水热法制备出了氧化铜掺杂的多孔结构  $ZnO$ . 通过调控氧化铜的掺杂比例, 研究掺杂对材料形貌及性能的影响. 气敏结果显示实验样品提高了对硫化氢

的检测灵敏度并缩短了响应时间.

## 1 实验方案

### 1.1 试验原材料

六水合硝酸锌 ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ), 尿素 (urea), 乙酸铜 ( $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ), 去离子水, 无水乙醇, 所有试剂均购自国药且为分析纯.

### 1.2 材料的制备

氧化铜掺杂多孔氧化锌是通过水热法制备的. 首先将摩尔浓度为  $0.15\text{ M}$  的六水合硝酸锌 ( $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ ) 和  $3\text{ M}$  的尿素的混合溶液用磁力搅拌器搅拌  $30\text{ min}$  得到澄清的溶液, 将该溶液转入到高压反应釜中  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  水热反应  $13\text{ h}$ , 得到前驱体碱式碳酸锌. 在前驱体中加入一定量的乙酸铜 ( $Cu(CH_3COO)_2 \cdot H_2O$ ), 制备氧化铜掺杂的碱式碳酸锌, 烘干后将粉末  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  下退火  $2\text{ h}$ , 得到氧化铜掺杂的多孔氧化锌气敏材料.

### 1.3 材料的表征

采用场发射扫描电镜 (SEM, Hitachi S-4800, 加速电压  $25\text{ kV}$ , 配备 EDS) 对样品的表面形貌、粒径及团聚程度进行观察; X 射线衍射仪 (XRD, D/max-2600PC,  $Cu\text{ K}\alpha\lambda = 1.54\text{ \AA}$ , 管电压  $40\text{ kV}$ ,

收稿日期: 2016-05-30; 修订日期: 2016-08-19

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (50925829); 国家自然科学基金资助项目 (51078334); 上海市科技类启明基金资助项目 (16QB1402400)

作者简介: 何丹农 (1956—), 男, 上海人, 上海交通大学教授, 博导, 主要从事纳米材料研究, E-mail: hdn\_nercn@163.com.

管电流 250 mA,扫描范围  $2\theta$  为  $10^\circ \sim 80^\circ$ ).

#### 1.4 旁热式气敏元件的制备及气敏测试

本实验所用的气敏元件为旁热式气敏传感器. 将实验收集到的产物倒入玛瑙研钵,加少量无水乙醇研磨至均匀的糊状,用细毛笔将糊状样品涂敷在陶瓷管外表面,如图 1(a). 涂覆好的陶瓷管气敏按照旁热式气敏传感器的常规工艺,焊接在六角塑料底座上,并将镍铬加热丝插入陶瓷管,焊接在底座上. 最后将底座安置在老化台上保持老化电压 3.3 V ( $180^\circ\text{C}$ ),老化时间为 7 d,如图 1(b). 老化完成后进行气敏性能的测试,气敏性能测试通过静态配气法在气敏测试系统(WS-30A,郑州炜盛科技)上完成,如图 1(c).

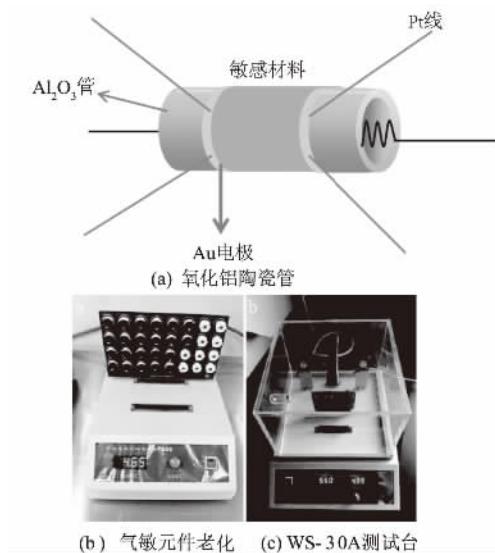


图1 气敏元件的制备及测试仪器

Fig. 1 The preparation of gas sensor and gas-testing instrument

气敏元件的灵敏度( $S$ )为:

$$S = \frac{R_g}{R_a} \quad (1)$$

式中:  $R_g$ 、 $R_a$  分别为元件在测试气体中及在空气中的电阻<sup>[8]</sup>.

气敏元件响应—恢复时间为元件在通入测试气体—空气后电阻变化达到总体电阻变化的90%所需要的时间.

## 2 分析与讨论

### 2.1 XRD 测试结果

图2为掺杂和未掺杂 ZHC 前驱体和焙烧前后的 XRD 衍射图谱. 图 2(a) 所示焙烧前样品的

XRD 图谱在  $2\theta \approx 13.0^\circ$ 、 $28.2^\circ$ 、 $32.7^\circ$  处的衍射峰与碱式碳酸锌的(200)、(020)、(021)晶面对应,化学式为  $[\text{Zn}_4(\text{CO}_3)(\text{OH})_6]$ ,简称 ZHC, JCPDS 编号为 19-1458. 乙酸铜加入前驱体后,如图 2(b) 所示. 说明加入乙酸铜对 ZHC 的生长方式有明显的影响. 图 2(c) 为 ZHC 在  $300^\circ\text{C}$  焙烧之后的 XRD 图谱,原来归属于 ZHC 的衍射峰完全消失,在  $2\theta \approx 31.8^\circ$ 、 $34.4^\circ$ 、 $36.3^\circ$  处出现了新的衍射峰,这些衍射峰依次与六方纤锌矿结构的 ZnO( JCPDS 36-1451) 的(100)、(002)、(101)晶面对应,说明在焙烧过程中 ZHC 完全转到 ZnO 的晶型. CuO 掺杂质量分数为 5% 时,样品 XRD 在  $2\theta \approx 38.7^\circ$  出现明显衍射峰,对应 CuO 的(111)衍射峰( JCPDS 05-0661),说明样品为 CuO 掺杂 ZnO. 另外,笔者发现焙烧后样品的 XRD 衍射峰非常尖锐,表明转变之后的结晶性良好.

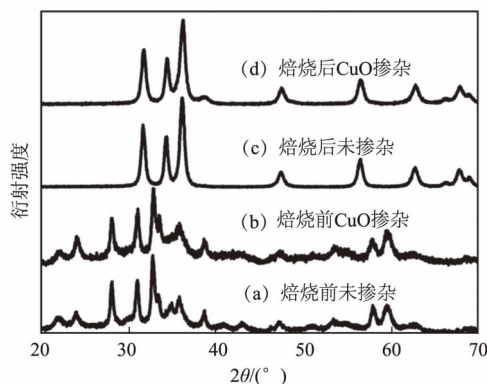


图2 样品的 XRD 衍射图谱

Fig. 2 XRD patterns

### 2.2 形貌分析

图3为试验样品的 SEM 图. 图 3(a)、3(b) 分别是未掺杂的碱式碳酸锌( ZHC) 前驱体和产物 ZnO. 由图 3(a) 可看出, 水热条件下合成的产物为交叠的纳米片, 纳米片厚度大约为  $10 \sim 13 \text{ nm}$ , 且纳米片表面光滑. 前驱体经过焙烧后仍然保持片状结构, 厚度仍然为  $10 \sim 13 \text{ nm}$ , 在纳米片的表面出现了很多坑洼和裂缝, 像很多纳米颗粒相互紧密粘连在一起. 这是由于焙烧过程中 ZHC 受热分解, 释放  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$ , 表面光滑平整的 ZHC 纳米片原位演化成了由纳米颗粒组装而成的多孔结构 ZnO 纳米片. 图 3(c) 和 3(d) 对应的是 CuO 掺杂质量百分数为 5% 的样品焙烧前后的 SEM 图. 掺杂 CuO 后的 ZHC 前驱体仍然为片状结构, 这些纳米片相互交错排列, 堆叠相连. 但是与掺杂



CuO 的 ZHC 前驱体不同的是,焙烧后纳米片形貌被破坏,形成了纳米颗粒。

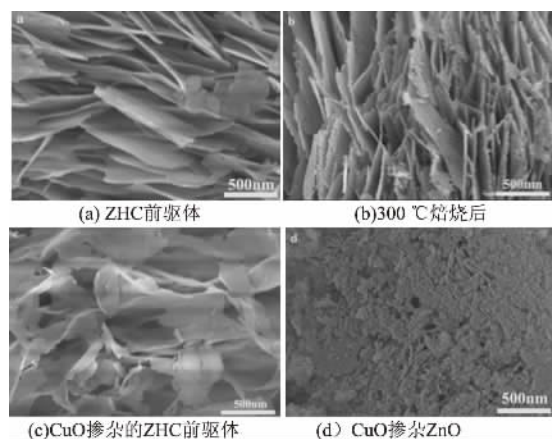


图3 样品的 SEM 图像

Fig. 3 SEM patterns of samples

### 2.3 气敏性能分析

改变陶瓷管的加热电压即可调节陶瓷管加热温度,即元器件的加热温度,图4为无掺杂和 CuO 掺杂 ZnO 在不同的工作温度下对 10 mg/L  $H_2S$  氢气的灵敏度曲线。如图4所示,样品的灵敏度随工作温度升高先增加,达到某一温度后,继续升高工作温度灵敏度降低。无掺杂 ZnO 气敏材料最佳工作温度是 210  $^{\circ}C$ , CuO 掺杂 ZnO 对应的最佳工作温度为 180  $^{\circ}C$ ,可见 CuO 掺杂后材料的最佳工作温度降低了。CuO 掺杂前后对 10 mg/L  $H_2S$  的最佳灵敏度分别为 48 和 60。从气敏结果可知, CuO 掺杂改善了 ZnO 的气敏性能。

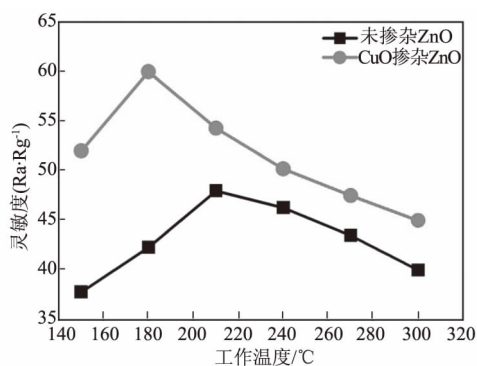


图4 无掺杂和 CuO 掺杂的 ZnO 对 10 mg/L  $H_2S$  在不同测试温度下的灵敏度

Fig. 4 Curves of gas versus sensitivity under different operating temperatures of samples

图5为 CuO 掺杂 ZnO 在 180  $^{\circ}C$  时对不同浓度的硫化氢气体的动态响应图。随着  $H_2S$  浓度增加,灵敏度逐渐增大。这种迅速的响应恢复特征归

因于该纳米片具有多孔的结构,使得气体能够很快的在该纳米片的表面弥散开来并进入下层的纳米片,从而能够与更多的吸附氧反应,提高了灵敏度。

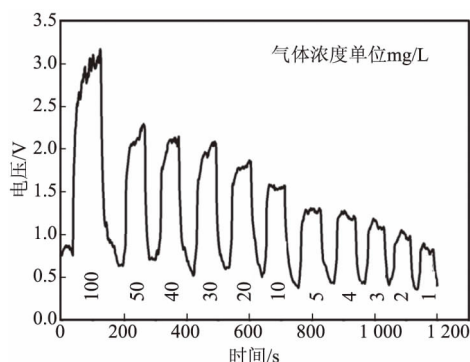


图5 CuO 掺杂的 ZnO 在 180  $^{\circ}C$  下对不同浓度的硫化氢气体的动态响应图

Fig. 5 Response and recovery of the CuO-doped ZnO gas sensor to different mg/L of  $H_2S$  under 180  $^{\circ}C$

图6为无掺杂和 CuO 掺杂的 ZnO 在 180  $^{\circ}C$  时对 10 mg/L 的乙醇、丙酮、氨水、甲醇和硫化氢的响应灵敏度。由图6可以看出, CuO 掺杂的 ZnO 对 10 mg/L  $H_2S$  的灵敏度达 60, 其次是乙醇气体, 灵敏度为 40。对其它几种气体响应相对较弱, 说明 CuO 掺杂的 ZnO 半导体气敏元件对硫化氢气体具有良好的选择性和响应性。同时, CuO 掺杂的 ZnO 较无掺杂的 ZnO 灵敏度和选择性更好, 表明掺杂可以改善材料的气敏性能。

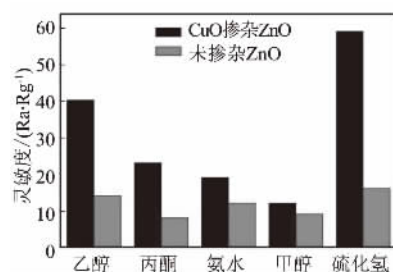


图6 无掺杂和 CuO 掺杂的 ZnO 在 180  $^{\circ}C$  下对 10 mg/L 不同气体的响应度

Fig. 6 Response of undoped and CuO-doped ZnO to different gas of 10 mg/L under 180  $^{\circ}C$

### 3 结论

本实验比较了无掺杂和 CuO 掺杂对 ZnO 气敏性能的影响, 结果表明 CuO 掺杂可降低工作温度并增加灵敏度和选择性。同时, CuO 掺杂 ZnO



气敏材料对  $\text{H}_2\text{S}$  具有非常好的选择性和灵敏度,对  $10 \text{ mg/LH}_2\text{S}$  气体的最佳灵敏度为 60. 由此可见,  $\text{CuO}$  掺杂  $\text{ZnO}$  半导体气敏材料是制备高灵敏度和快速响应的  $\text{H}_2\text{S}$  气敏器件的理想材料,具有较大的实际和商业使用价值.

### 参考文献:

- [1] 王新锋,郭二军,王丽萍,等.  $\text{ZnO}$  纳米棒的制备及其气敏性研究现状 [J]. 材料导报(纳米与新材料专辑), 2010, 24(16): 86–88.
- [2] 刘志芳,刘新红,黄亚磊,等. 纳米  $\text{ZnO}_2$  对  $\text{Al-Si}$  复合  $\text{Al}_2\text{O}_3$  材料性能组成和结构的影响 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(5): 15–19.
- [3] 胡骏,葛美英,尹桂林,等. 铜掺杂氧化锡的制备及其气敏性能研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 48–51.
- [4] 赵沙斐,潘荣凯,周思晨.  $\text{Al}_4\text{Ce}$  和  $\text{Al}_2\text{CeZn}_2$  相弹性性能的第一性原理研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(2): 104–107.
- [5] AHN M W, PARK K S, HEO J H, et al. On-chip fabrication of  $\text{ZnO}$  nanowire gas sensor with high gas sensitivity [J]. Sensors and actuators B, 2009(138): 168–173.
- [6] JUN J H, YUN J, CHO K, et al. Necked  $\text{ZnO}$  nanoparticle based  $\text{NO}_2$  sensors with high and fast response [J]. Sensors and actuators B, 2009(140): 412–417.
- [7] 刘洁,王志敏,余晓静,等. 单晶多孔  $\text{ZnO}$  纳米片的制备、表征及气敏性能研究 [J]. 无机化学学报, 2012, 28(11): 2329–2334.
- [8] LIU J Y, DAI M J, WANG T S, et al. Enhanced gas sensing properties of  $\text{SnO}_2$  hollow spheres decorated with  $\text{CeO}_2$  nanoparticles heterostructure composite Materials [J]. ACS Appl. Mater. interfaces, 2016(8): 6669–6677.
- [9] SHEWALE P S, PARIL V B, SHIN S W, et al.  $\text{H}_2\text{S}$  gas sensing properties of nanocrystalline  $\text{Cu}$ -doped  $\text{ZnO}$  thin films prepared by advanced spray pyrolysis [J]. Sensors and Actuators B, 2013(186): 226–234.
- [10] HEMMATI S, FIROOZ A A, KHODADADI A A, et al. Nanostructured  $\text{SnO}_2$ - $\text{ZnO}$  sensors: highly sensitive and selective to ethanol [J]. Sensors and actuators B: chemical, 2001(160): 1296–1303.
- [11] SU D W, FU H T, JANG X C, et al.  $\text{ZnO}$  nanocrystals with a high percentage of exposed reactive facets for enhanced gas sensing performance [J]. Sensors and actuators B: Chemical, 2013(186): 286–292.
- [12] MOHAMMAD S M, HASSAN Z, TALIB R A, et al. Fabrication of a highly flexible low-cost  $\text{H}_2$  gas sensor using  $\text{ZnO}$  nanorods grown on an ultra-thin nylon substrate [J]. J Mater Sci: Mater Electron, 2016, 27(9): 1–9.

## The Preparation of Cu-doped ZnO and Its Gas Sensing Properties

XUAN Tianmei<sup>1</sup>, SUN Jianwu<sup>1</sup>, GE Meiyang<sup>2</sup>, YIN Guilin<sup>2</sup>, HE Dannong<sup>1,2</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2 National Engineering Research Center for Nanotechnology, Shanghai 200241, China)

**Abstract:**  $\text{CuO}$  doped zinc carbonate was fabricated by hydrothermal method with zinc nitrate and urea, acetic acid copper and polyvinylpyrrolidone (PVP) as raw material. And the porous zinc oxide was obtained after calcinating. XRD, SEM were used to characterize the structure and morphology of samples. And the effects of  $\text{CuO}$ -doping on the properties of sulfide hydrogen sensitivity were studied. The results showed that  $\text{CuO}$ -doped porous zinc oxide for hydrogen sulfide had the better sensitivity, selectivity and stability. It turned out that the device showed the best response at  $180^\circ\text{C}$  and the sensitivity could reach 60 to  $10 \text{ mg/L}$  hydrogen sulfide. It had almost no response to other gases. The porous structure of copper doped zinc oxide could be used in the preparation of sulfide hydrogen sensor.

**Key words:**  $\text{CuO}$ -doped  $\text{ZnO}$ ; hydrothermal method; hydrogen sulfide; gas sensors; selectivity

# 徐州北郊煤矿区优势植物调查及重金属富集特征研究

张浩嘉<sup>1</sup>, 刘汉湖<sup>1</sup>, 肖 昕<sup>1</sup>, 孙晓菲<sup>1</sup>, 蔡成哲<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 乌鲁木齐铁路局, 新疆 库尔勒 841001)

**摘 要:** 以徐州北郊煤矿区本土植物为研究对象, 通过测定植物及土壤中的 Pb、Cu 和 Zn 3 种重金属含量, 研究优势植物对不同重金属的富集能力. 调查发现区域内共有草本植物 24 种, 分属 24 属 12 科, 其中优势植物 8 种. 结果表明, 矿区土壤中的 Pb、Cu 和 Zn 的平均含量分别为徐州市背景值的 1.56、1.10 和 2.70 倍. 其中小飞蓬 (*Erigeron annuus*) 对 Pb、Cu 和 Zn 的转运系数分别为 1.01、1.42 和 1.12; 野艾蒿 (*Artemisia lavandulaefolia*) 中 Zn 的含量超出正常范围, 高达 164.16 mg/kg, 且对 Zn 的转移和富集系数分别达到 2.08 和 1.13. 两种植物均具有一定的重金属富集潜力, 可考虑作为本土煤矿区生态修复的修复植物.

**关键词:** 重金属; 优势植物; 富集系数; 转运系数

**中图分类号:** X53 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.020

## 0 引言

中国经济几十年来的持续快速增长, 工业扩张、城市化和采矿作业的速度和规模惊人, 这给人均耕地面积不足世界平均水平 40% 的中国带来了巨大的农业负担<sup>[1]</sup>. 其中矿业用地侵占了大约 40 000 km<sup>2</sup> 的土地, 并且还在以每年 330 km<sup>2</sup> 的速度增长, 对所在区域及周边的耕作土壤产生持久性的重金属污染<sup>[2]</sup>. 这种影响可能会造成严重的生态危机, 引发人类的健康风险. 因此, 迫切需要一种经济有效的技术用于修复矿山尾矿, 这些问题已经引起了公众的广泛关注<sup>[3]</sup>.

化学法与物理法可以修复受重金属污染的土壤, 但成本过于昂贵, 且会对土壤的理化性质造成不可逆的影响. 植物修复作为一种经济环保的技术, 迅速成为世界各国在环境修复领域的研究热点<sup>[4]</sup>, 截至目前全世界大约发现了 400 种超富集植物<sup>[5]</sup>. 植物修复应首先考虑本土物种作为修复植物, 不仅因为其可以更好地适应当地环境, 同时可以避免引进潜在的外来入侵物种, 降低区域植物多样性. 本研究对徐州北郊煤矿区周边的植被和土壤进行采样调查, 分析植物对重金属 Pb、Cu 和 Zn 的吸收与富集能力, 以期发现适用于徐州本土的超累积植物或耐性植物, 并对其净化土壤的潜力作初步探讨.

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区概况

徐州市北郊煤矿区位于徐州市西北部, 北纬 34°20′, 东经 117°06′, 属暖温带季风气候, 年平均气温 14.2 °C, 年平均降水量 834.7 mm<sup>[6]</sup>. 研究区域内有庞庄矿、张小楼矿、夹河矿和王庄矿等若干个煤矿, 还有包括徐州地区最大电厂在内的大小数十个火电厂. 区域内近三分之二的面积为农田土壤, 主要种植水稻和小麦, 是徐州市矿业、火电、建材、冶金等多种行业的工业基地和重要的粮食种植区<sup>[7]</sup>.

### 1.2 野外调查与采样

根据煤矿区污染源的分布情况, 采用蛇形布点法由矿区东南侧向北向西一圈设置 8 个 10 m × 10 m 的样方, 采集当中的草本植物样本与土壤样本, 并记录样方内的优势植物<sup>[8]</sup>. 植物采集全株, 每个样本采集 3 个重复. 土壤样本为附着在根系上的 0 ~ 15 cm 表层土壤, 约 400 g 混合土壤为 1 个样品<sup>[9]</sup>.

### 1.3 样品处理

土壤样品先除杂、风干、捣碎、四分法弃取, 然后用研钵磨成粉末, 过 0.149 mm 孔径的尼龙筛后装入自封袋中密封保存<sup>[10]</sup>. 植物样品用去离子水洗净, 分为地上部分和地下部分, 放入烘箱在

收稿日期: 2016-04-16; 修订日期: 2016-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374208)

通讯作者: 肖昕(1972—), 女, 湖南人, 中国矿业大学副教授, 博士, 主要从事土壤环境化学、环境影响评价、环境分析、水处理等研究, E-mail: passerxx@163.com.

105 ℃下杀青 30 min,再于 80 ℃下烘干至恒重,然后用不锈钢植物粉碎机粉碎之后装入自封袋密封保存<sup>[11]</sup>. 土壤样品采用盐酸:硝酸:氢氟酸:高氯酸为3 mL:1 mL:3 mL:1 mL 的比例进行消解,植物样品采用硝酸:高氯酸为1 mL:1 mL 的方法消解<sup>[12]</sup>.

#### 1.4 样品测定与分析

消解后的植物、土壤样品采用 ICP - OES 测定 Pb、Cu 和 Zn 3 种重金属元素的含量. 为保证数据可信度,全程采用土壤国标 GSS - 13 和植物国标 GSB - 24 作为质控样. 实验数据用 SPSS 进行相关分析(CA)<sup>[13]</sup>,并计算相应的富集系数与转移系数<sup>[14]</sup>:富集系数 = 植物地上部分重金属含量/土壤中同种重金属含量;转移系数 = 植物地上部分重金属含量/植物地下部分同种重金属含量.

## 2 结果与讨论

### 2.1 植物科属组成

经调查在样方所在区域内共有草本植物 24

种,分属 24 属,12 科. 其中菊科 8 种(占 33.3%);十字花科 3 种(占 12.5%);禾本科 3 种(占 12.5%);豆科 2 种(占 8.3%),锦葵科、玄参科、茜草科、唇形科、牻牛儿苗科、蓼科、酢浆草科、桑科各 1 种,分别占 4.2%. 徐州北郊煤矿区优势草本植物种类介绍见表 1.

由表 1 提供的信息,选择样方内出现频度较高且多度较大的优势草本植物 8 种:蜀葵(*Alcea rosea linnaeus*)、苦苣(*Cichorium endivia L*)、荔枝草(*Saluiaplebeia R.Br*)、泥胡菜(*Hemisteptalyra-ta*)、酸模(*RumexacetosaLinn*)、野艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、小飞蓬(*Erigeron annuus*)、刺儿菜(*Cirsium setosum*)等. 其中菊科 5 种,占62.5%,由于菊科植物具有耐旱、耐贫瘠的特点,因此在徐州北郊的植物群落中占有明显优势,具有更强的适应环境的能力.

表 1 徐州北郊煤矿区优势草本植物种类介绍

Tab.1 The advantage herb species introduced of mining area in northern suburb of Xuzhou

种名	拉丁名	科名	属名	多度
蜀葵	<i>Alcea rosea Linnaeus</i>	锦葵科	蜀葵属	甚多
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科	蒲公英属	很多
苦苣	<i>Cichorium endivia L</i>	菊科	苦苣属	甚多
狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	禾本科	狗尾草属	很多
白车轴草	<i>Trifolium repens L</i>	豆科	车轴草属	多
荔枝草	<i>Saluiaplebeia R. Br</i>	唇形科	鼠尾草属	甚多
葎草	<i>Humulus japonicus</i>	桑科	葎草属	少而个别
婆婆纳	<i>Veronica polita Fries</i>	玄参科	婆婆纳属	很多
泥胡菜	<i>Hemisteptia lyrata Bunge</i>	菊科	泥胡菜属	甚多
荠菜	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	十字花科	荠属	尚多
野豌豆	<i>Vicia sepium Linn</i>	豆科	野豌豆属	中等
钻叶紫菀	<i>Aster subulatus Michx</i>	菊科	联毛紫菀属	中等
酸模	<i>Rumex acetosa L</i>	蓼科	酸模属	甚多
山酢浆草	<i>Oxalis acetosella</i>	酢浆草科	酢浆草属	很多
猪殃殃	<i>Galium spurium L</i>	茜草科	拉拉藤属	多
野艾蒿	<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	菊科	蒿属	甚多
芸苔	<i>Brassica rapa L</i>	十字花科	芸苔属	单株
燕麦	<i>Avena sativa L</i>	禾本科	燕麦属	尚多
小飞蓬	<i>Erigeron annuus</i>	菊科	飞蓬属	甚多
艾草	<i>Artemisia argyi</i>	禾本科	蒿属	少而个别
刺儿菜	<i>Cirsium setosum</i>	菊科	蓟属	甚多
野老鹳草	<i>Geranium carolinianum L</i>	牻牛儿苗科	老鹳草属	多
芦苇	<i>Phragmites australis</i>	禾本科	芦苇属	中等
播娘蒿	<i>Descurainia sophia L</i>	十字花科	播娘蒿属	很多

### 2.2 煤矿区土壤重金属元素污染状况

对于土壤是否受到了重金属的污染,一般有以下几种判定方法:①土壤中重金属的含量高于

当地土壤背景值的上限值,则判定为土壤受到了重金属污染;②土壤中重金属对水体、大气、生物甚至人体的健康产生了危害,即称为土壤重金属

污染;③土壤中重金属的含量高于土壤环境质量标准(GB15618—1995)二级标准上限值,称为土壤重金属污染<sup>[15]</sup>.笔者选用上述第一种观点进行分析评价.

徐州北郊煤矿区土壤的重金属元素含量(表2)表明,不同重金属的平均含量由高到低依次是Zn( $105.22 \pm 23.5$  mg/kg),Cu( $34.91 \pm 10.81$  mg/kg)和Pb( $25.52 \pm 5.21$  mg/kg),分别为徐州市背景值<sup>[16]</sup>的1.56、1.10和2.70倍.可见北郊土壤受到一定程度重金属Pb、Zn、Cd的污染.

表2 矿区土壤重金属含量的描述性统计分析

Tab.2 Descriptive statistical analysis of heavy metals in soil in the mining area		mg/kg		
		Pb	Cu	Zn
统计值				
最大值		32.73	49.91	145.87
最小值		19.11	22.85	75.97
平均值		25.52	34.91	105.22
徐州土壤背景值		16.30	12.61	91.10
中国土壤背景值		26	22.6	74.2
国家二级标准值(中性)		300	100	250

### 2.3 优势植物各部位重金属含量

常规植物体内对不同重金属的富集量为: Pb 0.1~41.7 mg/kg; Cu 0.4~45.8 mg/kg; Zn 11~160 mg/kg<sup>[17]</sup>.对8种优势植物体内的Cu、Pb、Zn的含量进行的测定,如表3所示.结果表明8种植物中,仅野艾蒿一种植物地上部分Zn的含量超出正常范围,其他植物体内重金属均在正常范围.且各部分的含量大小关系是:土壤>地下>地上,符合常规植物性质.通过SPSS做植物体内与土壤中重金属含量相关性分析发现,Zn在植物地上部分的含量与所处土壤中的重金属含量之间存在较显著的正相关性,Pb与Cu在植物体内和土壤含量之间均无相关性,与徐华伟<sup>[18]</sup>、王显炜<sup>[19]</sup>及王彬<sup>[20]</sup>得出结论不一致,与张丽<sup>[21]</sup>的结果相似.植物吸收的重金属大部分分布在地上部分,通常情况下,植物的转移系数(TF)仅为0.1左右<sup>[22]</sup>,而在本次研究中,所有8种植物的TF均大于0.1,推测该地区土壤并非植物体内重金属的唯一来源.考虑到研究区域空气中颗粒物污染较严重,不排除一部分重金属是以大气中含重金属的微尘通过植物叶片的方式进入植物体内.

### 2.4 植物对重金属元素的富集特征

富集特征主要指标有转移系数和富集系数,相同地区不同植物对重金属的富集能力有较大的差异,即使是同种植物,其不同部位的表现也不

同,基本都是地下部分高于地上部分<sup>[23]</sup>.

转移系数(transfer factor, TF)指植物地上部分与地下部分某种重金属含量的比值,用来衡量植物对某种重金属的运输迁移能力<sup>[24]</sup>.当TF大于1时,说明植物能够大量吸收某种重金属并将其从地下部分转移到地上部分,故可以在后续过程中通过不断收割地上部分到专门的地方进行处理后达到对受污染地区土壤的生态修复.从表3可知:荔枝草和小飞蓬两种植物对Pb的转移系数大于1,分别为1.73和1.01;小飞蓬对Cu的转移系数大于1,达到1.42;苦苣、野艾蒿和小飞蓬对Zn的转移系数也都大于1,分别为2.08和1.42.故在受到一定程度重金属污染的矿区小飞蓬和野艾蒿两种植物具有一定的修复潜力.

富集系数(bioaccumulation factor, BCF)指植物地上部分与土壤中相应重金属含量的比值,用来衡量其地上部分对土壤中重金属的吸收与累积能力<sup>[24]</sup>.当BCF大于1时说明植物地上部分重金属含量大于其所生长的土壤环境的含量<sup>[25]</sup>,具有作为重金属污染土壤的植物修复物种的潜力.从表3可知仅野艾蒿一种植物对Zn的富集系数与转移系数均大于1,达到1.13,说明野艾蒿Zn具有较强的富集与转移能力,可用于受到一定程度Zn污染的土壤的植物修复.

## 3 结论

(1)通过对徐州北郊矿区的调查,确定了样方区域内的24种草本植物,分属24个属,12个科.其中菊科8种(占33.3%);十字花科3种(占12.5%);禾本科3种(占12.5%).采集其中的8种优势植物作为研究对象,其中以菊科植物为主,菊科植物有5种占62.5%.

(2)徐州北郊矿区土壤的重金属元素Pb、Cu和Zn的平均含量由高到低依次是Zn( $105.22 \pm 23.5$  mg/kg),Cu( $34.91 \pm 10.81$  mg/kg)和Pb( $25.52 \pm 5.21$  mg/kg).分别为徐州市背景值的1.56、1.10和2.70倍,受到一定程度的污染.

(3)在8种优势植物中,小飞蓬对Pb、Cu和Zn的转移系数分别达到1.01、1.42和1.12,具有较强的将土壤中重金属转移到地上部分的潜力;野艾蒿地上部分Zn含量超出正常水平的上限,达到164.16 mg/kg,且转移系数和富集系数分别达到2.08和1.13,对Zn具有较强的转移与富集潜力,可考虑作为本地区生态修复的物种.

表3 矿区优势植物和土壤中重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )及富集系数和转移系数Tab.3 Mining area dominant plants and soil heavy metal content( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) and enrichment factor and transfer coefficient

植物	部位	Pb			Cu			Zn		
		含量	BCF	TF	含量	BCF	TF	含量	BCF	TF
蜀葵	地上	0.75			10.54			29.76		
	地下	2.34	0.03	0.32	22.23	0.37	0.47	44.26	0.36	0.67
	土壤	23.77			28.15			83.10		
苦苣	地上	0.63			20.75			41.97		
	地下	3.66	0.03	0.17	24.50	0.90	0.85	31.84	0.55	1.32
	土壤	19.11			22.99			75.97		
荔枝草	地上	2.06			12.14			50.95		
	地下	1.19	0.06	1.73	13.90	0.33	0.87	51.65	0.42	0.99
	土壤	32.05			36.44			121.24		
泥胡	地上	1.47			14.39			54.48		
	地下	3.38	0.05	0.43	19.36	0.47	0.74	70.75	0.47	0.77
	土壤	31.26			30.30			116.50		
酸模	地上	1.74			8.46			28.60		
	地下	3.92	0.07	0.44	32.84	0.37	0.26	53.32	0.34	0.54
	土壤	24.83			22.85			84.29		
野艾蒿	地上	3.04			13.54			164.16		
	地下	4.10	0.09	0.74	19.01	0.35	0.71	78.88	1.13	2.08
	土壤	32.73			38.87			145.87		
小飞蓬	地上	1.92			18.64			50.92		
	地下	1.90	0.06	1.01	13.10	0.37	1.42	45.37	0.49	1.12
	土壤	31.85			49.91			103.08		
刺儿菜	地上	1.00			15.13			32.02		
	地下	3.14	0.03	0.32	34.25	0.30	0.44	37.69	0.29	0.87
	土壤	32.58			49.76			111.71		

## 参考文献:

- [1] LI M S, LUO Y P, SU Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China [J]. Environmental pollution, 2007, 147(1): 168-75.
- [2] LI Y G, JIANG G M. Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: an over review [J]. Acta ecologica sinica, 2004, 24: 95-100.
- [3] ZHANG S, LI T, HUANG H, et al. Cd accumulation and phytostabilization potential of dominant plants surrounding mining tailings [J]. Environmental science & pollution research, 2012, 19(9): 3879-88.
- [4] MARRUGO N J, DURANGO H J, PINEDO H J, et al. Phytoremediation of mercury contaminated soils by *Jatropha curcas* [J]. Chemosphere, 2015, 127: 58-63.
- [5] 李坤陶. 植物修复技术在污染治理中的应用现状与展望 [J]. 郑州大学学报(理学版), 2006, 38(3): 95-98.
- [6] 李保杰, 于法展, 纪亚洲. 徐州市九里矿区土壤重金属插值分析及污染评价 [J]. 测绘科学, 2010, 35(6): 166-169.
- [7] 张满满, 肖昕, 谭敏. 徐州北郊土壤重金属污染评价研究 [J]. 北方园艺, 2013(6): 177-179.
- [8] 邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等. 黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征 [J]. 生态学报, 2012, 32(3): 796-804.
- [9] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 [J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3595-3600.
- [10] 中华人民共和国农业部. NY/T 1121.1-2006 土壤检测 第1部分: 土壤样品的采集、处理和贮存 [S]. 2006.
- [11] 毕德, 吴龙华, 骆永明, 等. 浙江典型铅锌矿废弃地优势植物调查及其重金属含量研究 [J]. 土壤, 2006, 38(5): 591-597.
- [12] 袁永强, 刘丛强. 广西某地金属冶炼废水外溢对农田土壤的污染特征 [J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3312-3317.
- [13] 朱佳文. 湘西花垣铅锌矿区重金属污染土壤生态修复研究 [D]. 湖南农业大学生物科学技术学院, 2012.



- [14] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR N P, et al. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. *Bio/technology*, 1995, 13(5): 468 – 74.
- [15] 耿慧. 张宣葡萄产区土壤铜、锌分布特征及与葡萄品质的关系 [D]. 河北农业大学资源与环境科学学院, 2011.
- [16] 李保杰, 顾和和, 于法展, 等. 徐州市区土壤重金属空间分布研究 [J]. *测绘科学*, 2011, 36(5): 82 – 84.
- [17] 刘月莉, 伍钧, 唐亚, 等. 四川甘洛铅锌矿区优势植物的重金属含量 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2020 – 2026.
- [18] 徐华伟, 张仁陟, 谢永. 铅锌矿区先锋植物野艾蒿对重金属的吸收与富集特征 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(6): 1136 – 1141.
- [19] 王显炜. 金矿区农田土壤重金属污染与农作物关系探讨 [D]. 西安: 长安大学地球科学与资源学院, 2010.
- [20] 王彬. 重金属 Cd、Zn、Cu、Pb 污染下土壤生物效应及机理 [D]. 重庆: 西南大学资源环境学院, 2008.
- [21] 张丽, 彭重华, 王莹雪, 等. 14 种植物对土壤重金属的分布、富集及转运特性 [J]. *草业科学*, 2014, 31(5): 833 – 838.
- [22] 殷捷, 周竹渝. 超积累植物的研究进展 [J]. *重庆环境科学*, 2003, 25(11): 150 – 152.
- [23] PENCE N S, LARSEN P B, EBBS S D, et al. The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn/Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2000, 97(9): 4956 – 4960.
- [24] 崔爽, 周启星, 晁雷. 某冶炼厂周围 8 种植物对重金属的吸收与富集作用 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 512 – 515.
- [25] 崔龙鹏, 白建峰, 史永江等. 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究 [J]. *土壤学报*, 2004, 41(6): 896 – 904.

## Study on Dominant Plants and Enrichment Characteristics of Heavy Metal from a Coal Mine Area in Northern Xuzhou

ZHANG Haojia<sup>1</sup>, LIU Hanhu<sup>1</sup>, XIAO Xin<sup>1</sup>, SUN Xiaofei<sup>1</sup>, CAI Chengzhe<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Surveying, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116;

2. Urumqi Railway Administration, Korla 841001)

**Abstract:** In this paper, the contents of Pb, Cu and Zn in the plants and soil from a coal mine area in northern Xuzhou were examined, to study the enrichment ability of the dominant plants for different heavy metals. 24 species (24 genera, 12 families) of herbaceous plants in the region were found, including the 8 dominant plants. The results indicated that the average contents of Pb, Cu and Zn in the soil were 1.56, 1.10 and 2.70 times to the background values of Xuzhou, and the content of Pb was positively correlated with Cu and Zn ( $P < 0.01$ ). The transfer coefficient of *Erigeron annuus* was more than 1.00, being 1.01 for Pb, being 1.42 for Cu and being 1.12 for Zn. The content of Zn in *Artemisia lavandulaefolia* was higher than the normal range, which reached 164.16 mg/kg. even, the plant's transfer coefficient and enrichment factor of Zn were 2.08 and 1.13. This two plants had the ability to enrichment the heavy metal, which can be used as a remediation for the ecological restoration of the local coal mine area.

**Key words:** heavy metal; dominant plant; enrichment factor; transfer coefficient