



ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N  
CODEN HDZIEF

# 华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY  
(NATURAL SCIENCE)

第 37 卷 第 5 期  
Vol. 37 No. 5

## 2016

中国·泉州·厦门  
CHINA·QUANZHOU·XIAMEN



公众微信号 网站二维码



《 华 侨 大 学 学 报 ( 自 然 科 学 版 ) 》  
第 六 届 编 辑 委 员 会

The Sixth Editorial Committee of  
Journal of Huaqiao University ( Natural Science )

主 编 (Editor in Chief)

乌东峰 (WU Dongfeng)

副主编 (Associate Editor in Chief)

陈国华 (CHEN Guohua)      黄仲一 (HUANG Zhongyi)

编 委 (Members) (按姓氏笔划为序)

王加贤 (WANG Jiaxian)	王全义 (WANG Quanyi)
方柏山 (FANG Baishan)	刘  堪 (LIU Gong)
江开勇 (JIANG Kaiyong)	张认成 (ZHANG Rencheng)
吴季怀 (WU Jihuai)	吴逢铁 (WU Fengtie)
陈锻生 (CHEN Duansheng)	周克民 (ZHOU Kemin)
胡日东 (HU Ridong)	高轩能 (GAO Xuanneng)
黄心中 (HUANG Xinzhong)	童  昕 (TONG Xin)
蔡灿辉 (CAI Canhui)	

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

### 目次

应用单元体参数的航空发动机性能预警方法 .....	黄燕晓, 郝红勋, 郭家琛 (527)
新颖波纹截面薄壁圆管的耐撞性 .....	葛平政, 张勇 (531)
内置式永磁电机齿槽转矩的优化设计 .....	黄燕涛, 郭新华, 项雷军 (536)
材料本构模型参数对二维直角切削仿真的影响 .....	廖通凯, 程鑫, 查旭明, 姜峰 (541)
单自由度冲压机构优化设计及其运动仿真 .....	安淑女, 王洪欣 (547)
地震波输入角度对钢网格盒式束筒结构响应的影响 .....	杨志勇, 马克俭, 孙敬明 (552)
轨道交通项目安全事故发生趋势和诱因分析 .....	许娜 (558)
三阶段 DEA 的区域建筑业碳排放效率评价 .....	陈钢, 祁神军, 张云波, 刘兵 (564)
滑移对部分充填式钢箱-砼组合梁承载力的影响 .....	班志鹏, 江雪, 郑艳, 胥海宁 (570)
开洞节能砌块隐形密框复合墙体恢复力模型 .....	黄端权, 李升才 (576)
采用 PLC 和 HMI 的单巷道立体车库控制系统设计 .....	颜玉玲, 张信禹, 黄余, 龚建平 (583)
超荷载条件下合成型水泥混合料拌堤坝弹性恢复机制 .....	王侠, 孙文君 (587)

采用多因素模糊矩阵算法的数值模拟与工程风险仿真诊断	矫立超 (591)
响应面法优化酶法提取马鲛鱼油	黄惠莉, 童记强, 汪泳, 马赫 (595)
采用微藻实验系统的入侵机制假说整合	李伟, 王秋华, 何淑婧 (601)
剧烈有氧运动对内脏的伤害分析	智虹霓 (606)
液压挖掘机的两级平滑挖掘规划方法	邵辉, 叶贤成, 孙祥云 (610)
光镊理论模型研究进展	王娟, 任洪亮, 周业鹏 (615)
三相组合互感器误差校验中的影响量分析	丁稳房, 金晓明, 陈铭明, 孙军, 陈江洪, 徐灿 (622)
采用 GPU 的提升纹理缓存命中光线投射方法	杜松江, 张思超 (627)
ASP.NET 的 SQL 注入攻击及防御	张学义, 钟志宏 (633)
电信客户流失的组合预测模型	余路 (637)
ARM TrustZone 的轻量级嵌入式虚拟化架构	王亮 (641)
大型电站分散控制系统人机界面的设计与实现	蒋满群, 高炜 (645)
采用时空重排扫描统计量的犯罪集聚可视分析	张永田, 吴升 (649)
采用多目标差分进化的移动 Ad Hoc 网络节能路由算法	魏文红, 秦勇 (654)

CONTENTS

Research on Aero-Engine Performance Early Alerting Method Using Module Parameters  
..... HUANG Yanxiao, HAO Hongxun, GUO Jiachen (527)

Crashworthiness of Novel Thin-Walled Circular Tube With Novel Corrugated Cross  
Section  
..... GE Pingzheng, ZHANG Yong (531)

Optimal Design of Cogging Torque of Interior Permanent Magnet Motor  
..... HUANG Yantao, GUO Xinhua, XIANG Leijun (536)

Influence of Material Constitutive Model Parameters on 2D Orthogonal Cutting  
Simulation  
..... LIAO Tongkai, CHENG Xin, ZHA Xuming, JIANG Feng (541)

Optimization Design and Motion Simulation for Single Degree of Freedom Stamping  
Mechanism  
..... AN Shu'nyu, WANG Hongxin (547)

Effects of Seismic Wave Input Angle on Response of Steel Grid Cassette Bundled  
Tube Structure  
..... YANG Zhiyong, MA Kejian, SUN Jingming (552)

Analysis of Occurrence Tendency and Cause of Safety Accidents in Urban Rail Transit  
Project  
..... XU Na (558)

Study of Carbon Emission Efficiency of Construction Industry Based on Three-Stage Data  
Envelope Analysis Model  
..... CHEN Gang, QI Shenjun, ZHANG Yunbo, LIU Bing (564)

Effects of Slip on Flexural Capacity of Partially Filled Steel Box Composite Beam  
..... BAN Zhipeng, JIANG Xue, ZHENG Yan, XU Haining (570)

Restoring Force Model of Energy-Saving Block Masonry Composite Walls With Holes  
and Hidden Frame  
..... HUANG Duanquan, LI Shengcai (576)

Control System Design of Single Aisle Dimensional Garage Based on PLC and HMI  
..... YAN Yuling, ZHANG Xinyu, HUANG Yu, GONG Jianping (583)

Elastic Recovery Mechanism of Synthetic Cement Mixture Mixed Dam under Over  
Load  
..... WANG Xia, SUN Wenjun (587)

Numerical Simulation and Engineering Risk Simulation Diagnosis Using Multi-Factor Fuzzy Matrix Algorithm	JIAO Lichao (591)
Optimization of Enzymatic Extraction Conditions of Spanish Mackerel Oil by Response Surface Methodology	HUANG Huili, TONG Jiqiang, WANG Yong, MA He (595)
Empiricism on Several Integrated Resource-Based Invasion Hypotheses Using Algal Microcosms	LI Wei, WANG Qiuhua, HE Shuqiang (601)
Visceral Damage Analysis of Intense Aerobic Exercise	ZHI Hongni (606)
Research on Two-Level Planning Method of Smoothly Excavating for Hydraulic Excavator	SHAO Hui, YE Xiancheng, SUN Xiangyun (610)
Research Progress on Theoretical Model of Optical Tweezers	WANG Juan, REN Hongliang, ZHOU Yepeng (615)
Analysis of Influence Quantity in Error Detection of Three-Phase Combined Transformer	DING Wenfang, JIN Xiaoming, CHEN Mingming, SUN Jun, CHEN Jianghong, XU Can (622)
Improving Texture Cache-Hit Rate of GPU-Based Ray Casting	DU Songjiang, ZHANG Sichao (627)
SQL Injection Attacks and Defense Based on ASP.NET	ZHANG Xueyi, ZHONG Zhihong (633)
Combination Forecasting Model of Customer Churns in Telecom Industry	YU Lu (637)
Towards Lightweight Embedded Virtualization Architecture Exploiting ARM TrustZone	WANG Liang (641)
Design and Application of Man-Machine Interface for Distributed Control System of Power Plant	JIANG Manqun, GAO Wei (645)
Visual Analysis of Crime Clusters Based on Space-Time Permutation Scan Statistic	ZHANG Yongtian, WU Sheng (649)
Energy Efficient Routing Optimization Algorithm for MANET Based Multi-Objective Differential Evolution	WEI Wenhong, QIN Yong (654)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605001



# 应用单元体参数的航空发动机性能预警方法

黄燕晓<sup>1</sup>, 郝红勋<sup>2</sup>, 郭家琛<sup>3</sup>

- (1. 中国民航大学 通用航空学院, 天津 300300;
2. 中国民航大学 飞行技术学院, 天津 300300;
3. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 基于安全关口前移的性能预警要求, 提出以单元体参数的航空发动机性能预警方法, 提取发动机原理分析性能参数相关的可测参数与参数组合, 以发动机机队为研究对象, 运用数据指标的  $\sigma$  准则构建性能指数动态阈值模型. 以 PW4077D 型机队 5 台发动机 1 440~1 980 循环数据验证模型, 并与主成分性能阈值模型比较. 结果表明: 构建的模型计算结果与主成分模型结果一致, 即性能动态阈值随循环数增加而复杂下降, 在 1 500, 1 560 和 1 840 等循环附近阈值有所恢复.

**关键词:** 航空发动机; 单元体参数; 预警方法; 动态阈值;  $\sigma$  准则

中图分类号: V 239 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2016)05-0527-04

## Research on Aero-Engine Performance Early Alerting Method Using Module Parameters

HUANG Yanxiao<sup>1</sup>, HAO Hongxun<sup>2</sup>, GUO Jiachen<sup>2</sup>

- (1. College of General Aviation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. College of Flight Technology, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
3. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To satisfy the requirements caused by the pre crossing safety for aero-engine performance early alerting, the paper put forward to take out the measurable parameters and their combinations related to the performance parameters by engine operating principle with aero-engine performance early alerting method based on module parameters. With the engine fleet as the research objects, then proposed performance index dynamic threshold model using the statistical criteria with the fleet as the research objects. The performance data of 5 engines with 1 440-1 980 cycles in PW4077D fleet were imputed into the model to verify the performance index dynamic threshold model. Then the paper compared the results generated by combining the fixed weighted value and the statistical criteria with that generated by the PCA method. The comparison showed that the results of two methods were in agreement with each other, i. e., when the performance index dynamic threshold values decrease complexly as the cycle number within the 1 440-1 980 cycles increases, and the threshold values of the 1 500, 1 560 and 1 840 cycles in their neighborhood had recovered somewhat.

**Keywords:** aero-engine; module parameters; alerting method; dynamic threshold;  $\sigma$  criteria

收稿日期: 2016-07-23

通信作者: 黄燕晓(1980-), 男, 讲师, 博士, 主要从事飞机发动机健康管理技术的研究. E-mail: oldsea0592@163.com.

基金项目: 国家安全生产监督管理局安全生产重大事故防治关键技术科技项目(tianjin-0001-2015AQ)

民航干线飞机装配的涡轮风扇发动机,具有推力大、耗油率低特点,因长期工作在高速、高压和高温等恶劣环境下<sup>[1-3]</sup>,容易引起性能衰退或突变,带来安全隐患.因此,航空发动机性能需要可靠监控预警<sup>[4-5]</sup>.传统的监控预警方法常以气路参数或振动参数构建性能超限或趋势模型,预测突发故障或分析性能衰退趋势等<sup>[5-6]</sup>.然而,以气路或振动参数而不是单元体参数进行性能监控预警,将使单元体结构设计优势无法充分应用,也不能将发动机安全关口前移至单元体层面<sup>[7]</sup>,采用经验确定的静态阈值不能满足性能精确监控预警要求.从单元体层面构建性能参数边界或阈值建立性能预警监控模型,国内外学者都做了相关工作<sup>[1,8,9]</sup>.这些研究工作更注重以经验监控发动机瞬态性能,判断精度不高且没有预警能力.鉴于此,本文提出单元体参数表征发动机性能的预警方法.

## 1 单元体及表征参数

民航飞机装配的涡轮风扇发动机均是以单元体结构设计为原则,常用机型为PW4077D发动机<sup>[10]</sup>.目前,使用机型为GE90系列发动机,文中以二者为例进行比较分析.PW4077D发动机有风扇、核心机、低压涡轮和附件传动装置4个核心单元体,以13个占位表示着不同的发动机位置,为使表述简洁,不计各占位的小数点,如12.5占位以125表述.航空发动机单元体性能参数与可测参数,如表1所示.

表1 航空发动机单元体性能参数与可测参数

Tab. 1 Aero-engine module performance parameters and measurable parameters

发动机机型	PW4077D	GE90
性能参数	$\pi_{c,l}^* \pi_{c,h}^* \eta_{c,l} \eta_{c,h} N_1 N_2 \pi_{t,l}^* \pi_{t,h}^* \eta_{t,l} \eta_{t,h}$	$\pi_{c,l}^* \pi_{c,h}^* \eta_{c,l} \eta_{c,h} N_1 N_2 \pi_{t,l}^* \pi_{t,h}^* \eta_{t,l} \eta_{t,h}$
可测参数	$N_1 N_2 p_1^* p_2^* p_{25}^* p_3^* p_{495}^* T_2^* T_{25}^* T_3^* T_{495}^* (\text{EPR})$	$N_1 N_2 T_{25}^* T_{49}^* T_{25}^* T_3^* T_{49}^* (\text{EGT})$
可测参数组合	$N_1-N_2 p_3^*/p_2^* (\text{EPR}) p_3^*/p_{495}^* p_{25}^* p_2^* p_{25}^* p_2^*$	$N_1-N_2 p_3^*/p_{49}^* T_{25}^* T_2^*$
选取单元体参数	$T_{459}^* (\text{EGT}) T_{25}^*/T_2^* p_{25}^*/p_2^* N_1 N_2 N_1-N_2 p_3^*/p_{495}^*$	$T_{49}^* (\text{EGT}) T_{25}^*/T_2^* N_1 N_2 N_1-N_2 p_3^*/p_{459}^*$

表1中:可测参数或参数组合用于表征PW4077D和GE90发动机性能; $T_{495}^*$ 或 $T_{49}^*$ 为发动机排气温度的(exhaust gas temperature, EGT),其作为整机气路参数,也因传感器的安装位置,而作为低压涡轮单元体参数; $T_{25}^*/T_2^*$ ,  $p_{25}^*/p_2^*$ 或 $T_{25}^*/T_{12}^*$ 为低压压气机单元体参数; $N_1$ 和 $N_2$ 为低压压气机单元体和核心机单元体参数,也看作整机气路参数; $N_1-N_2$ 为表征性能的可测参数组合;可测参数组合 $p_3^*/p_{495}^*$ 和 $p_3^*/p_{49}^*$ 为两种机型的落压比,即涡轮单元体的可测参数组合.

由表1可知:由于两种机型占位划分与表达存在差异,传感器实际位置是相同的,故选取的可测参数及参数组合能够统一;由于安装的传感器位置与类型不同,两种机型选取的性能可测参数及参数组合也存在不同;PW4077D机型的可测参数及参数组合是包含GE90机型的参数,后者由于在12占位安装没有安装总压传感器而使 $p_{25}^*/p_{12}^*$ 参数不可测.由于PW4077D发动机作为传统机型具有广泛应用且性能数据量大,故选取PW4077D机型的单元体参数及参数组合等进行发动机性能预警研究.

## 2 航空发动机性能预警方法

### 2.1 发动机性能单元体参数权值计算方法

选取某型机队发动机的 $n$ 个单元体参数的 $m$ 台发动机性能数据组成性能矩阵 $\mathbf{X} = \{(x_{i,j})_{m \times n}\}$ ,其中, $x_{i,j}$ 表示第 $i$ 台发动机的第 $j$ 个参数值, $i \leq m, j \leq n$ .各数据 $x'_{i,j}$ 为

$$x'_{i,j} = (x_{i,j} - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{i,j}) / \left( \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{i,j} - \bar{x}_j)^2} \right), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

各参数的相关系数 $\alpha_{i,j}$ 为

$$\alpha_{i,j} = \left( \sum_{k=1}^m (x_{k,i} - \bar{x}_i)(x_{k,j} - \bar{x}_j) \right) / \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{k,i} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^m (x_{k,j} - \bar{x}_j)^2}. \quad (2)$$

解相关系数矩阵的特征方程 $|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{R}| = 0$ ,计算特征根 $\lambda$ 与特征向量 $\boldsymbol{\gamma}$ 、各成分方差贡献率 $Q_i$ 、累计贡献率 $Q$ .当特征值大于1且累计贡献率达80%~95%时,确定主成分个数 $k$ ,并计算各主成分对应各参数载荷系数 $a_{k,j}$ .各参数对应各主成分线性组合的系数为 $\chi_{k,j}$ ,  $\chi_{k,j} = \frac{a_{k,j}}{\sqrt{\lambda}}$ .同时,对所得特征值进行加



权平均归一处理, 计算性能参数权值  $\omega_j$ .

### 2.2 机队各循环性能动态阈值计算方法

以机队性综合阈值替代各台发动机性能阈值作为准则, 依据发动机单元体参数值及各参数权值, 提出基于单元体参数的发动机性能指数. 不同循环  $t$  下的性能指数计算式为

$$z_t = \left( \sum_{j=1}^n \omega_j x'_{t,j} \right) / \left( \sum_{j=1}^n x'_{t,j} \right), \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

依据数据统计分析法中的  $\sigma$  准则, 将某循环的机队发动机分布不均匀的性能指数值视为满足正态分布要求. 设发动机性能指数的均值为  $\mu$ , 方差为  $\sigma$ , 指数的显著性水平为  $\alpha$ , 依据中心极限定理可得  $x < z_t - \frac{\sigma}{\sqrt{m}} z_{\alpha/2}$  或  $x > z_t + \frac{\sigma}{\sqrt{m}} z_{\alpha/2}$ . 其中,  $z_{\alpha/2}$  为性能指数的正态分布两侧百分点位, 而机队中任一台发动机的性能指数必须落在该点之内才是安全可靠的, 故将  $z_t - \frac{\sigma}{\sqrt{m}} z_{\alpha/2}$  作为机队性能指数的下限阈值.

## 3 性能预警定模型算例验证

选取某公司 PW4077D 机队 5 台发动机巡航状态下单元体参数, 如排气温度 EGT、低压压气机温升比  $T_{25}^*/T_2^*$ 、低压压气机增压比  $p_{25}^*/p_2^*$ 、低压转子转速  $N_1$ 、高压压气机转速  $N_2$ 、高低压转速偏差  $N_1 - N_2$  和涡轮落压比  $p_3^*/p_{459}^*$  等 1 440~1 980 循环数据验证该机队发动机的性能预警模型.

### 3.1 定量计算单元体参数性能权值

发动机性能的主成分计算结果, 如表 2 所示.

表 2 发动机性能的主成分计算结果

Tab. 2 Aero-engine performance results calculated by PCA methods

主成分	$\lambda$	方差贡献率/%	累计贡献率/%	主成分	$\lambda$	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	4.141 0	59.154 0	59.154 0	5	0.184 0	2.624 0	97.628 0
2	1.618 0	23.118 0	82.272 0	6	0.114 0	1.630 0	99.258 0
3	0.670 0	9.578 0	91.849 0	7	0.052 0	0.742 0	100.000 0
4	0.221 0	3.155 0	95.004 0				

由表 2 可知: 主成分 1, 2 对应特征根大于 1, 且方差贡献率分别为 59.154 0% 和 23.118 0%, 累计贡献率为 82.272 0%, 在 80%~90% 准则内. 故主成分 1, 2 能够包含选取的 7 个参数表征的发动机性能, 选取主成分  $k=2$ , 特征根  $\lambda_k = \{(4.141 0, 1.618 0) | k=1, 2\}$ . 计算各主成分对应于 7 个参数的载荷系数和线性组合系数, 然后, 计算相关系数矩阵中发动机排气温度特征值和权值, 所得结果如表 3 所示.

表 3 发动机单元体参数相关系数矩阵特征值与权值

Tab. 3 Characteristic value and weights of measurable parameters correlation coefficient matrix

参数	EGT	$T_{25}^*/T_2^*$	$p_{25}^*/p_2^*$	$N_1$	$N_2$	$N_1 - N_2$	$p_3^*/p_{459}^*$
特征值	0.061 9	0.319 6	0.383 3	0.419 5	0.157 0	0.398 2	0.180 2
权值	0.032 3	0.166 5	0.199 7	0.218 5	0.081 8	0.207 4	0.093 9

### 3.2 机队各台发动机的性能指数

由式(3)可计算出机队各台发动机的性能指数. 机队中 5 台发动机性能指数趋势, 如图 1 所示. 由图 1 可知: PW4077D 机队中 5 台发动机在该循环区间内性能总体处于降趋势, 但过程变化复杂.

### 3.3 发动机机队性能指数动态阈值

由于 5 台发动机在相同循环的发动机性能指数值视作正态分布, 按照  $\sigma$  准则分析该机队的性能指数动态阈值, 如图 2 所示. 图 2 中: 显著性水平  $\alpha=0.05$ ;  $n$  为工作循环数.

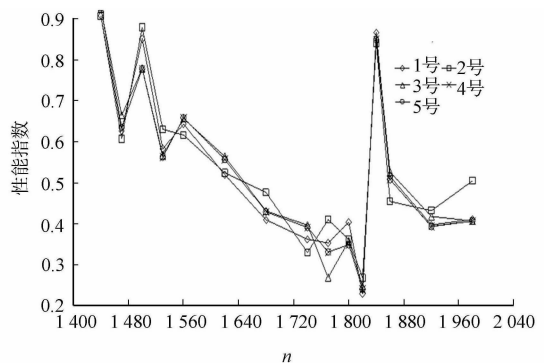


图 1 5 台发动机性能指数趋势

Fig. 1 performance index trends of five engines

依据主成分分析法,计算第 1,2 主成分特征值对应的发动机性能指数. 计算机队各循环性能的阈值分别为:6.305 0, 1.764 4, 4.531 0, 1.339 3, 2.179 9, 0.850 1, -0.725 2, -2.579 0, -1.492 8, -3.442 2, 5.277 7, -0.200 1, -1.209 6, -1.382 4. 由图 2 可知:在 1 440~1 980 循环区间的性能指数阈值变化与定权值法得到的结果从趋势上是一致的,故基于定权值法和数据统计结合计算出的机队性能指数阈值曲线能够替代发动机性能基线监控发动机无故障状态下的性能预警监控.

## 4 结论

1) 结合航空发动机单元体结构设计的主要特点,提出以单元体参数及组合替代气路参数和振动参数表征发动机性能<sup>[1]</sup>.

2) 提出以机队而不是单台发动机为预警计算的基准,定权值和主成分法得到的性能阈值趋势变化均随工作循环数增加而单调下降. 下降过程比较复杂,在维护维修等工作后性能阈值会显著恢复,但不会恢复到初始循环水平.

## 参考文献:

- [1] SIMON D L, ARMSTONG J B. An integrated approach for aircraft engine performance estimation and fault diagnostics[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(7): 1-10.
- [2] HOCHGREB S, DENNIS D, AYRANCI I, et al. Forced and self-excited instabilities from lean premixed, liquid-fuelled aero-engine injectors at high pressures and temperature[C]// *ASME Turbo Exp Turbine Technical Conference and Exposition*. San Antonio: American Society of Mechanical Engineers, 2013: 1-12.
- [3] GREITZER E M. Some aerodynamic problems of aircraft Engines: fifty years after-the 2007 IGTI scholar lecture [J]. *Journal of Turbo Machinery*, 2009, 131(3): 1-13.
- [4] 孙见忠, 左洪福, 刘鹏鹏, 等. 基于动态线性模型的民航发动机性能监控模型与在翼寿命预测[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(2): 3243-3250.
- [5] VOLPONI A J. Gas turbine engine health management: Past, present, and future trends [J]. *Journal of Engineering for GAS turbines and Power*, 2014, 136(5): 1-20.
- [6] 单晓明, 宋云峰, 黄金泉, 等. 基于神经网络和模糊逻辑的航空发动机状态监视[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(10): 2356-2361.
- [7] 赵威, 张德志. 单元体结构发动机总体结构尺寸控制与分析[J]. *航空发动机*, 2014, 40(5): 45-49.
- [8] 刘志荣, 朱睿, 梁忠生, 等. 发动机健康基线及评估准则研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2010, 49(4): 520-525.
- [9] 周俊, 刘俊华, 杨涛, 等. 航空发动机在线振动检测系统的开发[J]. *计算机测量与控制*, 2015, 23(11): 3599-3602.
- [10] 黄燕晓, 李书明, 王凌云, 等. 面向核心单元体的航空发动机性能评估研究[J]. *制造业自动化*, 2015, 37(9): 86-92, 105.
- [11] 李东民, 张慧, 李玉善. 不同氧空比下发动机动力性能与 NO<sub>x</sub> 排放仿真分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 281-286.

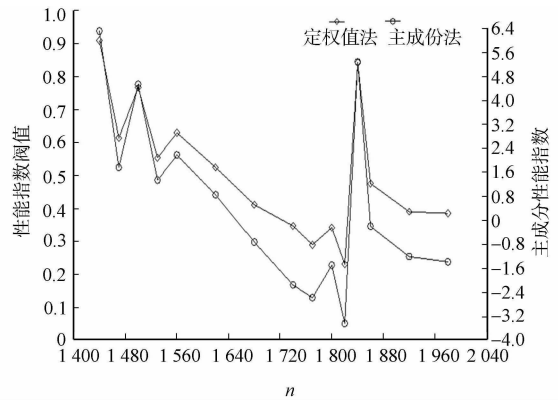


图 2 机队发动机性能阈值趋势

Fig. 2 Fleet performance threshold values trend

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 崔长彩)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605002



# 新颖波纹截面薄壁圆管的耐撞性

葛平政, 张勇

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 提出一种新颖的波纹薄壁圆形结构,采用数值对比分析方法,分析不同波纹截面形状对薄壁结构耐撞性的影响.结果表明:对于同一外截面形状的波纹,波纹内截面形状的变化使吸能相差 10%;外截面是矩形的不同内截面波纹结构的吸能性要高于外截面是圆形的不同内截面波纹结构,其中,外截面为矩形,而内截面为圆形的波纹结构具有最优的吸能性,比外截面为圆形,内截面为矩形的波纹结构的吸能性提高 34.5%;波长对薄壁结构的耐撞性也具有较大的影响,波长为 7.8 mm 的波纹管具有较好的耐撞性;与无波纹结构的圆管相比,外截面为矩形,内截面为圆形的波纹薄壁管在不影响吸能的情况下,可以使峰值力降低 50.8%.

**关键词:** 波纹管;薄壁结构;截面;耐撞性;吸能性

**中图分类号:** V 214.4; U 271.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0531-05

## Crashworthiness of Novel Thin-Walled Circular Tube With Novel Corrugated Cross Section

GE Pingzheng, ZHANG Yong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A novel corrugated thin-walled structure was proposed, and the crashworthiness of the structure with different corrugated cross section were studied using numerical analysis method. The research results show that the corrugated structure with same outer cross section and different internal cross sections can change energy absorption rate by approximately 10%. Moreover, the energy absorption rates of corrugated structure with rectangular outer cross section and different internal cross sections are higher than that of round outer cross sections. Meantime, corrugated structures with rectangular outer cross section and round internal cross section have the most excellent energy absorption capacity, 34.5% higher than that of round outer cross section and rectangular internal cross section. In addition, the corrugated length has an important influence on crashworthiness of thin-walled structure, and corrugated length of 7.8 mm has better crashworthiness performance. Furthermore, compared to traditional thin-walled circular tubes, the tubes with the proposed corrugated structure reduce peak force by 50.8% if energy absorption is not influenced.

**Keywords:** corrugated tube; thin-walled structure; cross section; crashworthiness; energy absorption

薄壁结构具有成本低、强度高、吸能效率好等优点,被广泛地应用于汽车、航空、航天等领域<sup>[1]</sup>.然而,传统的薄壁管在冲击过程中的变形模式具有一定的随机性,易受到冲击速度的影响,不能充分发挥吸能特性.此外,传统薄壁管在碰撞过程中,易产生较大的初始峰值力,从而产生较大的碰撞加速度,对

**收稿日期:** 2015-07-24

**通信作者:** 张勇(1980-),男,副教授,博士,主要从事汽车碰撞安全性的研究. E-mail: flashzy1980@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51205141);中国博士后基金特别资助项目(2014T70613);福建省自然科学基金资助项目(2015J01204);华侨大学中青年教师培养计划项目(ZQN-PY202)

乘员造成较为严重的二次伤害<sup>[2]</sup>. 因此,为了降低碰撞过程中的峰值力,并获得较好的变形吸能模式,国内外学者在薄壁结构的诱导变形结构、缺陷槽及组合缺陷结构方面开展了一些研究<sup>[3-8]</sup>. 虽然目前的诱导变形及缺陷结构能较好地降低薄壁结构的最大峰值力,但对于具有缺陷结构的薄壁结构仍易导致变形模式的不稳定性,从而降低薄壁结构的吸能特性<sup>[9]</sup>. 为了获得稳定的折叠变形模式,且能较好地降低碰撞峰值力的薄壁结构,本文提出一类新颖的波纹薄壁结构,对不同截面形状的波纹进行研究.

## 1 不同截面形状的波纹薄壁结构

### 1.1 不同截面形状的波纹薄壁管几何模型

提出的新颖波纹薄壁管模型,如图1所示. 波纹薄壁结构主要由不同的内外截面的形状构成. 其中,外截面分为矩形(r)和半圆形(c)2种截面形式,内截面分为半圆形(c)、三角形(t)、矩形(r)、半六边形(h)4种截面形式,由不同内外截面组成不同波纹形式的的波纹管结构. 薄壁波纹管总长度 $L$ 为150 mm,直径 $d$ 为50 mm,壁厚 $t$ 为1 mm,波纹的波长 $\omega$ 为7.8 mm,振幅 $h$ 为2 mm. 波纹在距管的顶部和底部5 mm处,均匀分布在薄壁管上,波纹管固定在刚性墙上,撞击块质量 $m$ 为500 kg,以 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的撞击速度对波纹管进行冲击.

### 1.2 不同截面形状薄壁管有限元结构模型

根据几何示意图,建立新型波纹结构的有限元模型,如图2所示. 波纹结构采用 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的单元尺寸进行有限元离散. 薄壁管的材料为铝合金,密度 $\rho$ 为 $2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,弹性模量 $E$ 为70 GPa,泊松比 $\mu$ 为0.3,其应力-应变( $\sigma$ - $\epsilon$ )曲线,如图3所示. 冲击块和刚性墙定义为刚体,波纹结构的撞击过程在非线性有限元软件LS-DYNA中进行. 其中,撞击块与薄壁波纹管采用点面接触,薄壁波纹管结构本身采用单面接触,接触的静动摩擦因数均为0.2,刚性墙与波纹管间的摩擦因数定义为0.3.

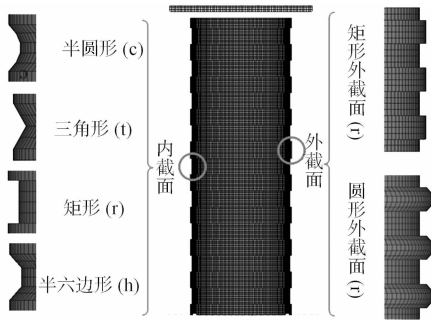


图2 不同截面形状的薄壁管有限元模型

Fig. 2 Different cross section of thin-walled structure finite element model

### 1.3 薄壁管的耐撞性评价指标

1) 比吸能 SEA. 比吸能表示碰撞过程中薄壁结构塑形变形吸收的能量 $E$ 与结构的质量 $M$ 的比值<sup>[10]</sup>. 它是薄壁结构耐撞评价的一个非常重要的指标,表征了单位质量的能量吸收率,即

$$SEA = E/M, \quad (1)$$

$$E = \int_0^{\rho} F \cdot d\rho. \quad (2)$$

式(1),(2)中: $E$ 为薄壁结构吸收的能量; $F$ 为压缩过程中的碰撞力; $\rho$ 为压缩距离; $M$ 为薄壁波纹管的总质量.

2) 载荷比 LR<sup>[11]</sup>. 载荷比表示平均碰撞力载荷与最大碰撞力载荷的比值,即

$$LR = F_{\text{mean}}/F_{\text{max}}. \quad (3)$$

式(3)中: $F_{\text{max}}$ 指碰撞发生时,波纹管在压溃过程中沿轴向产生的冲击载荷的最大值<sup>[11]</sup>,即式(2)中 $F$ 的最大值, $F_{\text{max}}$ 过大使车体的碰撞加速度较大,易造成车内乘员的损伤; $F_{\text{mean}}$ 是指碰撞过程中冲击载荷

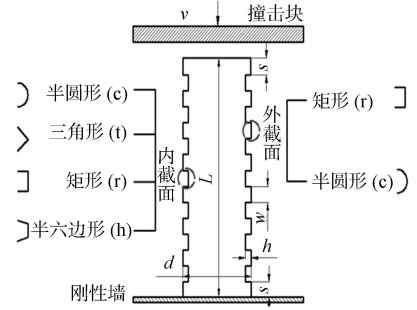


图1 薄壁波纹管的几何模型

Fig. 1 Geometry model of thin-walled corrugated tube

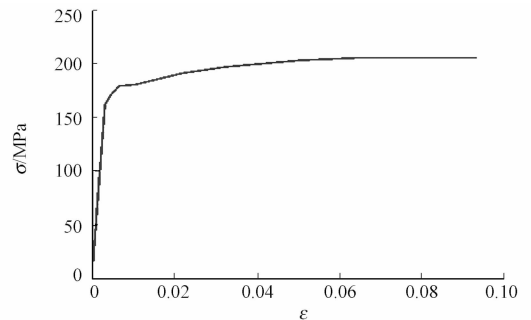


图3 铝合金的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress and strain curve of aluminum

的平均值. LR 反映了载荷的波动情况, 比值越大, 载荷波动越小; 当比值为 1 时, LR 最优, 此时, 载荷的波动最平缓, 碰撞对人造成的伤害也最小.

3) 行程利用率 SE. 行程利用率表示结构压实前的总位移  $x$  与结构总长度  $L$  的比值, 即

$$SE = x/L. \quad (4)$$

SE 越大, 薄壁结构压实前的位移  $x$  越大, 其有效压缩位移就越大, 表示其吸能利用率大.

## 2 不同波纹截面薄壁管的耐撞性分析

### 2.1 外截面为矩形的波纹管耐撞性分析

从碰撞力特性、能量吸收特性及行程利用率等 3 个方面对外截面为矩形的不同内截面形状 (rr, rt, rr, rh) 的波纹薄壁管耐撞性进行研究. 4 种波纹薄壁结构的峰值力及载荷比, 如图 4 所示. 由图 4 可知: rr, rh, rc 的  $F_{\max}$  基本一致, 然而, rt 波纹结构的  $F_{\max}$  则明显高于其余 3 种波纹结构, 这表明在碰撞过程中, rt 波纹结构的薄壁管将产生较大的碰撞减速度, 不利于乘员安全. 从 LR 方面看, rc 波纹结构的 LR 明显优于其余 3 种, 其值为 0.73; rt 波纹结构的 LR 最小, 其值为 0.58, 增幅达到了 25.8%. 由此可知: rc 波纹结构能大大改善薄壁结构的载荷比, 使碰撞力变化较为平缓, 碰撞发生时产生的加速度较小.

4 种矩形波纹薄壁管的吸能图, 如图 5 所示. 由图 5 可知: 虽然 rr 波纹结构吸收的总能量  $E$  较大, 其他截面形状吸收的总能量  $E$  相差较小, 然而, rc 波纹结构的单位质量的吸能量 SEA 却更有优势, 比 rr 波纹结构的波纹薄壁管高 6%, 比 rh 波纹结构的波纹薄壁管高约 10%. 因此, 从结构设计的轻量化角度出发, rc 波纹结构的吸能性要优于其他 3 种结构.

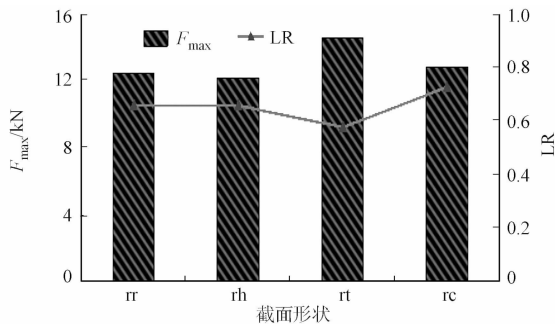


图 4 不同内截面形状的薄壁管峰值力和载荷比  
Fig. 4 Peak force and load ratio of different internal cross section of thin-walled structure

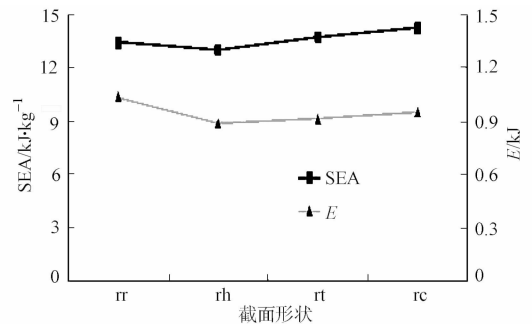


图 5 不同内截面形状的薄壁管吸能  
Fig. 5 Energy absorption of different internal cross section of thin-walled structure

rr, rh, rt, rc 的行程利用率, 分别为 0.61, 0.63, 0.72, 0.73. 由此可知: rc, rt 的 SE 大于 rr, rh 的 SE, 这说明 rc, rt 碰撞时的有效压缩位移大于另外两种波纹结构, 且 rc 波纹结构的行程利用率最大. 综上所述可知: rc 波纹结构在碰撞力特性、能量吸收特性和行程利用率等方面都优于其他 3 种波纹结构. 因此, 外截面为矩形, 内截面为圆形的波纹结构 (rc) 的波纹可以更好地改善薄壁管的耐撞性.

### 2.2 外截面为圆形的波纹管耐撞性分析

方形和圆形截面在薄壁结构中的应用最为广泛. 因此, 进一步研究外截面为圆形的 4 种不同波纹结构的耐撞性. cc, ct, cr, ch 等 4 种波纹薄壁结构的碰撞力峰值及载荷比, 如图 6 所示. 在 4 种结构中, cc 薄壁结构的  $F_{\max}$  最大, 而 ct 薄壁结构的  $F_{\max}$  最小, 表明其在冲击过程中所产生的碰撞加速度较小, 更有利于乘员保护.

此外, cc 波纹结构的 LR 最小, 其值为 0.87; ct 波纹结构的载荷比 LR 的值最大, 其值为 0.97. 因此, ct 波纹结构的薄壁管碰撞力波动较小, 造成的二次伤害程度也相应减小.

不同内截面形状薄壁管的吸能情况, 如图 7 所示. 由图 7 可知: cr, ct 波纹结构吸收的总能量  $E$  相对较大, 分别为 0.89, 0.82 kJ; ch 波纹结构的  $E$  最小, 其值为 0.76 kJ; ct 波纹结构的 SEA 最大, 其值为  $11.85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 高于其余 3 种结构; ch 波纹结构的 SEA 最小, 其值为  $10.63 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比 ch 波纹结构高出 11.5%. 因此, ct 截面形状的波纹薄壁管吸能性优于其他 3 种截面.

cr, ch, cc, ct 等 4 种结构的行程利用率分别为 0.49, 0.47, 0.55, 0.50. 由此可知: ct 波纹结构的 SE

大于 cr, ch, cc, 说明其压缩前的有效压缩位移较大, 碰撞发生时有一定的有效压缩行程, 对车内乘员起到较好的保护作用. 因此, 在 4 种外截面为圆形的波纹结构中, ct 波纹结构的耐撞性更为优异.

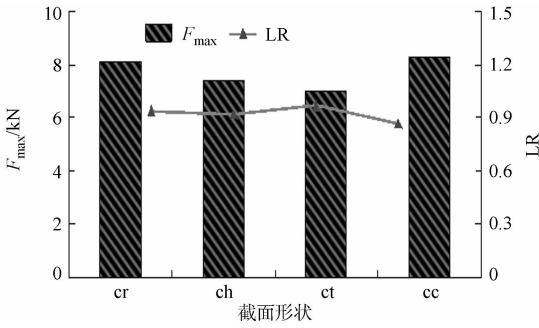


图 6 不同内截面形状的薄壁管峰值力和载荷比

Fig. 6 Peak force and load ratio of different internal cross section of thin-walled structure

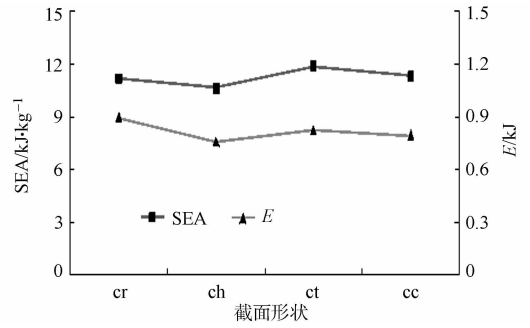


图 7 不同内截面形状的薄壁管吸能

Fig. 7 Energy absorption of different internal cross section of thin-walled structure

### 2.3 rc 截面形状的波长对薄壁管耐撞性的影响

对外截面为圆形与矩形的 8 种波纹结构进行分析, 由此可知: rc, ct 波纹结构具有较好的耐撞性. 相对而言, rc 波纹结构的 SEA 最大, 其值为  $14.3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; ct 波纹结构的 SEA 为  $11.85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 因此, rc 波纹结构的 SEA 比 ct 波纹结构高出 20.7%.

当碰撞力特性和行程利用率在一定的可行范围内时, 吸能结构的设计中最为重要的指标为 SEA. 因此, rc 结构相对于其他 7 种不同波纹结构具有最优的耐撞性.

以最优的 rc 波纹结构为研究对象, 研究波纹波长对结构耐撞性的影响. 对 rc 波纹结构的薄壁管建立波长为 0, 5.6, 7.8, 17.5 mm 的波纹, 分别命名为  $N_0, N_8, N_{18}, N_{25}$ .

不同波长的 rc 结构的碰撞力峰值及载荷比, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 没有波纹的薄壁结构  $N_0$ ,  $F_{max}$  明显高于其他波纹管, 比有波纹的  $F_{max}$  高了 50.8%. 此外, 3 个波纹管之间,  $N_8, N_{18}, N_{25}$  的碰撞力峰值呈现先降低, 后小幅上升的趋势,  $N_{18}$  波纹管的  $F_{max}$  最小 (12.8 kN). 由此可知: 降低峰值力要选择合适的波长. 同时, 载荷比 LR 也呈现出先升后降的趋势,  $N_0$  薄壁管的 LR 仅为 0.32, 而  $N_{18}$  的薄壁管的 LR 达到了 0.70, 是  $N_0$  薄壁结构的 2.2 倍, 表明波纹结构能显著改善薄壁管碰撞力特性, 降低碰撞传递到车内乘员的碰撞力, 降低车内乘员的伤害程度, 从而提高安全性能.

不同波长的 rc 波纹结构薄壁管的吸能图, 如图 9 所示. 由图 9 可知:  $N_0$  的波纹结构吸收的能量  $E$  比  $N_{18}$  高了 3.1%, SEA 也增加了 3.8%, 这主要是由于波纹结构减少材料用量所致. 对于  $N_8, N_{18}, N_{25}$  波纹结构而言,  $N_{18}$  波纹结构在总吸能  $E$  与比吸能 SEA 方面都优于  $N_8, N_{25}$ . 因此, 相对而言,  $N_{18}$  波纹结构具有最好的吸能性.

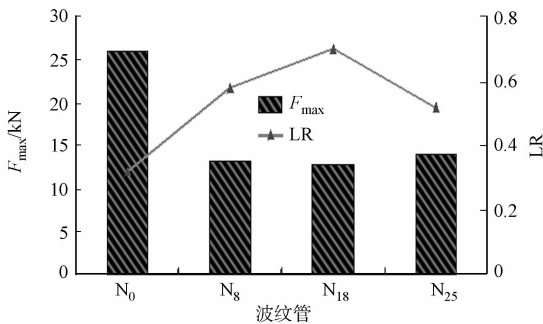


图 8 不同波长的薄壁管峰值力和载荷比

Fig. 8 Peak force and load ratio of different corrugated length of thin-walled structure

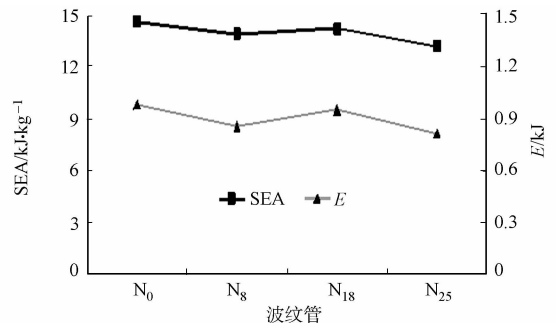


图 9 不同波长的薄壁管吸能

Fig. 9 Energy absorption of different corrugated length of thin-walled structure

$N_0, N_8, N_{18}, N_{25}$  的行程利用率分别为 0.73, 0.71, 0.72, 0.69. 由此可知:  $N_0$  薄壁管的 SE 稍高, 但与波纹薄壁管的 SE 相差不大, 说明有波纹的薄壁管并没有显著降低其行程利用率; 在有波纹的薄壁管中,  $N_{18}$  波纹薄壁管的 SE 仍较大, 但不同波纹结构的 SE 之间并无明显差异. 因此, 相对于没有波纹的薄

壁结构而言, 波纹结构对薄壁管的 SE 没有太大的影响. 综上可知: 在能量吸收  $E$  与 SEA 方面, 无波纹结构  $N_0$  较有波纹结构有一定的提高, 但波纹结构却能大大改善薄壁结构的碰撞力特性. 因此, 波纹结构比传统的直壁薄壁结构具有更好的耐撞性.

为了进一步揭示波纹结构的耐撞性, 对波纹结构在不同变形位移处的折叠模式进行研究, 如图 10 所示. 由图 10 可知: 直壁无波纹结构 ( $N_0$ ) 与波纹结构的变形模式有较大的差异, 直壁无波纹结构主要以钻石折叠模式为主, 此种折叠形式的碰撞力波动较大; 而波纹结构的变形开始皆由波纹的内截面缺陷开始, 使波纹结构大大降低碰撞峰值力. 从  $N_8, N_{18}, N_{25}$  的变形也可以看出, 波纹结构在变形初期阶段皆发生规则对称折叠变形. 但是, 后期易发生波纹结构相互挤压而形成的非对称变形模式 ( $N_{25}$ ), 从而导致吸能特性的降低. 因此, 进一步论证了波纹波长 (数目) 对波纹结构具有重要的影响, 具有 18 个波纹数的  $N_{18}$  波纹结构, 不仅可以明显降低碰撞过程中的峰值力, 而且可以保持较高的吸能特性.

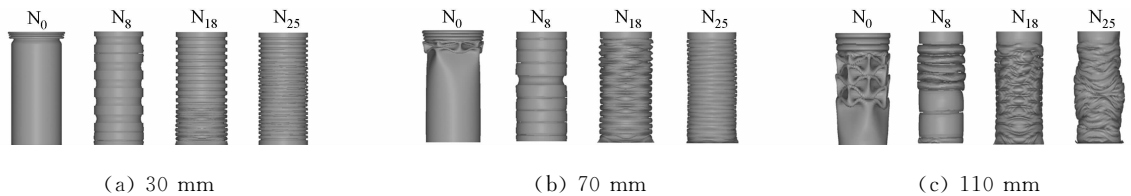


图 10 不同波长的薄壁管在不同变形位移处的折叠模式

Fig. 10 Deformation of different corrugated length thin-walled structure at different distance

### 3 结论

对不同截面形状和波长的波纹薄壁结构进行耐撞性研究, 通过数值分析可得出以下 3 点结论.

- 1) 外截面为矩形的波纹薄壁管比外截面为圆形的波纹薄壁管整体比吸能大, 最大提高到 34.5%. 因此, 要想获得较好的吸能特性, 应选择 rc 截面形状的波纹薄壁管.
- 2) 外截面为圆形的碰撞力整体比外截面为矩形的碰撞力变化平缓, 而在行程利用率方面, 矩形外截面的行程利用率要整体高于圆形外截面.
- 3) 薄壁管的波长对圆管的变形吸能和峰值力产生影响. 其中,  $N_{18}$  波长的薄壁管在耐撞性和吸能性方面都优于其他波长.

### 参考文献:

- [1] 钟志华, 张维刚. 汽车碰撞安全技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 2-5.
- [2] 李奇, 张勇, 张成, 等. 灵敏度分析的客车车身模块重构与结构轻量化优化设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 377-382.
- [3] 江志勇. 基于轿车薄壁构件碰撞的变形及吸能特性的仿真与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009: 20-60.
- [4] SHAKERI M, MIRZAEIFAR R, SALEHGHAFARI S. New insights into the collapsing of cylindrical thin-walled tubes[J]. Mechanical Engineering Science, 2007, 221(8): 863-890.
- [5] 柳艳杰. 汽车低速碰撞吸能部件的抗撞性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 7-20.
- [6] 王良杰, 陈浩, 强旭华, 等. 诱导槽对薄壁梁碰撞性能影响的仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(12): 1-4.
- [7] CHO Y B, BAE C H, SUH M W, et al. A vehicle front frame crash design optimization using hole-type and dent-type crush initiator[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(4): 414-430.
- [8] 张涛, 刘土光, 肖汉林, 等. 高速冲击下薄壁组合结构吸能特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 394-404.
- [9] 谭丽辉, 谭洪武, 毛志强, 等. 具有不同诱导槽结构的薄壁圆管抗撞性优化[J]. 振动与冲击, 2014, 33(8): 1-4.
- [10] 王海亮, 林忠钦, 金先龙. 基于响应面模型的薄壁构件耐撞性优化设计[J]. 应用力学学报, 2003, 20(3): 61-66.
- [11] 荆友录, 温卫东, 魏民祥. 不同截面结构薄壁直梁的轴向耐撞性研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(4): 455-459.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 崔长彩)

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605003



# 内置式永磁电机齿槽转矩的优化设计

黄燕涛<sup>1</sup>, 郭新华<sup>1,2</sup>, 项雷军<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 香港理工大学 电气工程学院, 中国 香港特别行政区)

**摘要:** 针对内置式永磁同步电机存在的齿槽转矩问题,采用有限元软件 Maxwell 分别对不同分段数、不同非均匀气隙情况下的内置式永磁同步电机进行分析.理论分析表明:转子分段斜极可以抑制齿谐波,从而削弱齿槽转矩;而采用非均匀气隙结构则可以通过优化气隙磁密的特定次谐波削弱齿槽转矩.依据理论分析,提出一种二者相结合的方法抑制电机的齿槽转矩.优化结果表明:该方法能有效地抑制电机的齿槽转矩.

**关键词:** 内置式永磁同步电机; 齿槽转矩; 转子分段斜极; 非均匀气隙

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0536-05

## Optimal Design of Cogging Torque of Interior Permanent Magnet Motor

HUANG Yantao<sup>1</sup>, GUO Xinhua<sup>1,2</sup>, XIANG Leijun<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

**Abstract:** In order to solve the issues on cogging torque of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), the IPMSMs with different segments and non-uniform air gap were analyzed using the finite element software Maxwell in this paper. Theoretical analysis showed that teeth harmonics can be effectively reduced by step skewing of rotor, which leads to the decrease of cogging torque; meanwhile, the cogging torque can also be minimized by introducing the non-uniform air gap based on specific harmonic of optimal gap flux density. On the basis of the theory analysis, a combined method is proposed to eliminate the cogging torque of IPMSM. Optimization results verify the described method can effectively reduce the cogging torque of the IPMSM.

**Keywords:** interior permanent magnet synchronous motor; cogging torque; step skewing of rotor; non-uniform air gap

由于内置式永磁同步电机(IPMSM)高效率、高功率密度等优点,在电动汽车、航天航空、机器人、工业控制等高性能领域得到广泛地应用<sup>[1-2]</sup>.然而,在永磁电机中,转子永磁体和定子齿槽相互作用,不可避免地产生齿槽转矩,导致转矩波动,引起振动和噪声,从而影响系统的控制精度<sup>[3-4]</sup>.因此,如何削弱电机齿槽转矩是高性能永磁电机的重要研究内容.近年来,国内外学者对电机齿槽转矩的影响因素和削弱进行了研究,提出很多有效的方法.文献[5-9]通过解析法,分析了定子槽宽、槽口偏移、转子永磁体分块、磁极偏移、磁极不对称分布和极弧系数对齿槽转矩的影响;文献[10-12]通过分析电机气隙磁场分

**收稿日期:** 2015-07-28

**通信作者:** 郭新华(1977-),男,副教授,博士,主要从事永磁型双机械端口电机、永磁同步电机、多相电机的驱动控制,中压大功率永磁(异步)牵引系统控制的研究. E-mail: guoxinhua@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51477058);福建省自然科学基金资助项目(2013J01198);华侨大学中青年教师科研提升计划项目(ZQN-YX304)



布,研究了气隙磁场对齿槽转矩的影响.但是,关于电机齿槽转矩的研究大多是针对表面式永磁同步电机,而针对内置式永磁同步电机的研究较少.本文利用有限元分析软件 Maxwell 分析转子分段数和采用非均匀气隙磁密结构对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响,通过改变转子结构偏心距离和转子分段斜极两种优化方法,结合仿真结果得到有效削弱电机齿槽转矩的方案.

## 1 齿槽转矩基本原理及电机模型

### 1.1 基本原理

齿槽转矩是永磁电机绕组不通电时,永磁体和电枢齿槽之间相互作用产生的转矩<sup>[13]</sup>,可定义为

$$T_{\text{cog}} = -\frac{\partial W}{\partial \alpha}. \quad (1)$$

式(1)中: $W$ 为电机不通电时的磁场能量; $\alpha$ 为定转子相对位置角.

假设电枢铁心的磁导率为无穷大,则电机内存储磁场能量<sup>[13-14]</sup>近似为

$$W = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_r^2(\theta) \left[ \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2 dV. \quad (2)$$

式(2)中: $\mu_0$ 为气隙磁导率; $V$ 为气隙体积; $B_r(\theta)$ 为永磁体剩磁; $h_m(\theta)$ 为永磁体充磁方向长度沿圆周方向的分布; $\delta(\theta, \alpha)$ 为有效气隙长度.

为了得到电机内的磁场能量,需对  $B_r^2(\theta)$  和  $\left[ \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2$  进行傅里叶展开,即

$$B_r^2(\theta) = B_{r,0} + \sum_{n=1}^{\infty} B_{r,n} \cos(2np\theta), \quad (3)$$

$$\left[ \frac{h_m(\theta)}{h_m(\theta) + \delta(\theta, \alpha)} \right]^2 = G_0 + \sum_{n=1}^{\infty} G_n \cos(nz(\theta + \alpha)). \quad (4)$$

式(3),(4)中: $B_{r,0} = \alpha_p B_r^2$ ;  $B_{r,n} = \frac{2}{n\pi} B_r^2 \sin(n\alpha_p \pi)$ ;  $p$ 为极对数; $B_r$ 为永磁体剩磁; $\alpha_p$ 为永磁磁极的极弧系数; $z$ 为电机电枢槽数.

将式(2)~(4)代入式(1),得到不考虑斜槽情况下的齿槽转矩表达式,即

$$T_{\text{cog}} = \frac{\pi z L_a}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_{r,\frac{m}{2p}} \cdot \sin(nz\alpha). \quad (5)$$

式(5)中: $L_a$ 为电枢铁心的轴向长度; $R_1$ 和  $R_2$ 分别是电枢外半径和定子轭内半径; $n$ 为使  $nz/(2p)$  为正整数的整数.

### 1.2 电机模型

利用 Maxwell 有限元分析软件建立电机模型,模型截面如图 1 所示.

电机的主要参数如下:额定功率 4 kW;额定电压 540 V;极对数 8;定子槽数 48;额定转速  $1\,200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ;定子铁心外径 180 mm;定子铁心内径 115.4 mm;转子外径 114 mm;转子内径 45 mm.

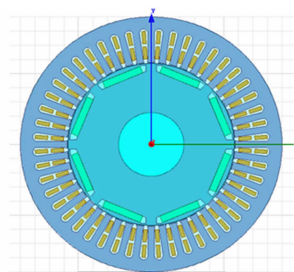


图 1 IPMSM 模型

Fig. 1 Model of IPMSM

## 2 分段斜极对齿槽转矩的影响

### 2.1 斜极方法

转子斜极与定子斜槽的原理相同<sup>[15]</sup>,其方法有 2 种,如图 2 所示.采用连续斜极的效果和定子斜槽基本一致,但该方法会增大工艺操作难度,提高电机生产成本,不利于大批量生产.采用转子分段斜极的方法不仅能够有效地削弱电机齿槽转矩,而且操作工艺相对简单,有利于降低电机生产成本.所以,文中采用转子分段斜极的方法.

### 2.2 斜极角度

在整数槽电机中,存在高次谐波磁动势.其中,有一种  $v = (z/p) \pm 1$  次的高次谐波称为一阶齿谐波,该谐波的次数与一对极下的齿数  $z/p$  有特定关系<sup>[15]</sup>.当转子分为  $N$  段时,为了更好地削弱齿谐波和齿槽转矩,应使每一段分段转子对应的  $z/p$  次谐波的矢量和为零.

由于  $z/p$  次谐波在一个定子齿距内的电角度为  $360^\circ$ , 若要较好地削弱齿谐波和齿槽转矩, 则  $N$  个矢量在  $360^\circ$  电角度方位内均匀分布, 即  $N$  段转子在一个定子齿距范围内等间距错开. 假设相邻两段转子之间沿圆周分布错开  $(1/N) \cdot \theta_r$  ( $\theta_r$  为齿距角度), 相对于第 1 段转子, 第  $N$  段转子错开角度为  $[(N-1)/N] \cdot \theta_r$ , 则斜极角度  $\theta_{PM}$  与分段数  $N$  的关系为

$$\theta_{PM} = [(N-1)/N] \cdot \theta_r. \quad (6)$$

### 2.3 不同分段数的有限元分析

采用 8 极 48 槽电机, 根据式(6)可得: 当转子分 2 段式, 斜极角为  $3.75^\circ$ ; 当转子分 3 段式, 斜极角为  $5^\circ$ ; 当转子分 4 段式, 斜极角为  $5.625^\circ$ . 有限元仿真得到的齿槽转矩及其谐波分析结果, 如图 3, 4 所示. 图 3, 4 中:  $T_{cog}$  为齿槽转矩;  $t$  为时间;  $N$  为分段数;  $n$  为谐波次数;  $M$  为转矩谐波幅值.

由图 3, 4 可知: 采用转子分段斜极能够较好地削弱齿槽转矩, 并且齿槽转矩幅值随着分段数的增大而减小; 不分段时, 齿槽转矩中存在较大的 2, 4 次谐波分量; 当分段数  $N=2$  时, 齿槽转矩中的 2 次谐波分量被大幅度削弱, 而在其他高次谐波中 4 次谐波分量较大; 当分段数  $N=3$  时, 齿槽转矩被大幅度削弱, 其中 6 次谐波分量较大; 当分段数  $N=4$  时, 齿槽转矩幅值和  $N=3$  时的齿槽转矩幅值相比减小不多, 其谐波含量中, 8 次谐波含量较大.

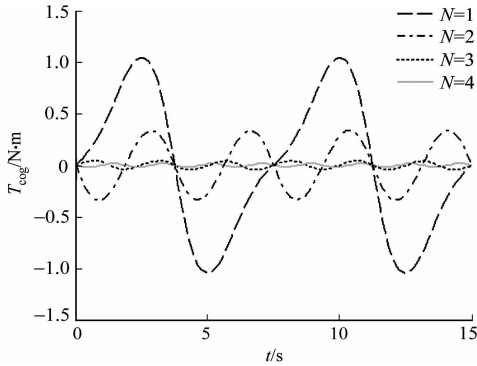


图 3 不同分段数时的齿槽转矩

Fig. 3 Cogging torque in different segments

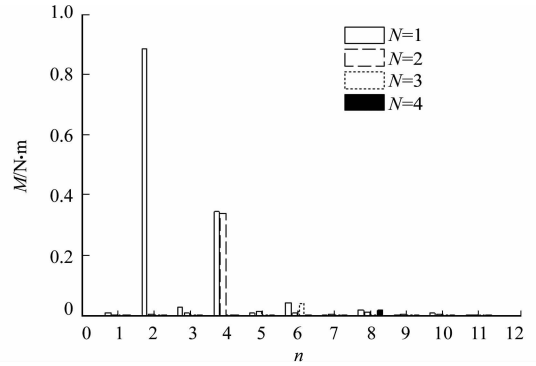


图 4 不同分段数时齿槽转矩的谐波分析

Fig. 4 Harmonic analysis of cogging torque in different segments

## 3 非均匀气隙磁密对齿槽转矩的影响

由式(5)可得: 当  $R_1, R_2, L_a$  等参数一定时, 齿槽转矩幅值与  $B_{r, nz/(2p)}$  有关. 在有限元分析软件 Maxwell 中, 齿槽转矩的取值为电机不通电时在瞬态场下计算得到的转矩值. 该情况下, 空载气隙磁密与永磁体剩磁有关, 因此, 只需减小空载气隙磁密的  $nz/(2p)$  次谐波含量, 便可削弱齿槽转矩. 文中采用 8 级 48 槽内置式永磁同步电机, 其中, 空载气隙磁密的  $6n$  次谐波分量会影响电机齿槽转矩的幅值.

### 3.1 基本原理

在均匀气隙磁密的 IPMSM 中, 转子是一个标准的圆周, 转子外圆周与定子内圆周是同心圆. 为了优化气隙磁密波形, 电机转子采用非均匀气隙结构, 如图 5 所示. 图 5 中:  $O$  为原转子外圆圆心;  $O'$  为一个极距范围内优化转子外圆圆心;  $OO'$  为优化转子的偏心距  $h$ ; 右半图中虚线部分为优化后的转子外沿.

### 3.2 不同偏心距的有限元分析

为了研究不同偏心距  $h$  对电机空载气隙磁密和齿槽转矩的影响, 选取了 10 个不同的偏心距离, 从 0 开始以 1 mm 长度递增, 对电机进行有限元分析, 并对结果进行傅里叶分解, 得到相应的空气隙磁密特定次谐波含量和齿槽转矩波形. 其中, 不同偏心距的空载气隙磁密 6, 12, 18 次谐波含量, 如表 1 所示. 不同偏心距的齿槽转矩波形, 如图 6 所示.

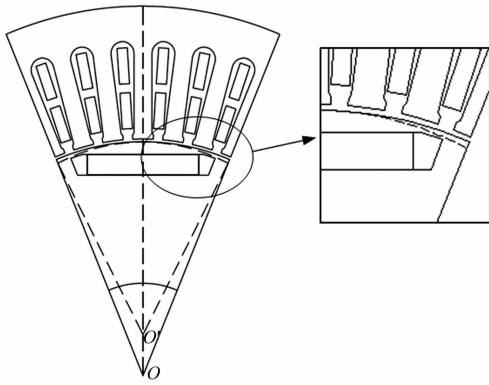


图 5 内置式永磁同步电机非均匀气隙结构图

Fig. 5 Non-uniform air gap structure diagram of IPMSM

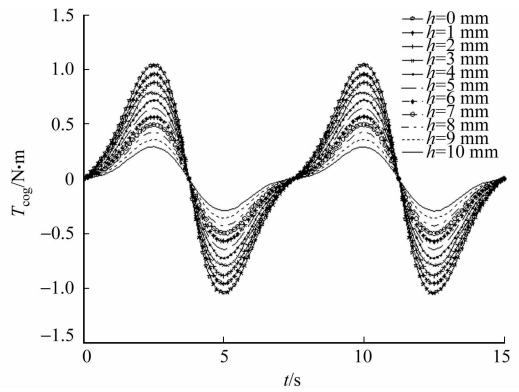


图 6 不同偏心距的齿槽转矩

Fig. 6 Cogging torque under different eccentric distance

表 1 不同偏心距的空载气隙磁密 6, 12, 18 次谐波含量

Tab. 1 Content of no-load gap flux density under different eccentric distances with 6, 8, 12 times harmonics %

n/次	h/mm											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
6	8.10	7.98	7.87	7.76	7.65	7.54	7.44	7.33	7.23	7.12	7.03	
12	2.84	2.74	2.64	2.54	2.44	2.36	2.28	2.17	2.09	2.02	1.96	
18	8.26	8.22	8.15	8.08	8.01	7.91	7.81	7.79	7.72	7.64	7.53	

由表 1 可知:随着偏心距的增加,空载气隙磁密 6, 12, 18 次的谐波含量在不断减少. 由图 6 可知:电机齿槽转矩的大小随偏心距的增大而减小. 因此,采用非均匀气隙结构能降低空载气隙磁密  $6n$  次谐波含量,且空载气隙磁密的  $6n$  次谐波分量对电机齿槽转矩的幅值有影响,即转子采用非均匀气隙结构可有效地削弱电机齿槽转矩. 但是,随着偏心距的增加,电机转子的制造工艺难度也随之增大. 所以,应在制造工艺所允许的基础上选取适合的偏心距.

### 4 优化结果

结合以上分析结果,同时考虑工艺操作的问题,选取电机转子磁极分段数  $N=3$ ,转子偏心距  $h=10$  mm,仿真结果如图 7~9 所示. 图 8, 9 中:  $B$  为空载气隙磁密;  $\alpha$  为机械角度;  $n$  为谐波次数;  $J$  为磁密谐波幅值.

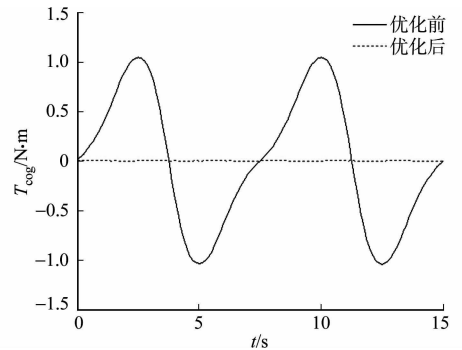


图 7 优化前后电机齿槽转矩

Fig. 7 Contrast of cogging torque before and after optimization

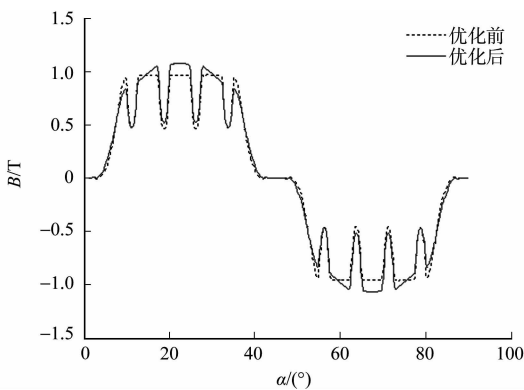


图 8 优化前后空载气隙磁密

Fig. 8 No-load gap flux density before and after optimization

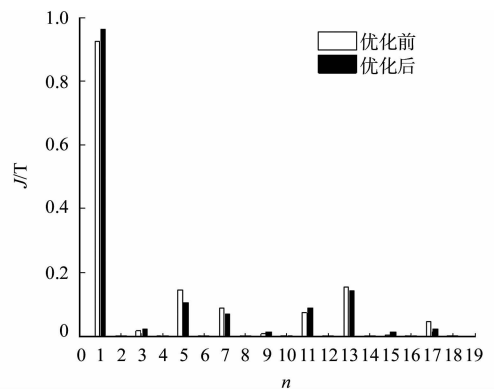


图 9 优化前后空载气隙磁密的谐波分析

Fig. 9 Harmonic analysis of no-load gap flux density before and after optimization

由图7可知:优化后,电机齿槽转矩被大大削弱.由图8,9可知:优化后,空载气隙磁密的正弦畸变率为35.22%,与优化前的37.59%相比有所降低,优化后的气隙磁密各谐波含量明显减少,且空载气隙磁密波形得到优化,波形接近正弦分布.

## 5 结束语

基于解析法对齿槽转矩进行理论分析,给出转子分段数和斜极角之间的关系及电机空载气隙磁密与齿槽转矩的关系.利用有限元分析软件Maxwell,对转子分段斜极和采用非均匀气隙磁密结构的内置式永磁电机的齿槽转矩进行仿真分析.结合以上2种方法,得到齿槽转矩最小的优化方案.仿真结果表明:该方法能够有效地优化电机空载气隙磁密波形且削弱齿谐波,从而抑制电机齿槽转矩.

## 参考文献:

- [1] 夏永洪,黄劭刚.齿谐波绕组电流对电枢绕组空载电压波形的影响[J].中国电机工程学报,2014,34(6):910-916.
- [2] 彭兵,夏加宽,董婷,等.不等齿宽提高多槽少极隔齿隔相绕组永磁电机转矩的方法[J].中国电机工程学报,2012,32(增刊1):242-248.
- [3] FAZIL M,RAJAGOPAL K R. A novel air-gap profile of single-phase permanent-magnet brushless DC motor for starting torque improvement and cogging torque reduction[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2010,46(11):3928-3932.
- [4] 罗宏浩,廖自力.永磁电机齿槽转矩的谐波分析与最小化设计[J].电机与控制学报,2010,14(4):36-40.
- [5] 王晓远,贾旭.基于槽口优化的电动汽车用大功率无刷直流电机齿槽转矩削弱方法[J].电工技术学报,2013,28(6):40-45.
- [6] 杨玉波,王秀和,朱常青.基于分块永磁磁极的永磁电机齿槽转矩削弱方法[J].电工技术学报,2012(3):73-78.
- [7] LIU Ting, HUANG Shoudao, GAO Jian. A method for reducing cogging torque by magnet shifting in permanent magnet machines[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems. Incheon: IEEE Press, 2010: 1073-1076.
- [8] 王道涵,王秀和,丁婷婷,等.基于磁极不对称角度优化的内置式永磁无刷直流电动机齿槽转矩削弱方法[J].中国电机工程学报,2008,28(9):66-70.
- [9] 杨玉波,王秀和,丁婷婷.基于单一磁极宽度变化的内置式永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法[J].电工技术学报,2009,24(7):41-45.
- [10] DUTTA R, SAYEED S, RAHMAN M F. Analysis of cogging torque and its effect on direct torque control (DTC) in a segmented interior permanent magnet machine[C]// Power Electronics Specialists Conference. Orlando: IEEE Press, 2007: 2568-2574.
- [11] KIM T W, CHANG J H. Effective step-skew method for cogging torque reduction in surface-mounted permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2013, 63(3): 288-292.
- [12] AXAR Z, ZHU Z Q, OMBACH G. Influence of electric loading and magnetic saturation on cogging torque, back-EMF and torque ripple of PM machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(10): 2650-2658.
- [13] 王秀和.永磁电机[M].北京:中国电力出版社,2010:71-115.
- [14] WANG Xiuhe, YANG Yubo, FU Dajin. Study of cogging torque in surface-mounted permanent magnet motors with energy method[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 267(1): 80-85.
- [15] 汤蕴缪.电机学[M].北京:机械工业出版社,2011:143-147.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605004



# 材料本构模型参数对二维直角 切削仿真的影响

廖通凯, 程鑫, 查旭明, 姜峰

(华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 利用 AdvantEdge 切削仿真软件建立二维直角切削过程的数值仿真模型,通过改变工件材料本构模型中的初始应力、应变硬化系数、应变率强化系数和热软化系数,获取各模型参数对二维直角切削仿真结果的影响. 结果表明:对切削力、刀尖温度和应力影响最大的是热软化系数,对切屑形貌影响最大的是初始应力;材料本构模型主导切削仿真过程中的应力-温度场耦合过程,同时,本构模型参数对仿真结果的影响具有明显的非线性效应.

**关键词:** 切削加工; 数值仿真; 有限元模型; 热-力耦合; 本构模型

**中图分类号:** TG 5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0541-06

## Influence of Material Constitutive Model Parameters on 2D Orthogonal Cutting Simulation

LIAO Tongkai, CHENG Xin, ZHA Xuming, JIANG Feng

(Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** 2D orthogonal cutting simulation model has been built by commercial FEM code AdvantEdge. The influence of the governing parameters on the simulation results of 2D orthogonal cutting has been achieved by modifying the governing parameters of material constitutive mode, which includes the governing parameters of initial stress, strain hardening, strain rate hardening and thermal softening. It is found that the effect of governing parameter of thermal softening on cutting forces, cutting temperature and tool stress is maximal, comparing the other governing parameters. The effect of governing parameter of initial stress on chip morphology is maximal, comparing the other governing parameters. Material constitutive model dominates the thermal-mechanical coupling process in cutting simulation. The effects of constitutive model parameters on the simulated results show obvious nonlinear characteristics.

**Keywords:** cutting process; numerical simulation; finite element model; thermal-mechanical coupling; constitutive model

金属切削加工过程中,切削力、切削温度、切削应力及切屑形貌不仅直接影响已加工表面的质量和刀具的使用寿命,对生产实际也有重要的意义. 切削仿真精度问题是研究的重点,而材料本构模型是仿真精度中最重要的一环. Outeiro 等<sup>[1]</sup>通过比较切屑的几何形状、切削力和温度的测量值和预测值,得出 Ti-6Al-4V 材料加工仿真最合适的 J-C 模型参数. Özel 等<sup>[2]</sup>采用优化算法对 J-C 材料模型参数进行改

**收稿日期:** 2015-09-08

**通信作者:** 姜峰(1981-),男,副教授,博士,主要从事切削过程数值仿真技术,精密、复杂切削刀具设计技术的研究.  
E-mail:jiangfeng@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目(51105224, 51475173);福建省高校产学研合作科技重大项目(2014H6018);华侨大学中青年骨干教师科研提升计划项目(13J0521);华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1511403008)

进,算得的流动应力优于经典数据算法所获得的值. Zhang 等<sup>[3]</sup>根据拉伸载荷和 7075-T6 铝合金应力-应变关系,修正了 J-C 本构方程,使其精度得到进一步提高. 姜峰等<sup>[4]</sup>提出了 power-law(P-L)本构模型的修正方法,将临界应力引入材料模型中,防止大应变条件下,应力虚高对仿真结果的影响. 但是,现有的研究主要是针对材料本构模型的局部修正,未见对本构模型的所有参数进行全面的分析及影响机理探讨. 本文利用 AdvantEdge 软件,建立切削过程的二维有限元模型,分别改变本构模型中的初始应力、应变硬化系数、应变率强化系数和热软化系数,分析本构模型参数对仿真结果的影响,进而得到模型参数对仿真结果的影响规律,并对影响机理进行了探讨.

## 1 材料本构模型

金属切削数值仿真过程中涉及很多模型,如摩擦模型<sup>[5]</sup>、材料本构模型<sup>[6]</sup>、传热模型和热物理属性模型<sup>[7]</sup>等. 这些模型的作用机制,如图 1 所示. 本构模型是一个不断进行修正,并引起热-力耦合现象和算法上的迭代过程. 当热-力耦合达到平衡后,切削仿真过程达到稳态,迭代过程结束,并输出切削力、切削温度和切削变形等切削过程物理量的最终结果.

由图 1 可知:影响金属切削数值仿真过程最重要的模型是材料本构模型. 材料本构模型是一组反映可变形体材料应力-应变之间关系的方程<sup>[8]</sup>. 目前,通常采用霍普金森高速压杆(SHPB)试验<sup>[9]</sup>,确定材料在一定的应变速率、温度范围内的流动应力-应变数据,进而根据这些数据和相应的经验公式进行拟合,建立本构方程. 材料的本构方程有许多类型<sup>[10-11]</sup>. 其中,P-L 本构模型引入了材料的应变硬化、应变率强化及热软化参数,综合反映了大应变、高应变率和高温加载下的金属本构关系,对不同材料参数的适用性较好. 同时,它自身形式简单,所使用的变量适用于多种计算机编码,因此是一个可应用于分析计算的实用模型<sup>[12]</sup>. P-L 本构模型的基本表达式为

$$\sigma(\epsilon_s, \dot{\epsilon}_s, \theta) = g(\epsilon_s) \cdot \Gamma(\dot{\epsilon}_s) \cdot \Theta(\theta).$$

上式中: $g(\epsilon_s)$ 为应变硬化效应; $\Gamma(\dot{\epsilon}_s)$ 为应变率强化效应; $\Theta(\theta)$ 为热软化效应.

应变硬化效应定义为  $g(\epsilon_s) = \sigma_0 (1 + \epsilon_s / \epsilon_0)^n$ . 式中: $\sigma_0$ 为初始应力; $\epsilon_s$ 为应变; $\epsilon_0$ 为参考应变; $n$ 为应变硬化系数. 应变率强化效应定义为  $\Gamma(\dot{\epsilon}_s) = (1 + \dot{\epsilon}_s / \dot{\epsilon}_0)^m$ . 式中: $\dot{\epsilon}_s$ 为应变速率; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率; $m$ 为应变率强化系数. 热软化效应定义为  $\Theta(\theta) = (c_0 + c_1\theta + c_2\theta^2 + c_3\theta^3 + c_4\theta^4 + c_5\theta^5)$ . 式中: $c_0 \sim c_5$ 为多项式拟合系数; $\theta$ 为切削温度.

应变硬化效应反映塑性变形对流动应力的影响;应变率强化效应反映粘性特性对材料流动应力的影响;热软化效应反映温度对流动应力的影响<sup>[13]</sup>. 在前期研究中,采用霍普金森压杆(SHPB)技术研究 Fe-Cr-Ni 不锈钢的动态变形特性,得到工件材料的真实应力-应变曲线,计算出各参数的值<sup>[12]</sup>,即

$$\sigma_s = 1\ 266.02(1 + \epsilon_s/0.001)^{0.030\ 82} \times (1 + \dot{\epsilon}_s/100)^{0.047\ 37} \times (1.003\ 1 + 1.478 \times 10^{-4}\theta - 5.769\ 3 \times 10^{-6}\theta^2 + 1.997\ 8 \times 10^{-8}\theta^3 - 3.068\ 3 \times 10^{-11}\theta^4 + 1.608\ 9 \times 10^{-14}\theta^5).$$

## 2 有限元仿真模型

选取 P-L 本构模型公式中,3 种效应对应的 4 个参数进行修改,探究其对仿真结果的影响及规律. 这 4 个参数分别是应变硬化效应中的初始应力  $\sigma_0$  和应变硬化系数  $n$ ,应变率强化效应中的应变率强化系数  $m$ ,及热软化效应中的热软化系数(第一项  $c_0$ ). 有限元模型的网格划分,如图 2 所示.

P-L 本构模型已进行了验证,文中以此模型中的参数为标准值,研究本构模型参数对切削过程仿真的影响. 本构模型参数浮动,如表 1 所示. 表 1 中: $\eta$ 为浮动百分比;当一个参数变动时,其他参数均为标准值.

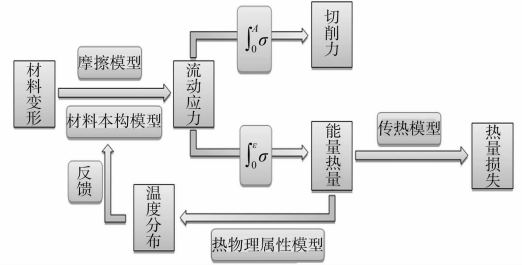


图 1 数值仿真精确建模原理图

Fig. 1 Schematic diagram of accurate modeling on numerical simulation

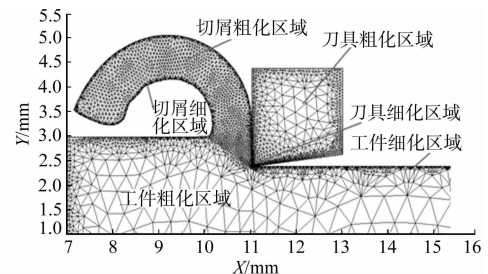


图 2 有限元模型的网格划分

Fig. 2 Mesh division of finite element model

表 1 本构模型参数浮动表

Tab.1 Changes of constitutive model parameters

材料参数	$\eta/\%$						
	-60	-40	-20	0	20	40	60
$n/10^{-2}$	1.232 8	1.849 2	2.465 6	3.082 0	3.698 5	4.314 9	4.931 3
$m/10^{-2}$	1.894 8	2.842 3	3.789 7	4.737 1	5.684 5	6.631 9	7.579 3
$\sigma_0/\text{GPa}$	0.506 4	0.759 6	1.012 8	1.266 0	1.519 2	1.772 4	2.025 6
$c_0$	0.401 2	0.601 9	0.802 5	1.003 1	1.203 7	1.404 3	1.605 0

仿真 Fe-Cr-Ni 不锈钢的车削粗加工. 工艺参数如下: 初始温度  $\theta_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ; 切削速度  $v = 40\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ; 切深 = 1 mm; 仿真切削长度 = 7 mm; 进给量 =  $0.6\text{ mm} \cdot \text{r}^{-1}$ . 刀具参数如下: 前角  $\gamma_0 = 0^\circ$ ; 后角  $\alpha_0 = 7^\circ$ ; 刃口半径  $r = 0.06\text{ mm}$ . 刀具材料选用 YG8 型硬质合金刀具.

### 3 材料本构模型参数对仿真结果的影响

#### 3.1 材料参数对刀尖温度和应力的影响

本构模型中, 4 个参数对刀尖温度( $\theta$ )和应力( $\sigma$ )的影响变化曲线, 如图 3 所示. 图 3 中: 刀尖温度是稳态时, 最高温度的平均值; 刀尖应力是最高应力前 10% 的平均值. 由图 3 可知: 随着初始应力和热软化系数数值的增加, 刀尖温度和应力增大; 而随着应变硬化系数和应变率强化系数的增加, 刀尖温度和应力减小. 由各条曲线的斜率可知: 对刀尖温度和应力影响最大的是热软化系数, 第二是初始应力, 第三是应变硬化系数, 最后是应变率强化系数. 各参数的温度、应力云图分布, 如图 4~11 所示. 由于每个参数所对应的温度、应力云图较多, 并且规律比较明显, 文中将其中对应的一 60% 和 60% 省略.

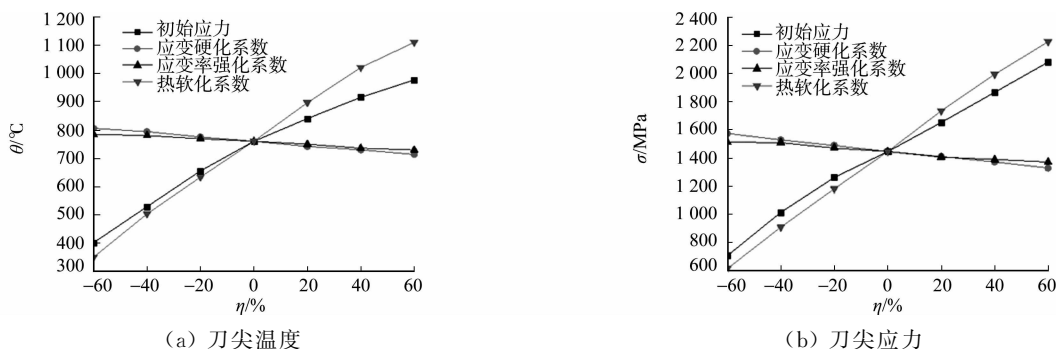


图 3 材料参数对刀尖温度和应力的影响

Fig. 3 Influence of material parameters on temperature and stress

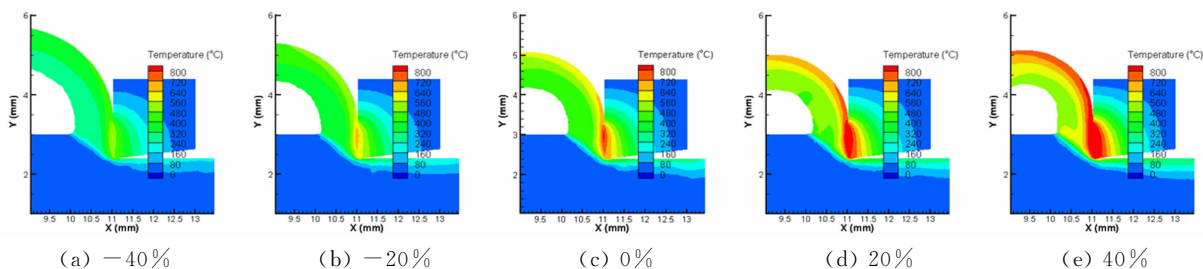


图 4 改变热软化系数对温度分布的影响

Fig. 4 Change of heat softening coefficient influence on temperature distribution

由图 4 可知: 热软化系数对温度云图影响很大. 随着热软化系数的增加, 刀具和切屑的温度不断上升, 特别是刀具和切屑接触部分, 温度更是急剧上升, 但是, 切屑的温度上升程度明显高于刀具的温度上升程度. 主要原因是大部分热量随切屑带走, 一定程度上保护了刀具.

由图 5 可知: 刀尖、后刀面和第一变形区的应力较高, 随着热软化系数的增加, 刀尖应力急剧向后刀面扩展; 同时, 第一变形区的应力也急剧升高. 原因主要是材料强度的增加加重了刀具的载荷.

由图 6 可知: 随着初始应力的增加, 切削所需能量越多, 引起刀具前刀面和切屑接触部分的温度不断上升; 相比热软化系数, 初始应力对温度分布的影响较小; 同时, 刀具前刀面的温度明显高于后刀面的

温度. 主要原因是第一第二变形区的产热量远高于第三变形区.

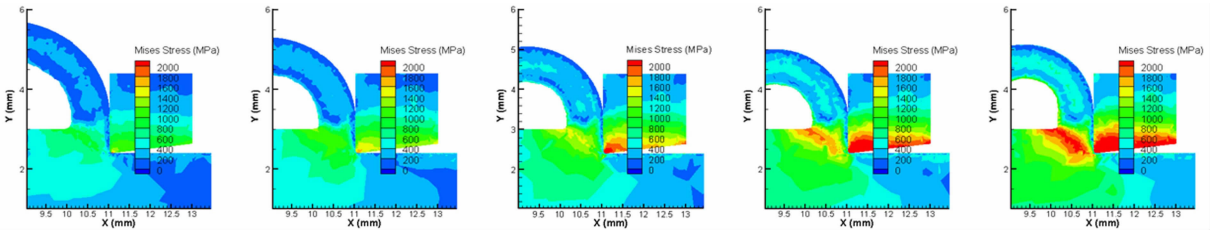


图5 改变热软化系数对应力分布的影响

Fig. 5 Change of heat softening coefficient influence on stress distribution

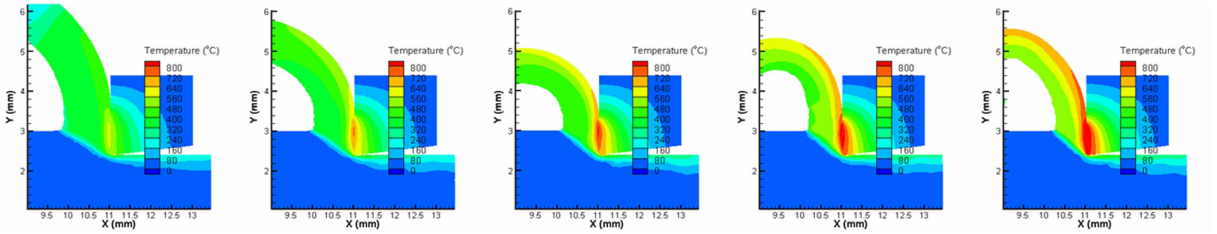


图6 改变初始应力对温度分布的影响

Fig. 6 Change of initial stress influence on temperature distribution

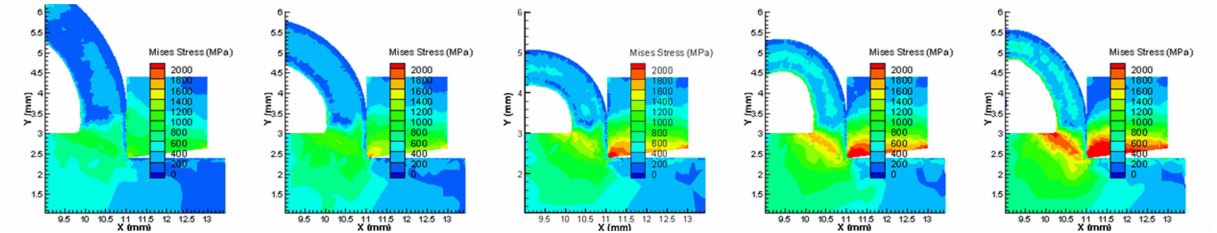


图7 改变初始应力对应力分布的影响

Fig. 7 Change of initial stress influence on stress distribution

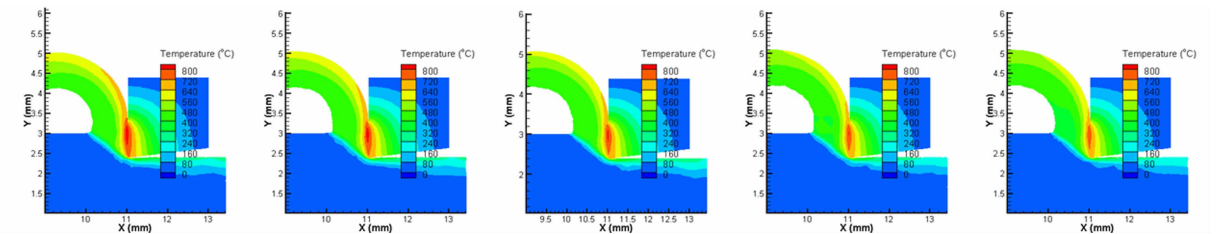


图8 改变应变硬化系数对温度分布的影响

Fig. 8 Change of strain hardening coefficient influence on temperature distribution

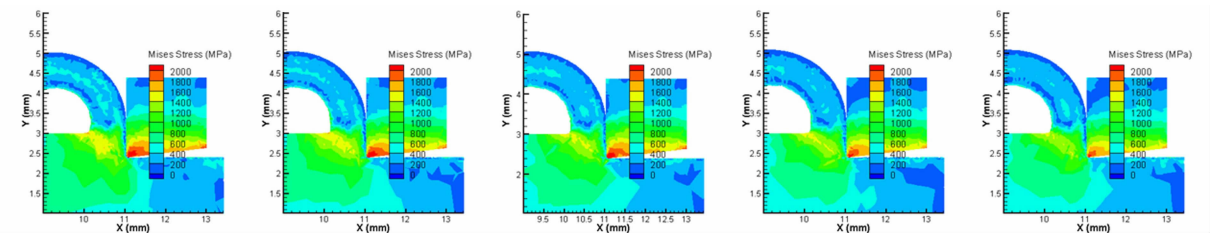


图9 改变应变硬化系数对应力分布的影响

Fig. 9 Change of strain hardening coefficient influence on stress distribution

由图7可知:随着初始应力的增加,刀尖应力不断上升并向后刀面扩展,第一变形区的应力增加,但影响程度比热软化系数小;同时,刀具的应力分布变化较明显,而对第一变形区的应力分布变化较小.



切削变形时, 应变率的增加会使材料的强度提高, 出现应变硬化现象. 同时, 由于塑性变形是一种不可逆过程, 切削时消耗的能量转变为热量. 由图 8 可知: 最高温发生在刀具与切屑接触的部位, 但应变硬化系数对温度分布影响较小, 随着应变硬化系数的增加, 刀具和切屑温度降低.

由图 9 可知: 改变应变硬化系数对应力分布影响较小. 高应力主要集中在第一变形区和刀尖处, 而刀尖处的应力高于第一变形区的应力. 这是因为刀尖处应力集中较严重. 同时, 也可以看出随着应变硬化系数的增加, 刀尖处的应力缓慢降低, 高应力区从后刀面向刀尖收缩, 第一变形区的应力也有所降低.

由图 10 可知: 因为切屑的产生及其与刀具前刀面的摩擦, 温度沿刀具前刀面向上发展; 在金属切削加工过程处于稳态时, 刀具的温度梯度比较明显, 最高温度集中刀一屑的接触面上; 同时, 应变率强化系数的变化对刀具上的温度分布和切屑区域的温度分布影响较小; 随着应变率强化系数的增加, 刀具和切屑接触部分的温度在降低.

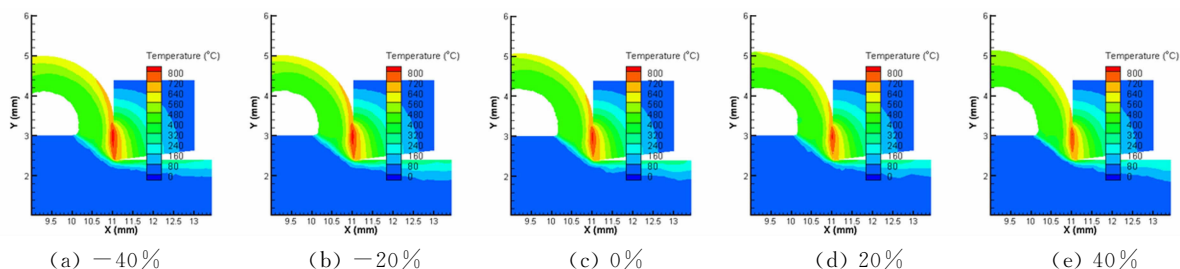


图 10 改变应变率强化系数对温度分布的影响

Fig. 10 Change of strain rate hardening coefficient influence on temperature distribution

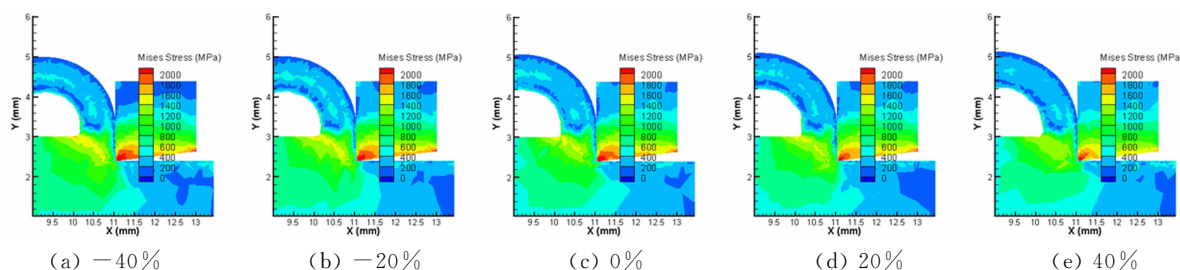


图 11 改变应变率强化系数对应力分布的影响

Fig. 11 Change of strain rate hardening coefficient influence on stress distribution

由图 11 可知: 应变率强化系数的变化对第一变形区的应力分布影响较小, 对刀尖区域应力分布影响稍微大些; 随着应变率强化系数的增加, 刀尖处应力降低, 高应力区从后刀面向刀尖处收缩, 第一变形区的应力也有所减小.

### 3.2 材料参数对切屑形貌的影响

切屑是衡量金属切削过程的又一重要指标, 其主要参数包括切屑厚度( $d$ )和切屑卷曲半径( $r$ ). 改变材料参数对切屑形貌的影响, 如图 12 所示. 由图 12 可知: 初始应力和热软化系数对切屑形貌有显著的影响; 随着初始应力和热软化系数的增加, 切屑厚度和卷曲半径随之减小, 并且初始应力对结果的影响

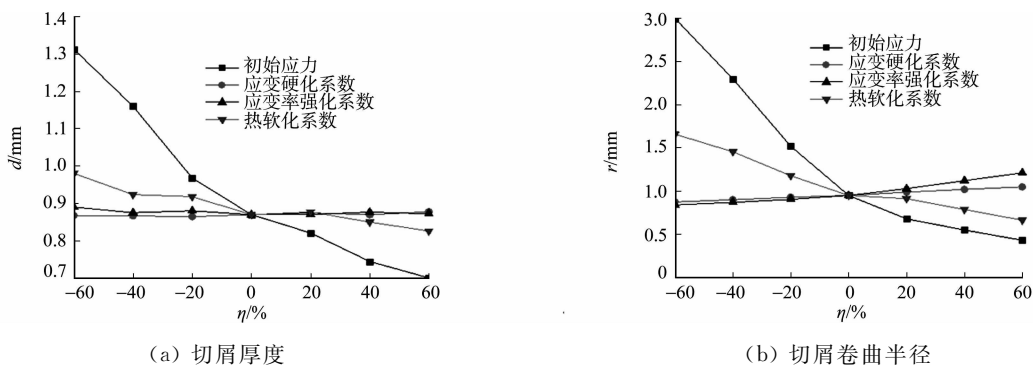


图 12 改变材料参数对切屑形貌的影响

Fig. 12 Influence of material parameters on chip morphology

更大;应变率强化系数和应变硬化系数的增加对切屑厚度的影响不大,而切屑卷曲半径有增大的趋势。

### 3.3 材料参数对切削力的影响

材料参数对切削力( $F$ )的影响,如图13所示.由图13可知:随着热软化系数和初始应力数值的增加,切削力增大;而随着应变硬化系数和应变率强化系数的增加,切削力减小.通过每条曲线的斜率得出:对切削力影响最大的是热软化系数,其次是初始应力,再者是应变硬化系数,最小是应变率强化系数.综上所述,热软化系数、初始应力、应变硬化系数和应变率强化系数对切削力、刀尖温度和刀尖应力的影响效果是一致的。

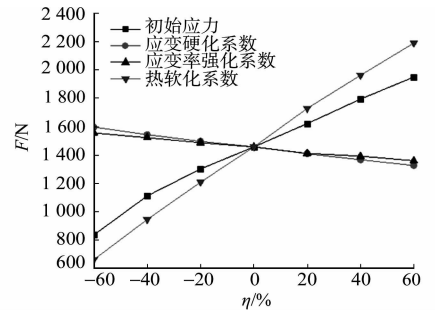


图13 材料参数对切削力的影响

Fig. 13 Influence of material parameters on cutting force

## 4 结论

研究基于 Fe-Cr-Ni 材料本构模型参数对切削数值仿真结果的影响,得到以下 3 点结论。

1) 随着初始应力和热软化系数的增加,切削力、刀尖温度和刀尖应力均增大;随着应变硬化系数和应变率强化系数的增加,切削力、刀尖温度和刀尖应力均减小;对仿真结果影响最大的参数是热软化系数,其次是初始应力,再者是应变硬化系数,而应变率强化系数则影响最小。

2) 对于切屑形貌,初始应力的影响是最明显的,第二是热软化系数,再者是应变率强化系数,应变硬化系数对切屑形貌影响最小.随着初始应力和热软化系数的增加,切屑厚度和切屑卷曲半径均减小.随着应变硬化系数和应变率强化系数的增加,切屑厚度几乎不变,卷曲半径逐渐增大。

3) 本构模型参数对仿真结果的影响体现出非线性的特点,对仿真结果影响较大的参数是初始应力和热软化系数。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Yancheng, OUTEIRO J C, MABROUKI T. On the selection of Johnson-cook constitutive model parameters for Ti-6Al-4V using three types of numerical models of orthogonal cutting[C]//15th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations. Karlsruhe: [s. n.], 2015, 31: 112-117.
- [2] ÖZEL T, KARPAT Y. Identification of constitutive material model parameters for high strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2007, 22(5): 659-667.
- [3] ZHANG Dingni, SHANGGUAN Qianqian, XIE Canjun, et al. A modified Johnson-Cook model of dynamic tensile behaviors for 7075-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619: 186-194.
- [4] JIANG Feng, LI Jianfeng, SUN Jie, et al. Al7050-T7451 turning simulation based on the modified power-law material model[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(9/10/11/12): 871-880.
- [5] 姜峰, 言兰, 徐西鹏, 等. 刀具-切屑接触区的应力分布建模方法研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(5): 188-193.
- [6] JIANG Feng, YAN Lan, RONG Yiming. Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts-simulations and experiments[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(9/10/11/12): 1555-1563.
- [7] 姜峰. 不同冷却润滑条件 Ti6Al4V 高速加工机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2009: 35-49.
- [8] 孔虎星. 钛合金高速正交切削过程的数值模拟及热力学研究[D]. 太原: 中北大学, 2012: 28-37.
- [9] 周霞, 赵昌美, 李利, 等. 基于 SHPB 实验的挤压 AZ91D 镁合金动态力学行为数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2014(8): 1968-1975.
- [10] 张东进. 切削加工热力耦合建模及其试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 9-15.
- [11] 孙玉晶. 钛合金铣削加工过程参量建模及刀具磨损状态预测[D]. 济南: 山东大学, 2014: 14-15.
- [12] YU Jianchao, JIANG Feng, RONG Yiming, et al. Numerical study the flow stress in the machining process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(1/2/3/4): 509-517.
- [13] 杨奇彪. 高速切削锯齿形切屑的形成机理及表征[D]. 济南: 山东大学, 2012: 32-33.

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605005



# 单自由度冲压机构优化设计 及其运动仿真

安淑女<sup>1</sup>, 王洪欣<sup>2</sup>

(1. 江苏建筑职业技术学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221116;  
2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 在冲压机构上定义坐标系,对冲压机构的运动学进行分析,推导出冲压机构滑块的位移、速度及加速度公式.导槽轮廓设计选择  $n$  阶贝塞尔曲线,采取优化方法得出冲压机构连杆及驱动杆的最佳尺寸.结合具体实例,在三维建模软件 SolidWorks 中构建冲压机构实体模型.采用 ADAMS 软件对其进行运动仿真,得到滑块的运动特性曲线.同时,与传统冲压机构的仿真结果进行对比分析.仿真结果显示:单自由度冲压机构滑块速度和加速度(每个周期滑块大约位于 0.3~0.7 s 的位置处)比传统冲压机构平稳,能够很好地满足深冲压模具的要求.

**关键词:** 冲压机构;单自由度;三维建模;运动仿真

**中图分类号:** TH 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0547-05

## Optimization Design and Motion Simulation for Single Degree of Freedom Stamping Mechanism

AN Shu'nyu<sup>1</sup>, WANG Hongxin<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,  
Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology, Xuzhou 221116, China;  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The coordinate system is defined on the stamping mechanism, whose kinematics is analyzed to obtain the formulas of displacement, speed and acceleration speed. The  $n$ -order Bessel curve is selected for contour design of its guide groove, and an optimization method is used to obtain the best size of the stamping connecting rod and drive rod. In combination with concrete examples, the modeling of stamping mechanism is established using three-dimensional modeling software of SolidWorks. ADAMS software is used to conduct the motion simulation to obtain movement characteristic curve of sliding blocks. Compared to the traditional simulation, the obtained simulation results show that the speed and acceleration speed of stamping mechanism unidirectional sliding blocks (the sliding block in each cycle lies about the location of 0.3-0.7 s) are steadier than traditional stamping mechanism, which can fulfill the requirements for deep stamping mould.

**Keywords:** stamping pressure mechanism; single degree of freedom; three-dimensional modeling; motion simulation

机械冲压机构的滑块运动通常很难调整.但是,在很多金属零部件的深冲压加工过程中,需要对滑块的速度及加速度进行控制,以适应不同产品加工的要求.目前,对冲压机构的研究方法有多种.于大坚

**收稿日期:** 2015-11-13

**通信作者:** 安淑女(1965-),女,副教授,主要从事机械设计与制造的研究. E-mail: anshunv1965@sina.com.

**基金项目:** 江苏省科研计划项目(11-01502);中国矿业大学科技基金资助项目(2012B008)

等<sup>[1]</sup>研究了非圆齿轮传动的精密压力机驱动机构,通过改变非圆齿轮形状改变冲压机构滑块的速度.文献[2-3]研究了八连杆冲压机构,对冲压机构的速度和功率进行优化,优化结果采用 ADAMS 进行动力学仿真.文献[4-6]研究了混合驱动冲压机构运动学的位移、速度及加速度,优化机构尺寸参数,对机构模型进行动力学仿真.文献[7-10]研究了六连杆冲压机构,构造六连杆冲压机构的简图,分析机构滑块运动过程中的位移、速度及加速度,对六连杆冲压机构进行仿真.以往研究的冲压机构大部分应用于浅冲压模具或精度不高的深冲压模具中,对于精度要求较高的深冲压机构却少有人研究.因此,本文研究了用于深冲压模具的机构,并对其动力学进行仿真.

### 1 单自由度冲压机构运动分析

单自由度冲压机构简图,如图 1 所示.该机构是电动机旋转带动驱动杆旋转,驱动杆通过三接头块与连接杆相连,连接杆通过运动带动滑块上下运动,从而实现冲压过程.驱动杆由伺服电动机和控制器驱动,电动机旋转轴上安装混合式光电码器,可以完成驱动杆位置检测.

驱动杆位置以脉冲量计算,根据计算机控制设定值(驱动杆旋转的角度)进行计算,采取 D/A 转换和放大器将信号输入到伺服电动机控制系统,完成电动机的变速控制.对驱动杆速度曲线和滚筒导槽轮廓的合理设计可以得到新的输出运动特性或提升现有的特性.

### 2 运动学分析

为了引出运动学方程,在单自由度冲压机构上定义坐标系,如图 2 所示.

#### 2.1 位置、速度及加速度分析

回路方程式可以写为

$$r_2 + r_3 - r_4 - r_1 = 0. \tag{1}$$

用一个长度  $r_i$  表示驱动杆和连杆的位置向量,用  $\varphi_i$  表示对应的旋转角度,如图 2 所示.驱动杆的长度可以表示为

$$r_2 = r_{2,0} + \Delta r_{ini} + \Delta r_2. \tag{2}$$

式(2)中: $r_{2,0}$ 是驱动杆的原始长度; $\Delta r_2$ 是驱动杆的瞬时长度调整值; $\Delta r_{ini}$ 是驱动杆的原始长度调整值.该矢量方程可分割为 X,Y 方向的标量方程,表示为

$$\left. \begin{aligned} r_2 \cos \varphi_2 + r_3 \cos \varphi_3 - r_4 \cos \varphi_4 - r_1 \cos \varphi_1 &= 0, \\ r_2 \sin \varphi_2 + r_3 \sin \varphi_3 - r_4 \sin \varphi_4 - r_1 \sin \varphi_1 &= 0. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

对式(3)两侧进行平方,整理可得

$$D \sin \varphi_3 + E \cos \varphi_3 = F, \quad A \sin \varphi_4 + B \cos \varphi_4 = C. \tag{4}$$

求解式(4)可得

$$\varphi_3 = 2 \cot \left( \frac{-D \pm \sqrt{D^2 + E^2 - F^2}}{E + F} \right), \quad \varphi_4 = 2 \cot \left( \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{B + C} \right). \tag{5}$$

式(5)中: $A = 2r_4(r_2 \sin \varphi_2 - r_1 \sin \varphi_1)$ ;  $B = 2r_4(r_2 \cos \varphi_2 - r_1 \cos \varphi_1)$ ;  $C = (r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 + r_4^2) - 2r_1 r_2 \times (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2)$ ;  $D = 2r_3(r_1 \sin \varphi_1 - r_2 \sin \varphi_2)$ ;  $E = 2r_3 \times (r_1 \cos \varphi_1 - r_2 \cos \varphi_2)$ ;  $F = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - r_4^2 - 2r_1 r_2 (\sin \varphi_1 \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2)$ .

因为  $\varphi_5 = \varphi_4 - \beta$ , 所以

$$\varphi_6 = \sec \left( \frac{r_7 - r_1 \cos \varphi_1 - r_5 \cos \varphi_5}{r_6} \right). \tag{6}$$

滑块的直线位移为

$$r_8 = r_1 \sin \varphi_1 + r_5 \sin \varphi_5 + r_6 \sin \varphi_6. \tag{7}$$

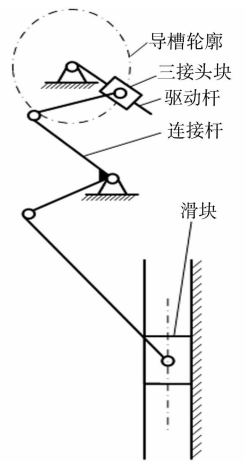


图 1 冲压机构简图  
Fig. 1 Stamping mechanism sketch

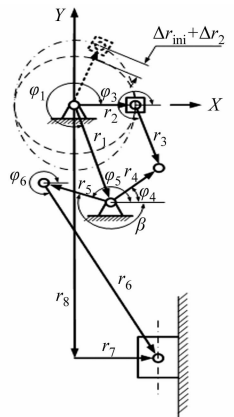


图 2 冲压机构坐标系  
Fig. 2 Stamping agency coordinates

同理, 对式(3)进行时间的微分, 可推得滑块的速度为

$$v_8 = r_5 \cos \varphi_5 \omega_5 + r_6 \cos \varphi_6 \omega_6. \tag{8}$$

对式(3)进行时间的二次微分, 可推得滑块的加速度为

$$\alpha_8 = -(r_5 \sin \varphi_5 \omega_5^2 - r_5 \cos \varphi_5 \alpha_5 + r_6 \sin \varphi_6 \omega_6^2 - r_6 \cos \varphi_6 \alpha_6). \tag{9}$$

### 2.2 驱动杆的速度曲线

假设组成机械拉伸冲压机的驱动杆是一个曲柄. 驱动曲柄的角位置由一条带有参数  $t$  的  $n$  阶贝塞尔曲线定义, 即

$$\varphi_2(t) = \sum_{i=0}^n \theta_i \cdot B_{i,n}(t). \tag{10}$$

式(10)中:  $B_{i,n}(t) = \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i}, t \in [0, 1]$ .

$\varphi_2(t)$  是一条代表驱动杆角位置由控制点  $\theta_i$  定义的贝塞尔曲线. 参数  $t$  是从 0 到 1 的变化时间. 贝塞尔曲线的  $n$  阶可微分性保证了整个运动的平滑性. 因此, 驱动杆的角速度  $\omega_2(t)$  和角加速度  $\alpha_2(t)$  可以由连续的微分方程(10)对时间求导得到, 即

$$\omega_2(t) = \frac{d\varphi_2(t)}{dt} = \sum_{i=0}^n \theta_i \cdot \frac{dB_{i,n}(t)}{dt}, \tag{11}$$

$$\alpha_2(t) = \frac{d^2\varphi_2(t)}{dt^2} = \sum_{i=0}^n \theta_i \cdot \frac{d^2B_{i,n}(t)}{dt^2}. \tag{12}$$

## 3 导槽的轮廓设计

驱动杆的瞬时长度假调整值  $\Delta r_2(t)$  和它对时间的第一阶和第二阶导数也同样可以由一条对应于驱动杆角位置的  $n$  阶贝塞尔曲线求得, 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta r_2(t) &= \sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot B_{i,n}(t), \\ \frac{d\Delta r_2(t)}{dt} &= \sum_{i=0}^n \frac{dB_{i,n}(t)}{dt}, \quad \frac{d^2\Delta r_2(t)}{dt^2} = \sum_{i=0}^n \frac{d^2B_{i,n}(t)}{dt^2}. \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

式(13)中:  $\Delta r_2(t)$  是一条代表驱动杆瞬时长度假调整值、由控制点  $\lambda_i$  定义的贝塞尔曲线.

因此, 导引槽轮廓上的第  $i$  个点的坐标可以表示为

$$p_{x,i} = (r_{2,0} + \Delta r_{ini} + \Delta r_{2,i}) \cos \varphi_{2,i}, \quad p_{y,i} = (r_{2,0} + \Delta r_{ini} + \Delta r_{2,i}) \sin \varphi_{2,i}. \tag{14}$$

式(14)中:  $r_{2,0}$  是驱动杆的原始长度;  $\varphi_{2,i}$  和  $\Delta r_{2,i}$  分别是对应于导引槽轮廓上第  $i$  个点的驱动杆的角位置和瞬时长度假调整值.

## 4 优化设计

基于运动学<sup>[11-12]</sup>分析可知, 速度曲线由变量  $\theta_0, \dots, \theta_n$  决定, 可调节驱动杆的总长由变量  $\lambda_0, \dots, \lambda_n$  和  $r_{ini}$  决定. 文中方法采用了一种优化步骤以决定所有的设计变量, 优化方程定义如下. 最小化等式为

$$f(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}, \theta_n; \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n; r_{ini}) = \sum_{i=1}^{n_i} O_i. \tag{15}$$

服从于等式约束条件和不等式约束条件为

$$c_j(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}, \theta_n; \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n; r_{ini}) = \sum_{i=1}^{n_i} O_i, \quad j = 1, \dots, n_c, \tag{16}$$

$$g_k(\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_{n-1}, \theta_n; \lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n; r_{ini}) < 0, \quad k = 1, \dots, n_g. \tag{17}$$

式(16)~(17)中:  $O_i$  是目标函数;  $n_i$  是目标函数的编号;  $n_c$  和  $n_g$  是等式约束条件和不等式约束条件的编号. 要注意的是, 等式约束条件和不等式约束条件都是在这样的情况下定义的, 即所需的输出运动特性是可以实现的.

## 5 设计实例

使用一条具有 11 个控制点的 10 阶贝塞尔曲线代表驱动杆的速度曲线和长度调节量. 可以清楚地知道,  $\theta_0, \lambda_0, \theta_n$  和  $\lambda_n$  是连续循环中的边界条件. 因此,  $\theta_0 = \theta_{\text{udc}}, \theta_n = \theta_{\text{udc}} + 2\pi, \lambda_0 = 0, \lambda_n = 0$  以保证导槽具有一个闭合的轮廓. 这里,  $\theta_{\text{udc}}$  是当滑块在上死点时对应的曲柄角度位置. 在所有的示例中, 输入曲柄的平均速度固定为  $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ .

在本例设计中, 机械冲压机构的有些尺寸是已知的, 如表 1 所示. 假设在  $t=0.3 \text{ s}$  和  $t=0.7 \text{ s}$  之间的前进冲程中, 需要恒定速度冲压加工. 设计一条速度曲线和确定驱动杆的长度, 以满足所需的运动学设计要求和使滑块的加速度峰值最小化.

表 1 压力机设计尺寸

Tab. 1 Press design size

设计变量	$r_1/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$r_3/\text{mm}$	$r_4/\text{mm}$	$r_5/\text{mm}$	$r_6/\text{mm}$	$r_7/\text{mm}$	$\beta/(\text{°})$
尺寸大小	50.1	307.9	252.2	128.8	125.9	662.1	32.1	-312.9

优化问题被定义为最小化, 即

$$f(\theta_1, \dots, \theta_9; \lambda_1, \dots, \lambda_9; r_{\text{ini}}) = a_{\text{Ram}}. \quad (18)$$

服从于

$$\left. \begin{aligned} c_1(\theta_1, \dots, \theta_9) &= \omega_2(0) - \omega_2(1) = 0, \\ c_2(\theta_1, \dots, \theta_9) &= \alpha_2(0) - \alpha_2(1) = 0, \\ c_3(\theta_1, \dots, \theta_9; \lambda_1, \dots, \lambda_9; r_{\text{ini}}) &= s(t_a) = s_{\text{max}}, \\ g_1(\lambda_1, \dots, \lambda_9; r_{\text{ini}}) &= (\Delta r + r_{\text{ini}} + r_2) < l_{\text{max}}, \\ g_2(\lambda_1, \dots, \lambda_9; r_{\text{ini}}) &= (\Delta r + r_{\text{ini}} + r_2) > l_{\text{min}}, \\ g_3(\theta_1, \dots, \theta_9; \lambda_1, \dots, \lambda_9; r_{\text{ini}}) &= \int_{t=t_{\text{ds}}}^{t=t_{\text{de}}} |v(t) - v(t_{\text{ds}})| dt - \epsilon_v < 0. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式(18), (19)中:  $a_{\text{Ram}}$  是滑块的线性加速度;  $s$  是滑块的线性位置;  $s_{\text{max}}$  是滑块最大线性位置;  $t_a$  是时间;  $l_{\text{max}}$  和  $l_{\text{min}}$  是驱动杆的最大和最小连杆长度, 该驱动杆满足格拉霍夫定律, 即“驱动杆当作曲柄”;  $v$  是滑块的线性速度;  $t_{\text{ds}}$  和  $t_{\text{de}}$  是一个特殊区域的开始和结束时间;  $\epsilon_v$  是一个小数.

本例中, 驱动杆的速度曲线和瞬时长长度调整值的优化控制点, 如表 2~3 所示.

表 2 驱动杆速度曲线控制角度

Tab. 2 Drive rod speed curve control angle

设计变量	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$
尺寸大小	40.0	95.3	74.8	172.2	233.5	211.7	233.2	296.4	321.5

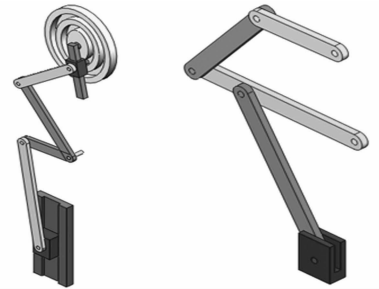
表 3 驱动杆长度控制点

Tab. 3 Drive rod length control point

设计变量	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$	$\lambda_7$	$\lambda_8$	$\lambda_9$	$\Delta r_{\text{ini}}$
尺寸大小	-1.44	-22.10	-35.20	-1.54	20.20	20.20	20.20	8.30	8.40	9.98

通过设计变量和优化尺寸创建冲压机构三维实体模型, 以及文献[8]的三维实体模型, 如图 3 所示.

将三维实体模型导入到 ADAMS 软件中进行运动仿真. 同时, 将文中输入的仿真结果与文献[8]进行了对比, 如图 4 所示. 图 4 中:  $s$  为滑块位移;  $v$  为滑块速度;  $a$  为滑块加速度. 运动仿真结果显示, 文中优化设计后的冲头速度、加速度(每个周期滑块大约位于  $0.3 \sim 0.7 \text{ s}$  的位置处)比文献[8]相对平稳, 此优点对于高精深冲压模具特别有益. 同时, 在电动机转速固定的某个值时, 通过调节驱动杆尺寸, 形成滑块不同的速度和加速度, 从而满足不同



(a) 文中模型 (b) 文献[8]模型

图 3 三维实体模型

Fig. 3 Three dimensional solid model

冲压模具件的要求.

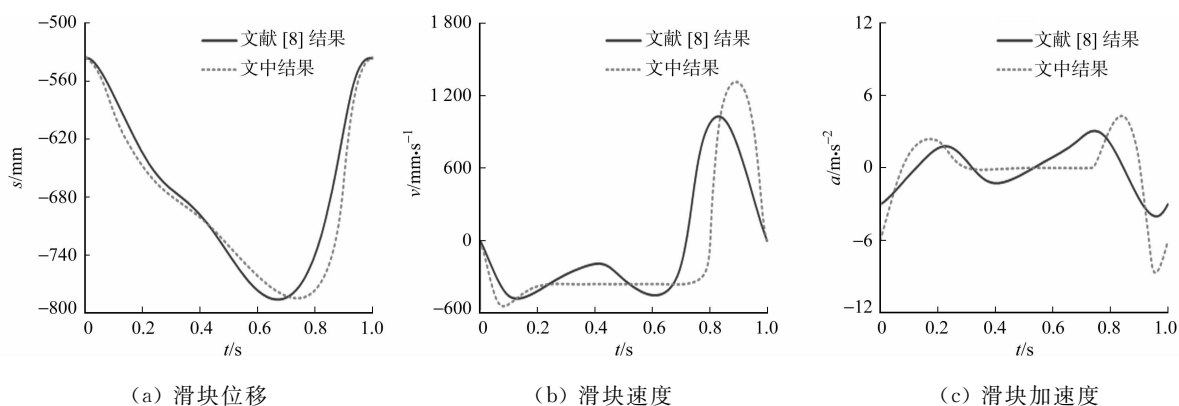


图 4 滑块运动仿真曲线

Fig. 4 Slide motion simulation curve

## 6 结束语

对单自由度冲压机构进行优化设计,得出驱动连杆运动的最佳尺寸,借助 SolidWorks 三维软件构造冲压机构实体模型.采用 ADAMS 软件对冲压机构进行动力学仿真.仿真结果显示,单自由度冲压机构在深冲压运动过程中(每个运动周期内,滑块大约运动到 0.3~0.7 s 的位置处),速度和加速度上下波动较小,振动较小,运动相对平稳,能够很好地满足深冲压模具的要求.因此,该冲压机构冲压的零部件精度较高,在精密冲压件中具有一定的应用价值,为冲压机构的深入研究提供了参考.

### 参考文献:

- [1] 于大坚, 邬义杰, 王彬, 等. 基于非圆齿轮传动的精密压力机驱动机构设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(12):13-17.
- [2] 白育全, 文学洙. 基于 ADAMS 的八连杆冲压机构的优化设计[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2015, 41(2):175-178.
- [3] SOONG R C, CHANG S B. Simulation and optimization of eight-bar linkage press mechanism using variable length driving links[J]. Mechanism and Machine Theory, 2011, 46(7):1696-1706.
- [4] 陈文, 傅蔡安. 混合驱动冲压机构的运动学分析及参数优化[J]. 机床与液压, 2011, 39(7):111-113.
- [5] 傅蔡安, 陈文. 混合输入冲压机构的运动学分析及参数优化[J]. 中国机械工程, 2011, 22(6):666-670.
- [6] 刘波. 混合驱动九连杆冲压机构的研究[D]. 太原:中北大学, 2013:32-45.
- [7] 宋梅利, 范元勋, 祖莉. 基于 ADAMS 的六连杆冲压机构的仿真优化设计[J]. 南京理工大学学报, 2006, 30(3):285-287.
- [8] SOONG R C. An adjustable six-bar mechanism with variable input speed for mechanical forming presses[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2010, 32(4):458-466.
- [9] 王淑坤. 平面六杆压力机构的优化设计[J]. 机械研究与应用, 2003, 16(4):20-21.
- [10] 谢慧萍, 季英瑜. 基于 ADAMS 软件的六连杆冲压机构的优化设计[J]. 轻工机械, 2009, 27(2):47-50.
- [11] 席晓燕. 金属成形加工机械执行机构的仿真与动力学分析[J]. 包装工程, 2015, 36(7):48-54.
- [12] 刘波, 梅瑛, 李瑞琴. 平面双曲柄冲压机构刚柔耦合模型的动态仿真[J]. 机械传动, 2012, 36(12):68-71.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605006



# 地震波输入角度对钢网格盒式束筒结构响应的影响

杨志勇, 马克俭, 孙敬明

(贵州大学 空间结构研究中心, 贵州 贵阳 550003)

**摘要:** 为研究空间钢网格盒式束筒结构在地震作用下的弹塑性性能, 采用 ETABS 有限元软件建立数值模型. 通过改变地震波输入角度, 对钢网格盒式束筒结构进行罕遇地震作用下弹塑性时程分析. 从结构顶点时程位移、基底剪力、层间扭转角及各构件塑性发展进行对比分析, 寻求对结构不利的地震波输入角度. 分析结果表明: 坐标轴方向并不是地震波作用的最危险方向, 与结构  $X$  轴成  $45^\circ$  左右的方向对该结构的影响最大; 盒式束筒结构抗震防线明确, 具有良好的抗震性能.

**关键词:** 不同角度; 地震波; 盒式束筒结构; 弹塑性时程分析

**中图分类号:** TU 973      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0552-06

## Effects of Seismic Wave Input Angle on Response of Steel Grid Cassette Bundled Tube Structure

YANG Zhiyong, MA Kejian, SUN Jingming

(Space Structure Research Center, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** In order to study the elastic and plastic properties of space steel grid cassette bundled tube structures under the earthquake action, the numerical model was established using ETABS software. The elastic-plastic time-history analysis of the structures under rare earthquake action was performed with different input angles of seismic waves. The analysis results including structural top displacement, the base shear force, floor displacement angles and plastic development of components are compared to find unfavorable seismic wave input angle against structure. Analysis results show: the most unfavorable direction of the earthquake actions is not the  $X$  axis, but is the angle of  $45^\circ$  to  $X$  axis; the cassette bundle tube structure has good seismic performance.

**Keywords:** different angles; seismic waves; cassette bundled tube structure; elastic-plastic time history analysis

空间钢网格盒式束筒结构体系是一种由网格式框架、协同式钢空腹夹层板和核心筒剪力墙构成的新型结构体系. 该结构体系具有良好的空间受力性能, 建筑功能和空间能够灵活划分, 目前该结构主要应用于大跨空间结构、高层及超高层建筑结构中<sup>[1]</sup>. Lu 等<sup>[2]</sup>研究了钢-混凝土组合结构在改进塑性铰方法作用下, 结构前、后屈服行为的非线性分析. Jeyarajan 等<sup>[3]</sup>研究了钢-混凝土组合框架结构在柱失稳情况下的一些加强措施. 余德冕等<sup>[4]</sup>研究了空间钢网格盒式“筒中筒”结构在水平力作用下产生的剪力滞

**收稿日期:** 2016-05-08

**通信作者:** 马克俭(1934-), 男, 教授, 院士, 主要从事大跨度、高层及超高层空间结构的研究. E-mail: makejian2002@163.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50978064/E080502); 贵州大学研究生创新基金资助项目(2015025)



后效应, 讨论了墙架刚度、角柱刚度对该结构体系剪力滞后效应的影响. 王建硕等<sup>[5]</sup>研究了空间钢网格式结构不规则楼板分别在刚性楼板假定和弹性楼板假定下板的应力集中现象. 本文拟建空间钢网格式高层束筒结构, 建立数值模型对其进行动力弹塑性时程分析.

## 1 结构数值分析模型

以某拟建工程为例, 共 30 层, 标准层层高为 3.1 m, 总高度为 93 m, 建筑平面尺寸为 32.5 m×32.5 m, 内核心筒尺寸为 8.0 m×8.0 m, 平面尺寸及核心筒大小满足 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》<sup>[6]</sup>和 JG J3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[7]</sup>. 假设防烈度为 7°(0.10 g); 地震组为第一组; 场地类别为 II 类; 场地特征周期为 0.35 s; 结构阻尼比为 4%; 地面粗糙类别为 B 类; 基本风压为 0.35 Pa; 楼面附加恒载(自质量除外)为 1.5 Pa, 楼面活荷载为 3.5 Pa(考虑隔墙线荷载折算面荷载); 空腹 T 型梁截面尺寸为 100 mm×150 mm×8 mm×12 mm. 根据组合梁中的规定, 考虑两侧混凝土板的刚度贡献, 按照抗弯刚度相等原则<sup>[1,8]</sup>, 将空腹 T 型梁折算为截面尺寸为 330 mm×150 mm×8 mm×12 mm 的 H 型钢. 钢网格式框架沿楼层层高划分为 3 小层, 每小层层高由住宅的窗户高度来控制, 层高分别为 800, 1 500, 800 mm. 钢梁、钢柱采用 Q345, 核心筒钢筋采用 HRB 400, 混凝土强度分别采用 C35, C30, 楼板混凝土强度均为 C30, 钢筋采用 HRB 400. 数值模型主要截面尺寸, 如表 1 所示. 模型结构平面图, 如图 1 所示.

表 1 主要截面构件尺寸  
Tab. 1 Sections of main members

构件类型	截面尺寸/mm	构件类型	截面尺寸/mm
框架柱 1	H450×400×14×24	剪力墙 1	300
框架柱 2	H400×350×13×22	剪力墙 2	250
框架柱 3	H350×300×12×20	剪力墙 3	220
框架柱 4	H300×300×11×18	剪力墙 4	200
楼层框架梁	H300×200×8×14	层间框架梁	H200×100×6×9

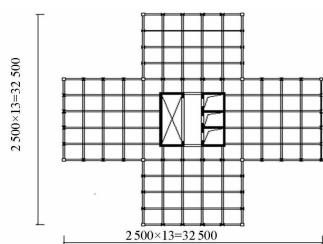


图 1 平面布置图(单位: mm)  
Fig. 1 Planlayout (unit: mm)

## 2 动力弹塑性分析

### 2.1 非线性材料的定义<sup>[9-12]</sup>

ETABS 有限元软件中提供了按照中国规范规定的非线性材料本构关系. 根据文献<sup>[12]</sup>ETABS 软件中默认的混凝土本构模型, 钢材及钢筋采用双折线模型, 在进行动力弹塑性分析之前, 需要定义材料的本构关系和恢复力模型, 混凝土采用 Takeda 模型, 钢筋与钢材都采用随动硬化模型.

### 2.2 塑性铰指定及分层壳定义<sup>[13-14]</sup>

数值模型中的梁、柱采用框架单元, 钢框架梁考虑弯曲屈服而产生的塑性铰, 在两端指定默认 M3 型铰, 混凝土连梁的塑性铰指定与钢框架梁相似, 都采用默认的 M3 型铰, 不同的是需将连梁的配筋面积输入到连梁的框架属性当中, 钢框架柱考虑轴力与弯矩的作用, 两端设置默认 P-M2-M3 型铰, 如图 2 所示.

ETABS 软件中, 对剪力墙的模拟采用分层壳单元. 分层壳在厚度方向上允许存在任意数量的层, 每层都具有独立的位置、厚度及材料. 因此, 可以用分层壳模拟混凝土剪力墙中的混凝土、水平和竖向钢筋. 具有分层截面属性的壳单元可以考虑线性、非线性、混合材料行为. 对每层选择一个材料、材料角及每层的平面内应力-应变关系分别对应是线性\非线性\无效.

### 2.3 地震波的选取

结构的弹塑性时程反应根据输入地震波的不同, 计算分析结果相差较大<sup>[15-16]</sup>. 为了使弹塑性时程分析结果能够真实反映出结构的动力响应及构件变形, 应该合理选取地震波. 根据《建筑抗震设计规范》及

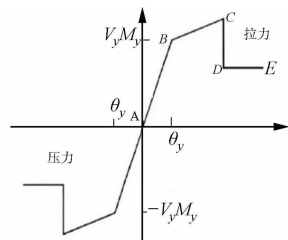


图 2 剪力和弯矩及 PMM 的耦合铰默认属性  
Fig. 2 Hinge default properties of shear force, bending moment and PMM coupling

条文说明规定,选取两条天然波与一条人工波,并将选取的地震波输入 ETABS 软件进行弹性时程计算.将弹性时程结果与反应谱结果进行对比,计算结果如表 2 所示.表 2 中: $V_d$  为基底剪力.数值模型中选取的 3 条地震波时程曲线,如图 3 所示.图 3 中: $a$  为加速度; $t$  为时间.

由表 2 可知:在两条天然波和一条人工波的弹性时程作用下,基底剪力均位于反应谱计算结果的 65%~135%之间;在 3 条地震波弹性时程作用下,基底剪力的平均值均大于反应谱计算结果的 80%,且小于 120%.因此,选取的 3 条地震波均满足规范要求.将选取的地震波按照规范的要求根据设防烈度调至罕遇地震  $220 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,并且分别进行了 X、Y 方向的地震响应时程分析.为了确保地震波的实用性,在

表 2 地震波与反应谱计算结果对比

Tab. 2 Calculation results of seismic waves and response spectra

地震波名	$V_d/\text{kN}$	
	X 方向	Y 方向
Chi-Chi	2 713.576 7	2 959.363 6
Northridge	2 858.042 8	3 684.259 0
RH4TG035	3 088.281 9	3 455.859 4
平均值	2 886.633 8	3 366.494 0
反应谱计算值	2 790.790 1	3 044.082 5

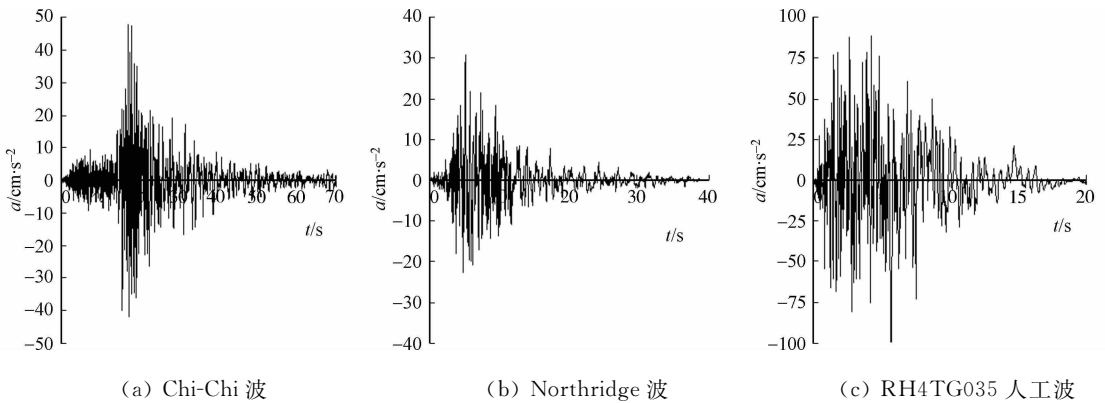


图 3 地震波时程曲线

Fig. 3 Time history curves of seismic wave

进行动力弹塑性之前,对所选择的地震波通过 Seismo Signal 软件进行傅里叶变换.

将地震波主波与规范的反应谱在结构的主要振型周期进行对比,如图 4 所示.图 4 中: $\eta$  为地震影响系数; $t$  为时间.由图 4 可知:前 3 阶周期相差不到 20%,吻合程度很好.

### 3 动力弹塑性分析结果

#### 3.1 顶点位移时程曲线

盒式束筒结构分别在  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  输入地震波的地震作用下的弹塑性分析顶点位移时程曲线,如图 5,6 所示.图 5,6 中: $s$  为位移; $\omega$  为地震波输入角度; $s_{\max}$  为最大顶点位移.在地震波作用初期,结构处于弹性阶段,材料刚度和强度没有退化,无论地震波与 X 轴成  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  输入,还是与 X 轴成  $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ$  输入,结构沿 X、Y 向的顶点位移相差较小.由图 5 可知:由于结构两个方向的刚度不同,随着地震波作用的持续进行,地震波与 X 轴成  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  方向输入时,结构 X 方向弹塑性反应的最大时程位移分别为 210.7, 155.6, 95.6, 50.8, 67.4, 121.2, 178.4 mm; Y 方向弹塑性反应的最大时程位移分别为 181.6, 228.4, 260.5, 279.5, 275.5, 242.9, 212.5 mm.由图 6 可知:结构 X 方向的顶点位移随地震波作用的角度增大,先减小后增大,在地震波 X 轴方向输入时达到最大值 210.7 mm,则说明该数值模型在地震波 X 方向作用时,结构 X 向为薄弱方向;结构 Y 方向的顶点位移随地震波作用的角度增大,先增大后减小,在地震波与 X 轴成  $45^\circ$  方向输入时达到最大值 275.5 mm,而并不在 Y 轴方向输入达到最大值,说明该数值模型在地震波与 X 轴成  $45^\circ$  方向时,结构 Y 向为薄弱方向;结构两个方向的顶点均远小于《高规》

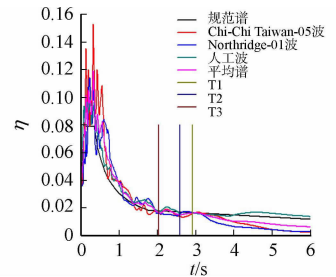


图 4 反应谱对比图

Fig. 4 Comparison of the design response spectrum

所规定的位移限制 775 mm,说明盒式束筒结构具有良好的抗侧刚度。

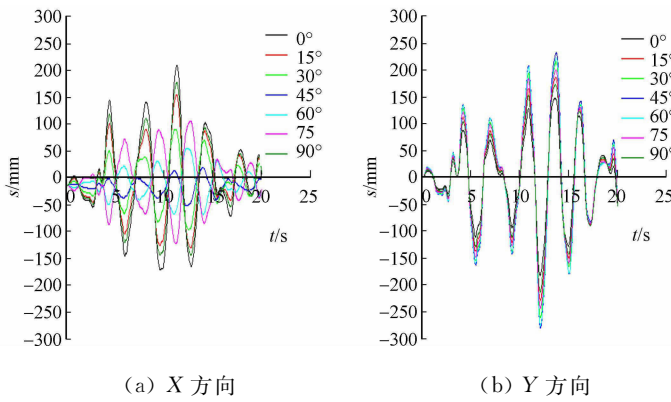


图 5 位移时程曲线

Fig. 5 Time history curves of displacement

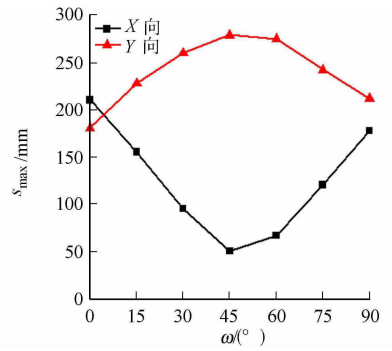


图 6 最大顶点位移随地震波作用变化

Fig. 6 Maximum top displacements for different seismic waves

### 3.2 基底剪力时程曲线

盒式束筒结构分别在 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°方向输入地震波时,双向地震作用下的弹塑性分析基底剪力时程曲线,如图 7 所示.由图 7 可知:地震波作用初期,结构处于弹性阶段,整个结构的刚度和强度还未退化,结构 X,Y 向的基底剪力大小基本相同.由于结构两个方向的刚度不同,随着地震波作用的持续进行,地震波与 X 轴成 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°方向输入时,结构 X 方向弹塑性反应的最大基底时程剪力分别为 8 534. 717, 6 451. 443, 3 931. 585, 1 275. 306, 2 414. 603, 5 023. 373, 7 304. 383 kN; Y 方向弹塑性反应的最大基底时程剪力分别为 11 403. 667, 13 959. 492, 15 949. 337, 16 952. 326, 16 847. 001, 15 558. 936, 13 068. 39 kN.

最大基底剪力,如图 8 所示.图 8 中:  $V_{d,max}$  为基底最大剪力.由图 8 可知:结构 X 方向的基底剪力随地震波作用的角度增大,先减小后增大,在地震波与 X 轴成 45°方向输入时达到最小值 1 275. 306 kN,则说明该数值模型在地震波 X 轴成 45°方向作用时,结构 X 向刚度分担的基底剪力最小;而结构 Y 方向的顶点位移随地震波作用的角度增大,先增大后减小,在地震波与 X 轴成 45°方向输入时达到最大值 16 952. 326 kN,而并不在 Y 轴方向输入时达到最大值,说明该数值模型在地震波与 X 轴成 45°方向作用时,结构 Y 向刚度分担的基底剪力最大.

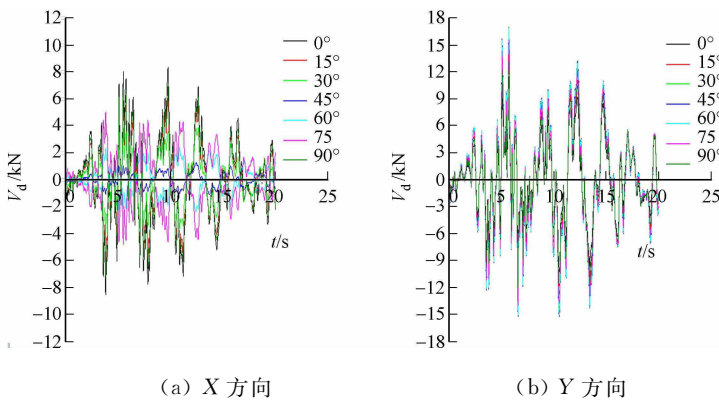


图 7 结构基底剪力时程曲线

Fig. 7 Structural base shear force time history curves

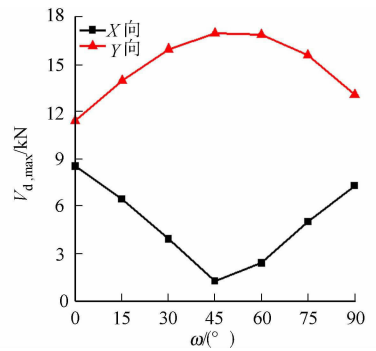


图 8 最大基底剪力随地震波作用变化

Fig. 8 Maximum base shear forces for different seismic waves

### 3.3 层间位移角

盒式束筒结构分别在 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°方向输入地震波时,地震波在双向地震作用下的弹塑性分析层间位移角曲线,如图 9 所示.图 9 中:  $f$  为楼层;  $\theta$  为层间位移角;  $\theta_{max}$  为最大层间位移角.由图 9 可知:由于结构两个方向的刚度不同,地震波与 X 轴成 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°方向输入时,结构 X 方向弹塑性反应的最大层间位移角分别为 1/326, 1/448, 1/774, 1/1532, 1/1122, 1/613, 1/388, 分

别出现在结构的第 14, 14, 14, 7, 8, 9, 14 层; Y 方向弹性反应的最大层间位移角分别为 1/480, 1/387, 1/343, 1/330, 1/332, 1/361, 1/415, 均出现在结构的第 24 层。

最大层间位移角, 如图 10 所示。由图 10 可知: 结构 X 方向的层间位移角随地震波作用的角度增大而先减小后增大, 在地震波与 X 轴成 45° 方向输入时达到最大值 1/1532, 则说明该数值模型在地震波 X 轴成 45° 方向作用时结构 X 向影响最小; 而结构 Y 方向的层间位移角随地震波作用的角度增大, 先增大后减小, 在地震波与 X 轴成 45° 方向输入时达到最大值 1/330, 而并不在 Y 轴方向输入达到最大值, 说明该数值模型在地震波与 X 轴成 45° 方向作用时对结构 Y 向最不利。在盒式束筒结构中, 根据《抗规》规定筒中筒结构的弹塑性层间位移角限值为 1/120, 由此可见, 结构在与 X 轴成 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90° 不同角度的罕遇地震作用下, 弹塑性反应的最大层间位移角均满足规范 1/120 的要求, 表明该结构具有良好的抗扭刚度和抗侧刚度。

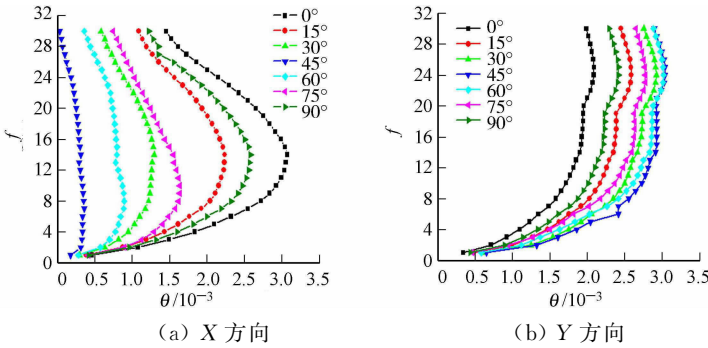


图 9 结构层间位移角曲线  
Fig. 9 Curves of structural layer drift angle

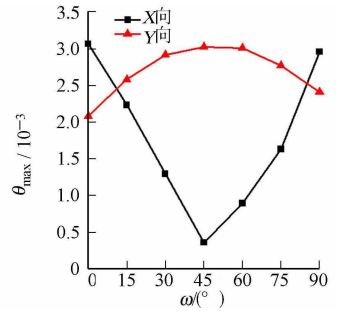
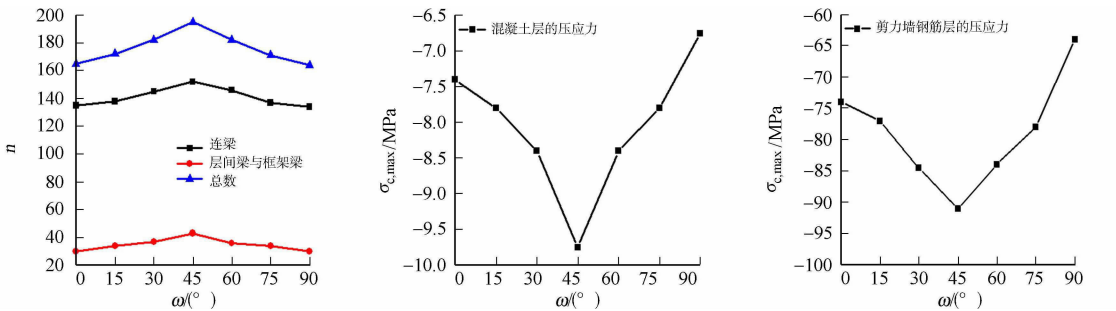


图 10 最大层间位移角随地震波作用变化  
Fig. 10 Maximum layer drift angles for different seismic waves

### 3.4 结构的力学特性及塑性发展

由于结构在不同角度的地震波作用下, 结构各构件的塑性发展顺序相似, 结构振动特性未出现的差异, 仅在结构的变形与结构损伤程度上存在着不同。结构在地震波作用下, 核心筒连梁两端发生剪切破坏, 出现剪切铰, 说明核心筒连梁首先起到消耗地震能量的作用, 使得剪力墙不会过早发生破坏。核心筒底部、角部及变截面楼层底部位置为剪力墙抗剪薄弱部位, 随着地震波的输入, 这部分的混凝土最先进入塑性状态, 即混凝土层压应力达到屈服状态。随着混凝土层达到极限状态, 由混凝土层承担的力转向钢筋层。紧接着网格格式框架中的层间梁开始出现塑性铰, 层间梁作为结构外围钢网格筒的第一道防线。首先, 消耗地震能量, 此后, 楼层框架梁开始出现塑性铰, 至此弹塑性时程分析结束, 结构的框架柱未出现塑性铰。综合所述, 结构中各构件屈服顺序依次是: 核心筒连梁、剪力墙、网格格式框架层间梁、楼层框架梁、框架柱。结构在不同角度的地震作用下结构各构件的塑性发展特点, 如图 11 所示。



(a) 梁塑性铰数量图 (b) 剪力墙混凝土层最大压应力 (c) 剪力墙竖向钢筋层最大压应力  
图 11 不同角度地震波作用下结构塑性发展特点

Fig. 11 Structural plastic development characteristics under seismic wave actions of different angles

图 11 中:  $n$  为塑性铰的数量;  $\sigma_{c,max}$  为混凝土的最大压应力;  $\sigma_{s,max}$  钢筋的最大压应力。由图 11(a) 可知: 结构梁构件的塑性铰的数量随地震波作用的角度增大, 先增大后减小, 在地震波与 X 轴成 45° 方向输入时梁的塑性铰数量达到最大值, 说明结构在此方向地震波作用下影响最大。由图 11(b) 可知: 剪力

墙混凝土层最大压应力随地震波作用的角度增大,先增大后减小,在地震波与 $X$ 轴成 $45^\circ$ 方向输入时达到最大值 $9.75\text{ MPa}$ ,说明此方向地震作用下,剪力墙混凝土层承担的压应力最大.由图11(c)可知:剪力墙竖向钢筋层最大压应力随地震波作用的角度增大,先增大后减小,在地震波与 $X$ 轴成 $45^\circ$ 方向输入时达到最大值 $91.1\text{ MPa}$ ,说明此方向地震作用下,剪力墙竖向钢筋层承担的压应力最大.综合上述,坐标轴方向并不是地震波作用的最危险方向,而是与结构 $X$ 轴成 $45^\circ$ 左右方向对该结构的影响最大.

## 4 结论

1) 地震波沿不同角度输入对结构的顶点位移、基底剪力、层间位移角影响十分明显,根据计算结果,对结构 $X$ 向最危险的地震波作用方向为 $X$ 轴,对结构 $Y$ 向最危险的地震波作用方向为与结构 $X$ 轴成 $45^\circ$ 角左右.在结构设计中,可以合理的调整结构的强度分配和刚度分布,在一定程度上能够控制结构在地震作用下的弹塑性反应.

2) 通过结构塑性发展规律可知:盒式束筒结构各构件屈服顺序依次为连梁、剪力墙、层间梁、楼层框架梁、框架柱.结构在罕遇地震下,连梁先发生屈服,核心筒底部、角部及变截面楼层底部位置混凝土和竖向钢筋均受压屈服,但受拉屈服部位面积较小,未出现严重破坏,外框架柱未出现塑性铰,处于弹性状态,满足性能目标的要求.因此,盒式束筒结构在罕遇地震下具有良好的抗震性能,满足大震不倒的抗震设防标准和结构抗震设计性能.

3) 盒式束筒结构在不同角度的地震作用下结构各构件的塑性发展特点:结构梁构件的塑性铰的数量、剪力墙混凝土层最大压应力、剪力墙竖向钢筋层最大压应力随地震波作用的角度增大而先增大后减小,在地震波与 $X$ 轴成 $45^\circ$ 方向输入时达到最大值,说明坐标轴方向并不是地震波作用的最危险方向,而是与结构 $X$ 轴成 $45^\circ$ 角左右方向对该结构的影响最大.

## 参考文献:

- [1] 马克俭,张华刚,郑涛.新型建筑空间网格结构理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2005:209-214.
- [2] LU C K. Nonlinear analysis for the pre-and post-yield behavior of a composite structure with the refined plastic hinge approach[J]. Journal of Constructional Steel Research,2016,119:1-16.
- [3] JEYARAJAN S,RICHARDLIEW J Y,KOH C G. Enhancing the robustness of steel-concrete composite buildings under column loss scenarios[J]. International Journal of Protective Structures,2015,6(3):529-550.
- [4] 余德冕,马克俭,张华刚.新型超高层装配整体钢网格式“筒中筒”混合结构力学特性及其剪力滞后效应[J].空间结构,2014,20(2):2-8.
- [5] 王建硕,马克俭,申波,等.装配整体式空间钢网格式结构住宅平面不规则楼板的研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2015,32(1):103-107.
- [6] 中华人民共和国建设部.建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:8-9.
- [7] 中华人民共和国建设部.高层建筑混凝土结构技术规程:JG J3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:11-12.
- [8] 孙涛.现浇石膏外墙多高层钢网格式节能住宅结构体系研究[D].天津:天津大学,2012:31-32.
- [9] 北京金土木软件技术有限公司.ETABS中文版使用指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2004:114-118.
- [10] 单孟硕,张晓光,何诚.某超高层结构罕遇地震弹性时程分析[J].结构工程师,2014,30(2):84-89.
- [11] 王彪.平面不规则结构的抗震性能及消能减震分析[D].合肥:安徽建筑大学,2015:24-25.
- [12] 袁泉,杨年祥.混凝土本构关系对抗震性能评估影响[J].科学技术与工程,2011,18(11):4254-4257.
- [13] 孙若飞.高烈度地区钢框架-核心筒混合结构抗震性能分析[D].昆明:昆明理工大学,2014:61-64.
- [14] DAGHER A M. Non-linear pushover analysis of flatslab building by using SAP2000[J]. European Journal of Civil Engineering and Architecture,2013,10(1):8-15.
- [15] 杨志勇,黄吉锋,邵弘.弹性与弹塑性动力时程分析方法中若干问题探讨[J].建筑结构学报,2008(6):213-217.
- [16] 尧国皇,王卫华,陈宜言.超高层钢框架-核心筒结构弹塑性与弹性时程分析结果对比研究[J].北京工业大学学报,2013,39(4):529-535.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605007



# 轨道交通项目安全事故 发生趋势和诱因分析

许娜

(中国矿业大学 工程管理研究所, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 通过现场调研及资料查阅,搜集整理 2003—2015 年我国 167 个城市轨道交通项目安全事故的资料.从百公里事故起数和死亡人数的角度揭示了安全事故发生的时间趋势:2008 年是我国轨道交通建设安全事故由高转低的拐点,2014 年事故呈抬头趋势,需警惕.以轨迹交叉理论为指导进行分析,结果表明:一般性安全事故的主要诱因为人和管理因素;坍塌事故的主要诱因为环境因素;物体打击和高空坠落事故的主要诱因为人的因素.

**关键词:** 轨迹交叉论; 安全事故; 统计分析; 城市轨道交通项目; 事故诱因

**中图分类号:** TU 714      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0558-06

## Analysis of Occurrence Tendency and Cause of Safety Accidents in Urban Rail Transit Project

XU Na

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** 167 safety accidents of rail transit project in China during the year 2003—2015 were collected by site investigation and reference review. The development tendency and cause analysis on accidents were discussed by statistical analysis. The time tendency of accident occurrence was revealed by the accident number and deaths per one hundred kilometers. The results show that the rail transit construction accidents start to decrease in the year 2008, but and in 2014 the accidents trend raises slightly which should be concerned closely. Based on the track cross theory, the main causes of general accidents are related to human and management factors, the cause of the collapse accidents are mostly related to environment factors, and the objects strike accidents and high altitude fall accidents are often related to by human factors.

**Keywords:** track cross theory; safety accident; statistical analysis; urban rail transit project; accident incidence

我国城市轨道交通建设正处于高速发展时期,发展规模和速度与管理能力和技术力量不足的矛盾日益凸显,导致施工过程中安全事故发生率居高不下,重大事故时有发生.除直接导致巨额的财产损失和人员伤亡外,往往给社会造成很大的负面影响.未来几年我国城市轨道交通建设仍将保持大规模快速发展的趋势,施工安全和风险防控是目前工程建设的重中之重.为了借鉴城市轨道交通项目施工安全工作的惨痛教训,更好地研究我国城市轨道项目安全生产的现状,本文对安全事故发生趋势、安全事故类

**收稿日期:** 2016-03-15

**通信作者:** 许娜(1982-),女,讲师,博士,主要从事轨道交通项目管理和风险的研究. E-mail: xuna@cumt.edu.cn.

**基金项目:** 住建部科技基金资助项目(R32016036)

型、事故诱因进行了多角度分析。

## 1 研究现状和分析方法

### 1.1 研究现状

轨道交通建设项目的施工安全涉及范围广、影响因素复杂,因此,相关文献多基于某种特定工程环境或角度进行施工安全分析和事故预防。Marcoulaki 等<sup>[1]</sup>利用贝叶斯方法对某项目的事故发生频率、恢复时间及人员损失进行了分析,以评估影响安全事故的因素。刘纪峰等<sup>[2]</sup>对福州地铁1号线埋深范围内存在的较厚层典型软土的工程性质及其施工扰动后对底层环境的影响进行了针对性分析。除此之外,还有一些文献关注地铁施工安全事故的局部统计。周红波等<sup>[3]</sup>重点对国内52例城市轨道交通项目施工基坑事故进行了统计分析。李小浩等<sup>[4]</sup>针对2008—2009年国内的地铁施工事故进行了不完全统计分析,提出了诱发地铁施工事故的重大原因,主要包括外界原因、设计原因和施工原因3个方面。目前,我国轨道交通项目的规划和施工已在全国范围内近60个城市全面展开,积累了大量安全事故的案例和数据,但这些数据并没有得到充分利用。目前,对轨道交通项目安全事故发生规律的统计研究较少,代表性的文献和主要研究结论,如表1所示。文献在大量事故数据的基础上运用分类统计的方法,通过定性分析得出事故发生的规律和特征。通常以事故发生起数、死亡人数作为统计指标,按照事故发生的时间、区域、事故类型的维度进行统计分析,以柱状图、折线图或饼状图等统计图表进行展示,其统计指标和维度具有一定的可借鉴性。

表1 轨道交通项目安全事故统计的代表性文献分析

Tab. 1 Representative reference analysis of rail transit safety accident statistics

研究范围	主要结论
1999—2008年的126起地铁施工安全事故 <sup>[5]</sup>	1) 按城市分布统计事故起数和伤亡人数:北京、上海和广州次数最多;杭州、广州和上海的受伤人数最多;杭州、北京和深圳的死亡人数最多 2) 按施工工法统计事故起数:明挖法事故数最多,明挖法和盾构法共占总事故的80%以上 3) 按事故类型统计事故起数:坍塌事故数,尤其深基坑(槽)施工中的土石方坍塌事故数最多
2001—2011年的89起地铁隧道施工安全事故 <sup>[6]</sup>	1) 按事故类型统计事故起数和死亡人数:坍塌、物体打击、高处坠落占事故数40%,坍塌事故单次死亡人数最多 2) 按事故发生位置统计事故起数:区间事故数远超车站事故数 3) 按年份统计事故起数和死亡人数:2009年出现拐点,得益于风险管理的加强
2003—2010年的118起地铁施工安全事故 <sup>[7]</sup>	1) 逐年统计事故起数、死亡比率、受伤比率:2009年出现拐点,其原因是风险管理理念在加强 2) 按城市分布统计事故起数、死亡人数、受伤人数:北京、深圳、南京次数最多;北京、杭州、深圳死亡人数最多;西安、北京、南京受伤人数最多 3) 按事故类型统计事故起数、死亡人数、受伤人数:塌陷、坍塌、火灾是事故和死亡的主要原因 4) 按事故类型统计事故起数、死亡人数、受伤人数在北京和深圳的分布:塌陷和坍塌类型占北京事故总量的45%,占深圳事故总量的61%

轨道交通项目安全事故统计的代表性文献分析有以下3点不足之处。

- 1) 统计区间集中在1999—2011年,数据较陈旧,且2009年出现事故起数下降和伤亡下降的拐点的结论还需要最近几年的数据佐证。
- 2) 统计指标以事故起数、伤亡人数为主,较为单一,未考虑各年份因里程数不同而带来的差异。
- 3) 统计维度以时间、城市、事故类型为主,缺乏对事故诱因的深入分析及相应的风险防范对策。

### 1.2 分析方法

1) 以我国在2003—2015年发生的167起轨道交通建设的安全事故资料作为统计样本。事故资料来源于实地调研、国家安全生产监督管理总局网站、住房和城乡建设部事故快报网站、已公开发表的论文文献及事故调查报告等。

2) 由于统计的局限性,部分事故未能统计在内,尤其是没有造成人员伤亡的事故多数未能纳入统计,这些事故引发的损失相对较小,因此,不作为重点分析对象。

3) 除事故起数、死亡人数外,增加百公里事故起数和死亡人数的统计指标,以便更准确反映我国轨

道交通项目施工安全管理的效果和现状。

4) 以轨迹交叉论为指导,从事故类型和诱因分析的视角,分析影响我国轨道交通工程施工安全的关键性风险因素,为政府部门和相关建设单位科学制定风险防范措施提供建议。

## 2 安全事故发生趋势分析

### 2.1 安全事故随年份的趋势分析

自2003年以来,我国轨道交通项目平均每年发生事故13起,平均每年因事故死亡15.2人,每起事故平均死亡1.2人。安全事故起数和死亡人数的趋势,如图1所示。图1中: $n$ 为数量。

由图1可知以下3点结论。

1) 事故的发生起数和死亡人数紧密相关,这虽和统计样本选取的局限性有关,但也从侧面反映出轨道交通项目安全事故的发生往往伴随人员伤亡和大量经济和社会损失,需要给予高度重视。

2) 2003—2009年事故起数逐渐增长,在2009年达到巅峰,此后,2010—2015年稳定在每年约12.5起,说明由于近年来我国颁布了多个轨道交通建设的法规和条例,安全事故起数显著下降,安全管理初见成效。

3) 2003—2008年死亡人数波动较大,在2008年达到最高值。2008年死亡人数突增,是由于2008年杭州地铁1号线湘湖站及湘滨区间发生坍塌导致死亡21人,属于个案,但这次重大安全事故掀起了各地安全风险管理的热潮,此后,安全事故和死亡人数均大幅降低。此外,2014年出现3起较大安全事故,导致出现了死亡人数的2次高峰,这与较长时间内安全事故减少,安全风险意识懈怠有关。

### 2.2 百公里事故起数及死亡人数的趋势分析

为进一步分析我国轨道交通项目的安全管理现状,将安全事故起数和死亡人数按百公里里程数进行统计,如图2所示。由图2可得到如下3点主要结论。

1) 2007—2008年是我国轨道交通项目百公里事故数和死亡人数的转折点,之后一直保持约每百公里5起事故、5人死亡的事故频率。这和图1的结论不谋而合,进一步说明了2008年是我国轨道交通项目安全管理的重要转折时间。

2) 在2009年后,轨道交通建设规模大幅增加,但并没有引起安全事故的突增,体现出我国轨道交通建设安全管理水平较2007年以前有了较大的提升。

3) 2013—2014年,百公里事故的发生频率略有抬头趋势,值得警惕,现阶段更需要加强安全风险管理的意识,不能麻痹放松。

## 3 安全事故类型分析

参照GB 6441—1986《企业职工伤亡事故分类》,对安全事故类型分别按照发生起数和死亡人数进行统计。结果表明:无论是从事故发生数量还是死亡人数所占的比例,坍塌、物体打击、高处坠落都是依次排在前3位,这3类事故占事故数量的70%,死亡人数占73%。因此,要重点加强这3类事故的风险管理,这与表1的统计结论基本一致。

提取2011—2015年的事故类型进行分析,结果表明:坍塌、物体打击、高处坠落的事故起数和死亡人数依然远超其他事故类型,占事故数量的68%,占死亡人数的75%。说明近5年的高发事故类型依旧为坍塌、物体打击、高处坠落,还需进一步加强施工安全风险防控,落实针对性的风险应对措施。由于坍

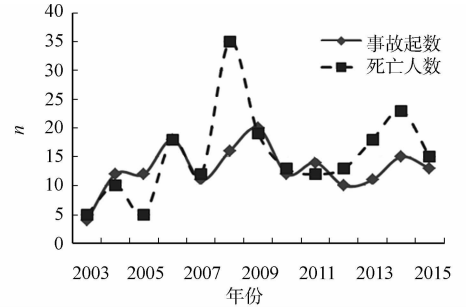


图1 安全事故和死亡人数趋势图  
Fig. 1 Tendency of safety accidents and death number

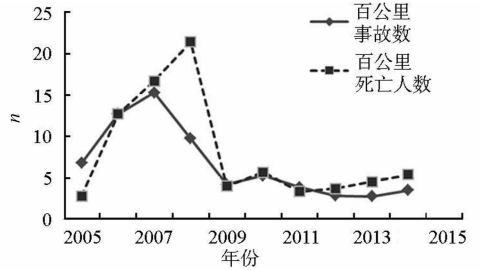


图2 百公里发生起数和死亡人数趋势图  
Fig. 2 tendency of safety accidents and deaths per one hundred kilometers



塌、物体打击、高处坠落这3类事故的发生频率和死亡人数远远高于其他事故类型. 因此, 将其归类为高发事故类型.

## 4 安全事故发生诱因分析

### 4.1 轨迹交叉论

轨迹交叉论是一种从事故的直接和间接原因出发研究事故致因的理论. 在系统中, 人的不安全行为是一种人因失误, 物的不安全状态多为机械故障和物的不安全放置, 人与物两系统一旦发生时间和空间上的轨迹交叉就会造成事故<sup>[8]</sup>. 就轨道交通建设项目而言, 虽然诱发安全事故的潜在风险众多且覆盖范围广, 但触发安全事故发生的直接(最主要)原因往往只有2个: 人的不安全行为和物的不安全状态. 结合轨迹交叉论, 将轨道交通项目安全事故的发生过程描述为: 基本原因→间接原因→直接原因→事故→伤害<sup>[9-10]</sup>, 并将发生诱因划分为人的因素、物的因素、管理因素和环境因素<sup>[11]</sup>. 其中, 人的因素主要是指工人的施工操作; 物的因素主要是指设备材料等的不当存放等; 管理因素和人的因素可能会引发人的不安全行为; 环境因素和物的因素可能会造成物的不安全状态.

### 4.2 发生诱因的分析

为提取出引发安全事故的直接原因, 根据167起安全事故的调查报告按照事故最直接、最主要的发生诱因进行单因素分类, 如图3所示. 由图3可以知道: 人的因素是直接造成安全事故的主要原因(38%); 其次是环境因素(30%), 管理因素(22%)和物的因素(11%); 而造成死亡的主要原因是管理因素(35%)和人的施工操作(33%). 这说明人的不安全行为(包括人的因素和管理因素)是轨道交通项目施工安全最大的风险来源.

1) 人的因素. 现场施工的作业人员未能遵守劳动操作规程和施工规范, 因违章操作、疲劳作业或者操作不慎而引发安全事故, 尤其是物体打击事故、触电事故、车辆伤害, 以及机具伤害事故的发生.

2) 管理因素. 主要体现在施工方案不合理、现场安全防护措施不到位、围护或支撑结构失稳等, 多导致坍塌事故和高处坠落事故. 虽然因管理因素作为直接原因引发的安全事故比例不大, 但几乎每一起安全事故的背后都有管理不到位的间接原因. 更需警惕的是, 管理上的欠缺往往会引发重大、较大安全事故, 造成大量人员伤亡. 例如, 2008年杭州地铁重大安全事故就和专项施工方案不合理、过程监管不到位息息相关.

3) 环境因素. 不利的地质条件、阴雨天气、周边管线漏水等环境因素最容易带来渗水或局部沉降, 从而引发坍塌安全事故. 例如, 2015年深圳地铁7号线就是因为盾构机在填仓换刀过程中, 由于局部沉降, 上部供水管断裂, 泥水涌入盾构机仓导致地面塌陷, 造成1人死亡, 3人受伤.

4) 物的因素. 包括材料和设备两个方面, 风险隐患主要为材料堆放不合理、材料性能破坏、设备故障等, 常常导致物体打击和机具伤害事故.

### 4.3 高发事故类型的诱因分析

1) 坍塌事故诱因分析. 坍塌事故诱因统计图, 如图4所示. 由图4可知: 环境因素是引发坍塌事故的主要直接原因, 往往带来大面积塌方和较大的经济损失. 管理因素则更易导致重、特大坍塌事故, 导致大量人员伤亡和舆论关注. 因此, 防范坍塌事故的重点应聚焦于提升安全管理水平、做好安全防护及跟踪监测环境变化.

2) 物体打击事故诱因分析. 物体打击事故诱因统计图, 如图5所示. 图5中:  $\eta$  为比率. 由图5可知: 引起物体打击事故的主要原因是作业人员安全意识薄弱、违章操作、疲劳作业等, 此类事故往往直接导致作业人员死亡, 基本为一般安全事故. 此外, 材料和设备的存放和保管也是引发物体打击事故的重要因素. 因此, 物体打击事故的防范要重点关注作业人员的安全教育和培训、安全交底, 以及加强材料设备的存放和管理.

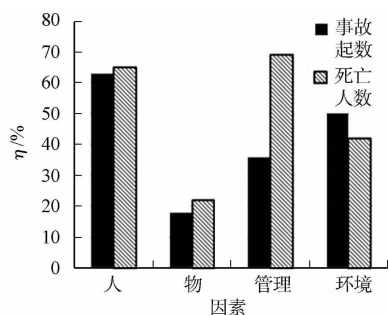


图3 发生诱因统计图

Fig. 3 Statistics of accident causes

3) 高处坠落事故诱因分析. 高处坠落事故的原因较为单一, 即作业人员安全意识缺乏和现场安全防护不到位, 常导致作业人员死亡, 造成一般性安全事故.

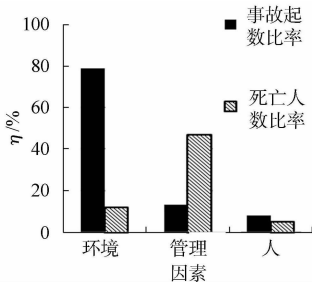


图4 坍塌事故诱因统计图

Fig. 4 Statistics of collapse accident causes

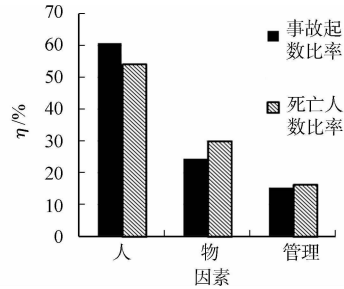


图5 物体打击事故诱因统计图

Fig. 5 Statistics of object strike accident causes

## 5 轨道交通项目安全事故风险防范

我国轨道交通建设项目截止目前虽未发生特大事故, 但一般性事故较多, 且现阶段绝不可因事故数减少而麻痹放松. 根据轨迹交叉论, 防止安全事故发生的根本途径就是控制和消除施工过程中人与物两系统的轨迹交叉.

### 5.1 杜绝人的不安全行为

根据安全事故发生诱因的分析结果, 人的不安全行为是造成安全事故的主要原因(人的因素占38%, 管理因素占22%), 是诱发安全事故的最重大风险源.

工人违章操作或操作失误, 极易引发物体打击、触电、机具伤害事故, 主要有如下3点建议: 1) 分层次做好安全教育, 提高从业人员的整体素质, 尤其是基层从业人员, 以及文化层次低、专业技能差的人群; 2) 坚持持证上岗制度, 对危险性较大的工序(如机械操作、特种作业等)选择素质较高的从业人员; 3) 做好安全技术交底, 对安全操作规程和注意事项等落实到位.

参建单位的质量安全主体责任落实不到位, 间接引发安全事故. 建议从两个层面解决: 1) 各参建单位时刻保持高风险管理意识, 树立以人为本、安全发展的理念, 创新安全管理的模式, 并将之渗透到每一位参建人员, 尤其是现场的管理和作业人员; 2) 建立全过程安全风险控制体系, 引入全面风险管理的理念和方法, 通过规避和控制风险降低安全事故发生的几率, 包括健全安全风险防控制度体系、实施全过程风险分级动态管理、完善和创新风险防控机制等.

### 5.2 消除人和物的轨迹交叉

根据安全事故发生诱因的分析结果, 物的因素仅占11%, 说明物的因素并非引发轨道交通项目安全事故的主要风险源. 但根据轨迹交叉论, 防止施工过程中人和物不安全因素的轨迹交叉是预防安全事故的关键. 因此, 从消除人和物的轨迹交叉的角度, 提出如下2点风险防范建议.

1) 在编制施工组织设计和危险性较大的分部分项工程专项施工方案时, 尽可能避免在施工作业面上人和物的交叉作业. 例如, 在工期允许的情况下安排依次或者流水作业, 少采用大规模的平行作业等.

2) 严格现场的安全文明施工管理, 尽量避免从业人员的冗余行动路线及现场材料设备的无序使用, 做到安全防护措施到位.

### 5.3 高发事故风险防范建议

高发事故类型包括坍塌、物体打击及高处坠落. 应建立和落实企业标准和专项风险应急预案, 在参建企业内部落实《城市轨道交通工程周边环境调查指南》、《城市轨道交通建设工程质量安全事故应急预案管理办法》等文件. 针对每个将建项目制定专门的坍塌、物体打击及高处坠落事故风险管控专项方案. 此外, 坍塌事故的事故起数和死亡人数均为轨道交通项目安全事故之首, 多由环境因素和管理因素共同引发, 建议将其风险防控延伸至勘察和设计阶段, 包括以下3点内容.

1) 对工程影响范围内的周边环境、工程地质水文条件进行全面核查和必要的补充工作, 并对地下空洞情况进行专项普查.

2) 进行施工安全设计交底, 并根据施工图设计文件、现场环境与地质条件、施工工艺设备及施工经

验等进行设计安全性核查。

3) 结合施工工艺、工序和施工经验水平等,深入识别工程自身风险和環境风险因素,编制风险清单及风险分级应对方案,风险清单原则上考虑到工点(车站、区间)的各个单元。

## 6 结论

对2003—2015年我国城市轨道交通建设项目的167个安全事故进行统计分析,从不同角度揭示了安全事故发生的趋势,提出了引发安全事故的主要诱因,主要有如下5个结论。

1) 2007—2008年是我国轨道交通建设项目安全事故发生的转折点,2008年后安全事故的发生较为稳定。

2) 2014年以来,百公里事故起数和死亡人数有抬头趋势,现阶段依然要紧抓安全不能放松。

3) 坍塌、物体打击、高处坠落事故起数和死亡人数远超其他事故类型,需要特别关注,包括建立专门的风险清单、风险监控体系及风险应急预案等。

4) 人的因素和管理因素是引发安全事故的最主要诱因。坍塌事故往往由环境因素和管理因素共同引发,物体打击事故多由作业人员的违章操作和材料设备的不安全存管造成,高处坠落事故通常因人的安全意识和现场防护不足引发。

5) 从杜绝人的不安全行为、消除人和物的轨迹交叉、高发事故风险的角度进行原因分析,提出相应的风险防控建议,包括加强安全教育培训、提高风险管理意识、建立全过程安全风险控制体系等方面。

上述结论补充和完善了现有基于统计分析的轨道交通建设项目安全事故发生规律的研究,希望对我国轨道交通建设项目规范和标准制定提供指导,推动各参建单位提高安全风险管理水平,降低我国轨道交通项目的安全事故发生率。由于篇幅的局限性,未能统计分析轻伤害及无伤害安全事故。此外,在安全事故的诱因分析方面还需要进一步研究多种风险因素的耦合和共同作用。

### 参考文献:

- [1] MARCOULAKI E C, KONSTANDINIDOU M, PAPA ZOGLOU I A. Bayesian tools for the prediction of occupational accident statistics based on safety performance indicators[C]//Steenbergen RDJM, VanGelder PHAJM, Miraglia S, Vrouwenvelder ACWMT Safety, Reliability and Risk Analysis: Beyond the Horizon, Amsterdam: CRC Press-Taylor and Francis Group, 2014: 1457-1464.
- [2] 刘纪峰,李雄润,陈福星.福州地铁1号线典型软土的工程性质[J].华侨大学学报(自然科学版),2015,36(1):91-96.
- [3] 周红波,蔡来炳,高文杰.城市轨道交通车站基坑事故统计分析[J].水文地质工程地质,2009,2(2):67-71.
- [4] 李小浩,宋永发.CIM模型在地铁施工安全风险评估中的应用[J].工程管理学报,2010,24(5):513-516.
- [5] 邓小鹏,李启明,周志鹏.地铁施工安全事故规律性的统计分析[J].统计与决策,2010,9(9):87-89.
- [6] 胡群芳,秦家宝.2003—2011年地铁隧道施工事故统计分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(3):705-710.
- [7] 李凤伟,杜修力,张明聚.地铁工程建设施工事故统计分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(2):474-479.
- [8] 景国勋,施式亮.系统安全评价与预测[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009:34.
- [9] 王洪林.城市轨道交通项目施工风险管理研究[D].徐州:中国矿业大学,2014:44.
- [10] 贾宝山,尹斌,王翰钊,等.煤矿安全状态的突变理论评价模型及其应用[J].中国安全科学学报,2015,25(6):98-104.
- [11] 周洁静.地铁施工项目风险评价研究[D].大连:大连理工大学,2009:11,18.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605008



# 三阶段 DEA 的区域建筑业 碳排放效率评价

陈钢, 祁神军, 张云波, 刘兵

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为剔除环境因素和随机误差对区域建筑业碳排放效率评价结果的影响,采用三阶段数据包络法(DEA)对区域建筑业碳排放效率进行评价.以非期望产出的建筑业碳排放替代建筑业能源消耗作为投入指标,并将能源结构系数作为环境变量,建立基于三阶段 DEA 的区域建筑业碳排放效率评价模型.以 2003—2012 年区域建筑业碳排放进行实证分析,研究表明:规模效率偏低是区域建筑业碳排放综合效率不高的主要原因;经济发达程度与建筑业碳排放技术效率相关性不大,但经济欠发达地区建筑业碳排放的规模效率普遍较低;建筑业碳排放冗余最为显著,累计冗余率达到 0.38.

**关键词:** 碳排放效率; 建筑业; 数据包络分析; 规模效率; 综合效率; 碳排放冗余

中图分类号: TU 723

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2016)05-0564-06

## Study of Carbon Emission Efficiency of Construction Industry Based on Three-Stage Data Envelope Analysis Model

CHEN Gang, QI Shenjun, ZHANG Yunbo, LIU Bing

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to eliminate the influences of the environmental factors and random error on the construction industry of carbon emission efficiency evaluation results, the technique of three-stage-DEA (data envelope analysis) model was introduced to evaluate the carbon emission efficiency of regional construction. Regarding the unexpected output of construction industry carbon emission as the input index to replace the energy sources consumption, and introducing the coefficient of the energy structure, the construction carbon efficiency evaluation model was established based on a three-stage DEA model. The construction carbon emission in different provinces from 2003 to 2012 was analyzed. The results show that the low scale efficiency is the main reason that causes the low comprehensive efficiency of regional construction; there is a little correlation between carbon emission efficiency of regional construction and economic level, but the scale efficiency in underdeveloped areas is generally low; the carbon emission redundancy of the construction is the most significant, and the accumulative redundancy rate reaches 0.38.

**Keywords:** carbon emission efficiency; construction industry; data envelope analyse model; scale efficiency; comprehensive efficiency; carbon emission redundancy

为实现巴黎气候大会中将温度升高控制在 2 °C 之内的目标,作为负责任的发展中国家,我国减排责

收稿日期: 2015-12-28

通信作者: 祁神军(1982-),男,副教授,博士,主要从事低碳建筑的研究. E-mail: qisj972@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(71303082); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1400204041)

任重大. 建筑业具有高能耗、高污染的特点. 减少建筑业能源浪费、提高碳排放效率对实现建筑业减排目标至关重要. 而地域经济发展的不平衡及自然资源的先天差异导致我国建筑业碳排放效率地域差异显著<sup>[1]</sup>, 存在建筑业减排效率较低的问题<sup>[2]</sup>, 因此, 效率因素也被认为是减少我国建筑业 CO<sub>2</sub> 排放的最大贡献者<sup>[3]</sup>, 有必要对建筑业碳排放效率展开分析. 数据包络法(data envelope analyse, DEA)是一种非参数的相对效率评价方法, 适用于多投入产出指标的相对效率评价<sup>[4]</sup>, 具有数据非量纲化的优点<sup>[5]</sup>, 在建筑业碳排放效率评价中得到应用. 文献<sup>[6-7]</sup>构建了 CCR-DEA 的建筑业能源效率评价模型, 但忽视了 CO<sub>2</sub> 对社会造成的负面效益. 尽管冯博等<sup>[8]</sup>将 CO<sub>2</sub> 作为非期望产出, 但在建筑业总资产中重复计算了机械设备; 祁神军等<sup>[9]</sup>将建筑业总资产扣除了机械设备, 但忽视了建筑业碳排放量与能源消耗量的相关性, 且没有考虑环境因素和随机误差对建筑业碳排放效率评价的影响, 可能影响碳排放的效率评价. 三阶段 DEA 能够剔除环境因素和随机误差对决策单元效率评价结果造成的误差<sup>[10]</sup>, 而被应用于区域能源效率分析<sup>[1, 11-13]</sup>. 建筑业外部环境复杂, 传统碳排放效率评价结果受到环境因素干扰<sup>[14]</sup>, 迫切需要运用三阶段 DEA 模型对建筑业碳排放效率展开分析. 鉴于此, 本文探索性地将三阶段 DEA 模型引入到区域建筑业碳排放效率评价中.

## 1 基于三阶段 DEA 的建筑业排放效率评价模型

### 1.1 三阶段 DEA 模型

三阶段 DEA 模型包括传统 DEA 模型、SFA(stochastic frontier analysis)多元回归模型及调整后的 DEA 模型.

1.1.1 传统 DEA 模型 CCR-DEA 模型是 DEA 的基本模型, 在规模报酬不变的前提下, 对决策单元的综合效率展开评价. 在 CCR-DEA 模型基础上增加  $\sum \lambda_j^* = 1$  的约束, 演变成 BCC-DEA 模型, 旨在规模报酬可变的前提下, 对决策单元的技术效率和规模效率展开评价.

BCC-DEA 模型分为投入导向型和产出导向型两种. 其中, 投入导向型可以反映在产出不变和相对效率提升的情形下投入指标的减少量和减少率. 在区域建筑业总产出规模不变条件下, 为了直观反映建筑业碳排放效率评价模型的投入指标冗余及冗余率, 选择投入导向型 BCC-DEA 模型.

1.1.2 SFA 多元回归模型 多元回归模型构建为

$$s_{n,i} = f^n(z_i; \beta^n) + v_{n,i} + u_{n,i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, I. \quad (1)$$

式(1)中:  $n$  为投入指标;  $i$  为决策单元;  $s_{n,i}$  为第  $i$  个决策单元的第  $n$  个投入指标的松弛变量;  $z_i = [z_{1,i}, z_{2,i}, \dots, z_{k,i}]$  中  $k$  为环境变量的个数;  $z_{k,i}$  为第  $i$  个决策单元的第  $k$  个环境变量;  $\beta^n$  为待估参数;  $f^n(z_i; \beta^n)$  为环境变量与待估参数的函数关系.

$\epsilon_i = v_{n,i} + u_{n,i}$  为综合误差项, 其中,  $v_{n,i}$  为统计误差;  $u_{n,i}$  为管理无效率.

1.1.3 调整后的 DEA 模型 将调整后的投入指标和初始产出指标作为 DEA 的投入产出指标, 重新计算各决策单元的效率. 将决策单元置于最差条件下<sup>[15-16]</sup>, 对投入指标进行调整, 即

$$X_{n,i}^* = X_{n,i} + [\max(z_i \beta_n) - z_i \beta_n] + [\max(v_{n,i}) - v_{n,i}]. \quad (2)$$

式(2)中:  $X_{n,i}^*$  为调整后的投入指标;  $X_{n,i}$  为初始投入指标;  $[\max(z_i \beta_n) - z_i \beta_n]$  表示调整环境因素影响, 将所有决策单元置于最差的公平环境中;  $[\max(v_{n,i}) - v_{n,i}]$  表示调整随机误差项, 将所有决策单元置于随机误差最大条件下.

### 1.2 建筑业碳排放的非期望产出及处理方法

非期望产出是指在决策单元的生产关系中客观存在, 但造成负效益的产出. 非期望产出越小, 越符合生产者的利益要求<sup>[17]</sup>. 因此, 建筑业碳排放是建筑业的非期望产出. 目前, 非期望产出处理方法中, 碳排放作为投入法<sup>[11]</sup>忽视了建筑业碳排放和能源消耗之间的相关性. 线性函数转化法<sup>[12]</sup>改变数据间的相对数值关系. 因此, 探索性地以建筑业碳排放量替代能源消耗作为投入指标, 直观分析建筑业的碳排放效率现状. 为了消除建筑业碳排放与能源消耗之间的差异对建筑业碳排放效率评价的影响, 引入能源结构系数. 能源结构系数是碳排放量与能源消耗标准煤的比值, 主要由区域性建筑业能源结构及能源碳排放系数共同决定, 对建筑业碳排放量的影响不受主观控制. 因此, 以能源结构系数为环境变量, 采用三阶

段 DEA 模型剔除环境影响因素对效率评价结果的影响。

### 1.3 基于三阶段 DEA 模型的建筑业碳排放效率评价指标

1.3.1 投入产出指标 一般产业部门投入资本、劳动力及能源进行生产活动,同时排放  $\text{CO}_2$ <sup>[11]</sup>,在此基础上,应结合建筑业的自身特性,确定建筑业的投入产出指标.因此,选取机械设备、资本存量、劳动力、建筑业碳排放为投入指标,选取经济产出、施工面积为产出指标。

1) 机械设备. 机械设备对建筑业生产有显著影响,是建筑业的重要投入要素之一. 选取各省当年年初和年末建筑业机械设备总功率的均值作为机械设备的投入量。

2) 资本存量. 以资本存量与机械设备之差作为投入指标。

3) 劳动力. 选取各省建筑业当年的平均从业人员作为劳动力的投入量,即以年初从业人员数和年末从业人员数平均值表示。

4) 建筑业碳排放. 以建筑业碳排放为投入指标<sup>[18]</sup>。

5) 经济产出. 以建筑业 GDP 为经济产出。

6) 施工面积. 考虑到所分析的碳排放为直接碳排放<sup>[18]</sup>,主要由施工建造阶段产生,所以选用施工面积为产出指标。

1.3.2 环境变量 环境变量是指对决策单元产生影响,但不在主观控制范围内的外生变量. 建筑业主要受企业所有权属性、人口密度、区域经济及能源结构系数的影响,因此将以上指标确定为环境变量。

1) 所有权属性. 所有权属性是影响建筑业生产的制度因素,一方面所有权属性不同,生产积极性和资源投入浪费状况不一样;另一方面,国有企业会更加贯彻国家节能减排政策。

2) 人口密度. 人口密度越大,对建筑业需求越高,建筑业的规模及产值越大,越有利于建筑业发展。

3) 区域经济. 地区建筑业必然受到区域经济发展水平影响,区域经济发展水平以省份 GDP 表示,反映地区的经济发展的整体实力。

4) 能源结构系数. 能源结构系数反映建筑业消耗单位标准煤的碳排放量,系数越高,越不利于建筑业减排。

## 2 实证分析

### 2.1 数据来源与处理

以 2003—2012 年 30 个省份建筑业为研究对象(由于数据缺失,港澳台及西藏地区暂不考虑),将投入产出数据转化为可比数据,各指标数据来源,如表 1 所示。

表 1 指标数据来源  
Tab. 1 Index data source

指标	分录	来源	计算说明
资本存量	各地区按主要行业分建筑业总资产	《中国统计年鉴》	—
劳动力	各地区总承包建筑业企业主要经济指标	《中国统计年鉴》	人口密度按年末人口数除以省份面积
机械设备	各地区专业承包建筑业企业主要经济指标	《中国统计年鉴》	—
经济产出	各地区建筑业总产值	《中国统计年鉴》	—
施工面积	建筑业企业房屋建筑业面积	《中国统计年鉴》	按房屋建筑产值与建筑业的产值之比转换成建筑业施工面积当量
所有权属性	分地区按登记注册类型分建筑业总产值	《中国统计年鉴》	—
人口密度	分地区年末人口数	《中国统计年鉴》	—
GDP	地区生产总值和指数	《中国统计年鉴》	—
能源消耗	分地区能源平衡表	《中国能源统计年鉴》	折算为标准煤

### 2.2 第 1 阶段 DEA 实证结果

第 1 阶段的 2003—2012 年各省份效率指标均值,如图 1 所示。

由图 1 可知:3 项效率指标均实现稳步增长,表明我国建筑业不断进步,与文献[8]结果相印证. 自 2003 年,规模效率由 0.907 不断上升,在 2012 年达到了 0.984,长期处于较高水平. 决策单元综合效率没有实现最优,主要是由于技术效率不高。

第 1 阶段中决策单元中实现综合效率最优的决策单元仅仅占总数的 6%, 表明我国建筑业整体水平不高; 另一方面, 说明我国建筑业能源消耗高、碳排放量大、减排潜力显著。

### 2.3 第 2 阶段 SFA 回归结果

对第 1 阶段 DEA 模型所得到的投入指标的松弛变量进行多元回归分析, 结果显示, 所有回归系数均至少通过了 10% 的显著性检验, 满足显著性要求。因此, 所选择环境变量对投入指标的松弛变量具有显著影响, 有必要对投入指标进行调整。

### 2.4 第 3 阶段调整后 DEA 实证结果

2.4.1 建筑业碳排放效率变化趋势分析 将第 1 阶段及第 3 阶段的效率评价指标进行对比: 2003—2012 年, 3 项效率指标 10 年间显著提升, 变化趋势与第 1 阶段相同, 但数值大小存在差异。

与第 1 阶段相比, 第 3 阶段综合效率明显偏小, 技术效率差异不明显, 而规模效率显著降低, 远远低于第 1 阶段规模效率。因此, 规模效率降低是决策单元综合效率降低的主要原因。

2.4.2 基于 RPM 的建筑业碳排放效率分析 在各省份第 3 阶段 DEA 建筑业碳排放效率的基础上, 引进 RPM (resources portfolio management) 方法<sup>[19]</sup>对各省份建筑业碳排放效率象限分布特征加以分析。构建中国建筑业碳排放效率的组合分布矩阵, 如图 2 所示。图 2 中:  $\eta_1$  为技术效率;  $\eta_2$  为规模效率。由图 2 可得到以下 3 点结果。1) 从建筑业碳排放技术效率分析可知, 所有省份均处于横坐标右侧, 技术效率差异并不显著, 整体水平较高, 说明各省份建筑业的技术效率整体较高, 技术效率水平与区域经济水平相关性不强。2) 从建筑业碳排放规模效率分析可知, 规模效率分布相对分散, 不同省份建筑业规模效率差异显著。与技术效率相比, 规模效率水平并不理想。规模效率与区域经济水平相关性较强, 经济发达地区规模效率一般较高; 相反, 经济欠发达地区规模效率整体偏低。3) 从建筑业碳排放综合效率分析可知, 根据建筑业碳排放效率的 RPM 组合分布矩阵, 得出区域建筑业减排的基本原则。对角线上方的省份, 规模效率大于技术效率; 反之, 技术效率大于规模效率。沿对角线方向, 距离原点越远, 圆圈面积越大, 综合效率越大。通过对不同省份综合效率影响程度分析, 得到以下 6 点结论。

1) 位于对角线下侧的 20 个省份规模效率低于技术效率, 提高综合效率主要考虑提高规模效率; 位于对角线上侧的 10 个省份技术效率低于规模效率, 提高综合效率主要考虑提高技术效率。

2) 海南、青海、宁夏、贵州综合效率现状主要由于规模效率造成, 技术效率均达到高水平以上, 但规模效率却均至少处于较低水平, 生产规模效率问题严峻, 应当维持现有技术和管理水平, 着力提高建筑业碳排放的规模效率。

3) 甘肃、云南、内蒙古和新疆综合效率现状由规模效率较低和技术效率不高共同造成, 需要考虑调整资源配置、改进生产规模效率, 同时, 改善现有的技术水平和管理水平。

4) 广西、重庆、四川、安徽、福建及陕西综合效率较低现状由规模效率和技术效率不高共同造成, 技术效率与规模效率对综合效率影响程度相同。

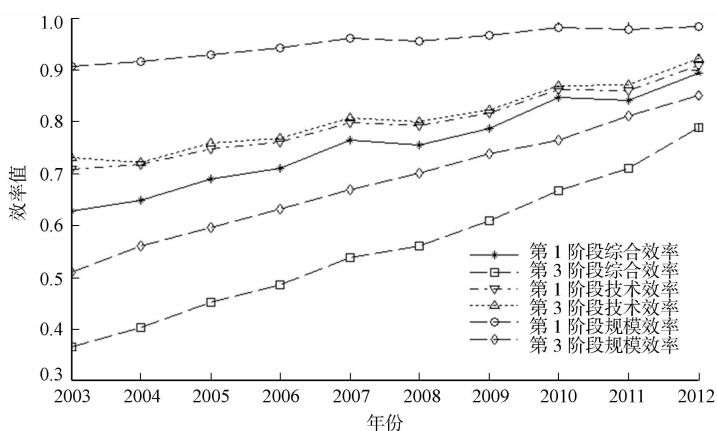


图 1 建筑业碳排放效率均值对比

Fig. 1 Average efficiency comparison of construction industry carbon emission efficiency

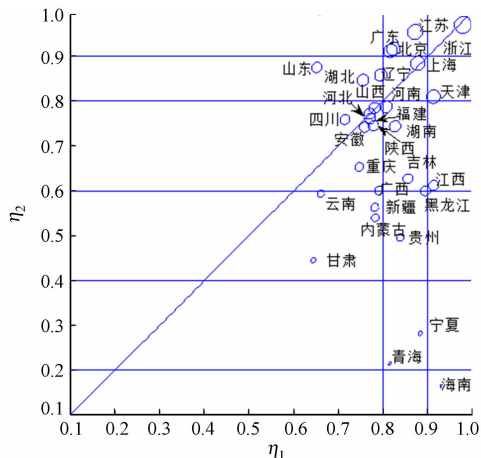


图 2 建筑业碳排放效率的 RPM 组合分布矩阵

Fig. 2 RPM combination distribution matrix of construction industry carbon emission efficiency

5) 吉林、黑龙江和江西综合效率偏低主要由规模效率不高造成. 以上省份技术效率均达到高水平, 但规模效率均不高, 应当维持现有生产技术水平, 提高规模效率, 实现规模红利.

6) 山东综合效率不高主要是技术效率不高造成. 山东规模效率达到高水平, 建筑业产值高、规模大, 但是技术效率排名倒数第3, 未来更应当提高建筑业的技术水平和管理水平.

2.4.3 建筑业碳排放冗余分析 1) 由建筑业碳排放冗余整体变化趋势分析, 建筑业资本存量、劳动力、碳排放量及机械设备的冗余率( $\eta_s$ )分别为0.172, 0.208, 0.380及0.255, 其中, 碳排放量冗余率明显高于其他投入指标. 对同一年份各省建筑业碳排放冗余量累计求和后, 各年全国建筑业碳排放量冗余率, 如图3所示.

由图3可知: 建筑业碳排放冗余率由2003年的0.532递减至2012年的0.205, 表明建筑业碳排放冗余初期严重, 后期有所改善. 若实现建筑业效率最优, 2003—2012年累计减排将达到38%, 共计30780万t.

2) 由区域建筑业碳排放累计冗余分析, 各省份建筑业碳排放累计冗余率, 如表2所示. 山东和内蒙古累计冗余率最高, 分别达到0.745和0.725, 明显超出其他地区. 上海、湖南、云南建筑业累计冗余率达到了0.4以上. 从碳公平角度考虑, 以上累计碳排放冗余较高的省份其后期减排责任更大<sup>[20]</sup>.

山东和内蒙古建筑业碳排放冗余率变化规律显著不同(图3). 山东年建筑业碳排放冗余率2003年达到0.86, 随后逐年递减, 2012年为0.61. 山东建筑业碳排放冗余整体依然较高, 但已呈逐年递减趋势, 未来应当加大建筑业减排力度, 推进建筑节能减排.

内蒙古建筑业碳排放冗余率呈逐年上升趋势, 由2003年的0.61上升到2012年的0.79, 减排效果极不理想. 由于内蒙古早期经济落后, 生产力水平不高, 近年来, 虽然短期内建筑业需求增加, 但技术水平和管理工作无法提高, 导致建筑业生产效率低下. 此外, 内蒙古是产煤大省, 原煤的消耗所占比重较高. 内蒙古建筑业碳排放应加强与发达地区的技术沟通与交流同时, 改善建筑业能源消费结构.

### 3 结论

以建筑业碳排放代替能源消耗为投入指标, 将建筑业碳排放与能源消耗的差异作为环境变量, 构建中国建筑业碳排放的三阶段DEA模型, 分析中国建筑业碳排放效率.

1) 在传统DEA模型中, 规模效率被显著高估, 是造成效率评价不准确的主要原因.

2) 规模效率不高是造成各省份的综合效率偏低的主要原因. 第3阶段结果显示规模效率整体偏低, 20个省份规模效率低于技术效率.

3) 建筑业碳排放效率与区域经济发展水平关系密切. 经济欠发达地区有可能实现技术效率最优, 但规模效率普遍偏低. 由此说明区域经济实力、生产力水平、科学技术促进建筑业规模效益的提高.

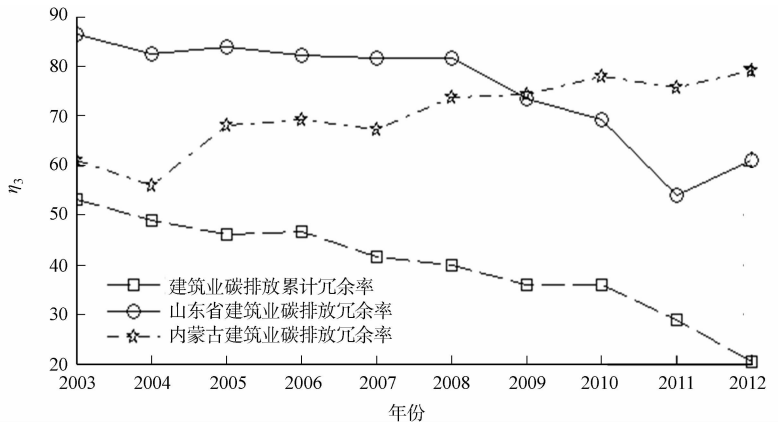


图3 建筑业碳排放冗余率

Fig. 3 Construction industry carbon emission redundancy

表2 建筑业累计碳排放冗余率

Tab. 2 Construction industry cumulative carbon emission redundancy

省份	冗余率	省份	冗余率	省份	冗余率
北京	0.196	浙江	0.064	海南	0.074
天津	0.186	安徽	0.244	重庆	0.282
河北	0.431	福建	0.326	四川	0.370
山西	0.310	江西	0.099	贵州	0.335
内蒙古	0.725	山东	0.745	云南	0.472
辽宁	0.247	河南	0.184	陕西	0.350
吉林	0.381	湖北	0.300	甘肃	0.453
黑龙江	0.107	湖南	0.446	青海	0.186
上海	0.413	广东	0.194	宁夏	0.234
江苏	0.131	广西	0.215	新疆	0.275



4) 建筑业碳排放冗余严重, 减排潜力突出. 2003—2012 年全国建筑业累计冗余量达到 30 780 万 t. 山东、内蒙古建筑业累计碳排放冗余率最高, 是建筑业减排的重点区域.

基于此, 针对性提出以下 4 点建筑业的减排策略建议.

1) 加强区域间建筑业技术管理水平的沟通与交流. 区域经济的发展水平影响建筑业发展, 应加强全国各省份建筑业的互联互通, 促进不同区域先进生产技术及管理水平的沟通交流.

2) 调整建筑生产规模, 实现规模效益红利. 应根据规模效率对综合效率的影响程度, 对不同省份采取相应措施, 提高综合效率.

3) 建筑业累计碳排放冗余偏大省份应承担更大的减排责任. 山东、内蒙古、上海、湖南、云南建筑业累计碳排放冗余超过 0.4, 未来应承担更大减排责任.

4) 调整建筑业能源结构, 发展新型清洁能源. 未来能源需求必然增加, 因此, 调整能源结构, 降低能源碳排放系数. 在不影响建筑业产值规模下对降低建筑业碳排放具有现实意义.

三阶段 DEA 模型是以内部最优决策单元为样本单元的相对效率评价, 无法实现与特定具有代表性单元的比较. 后期将以典型的发达国家和发展中国家为样本单元, 对比分析我国建筑业碳排放效率.

### 参考文献:

- [1] 刘亦文, 胡宗义. 中国碳排放效率区域差异性研究: 基于三阶段 DEA 模型和超效率 DEA 模型的分析[J]. 山西财经大学学报, 2015, 37(2): 23-34.
- [2] 陆宁, 杨文君, 丁荣, 等. 2008—2012 年中国 30 个省域建筑业碳排放效率评价[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(6): 718-721.
- [3] 胡颖, 诸大建. 中国建筑业 CO<sub>2</sub> 排放与产值、能耗的脱钩分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(8): 50-57.
- [4] CHARNES A, COOPER W W. Chance-constrained programming[J]. Management Science, 1959, 6(1): 73-79.
- [5] SUEYOSHI T, GOTO M. DEA environmental assessment in time horizon: Radial approach for malmquist index measurement on petroleum companies[J]. Energy Economics, 2015, 51(1): 329-345.
- [6] 王雪青, 娄香珍, 杨秋波. 中国建筑业能源效率省际差异及其影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(2): 56-61.
- [7] 张友志, 顾红春. 基于 DEA 的 2005—2010 年中国省际建筑业能源效率研究[J]. 建筑经济, 2013(4): 12-15.
- [8] 冯博, 王雪青, 刘炳胜. 考虑碳排放的中国建筑业能源效率省际差异分析[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1256-1266.
- [9] 祁神军, 田丝女, 刘冰, 等. 基于 DEA 及 FAA 的中国建筑业能效评价及减排策略研究[J]. 2015, 31(12): 133-140.
- [10] FRIED H O, LOVELL C A K, SCHMIDT S S, et al. Accounting for environmental effects and statistical noise in data envelopment analysis[J]. Journal of Productivity Analysis, 2002, 17(1/2): 157-174.
- [11] 华坚, 任俊, 徐敏, 等. 基于三阶段 DEA 的中国区域二氧化碳排放绩效评价研究[J]. 资源科学, 2013, 35(7): 1447-1454.
- [12] 江洪, 赵宝福. 碳排放约束下中国区域能源效率测度与解构: 基于三阶段 DEA 方法[J]. 价格理论与实践, 2015, 37(1): 103-105.
- [13] 董锋, 刘晓燕, 龙如银, 等. 基于三阶段 DEA 模型的我国碳排放效率分析[J]. 运筹与管理, 2014(4): 196-205.
- [14] 华坚, 任俊. 长三角地区碳排放的测度、比较及影响因素分析: 1990—2009 年[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2012, 14(3): 57-61.
- [15] 邓波, 张学军, 郭军华. 基于三阶段 DEA 模型的区域生态效率研究[J]. 中国软科学, 2011(1): 92-99.
- [16] 沈能, 王群伟. 中国能源效率的空间模式与差异化节能路径: 基于 DEA 三阶段模型的分析[J]. 系统科学与数学, 2013, 33(4): 457-467.
- [17] 李永立, 吴冲. 考虑非期望产出弱可处置性的随机 DEA 模型[J]. 管理科学学报, 2014, 17(9): 17-28.
- [18] 祁神军, 张云波. 中国建筑业碳足迹流追踪及低碳发展策略研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(6): 10-16.
- [19] 矢矧晴一郎. 企业经营战略的制定及实施方法·案例[M]. 金周英, 译. 北京: 职工教育出版社, 1989: 1-3.
- [20] 滕飞, 何建坤, 潘勋章, 等. 碳公平的测度: 基于人均历史累计排放的碳基尼系数[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 449-455.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605009



# 滑移对部分充填式钢箱-砼 组合梁承载力的影响

班志鹏<sup>1,2</sup>, 江雪<sup>1</sup>, 郑艳<sup>1</sup>, 胥海宁<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004  
2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为了分析滑移对受负弯矩作用的部分充填式钢箱-混凝土组合梁弹性抗弯承载力的影响, 建立在反向两点对称加载工况下的组合梁微段模型, 并推导滑移微分方程, 在此基础上得出滑移和滑移应变解析解. 根据截面应变分布, 进一步推导出组合梁考虑滑移效应的弹性抗弯承载力计算公式. 对 3 根反向两点对称加载的组合梁进行试验, 对公式的准确性进行验证, 试验得出的结果与公式计算值之间拟合良好. 结果表明: 考虑滑移的不利影响后, 组合梁的弹性抗弯承载力下降明显.

**关键词:** 部分充填式钢箱-混凝土组合梁; 负弯矩区; 滑移; 弹性抗弯承载力

**中图分类号:** TU 398; TU 375.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0570-06

## Effects of Slip on Flexural Capacity of Partially Filled Steel Box Composite Beam

BAN Zhipeng<sup>1,2</sup>, JIANG Xue<sup>1</sup>, ZHENG Yan<sup>1</sup>, XU Haining<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Rock-Soil Mechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;  
2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In order to analyze the elastic flexural capacity of negative bending moment regions of partially filled steel box composite beam under the influence of the slip. Infinitesimal element of simply supported composite beams under the two-points symmetric reverse loading is established, and the differential equation of slip is derived to study solutions of slip and slip strain, the formula of elastic flexural capacity is deduced further by the means of the strain distribution of composite sections. The two-points symmetric reverse loading experiment on three composite beams are carried out to validate the accuracy of the formula, and the test results are in good agreement with the calculated results, indicating that the elastic flexural capacity of composite beam decreases significantly by the adverse effect of slip.

**Keywords:** partially filled steel box composite beam; negative moment regions; slip; elastic flexural capacity

传统的钢-混凝土组合梁在钢梁部分采用工字型钢, 在受正弯矩作用时能充分地发挥材料强度, 但在受负弯矩作用时容易发生失稳. 针对这一问题, 钟新谷等<sup>[1]</sup>提出了钢箱-混凝土组合梁新式截面, 这一形式的组合梁在负弯矩区有明显的受力性能优势. 文献[2-4]相继对内填混凝土的钢箱梁进行了研究,

**收稿日期:** 2015-09-23

**通信作者:** 郑艳(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事组合桥梁结构行为的研究. E-mail: 253651988@qq.com.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51168011, 51108109); 广西岩土力学与工程重点实验室科研课题资助项目(11-CX-05)

并取得了一定成果. 在此基础上, 羊海林等<sup>[5-6]</sup>提出了部分填充式钢箱-混凝土连续组合梁的结构形式, 这类连续组合梁负弯矩区的设计尤为关键, 对其进行深入的研究十分必要. 组合梁由于界面连接采用栓钉这类的柔性抗剪连接件, 在荷载作用下, 混凝土和钢梁的交接面用于连接件的变形, 不可避免地出现滑移. 大量研究表明, 组合梁的抗弯承载力受到滑移效应的影响, 使组合梁的弹性抗弯承载力达不到按截面换算法计算的承载力值, 这点在设计上尤为重要. 目前, 国内外学者对于滑移效应的研究主要集中于正弯矩区<sup>[7-10]</sup>、而对负弯矩的滑移效应研究相对较少. 本文在反向对称集中荷载作用下, 对 3 根不同配筋率的部分填充式钢箱-混凝土简支组合梁进行了试验, 并在负弯矩作用下, 尝试推导部分填充式钢箱-混凝土简支组合梁的计算公式. 通过对比分析试验结果与计算结果, 证明公式的准确性.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

组合梁的横截面尺寸, 如图 1 所示. 试验制作了 3 根编号为 PSCB2-1, PSCB2-3, PSCB2-5 的部分填充式钢箱-混凝土简支组合梁. 组合梁上部为 120 mm 厚配筋混凝土翼板, 下部为 6 mm 的中空箱型截面的钢梁, 内部用 4mm 的中隔板将内部分为上

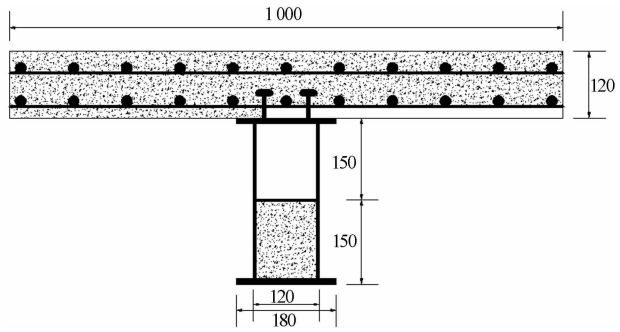


图 1 组合梁横截面(单位: mm)

Fig. 1 Section of composite beam(unit: mm)

下两个箱室, 顶板和底板厚度为 10mm. 在下箱室中填充密实的 C40 混凝土, 在钢箱梁顶板焊接圆柱头栓钉, 作为抗剪连接件. 试件全长为 4 200 mm, 跨度为 4 000 mm. PSCB2-1, PSCB2-3, PSCB2-5 的设计配筋率分别为 1%, 2%, 3%. 试件实际配筋情况和栓钉布置情况, 如表 1 所示. 表 1 中:  $\rho$  为配筋率;  $A_s$  为所配纵筋总面积;  $p$  为栓钉间距;  $k$  为抗剪连接程度;  $n$  为栓钉数量. 所用的钢材力学性能, 如表 2 所示. 表 2 中:  $f_y$  为屈服强度;  $f_{st}$  为极限强度;  $E$  为弹性模量. 通过推出试验得出栓钉的力学性能, 如表 3 所示. 表 3 中:  $V'_u$  为推出试件极限承载力;  $V_u$  为单个栓钉极限承载力; 推出试件两面共布置 8 个栓钉.

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of test specimens

编号	$\rho/\%$	$A_s/\text{mm}^2$	栓钉连接件		
			$p/\text{mm}$	$k/s$	$n$
PSCB1-1	1	11 $\phi$ 12	450	1.00	18
PSCB1-3	2	22 $\phi$ 12	240	1.00	32
PSCB1-5	3	32 $\phi$ 12	190	1.00	44

表 2 钢材的力学性能

Tab. 2 Performance of steel

材料名称	$f_y/\text{MPa}$	$f_{st}/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$
纵向钢筋	435	606	0.200
横向钢筋	315	471	0.200
钢箱梁	285	405	0.206

表 3 推出试件的试验结果

Tab. 3 Result of push-out test

推出试件编号	$V'_u/\text{kN}$	$V_u/\text{kN}$
2-1	537	67
2-2	580	72
2-3	590	73

### 1.2 加载方案与测量方案

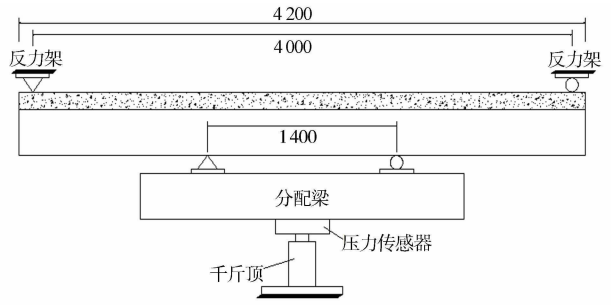
为了模拟连续组合梁负弯矩区的受力状态, 尝试对简支组合梁进行反向加载. 试验通过油压千斤顶施加荷载, 并在油压千斤顶上放置压力传感器, 用于读出每级所施加荷载的大小. 在千斤顶和组合梁之间还放置了分配梁, 将千斤顶提供的集中力转化为一对反向的对称集中荷载, 传递给组合梁, 两点集中荷载的间距为 1 400 mm. 梁两端的支座利用反力架固定. 试验装置和加载设备, 如图 2 所示. 试验的测量内容包括滑移、挠度和应变. 滑移和挠度通过百分表测量, 由人工读出; 应变通过应变片和应变采集仪进行测量.

### 1.3 试验结果

根据试验结果, 3 个试件的钢筋和钢箱底板荷载-应变关系曲线, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 3 个试件



(a) 实景图



(b) 设计图

图2 试验装置和加载设备(单位: mm)

Fig. 2 Test device and loading equipment(unit: mm)

的钢筋应变曲线在加载到 100 kN 附近时,出现了第一个转折点,表示混凝土面板已经开裂,钢筋承受的荷载继续增加,进而钢筋拉应变发生突增;在钢箱底板应变曲线中,试件 PSCB2-1 和 PSCB2-5 分别在 250,400 kN 附近出现折点,可能是由于加载到该级荷载时,钢箱梁和混凝土翼板的交界面发生较大滑移,导致钢箱底板的压应变增大;继续加载直到钢箱底板或钢筋达到屈服应变时,认为组合梁截面已经达到了弹性承载力的极限状态,钢箱底板所用钢材的屈服应变在  $1\ 400 \times 10^{-6}$  左右,而钢筋的屈服应变在  $2\ 200 \times 10^{-6}$  左右,钢箱底板先于钢筋屈服。

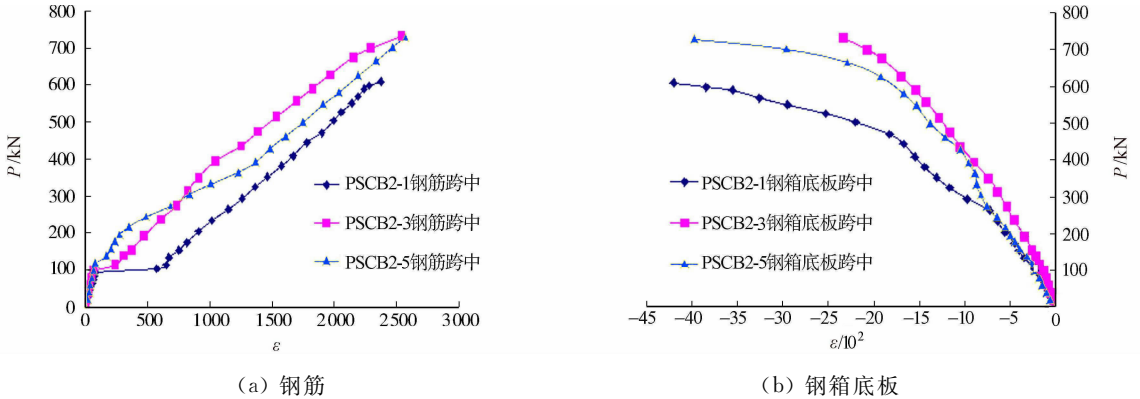


图3 跨中截面荷载-应变曲线

Fig. 3 Curves of load-strain of cross section

## 2 负弯矩作用下组合梁的滑移分析

### 2.1 基本假定

引入如下 4 个假定对部分填充钢箱-混凝土梁进行弹性分析. 1) 平截面假定. 2) 同一截面的钢箱与混凝土面板具有相同的变形曲率. 3) 钢材与混凝土均为服从胡克定律的线弹性材料. 4) 混凝土与钢箱交界面上的纵向剪力与相对滑移成正比例关系。

### 2.2 截面换算

部分填充钢箱-混凝土梁材料组成并不单一,在计算其弹性阶段的截面特性时,需将截面换算为同种材料,如图 4 所示. 文中用等效的钢截面替代全部混凝土截面,并使换算前后混凝土截面的高度保持不变,仅改变其宽度,从而使换算前后填充混凝土和混凝土面板形心位置不变。

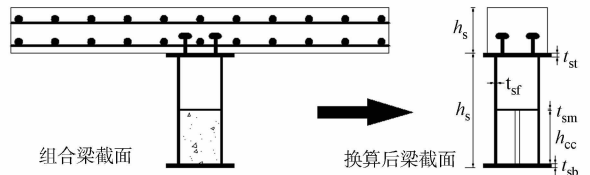


图4 组合梁换算截面

Fig. 4 Section of composite beam conversion

按截面换算法计算的换算后钢截面面积为

$$A'_{ct} = \frac{A_{ct}}{\alpha_E}, \quad A'_{cc} = \frac{A_{cc}}{\alpha_E} \tag{1}$$

式(1)中:  $\alpha_E = E_s/E_c$ ;  $A_{ct}, A_{cc}, A'_{ct}, A'_{cc}$  分别为混凝土翼板面积、填充混凝土的面积、换算后翼板面积和换算后填充混凝土面积。

### 2.3 计算模型

对组合梁交界面上的滑移进行分析, 需建立微段变形模型, 在两点对称集中荷载作用下的组合梁上取一长度为  $dx$  的微段, 如图 5 所示。图 5 中:  $y_r, y_{sc}$  分别为钢筋合力点和钢箱(包括内填混凝土)合力点到组合梁交界面的距离;  $s$  为微段组合梁交界面上的滑移。

### 2.4 滑移刚度

根据假设, 单位长度上纵向水平剪力  $v$  与滑移  $s$  的关系为

$$pv = Ks, \tag{2}$$

式(2)中:  $p$  为栓钉间距;  $K$  为剪切刚度, 即

$$K = 0.66n_sV_u. \tag{3}$$

式(3)中:  $n_s$  为同一截面上的栓钉数量;  $V_u$  为单个栓钉的极限抗剪承载力。在钢结构设计的规范<sup>[11]</sup>中,  $V_u = 0.43A_s \sqrt{E_c f_c}$ , 但考虑到该值为设计值, 取值偏保守。因此, 取表 3 得到的试验值作为栓钉的极限承载力值。

### 2.5 滑移解析解

根据组合梁微段模型的受力平衡关系, 可得到钢梁与混凝土交界面的滑移微分方程<sup>[12]</sup>, 即

$$s'' - \alpha^2 s + 2\beta V(x) = 0. \tag{4}$$

式(4)中:  $\alpha^2 = \frac{K}{p} \left( \frac{1}{E_r A_r} + \frac{1}{E_s A_{sc}} + \frac{y_{sc}(y_{sc} + y_r)}{E_s I_{sc}} \right)$ ;  $\beta = \frac{y_{sc} + y_r}{2E_s I_{sc}}$ 。

简支梁计算模型, 如图 6 所示。竖向剪力  $V(x)$  根据不同的荷载作用情况进行取值, 文中所对应的两点在对称集中荷载作用下, 取值为

$$\left. \begin{aligned} V(x) &= \frac{P}{2}, & -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}, & \quad \frac{b}{2} \leq x \leq \frac{L}{2}, \\ V(x) &= 0, & -\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

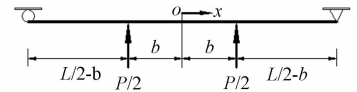


图 6 简支梁计算模型  
Fig. 6 Model of simply supported beam

对应工况下弯剪段、纯弯段的滑移解析解分别为

$$\left. \begin{aligned} s_1(x) &= C_1 \exp(\alpha x) + C_2 \exp(-\alpha x) - \frac{\beta P}{\alpha^2}, \\ s_2(x) &= C_3 \exp(\alpha x) + C_4 \exp(-\alpha x). \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

对式(6)求导, 即可得出弯剪段、纯弯段滑移应变分别为

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{s1}(x) &= C_1 \alpha \exp(\alpha x) - C_2 \alpha \exp(-\alpha x), \\ \epsilon_{s2}(x) &= C_3 \alpha \exp(\alpha x) - C_4 \alpha \exp(-\alpha x). \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

将边界条件  $s_2(0) = 0, s'_1(L/2) = 0, s_1(a/2) = s_2(a/2), s'_1(a/2) = s'_2(a/2)$  代入式(6), (7)可求出系数, 即

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\beta P (1 + \exp(\alpha b))}{2\alpha^2 \exp(\alpha b/2) (1 + \exp(\alpha L))}, \\ C_2 &= \frac{\beta P (1 + \exp(\alpha b))}{2\alpha^2 \exp(\alpha(L - b/2)) (1 + \exp(\alpha L))}, \\ C_3 &= \frac{\beta P (\exp(\alpha b) - \exp(\alpha L))}{2\alpha^2 \exp(\alpha b/2) (1 + \exp(\alpha L))} = -C_4. \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

## 3 弹性承载力分析

### 3.1 弹性阶段的截面应变分布

负弯矩区的部分填充式钢箱-混凝土组合梁受拉翼板会产生开裂, 在弹性承载力极限状态下, 开裂

后的混凝土退出工作,组合梁的承载力由纵向钢筋、钢箱和钢箱内填充的混凝土承担.当钢箱底板或纵向钢筋达到屈服应变时,即认为组合梁截面达到弹性承载力极限状态.在组合梁的交界面存在滑移效应时,其负弯矩区的弹性应变分布,如图7所示.图7中: $\epsilon_r$ 为钢筋合力点处纵向应变; $\epsilon_{bf}$ 为钢箱底板应变纵向压应变; $T$ 为钢筋收到的拉力; $C$ 为钢箱梁受到的压力.

### 3.2 滑移效应影响下的弹性极限承载力

1) 钢梁首先屈服组合梁的弹性承载力表示为

$$M_{eu} = M_{sc} + T y_0. \quad (9)$$

式(9)中: $y_0 = y_{sc} + y_r$ ;  $M_{sc}$ 为钢箱梁承担的弯矩,即

$$M_{sc} = [f - T/(A_s + A'_{cc})] W_{sc}. \quad (10)$$

式(10)中: $f$ 为钢材屈服强度; $M_{sc}$ 为截面换算后的填充混凝土和钢箱组合的截面抵抗矩.

由图7中应变分布的关系,根据式(1),(2),组合梁在弹性极限状态时满足关系式,即

$$\frac{f}{E_s} = \frac{M_{sc}}{E_s I_{sc}} h_0 - \epsilon_s - \frac{T}{A_r E}. \quad (11)$$

式(11)中: $h_0$ 为组合梁底部到钢筋形心的距离; $I_{sc}$ 为截面换算后的填充混凝土和钢箱组合的截面惯性矩,可用平行移轴定理求出.

由于钢筋和钢箱的弹性模量差值只有3%左右,此处为了公式的简化忽略其差别,统一用 $E$ 表示.联立式(9),(10),(11),可得出组合梁弹性承载力的表达式,即

$$M_{eu} = \frac{[A_r E \epsilon_s + (A_r + A_s + A'_{cc}) f] I_{sc} M_{sc} - [I_{sc} E \epsilon_s + (I_{sc} - W_{sc} h_0) f] A_r (A_s + A'_{cc}) y_0}{(A_s + A'_{cc}) I_{sc} + A_r h_0 W_{sc}}. \quad (12)$$

取 $\epsilon_s = 0$ 即为按完全剪力连接.不考虑滑移效应时的弹性抗弯承载力为

$$M_{eu,0} = \frac{(A_r + A_s + A'_{cc}) f I_{sc} M_{sc} - (I_{sc} - W_{sc} h_0) f A_r (A_s + A'_{cc}) y_0}{(A_s + A'_{cc}) I_{sc} + A_r h_0 W_{sc}}. \quad (13)$$

$M_{eu,0}$ 和 $M_{eu}$ 的差值 $\Delta M_{eu}$ 则为考虑滑移效应后组合梁的弹性抗弯承载力下降值,即

$$\Delta M_{eu} = \frac{A_r E \epsilon_s I_{sc} [(A_s + A'_{cc}) y_0 - W_{sc}]}{(A_s + A'_{cc}) I_{sc} + A_r h_0 W_{sc}} \quad (14)$$

2) 设钢筋屈服强度为 $f_y$ ,钢筋屈服时,承受的拉力如图7所示,根据水平向受力平衡,得

$$C = T = A_r f_y, \quad (15)$$

同样,根据应变分布关系和假定(1),(2),有

$$\frac{f_r}{E_r} = \frac{M_{sc}}{E_s I_{sc}} h_0 - \epsilon_s - \frac{M_{sc}}{E_s W_{sc}} - \frac{C}{E_s A_{sc}}. \quad (16)$$

联立式(9),(15),(16),解得

$$M_{eu} = A_r + f_y y_0 - \frac{[(A_s + A'_{cc}) E \epsilon_s + (A_r + A_s + A'_{cc}) f_r] I_{sc} W_{sc}}{(A_s + A'_{cc}) (I_{sc} - h_0 W_{sc})}. \quad (17)$$

考虑滑移效应的弹性抗弯承载力下降值

$$\Delta M_{eu} = E I_{sc} W_{sc} \epsilon_s / (I_{sc} - h_0 W_{sc}). \quad (18)$$

式(18)为负值,说明当钢筋先于钢梁底板屈服时,组合梁截面的弹性抗弯承载力有所增大.但这种情况下钢梁下翼缘通常已经屈服,因此,从设计安全的角度出发,滑移效应影响下,组合梁的弹性抗弯承载力应主要考虑钢箱梁底板首先屈服的情况,并按式(12)进行计算.文中3个试件同为钢箱底板首先屈服也证明了这一点.由式(14)可知,组合梁截面的弹性抗弯承载力下降程度只由截面特性及滑移应变的大小决定,而钢筋和钢材的屈服强度对其没有影响.

## 4 理论计算值与试验值对比

按式(12),(14)计算的不考虑滑移效应和滑移影响下的弹性抗弯承载力,及试验测得的弹性抗弯承载力实测值,如表4所示.表4中: $M_{eu,0}$ , $M_{eu}$ 分别为不考虑滑移效应和滑移影响下的弹性抗弯承载力计算值; $M'_{eu}$ 为滑移影响下的弹性抗弯承载力实测值.由表4可知:试件PSCB2-1在滑移影响的弹性抗弯

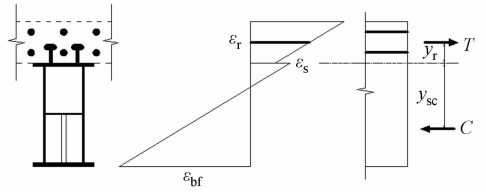


图7 组合梁截面计算模型

Fig. 7 Calculation model of composite section

承载力计算值与实测值的比值达到了 1.39, 相差较大, 分析可能是因为试件在加载过程中部分栓钉发生破坏, 剪切刚度随着试验的进行在逐渐降低, 导致试件的弹性抗弯承载力进一步下降. 试件 PSCB2-3, PSCB2-5 的计算值与实测值的比值分别为 1.02 和 1.02, 两者吻合良好. 同时,  $M_{eu,0}$  和  $M_{eu}$  的对比可以看出: 在相同的抗剪连接程度下, 随着配筋率的提高, 虽然试件的  $M_{eu,0}$  和  $M_{eu}$  都有所提高, 但是其在滑移影响下导致弹性抗弯承载力下降的程度有所增大, 在设计上考虑综合考虑经济效益时, 在负弯矩区应选取合适的配筋率.

表 4 抗弯承载力计算结果与实测结果对比

Tab. 4 Compare between calculation results and test results of flexural capacity kN · m

试件编号	$M_{eu,0}$	$M_{eu}$	$M'_{eu}$	$M_{eu}/M'_{eu}$	$M_{eu}/M_{eu,0}$
PSCB2-1	412.83	368.28	264.55	1.39	0.89
PSCB2-3	427.58	370.29	361.66	1.02	0.86
PSCB2-5	455.78	382.24	376.35	1.02	0.84

## 5 结论

1) 滑移效应对部分充填式钢箱-混凝土组合梁的承载力的影响不能忽视, 它会引起截面弹性抗弯承载力的降低, 按换算截面法计算的弹性抗弯承载力值偏大. 文中推导出考虑滑移效应的弹性抗弯承载力计算公式, 并将计算结果与试验实测值进行对比, 发现两者吻合良好, 验证了公式的准确性.

2) 在抗剪连接程度相同时, 随着配筋率的提高, 组合梁的弹性抗弯承载力下降程度逐渐增大.

3) 通常以工字钢为钢梁的钢-混凝土组合梁, 其负弯矩区的弹性抗弯承载力下降程度一般达到 15% 以上<sup>[13]</sup>, 而文中所述的部分充填式钢箱-混凝土组合梁下降程度只有 15% 左右, 证明了该截面形式在受力性能上的优势, 在设计中可以考虑采用.

## 参考文献:

- [1] 钟新谷, 舒小娟, 郑玉国, 等. 钢箱-混凝土组合梁正截面承载力的初步研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(6): 73-79.
- [2] 莫时旭, 郑艳, 钟新谷, 等. 钢箱-混凝土组合梁受力性能有限元分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(4): 543-548.
- [3] 舒小娟, 钟新谷, 沈明燕, 等. 钢箱-混凝土组合梁初步设计与应用[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 1): 8-16, 37.
- [4] 钟新谷, 舒小娟, 沈明燕, 等. 钢箱-混凝土组合梁正截面强度设计理论与试验研究[J]. 中国工程科学, 2008, 10(10): 47-53.
- [5] 羊海林, 莫时旭, 郑艳, 等. 部分充填混凝土窄幅钢箱组合梁抗弯承载力[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2015, 40(1): 11-18.
- [6] 羊海林, 莫时旭, 郑艳, 等. 部分充填混凝土窄幅钢箱组合梁抗裂性能研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2014, 39(4): 1441-1447.
- [7] 聂建国, 沈聚敏. 滑移效应对钢-混凝土组合梁弯曲强度的影响及其计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(1): 31-36.
- [8] XUA Rongqiao, WU Yufei. Two-dimensional analytical solutions of simply supported composite beams with interlayer slips[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(1): 165-175.
- [9] GIRHAMMAR U A. A simplified analysis method for composite beams with interlayer slip [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2009, 51(7): 515-530.
- [10] 胡少伟, 叶祥飞. 预应力连续组合梁负弯矩区抗弯承载力分析[J]. 工程力学, 2013, 30(11): 160-165.
- [11] 中华人民共和国国家标准. 钢结构设计规范: GB 50017-2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 113.
- [12] 聂建国, 樊健生. 组合梁在负弯矩作用下的刚度分析[J]. 工程力学, 2002, 19(4): 33-36, 28.
- [13] 张旭宏. 负弯矩作用下钢-混凝土简支组合梁的滑移效应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 12.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605010



# 开洞节能砌块隐形密框 复合墙体恢复力模型

黄端权, 李升才

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 研究开洞节能砌块隐形密框复合墙体的抗震性能,对 6 片 1/2 缩尺的开洞密框复合墙体进行低周往复荷载作用下的拟静力试验,研究不同参数对结构构件受力性能的影响. 试验考虑了墙体的配筋率、开洞形式对构件的承载力、刚度、变形、延性耗能、破坏形态及刚度退化等的影响,得出相应的荷载-位移滞回曲线、骨架曲线等,并建立相应的开洞复合墙体恢复力模型. 研究表明:肋柱配筋率的增加有利于提高复合墙体承载力、延性变形性能,而肋梁配筋率的增加有利于约束后期横向滑移变形,变形性能较佳;随着墙洞比系数的减小,复合墙体的强度、刚度有所增加,滑移变形较少,极限位移变形较少,前期刚度退化较平缓,后期下降段强度变化较明显,滞回曲线相对饱满,延性耗能、抗震效果较好.

**关键词:** 开洞复合墙体; 滞回曲线; 骨架曲线; 恢复力模型; 节能砌块; 隐形密框结构

**中图分类号:** TU 399; TU 317.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0576-07

## Restoring Force Model of Energy-Saving Block Masonry Composite Walls With Holes and Hidden Frame

HUANG Duanquan, LI Shengcai

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to obtain the restoring force model which can reflect the important parameters of seismic performance of block masonry composite walls with holes and hidden frame, the quasi static test of 1/2 scale 6 walls under horizontal low-cyclic loading were conducted to study the influence of different test parameters on the structure performance. The influence of the reinforcement ratio and the hole forms in the walls on the bearing capacity, stiffness, deformation, ductility, energy dissipation, failure pattern and stiffness degradation were investigated. Based on the test and analysis results, the hysteretic loops and skeleton curves were obtained, the restoring force model of composite walls with holes was established. The research shows that, as the reinforcement ratio in rib columns increases, the composite wall deformation performance, bearing capacity and ductility are improved; and as the reinforcement ratio in rib beams increases, the deformation of lateral sliding decreases, the deformation performance is upgraded. As the ratio of hole in the wall increases, the composite wall strength, stiffness increase, slip deformation decreases, the ultimate displacement decreases, the initial stage of the stiffness degradation becomes gentle, but the strength changes obviously in later descending stage. The hysteretic loops are relatively full, ductility and energy consumption, seismic performance are enhanced.

**Keywords:** composite walls with holes; hysteretic loops; skeleton curves; restoring force model; Energy saving building block; hidden frame

收稿日期: 2015-11-10

通信作者: 李升才(1960-),男,教授,博士,主要从事结构抗震方面的研究. E-mail: lsc50605@hqu.edu.cn.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BA107b04).



节能砌块隐形密框结构是在配筋砌体结构及混凝土小型空心砌块结构的基础上研制而成的轻型节能抗震结构体系<sup>[1]</sup>. 作为该结构体系的核心受力构件, 节能砌块隐形密框复合墙体是一种轻质高强、经济节能、受力性能及抗震性能良好、保温(隔热)隔音效果佳的新型承重墙体. 其独特、简单的施工工艺, 便于工业化生产, 适用于我国多层及中高层住宅建筑结构<sup>[2]</sup>. 该复合墙体是以截面及配筋较小的混凝土肋格作为骨架, 内嵌具有预留孔槽(便于形成用于浇筑十字交错密梁、柱肋格密框的孔道)的轻质砌块. 利用密布的梁、柱、轻质砌块及大外框形成具有共同工作性能的抗震受力体系. 其中, 砌块是以炉渣、粉煤灰等工业废料为主要原料的加气混凝土或轻质石膏块. 以往对对墙体的研究主要集中在有填充配筋砌块的复合墙体整片墙板的整体性试验<sup>[2-12]</sup>, 未能对由密布肋梁、肋柱、节能砌块组成的带门、窗洞口框格单元的隐形密框复合墙体的破坏机理及抗震性能进行深入研究. 本文对 6 片(SW1~SW6)带门、窗洞口的节能砌块隐形密框复合墙体进行试验研究, 建立相应的荷载-挠度恢复力模型.

## 1 试验概况

### 1.1 试件的设计与制作

选用 6 片带门窗洞口的 1/2 缩尺试件进行拟静力试验, 其中, 带窗洞试件为 SW1~SW3, 墙体尺寸为 1.80 m×1.35 m×0.11 m, 窗口位于墙体中间(距顶梁 150 mm, 距底梁 450 mm), 洞口尺寸为 0.75 m×0.60 m; 带门洞试件为 SW4~SW6, 墙体尺寸为 2.70 m×1.35 m×0.11 m, 采用偏开洞方式布置门洞口(距左翼缘墙 95 mm), 洞口尺寸为 0.45 m×1.05 m, 均带底梁、顶梁及翼墙, 肋梁均为 50 mm×60 mm 矩形截面, 肋柱直径均为 60 mm 圆形截面. 试件配筋情况, 如表 1 所示. 节能石膏砌块的抗压强度为 1.84 MPa, 抗拉强度为 0.18 MPa, 干重度为 6.15 kN·m<sup>-3</sup>, 弹性模量为 1 950 N·mm<sup>-2</sup>. 试件先浇筑地梁, 再分层堆砌节能砌块, 并在对应肋孔处放置相应钢筋. 最后, 往孔道内浇灌自密实流动混凝土砂浆使孔道密实, 试件制作完成. 工艺方便快捷, 节省劳动成本及砌筑时间, 综合效益高, 适用于实际工程运用.

表 1 复合墙体试件的配筋情况

Tab. 1 Reinforcement in composite walls

试件编号	边肋柱	内肋柱	顶、低肋梁	中间肋梁
SW1, SW4	1Φ8	1Φ6	1Φ8	1Φ6
SW2, SW5	1Φ10	1Φ8	1Φ8	1Φ6
SW3, SW6	2Φ8	2Φ6	1Φ10	1Φ8

### 1.2 试验加载方案及结果

为了综合研究试件的抗震性能, 采用单向往复荷载作用下的拟静力试验研究方法. 运用变幅等幅混合的位移控制方法, 每级循环 1 次, 当开洞墙体试件达到屈服荷载后, 每级位移幅值循环 2 次(即相当于等幅加载), 直至荷载下降到极限荷载 85% 左右时, 停止继续加载, 试验装置如图 1 所示. 图 1 中: ① 为激光位移计; ② 为普通位移计; ③ 为钢板; ④ 为电液伺服作动器; ⑤ 为地梁固定端螺栓; ⑥ 为记录及显示装置; ⑦ 为液压源; ⑧ 为反力架; ⑨ 为 45 号高强度加载圆钢; ⑩ 为千斤顶. 加载制度如表 2 所示. 表 2 中: (2) 为相同位移幅值循环 2 次.

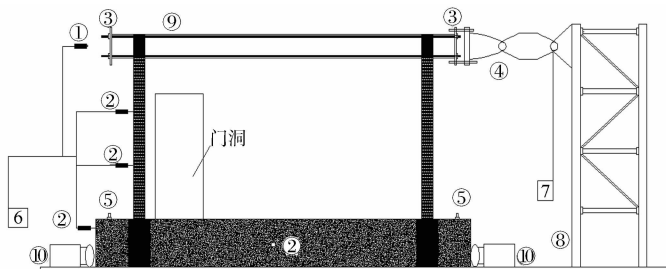


图 1 加载装置

Fig. 1 Loading device

表 2 加载制度

Tab. 2 Loading system

mm

试件	试件实际加载过程变幅情况
SW1	0.7, 1.0, 1.3, 1.8, 2.3(2), 3.45(2), 4.6(2), 6.9(2), 9.2(2), 13.8(2), 18.4(2), 23(2), ...
带窗洞 SW2	0.7, 1.0, 1.3, 1.8, 2.3(2), 3.45(2), 4.6(2), 6.9(2), 9.2(2), 13.8(2), 18.4(2), 23(2), 27.6(2), ...
SW3	0.7, 1.0, 1.3, 1.8, 2.3, 3.45(2), 4.6(2), 6.9(2), 9.2(2), 13.8(2), 18.4(2), 23(2), ...

续表

Continue table

mm

试件	试件实际加载过程变幅情况
SW4	0.8, 1.8, 2.8, 3.8, 4.8, 6.8(2), 8.8(2), 10.8(2), 12.8(2), 16.8(2), 20.8(2), ...
带门洞 SW5	0.8, 1.8, 2.8, 3.8, 4.8, 6.8(2), 8.8(2), 10.8(2), 12.8(2), 16.8(2), 20.8(2), 22.8(2)
SW6	0.8, 1.8, 2.8, 3.8, 4.8, 6.8(2), 8.8(2), 10.8(2), 12.8(2), 16.8(2), 20.8(2), 24.8(2)

通过测量复合墙体内部梁肋柱钢筋应变、墙板各分层水平位移,观测加载过程中的试件开裂、屈服、极限荷载及裂缝开展情况,进行试件破坏现象描述.开洞复合墙体在不同参数下的荷载-位移滞回曲线、骨架曲线,进一步研究其抗震耗能性能,建立相应的开洞复合墙体恢复力模型.试验加载过程中,各试件在各阶段临界点的推、拉平均荷载-位移试验结果,如表3所示.表3中: $P$ 为荷载; $\Delta$ 为位移.

表3 各试件试验结果

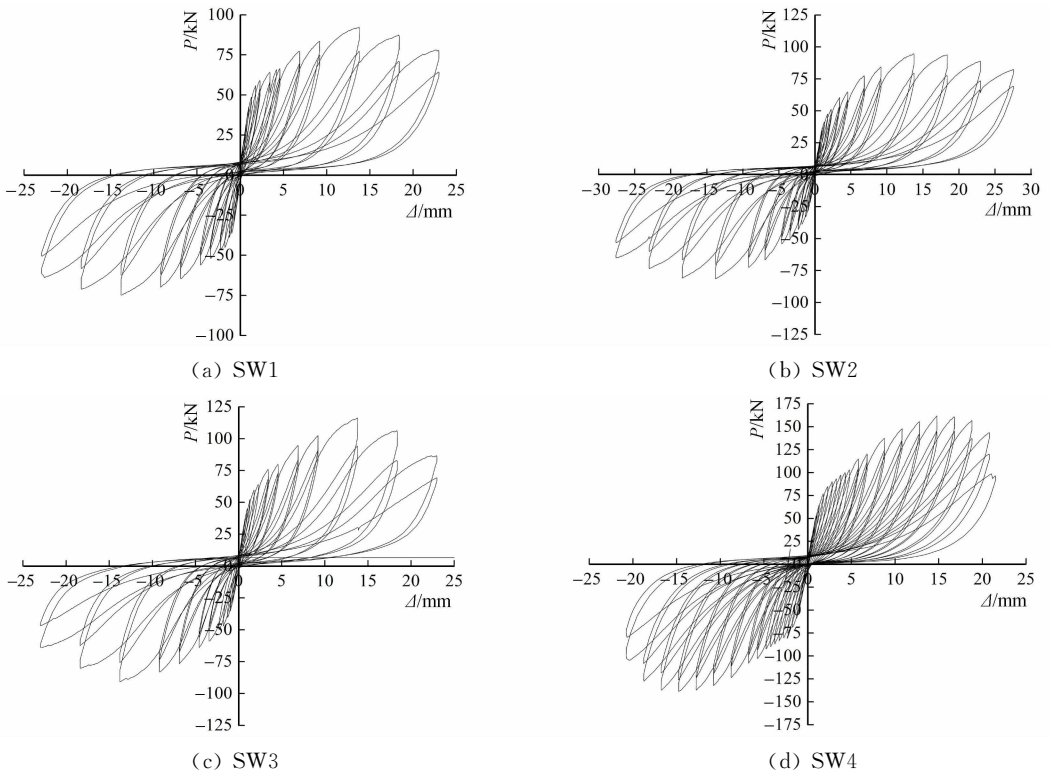
Tab.3 Test results of specimens

试件名称	开裂点		屈服点		极限荷载点		极限位移点	
	$P_c$ /kN	$\Delta_c$ /mm	$P_y$ /kN	$\Delta_y$ /mm	$P_u$ /kN	$\Delta_u$ /mm	$P_m$ /kN	$\Delta_m$ /mm
SW1	37.55	1.29	66.41	4.55	92.34	13.73	78.49	22.93
SW2	52.93	1.79	77.63	6.92	94.65	13.65	80.45	28.99
SW3	53.45	1.79	94.66	6.97	116.21	13.80	98.78	22.66
SW4	72.49	1.76	120.31	7.53	150.27	14.79	127.72	20.44
SW5	94.18	1.74	131.12	5.45	162.54	14.80	136.16	22.16
SW6	72.58	1.26	137.15	6.72	162.91	13.84	138.47	21.12

## 2 试验结果分析

### 2.1 试件滞回特性

通过对6片带门窗洞口复合墙体试件进行试验,荷载-位移滞回曲线,如图2所示.



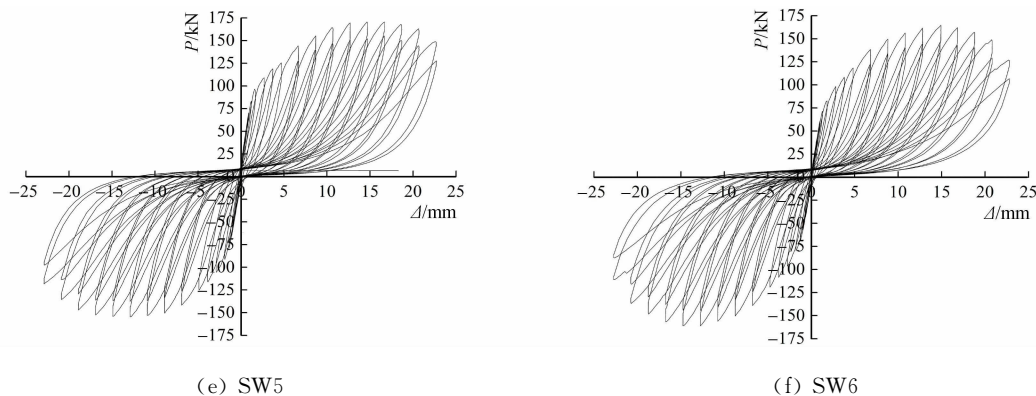


图 2 各试件荷载-位移滞回曲线

Fig. 2 Load-displacement hysteretic loops of specimens

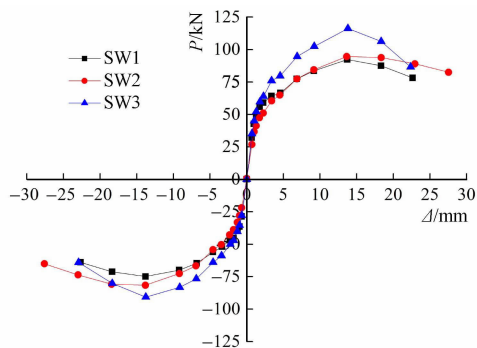
由图 2 可知:开裂前,加载、卸载曲线基本重合,以弹性变形为主,荷载-位移曲线呈线性发展;开裂后,滞回曲线出现较明显的拐点,试件刚度有所下降,但相对缓慢.随着荷载增加,曲线出现明显屈服点和下降段,“捏拢”及刚度退化现象明显,滞回曲线呈现反 S 形,表现出更多剪切变形和滑移变形,但总体延性提高,塑性增强,滞回面积较大,曲线图形虽靠近位移轴,仍表现出一定的耗能能力.

### 2.2 试件骨架曲线确定

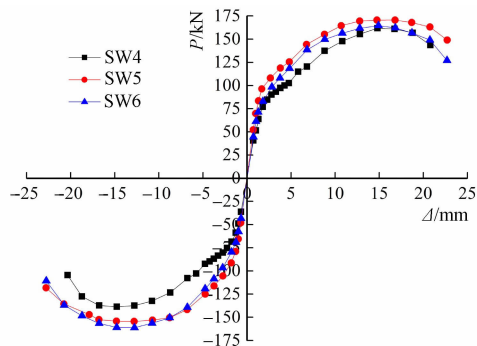
通过 6 片带门窗洞口节能砌块隐形密框复合墙体试件的试验结果,得到不同配筋及不同开洞形式下的 5 组骨架曲线,如图 3 所示.

由图 3 (a),(b)可知:随着肋柱配筋率的增加,试件承载力、刚度的提高效果显著,耗能效果较佳. SW2 开裂荷载比 SW1 提高最多达 41%, SW3 屈服荷载比 SW2 提高最多达 22%, SW3 极限荷载比 SW2 提高最多达 23%, SW5 初始刚度比 SW4 提高最多达 31.4%. 同时,相对于相同开洞形式的其他试件, SW3 与 SW2, SW6 与 SW5 的肋柱配筋率相差不大,但极限位移差别较大. 随着肋梁配筋率的较大提高,对复合墙体的约束作用增强,试件的极限位移变形(即总变形)分别减小 22% 和 5%, 后期下降的强度、刚度变化加剧,反 S 形的滞回曲线图形更加明显,即肋梁配筋率对于试件后期横向滑移变形的约束效果明显. 因此,提高肋梁肋柱的配筋率在一定程度上有利于改善复合墙体抗震性能,提高其承载力、刚度及延性耗能水平.

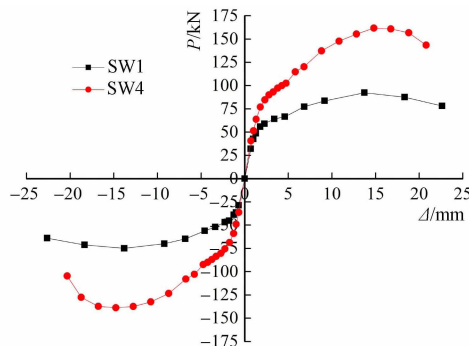
由图 3 (c)~(e)可知:在相同配筋情况下,不同开洞形式复合墙体的抗震性能明显不同. 结合表 3 的试验结果分析对比可知: SW1~SW3 平均初始刚度为  $29.51 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ; SW4~SW6 平均初始刚度为  $50.97 \text{ kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ . 而图 3(c)~(e)也正确地反映了偏开门洞复合墙体初始刚度、强度较大,但极限位移比正开窗洞复合墙体小的特点. 同时,与文献[2]中 3 片同类型的不开洞完整墙体相比,文中试件偏开门洞复



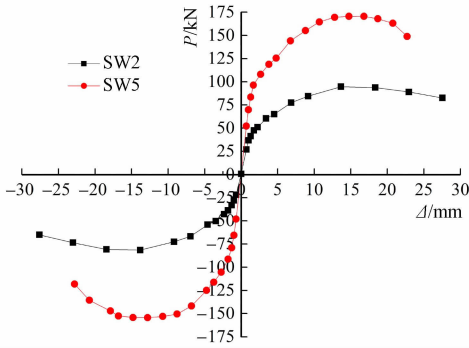
(a) 不同配筋正开窗



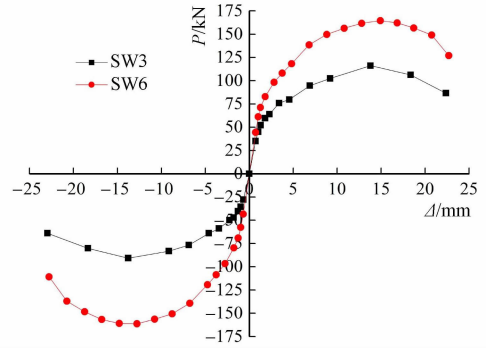
(b) 不同配筋偏开门



(c) 同配筋不同开洞形式



(d) 同配筋不同开洞形式



(e) 同配筋不同开洞形式

图3 不同复合墙体的骨架曲线

Fig. 3 Comparison of skeleton curves of specimens

合墙体 SW4~SW6 的极限承载力分别相对削弱了约 28%, 36%, 40%, 对应平均初始刚度相对削弱了约 31%。这表明开洞将大大削弱复合墙体的承载力及刚度, 抗震性能减弱。不同开洞形式体现在位置和尺寸, 理论上试件洞口越大、越远离中性轴, 对抗弯刚度的削弱越大, 抗震性能越差。

由图 2, 图 3 (c)~(e) 可知: 远离中和轴的偏开门洞 SW4~SW6 滞回曲线相对较饱满, 循环次数较多, 耗能性能较好, 而 SW1~SW3 却表现出更多的滑移变形, 曲线与位移轴更接近, 后期下降段强度变化较不明显, 耗能相对较差的特点, 故可以定性认为是由于正开窗洞口尺寸比门洞大的结果, 其对于复合墙体抗震性能的削弱更大。

文中通过墙洞比系数  $\alpha_1$  考虑开洞形式尺寸的影响(门洞的  $\alpha_1$  系数较小)。由文献[2]及 SW1~SW6 这 3 类不同开洞形式墙体可知: 随着肋梁肋柱配筋的增加, 有无开洞及墙洞比系数的减小(即墙体越完整), 复合墙体的初始刚度相应提高。综上所述, 不同开洞形式和肋梁肋柱配筋对墙体抗震性能有较大影响, 尤其对复合墙体初始刚度的削弱影响显著。

### 2.3 刚度的确定及刚度退化特征

针对开洞复合墙体试验研究结果的荷载-位移变化特点, 提出下降段的 4 折线型简化等效骨架曲线模型, 并定义试件的开裂点 A、屈服点 B、极限荷载点 C、极限位移点 D, 即 OA 段处于弹性阶段, AB 段和 BC 段处于强化段, CD 段未软化段, 模型如图 4 所示。图 4 所示的开洞复合墙体的骨架曲线模型各阶段刚度均采用割线刚度, 即各特征点间的连线刚度,  $K = \Delta P / \Delta U$ 。其中:  $\Delta P$  为相邻两特征点各自荷载平均值之差;  $\Delta U$  为相邻两特征点各自位移平均值之差。由此得到弹性段刚度  $K_1$ , 强化段刚度  $K_2$  和  $K_3$ , 以及软化段刚度  $K_4$ 。

为得到开洞复合墙体的初始理论刚度  $K_0$ , 可假定其为悬臂板, 且弹性阶段刚度为总变形的一阶倒数  $1/\delta$ , 其中,  $\delta$  包含弯曲变形  $h^3/(3EI)$  及剪切变形  $\mu h/(GA)$ 。结合试验结果及分析, 考虑到开洞形式及配筋等对初始刚度的影响, 文中提出修正的初始刚度理论计算式为

$$K_0 = \frac{\alpha(1 - \alpha_1)^{1/\alpha_1}(1 + \rho_1)(1 + 100\rho_2)}{\frac{h^3}{3EI} + \frac{\mu h}{GA}} \quad (1)$$

式(1)中:  $\alpha$  为修正系数, 综合考虑除配筋、墙洞比外的其他如开洞位置等因素对初始刚度的影响程度, 结合  $1/\delta$  与试验实测值  $K_1$  的对比分析结果,  $\alpha$  取 0.68;  $\alpha_1$  为墙洞比系数, 指洞口截面面积与墙腹板截面面积的比值;  $\rho_1, \rho_2$  分别是复合墙体横、纵向配筋率;  $h$  为墙体高度;  $I$  为试件全截面惯性矩;  $\mu$  为剪应力分布不均匀系数, 工字型截面  $\mu = A/A'$ ,  $A'$  为腹板毛截面面积,  $A' = Lt$ ,  $t, L$  分别为腹板厚度和长度;  $E$  为墙体弹性模量;  $G$  为墙体剪切模量,  $G = 0.4E$ 。

由式(1), 计算各试件的初始刚度, 如表 4 所示。由表 4 可知: 各试件采用式(1)计算得到的理论初始刚度  $K_0$  与试验所得的实测线弹性段刚度  $K_1$  较接近, 与试验结果较吻合, 故该公式对于同类型的开洞

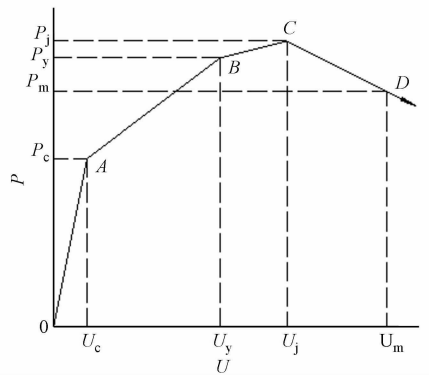


图4 开洞复合墙体骨架曲线模型  
Fig. 4 Skeleton curves model of composite walls

复合墙体结构的理论初始刚度计算具有一定参考价值。

表 4 恢复力模型相关参数

Tab. 4 Parameters of restoring force model

编号	$K_0/kN$	$K_1/kN$	$K_2/kN$	$K_3/kN$	$K_4/kN$	$K_1/K_0$	$K_2/K_0$	$K_3/K_0$	$K_4/K_0$	$P_c/P_u$	$P_y/P_u$	$P_m/P_u$
SW1	27.16	29.11	8.85	2.82	-1.51	1.07	0.33	0.10	-0.06	0.41	0.72	0.85
SW2	30.25	29.57	5.60	2.53	-0.93	0.98	0.19	0.08	-0.03	0.56	0.82	0.85
SW3	31.17	29.86	7.96	3.16	-1.97	0.96	0.26	0.10	-0.06	0.46	0.82	0.85
SW4	47.14	41.19	8.29	4.13	-3.99	0.87	0.18	0.09	-0.08	0.48	0.80	0.85
SW5	52.51	54.13	9.96	3.36	-3.58	1.03	0.19	0.06	-0.07	0.58	0.81	0.84
SW6	54.11	57.60	11.83	3.62	-3.36	1.06	0.22	0.07	-0.06	0.45	0.84	0.85
平均值						1.00	0.23	0.08	-0.06	0.49	0.80	0.85

根据试验荷载-位移数据,各开洞复合墙体试件的刚度退化特征曲线,如图 5 所示。由图 5 可知:各试件刚度随着加载过程中位移的增大而退化,初始刚度越大的试件刚度退化速率越快,且前期刚度退化较快,曲线较陡;后期刚度退化变化趋于平缓,即试件的变形越大,刚度退化速率越慢;而达到极限荷载后试件强度下降越加明显,刚度变为负数;当试件加载达到极限位移即破坏,完全丧失承载力。

### 2.4 试件的滞回规则

根据已有试验结果,可以确定开洞复合墙体的恢复力模型具有如下 2 点滞回规则。

1) 开洞复合墙体在低周往复荷载拟静力试验过程中,达到屈服荷载前,推、拉加载下的刚度均保持一致。达到开裂荷载前,试件加载路径与卸载路径基本重合,曲线基本呈现线性,可近似以线性关系表示该阶段,卸载刚度为  $K_1$ 。达到开裂荷载而未达到屈服阶段,刚度有所衰减,加载路径与卸载路径不再完全重合,卸载路径仍近似取单线性,其变形可恢复,卸载到荷载 0 时,变形也基本为 0,卸载刚度为  $K_i$ (对应卸载点与原点连线刚度)。

2) 当开洞复合墙体达到屈服荷载后,其刚度退化明显,随着推、拉加载位移的不断增大而逐渐减小,且随着加载循环次数的增加及加、卸载位移的增大,刚度退化速率加快。同时,随着位移的增大和加载循环次数的增加,卸载刚度的衰减更显著,用两折线表示卸载路径曲线更加合理,而重新加载曲线接近线性。具体的两折线卸载规则有如下 2 点:第一,卸载刚度取弹性段刚度  $K_1$ ,卸载到开裂荷载  $P_c$ ;第二,卸载刚度取  $K_i$ ,卸载到荷载 0,具体的滞回规则曲线,如图 6 所示。按 1-2-3-4-5-6-7-8-9-3-10-11... 的顺序加、卸载循环。

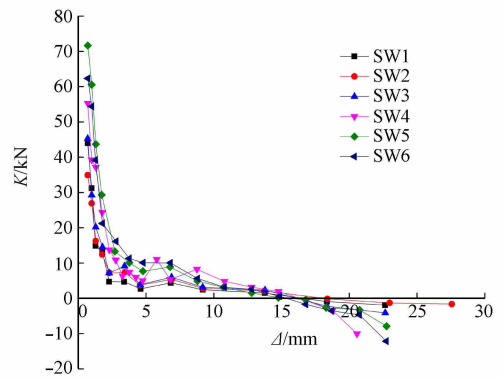


图 5 各试件刚度退化比较

Fig. 5 Comparison of stiffness degradation

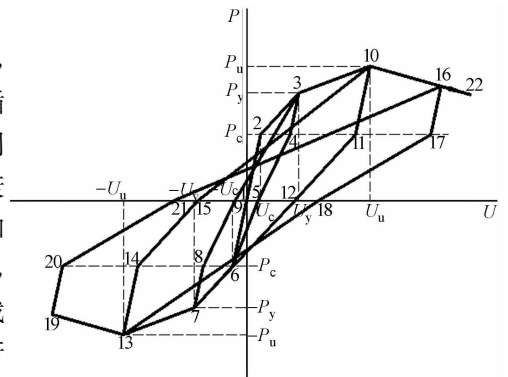


图 6 开洞密框复合墙体恢复力模型

Fig. 6 Restoring force model of composite walls with holes and frame column

## 3 开洞复合墙体的恢复力模型

通过对 6 个开洞复合墙体试件试验结果、滞回曲线、骨架曲线及刚度退化现象等的分析研究,提出该结构的恢复力模型,即退化四线型。同时,根据表 4 关于恢复力模型,各阶段刚度、特征点强度、位移的计算公式分别为

$$K_1 = K_0, \quad K_2 = 0.23K_0, \quad K_3 = 0.08K_0, \quad K_4 = -0.06K_0 \quad (2)$$

$$P_c = 0.49P_u, \quad P_y = 0.80P_u, \quad P_m = 0.85P_u \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} U_c &= P_c/K_1, & U_y &= (P_y - P_c)/K_2 + U_c, \\ U_u &= (P_u - P_y)/K_3 + U_y, & U_m &= (P_m - P_u)/K_4 + U_u. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中:理论初始刚度  $K_0$  可以通过式(1)得到,而极限荷载  $P_u$  通过相应承载力公式可以求得.

对式(4)进行推广,得到加载到退化四线型上各阶段任意点的位移,即

$$\left. \begin{aligned} U_{c,i} &= P_{c,i} / K_1, & U_{y,i} &= (P_{y,i} - P_c) / K_2 + U_c, \\ U_{u,i} &= (P_{u,i} - P_y) / K_3 + U_y, & U_{m,i} &= (P_{m,i} - P_u) / K_4 + U_u, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中: $U_{c,i}, U_{y,i}, U_{u,i}, U_{m,i}$  和  $P_{c,i}, P_{y,i}, P_{u,i}, P_{m,i}$  分别是各阶段上任意点的位移和荷载,且  $P_{c,i}$  不大于  $P_c$ ,  $P_{y,i}$  不大于  $P_y$ ,  $P_{u,i}$  不大于  $P_u$ ,  $P_{m,i}$  不大于  $P_m$ .

根据加载到任意点的荷载  $P_i$ 、位移  $U_i$ , 可得对应的卸载刚度  $K_i$ , 即

$$K_i = P_i / U_i. \quad (6)$$

开洞墙体恢复力模型的建立,对于指导同类结构进行非线性分析及抗震设计具有一定的参考价值.

## 4 结论

1) 滞回曲线和骨架曲线均可以看出:开洞节能砌块隐形密框复合墙体仍具有一定的延性及耗能能力,适当增加横、纵向配筋有利于提高该类结构抗震性能,而且开洞会大大削弱其体性能,横、纵向钢筋配筋率,且开洞形式对试件刚度影响显著,而横向配筋对结构变形(尤其是滑移变形)的约束作用明显.

2) 开洞复合墙体初始刚度越大,刚度退化越快,且前期退化快,后期退化慢,达极限荷载后刚度变负,随着结构变形的增大,刚度退化速率减慢,但承载力降低不大,结构表现出一定的延性及抗震性能.

3) 提出的开洞复合墙体的理论初始刚度计算公式与试验计算结果较吻合,对同类结构的理论初始刚度确定有一定借鉴价值.同时,确定的带下降段的退化四折线型骨架曲线模型能反映试验过程中试件分阶段的刚度退化特点,对模拟同类型结构进行非线性有限元分析有一定的参考意义.

4) 针对开洞复合墙体的滞回曲“捏缩”现象明显的特点,提出适用于模拟该结构类型的滞回规则及恢复力模型的确定方法,开裂前以卸载刚度  $K_1$  单线型卸载,屈服前以卸载刚度  $K_i$  单线型卸载,达屈服荷载后的卸载段以两折线型表示,为工程设计和理论分析提供了一定参考.

## 参考文献:

- [1] LI Shengcai, ZENG Zhixing. Research on an energy-saving block and invisible multi-ribbed frame structure[C]// Proceedings of the 3rd Specialty Conference on the Conceptual Approach To Structural Design. Singapore: [s. n.], 2005:119-124.
- [2] 董建曦. 节能砌块隐形密框结构墙板抗震性能研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2008:14-90.
- [3] 李宏男, 李兵. 钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(5): 35-42.
- [4] 姚谦峰, 黄炜, 田洁, 等. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 1-5.
- [5] 李升才. 带框复合墙体恢复力模型研究[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊2): 74-79.
- [6] 姚谦峰, 侯莉娜, 黄炜, 等. 不同填充材料生态节能复合墙体破坏模式研究[J]. 建筑结构学报, 2009(增刊2): 7-12.
- [7] 王凤来, 陈再现, 王煊定, 等. 底部框支配筋砌块短肢砌体剪力墙结构抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(11): 71-78.
- [8] 张亮. 240厚砌块整浇墙抗震性能试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010:14-24.
- [9] 李利刚. 低周往复荷载下290厚砌块整浇墙弯曲破坏模式试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011:18-35.
- [10] 郭猛, 姚谦峰, 袁泉, 等. 框架-密肋复合墙体抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 50-56.
- [11] 郭猛, 袁泉, 常鹏, 等. 基于水平薄弱层破坏准则的密肋复合墙受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(9): 148-153.
- [12] 王凤来, 赵燕, 谢礼立. 配筋砌块砌体短肢剪力墙恢复力模型[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 103-110.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605011



# 采用 PLC 和 HMI 的单巷道 立体车库控制系统设计

颜玉玲<sup>1,2</sup>, 张信禹<sup>2</sup>, 黄余<sup>2</sup>, 龚建平<sup>3</sup>

- (1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;
2. 宜宾职业技术学院 电子信息与控制工程系, 四川 宜宾 644003;
3. 湖南涉外经济学院 商学院, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** 以 3 层 6 车位单巷道堆垛式立体车库为研究对象,以西门子 S7-200 系列 CPU 224 为核心控制器,以 TPC7062KD 型监视与控制通用系统(MCGS)触摸屏为操作面板,共同控制 3 台减速电机正反转,并由减速电机传动给丝杆实现堆垛机的运行.结果表明:该设计可在车库模型上进行模拟运行.

**关键词:** 立体车库;单巷道;堆垛式;可编程逻辑控制器;触摸屏

**中图分类号:** TP 271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0583-04

## Control System Design of Single Aisle Dimensional Garage Based on PLC and HMI

YAN Yuling<sup>1,2</sup>, ZHANG Xinyu<sup>2</sup>, HUANG Yu<sup>2</sup>, GONG Jianping<sup>3</sup>

- (1. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. Department of Electronic Information and Control Engineering, Yibin Vocational and Technical College, Yibin 644003, China;
3. Business School, Hunan International Economics University, Changsha 410205, China)

**Abstract:** 3-storey 6 parking places single laneway stowed dimensional garage was studied. The core controller was Siemens S7-200 CPU 224, the operator panel was CGS TPC7062KD touch screen, the positive and reverse rotations of 3 decelerated motors were jointly controlled by the core controller and operator panel, the ball screw driven by decelerated motors operated the stowed machine. The results show: this control system design can perform well in the simulation garage.

**Keywords:** dimensional parking garage; single-aisle; stowed pattern; programmable logic controller; touch screen

机械式立体停车库,又称立体车库,是一种可有效节省土地资源的停车设备.我国对立体车库的研究起步较晚,随着近几年汽车数量的增加,停车难问题突出,加速了学者对立体车库的研究<sup>[1-2]</sup>.目前,立体车库主要形式有垂直循环式、升降横移式、箱型水平循环式、巷道堆垛式、垂直提升式、圆形水平循环式<sup>[3-4]</sup>.本文对基于可编程逻辑控制器(PLC)和人机界面(HMI)的单巷道立体车库控制系统进行研究.

### 1 控制系统整体设计

以 3 层 6 车位巷道立体车库为研究对象,以 PLC 为主控制元件,进行立体车库模拟,设计 3 层 6 车

**收稿日期:** 2016-06-21

**通信作者:** 颜玉玲(1981-),女,副教授,主要从事电气自动化、机电一体化的研究. E-mail:5318949@qq.com.

**基金项目:** 教育部人文社会科学研究项目(12YJA790035);四川省教育厅课题资助项目(川教函 2014(156))

位 PLC 软硬件控制系统. 立体车库的整个控制系统由人机界面、PLC 控制系统和现场操作机构构成. 控制说明图, 如图 1 所示.

触摸屏赋值给 PLC 指定地址, 读取指定地址的值, PLC 按照程序执行输出信号, 控制继电器动作. 其中, PLC 是控制系统的核心, 结合现场实际 I/O 操作数据, 可以实现车库当前状态信号的显示(指示灯)和存取操作. 在设计中, PLC 的主要作用是控制堆垛机的运行, 实现存取车辆的动作. 车辆进入驶入信号采取限位开关, 实现车辆有无检测. 拖动电机的起动、正反转、停止控制使用继电器控制, 不仅可靠性高, 而且可以节约大量的人力、物力, 以及减少后续维护的成本与难度, 方便后续改造升级, 自动化程度更高.

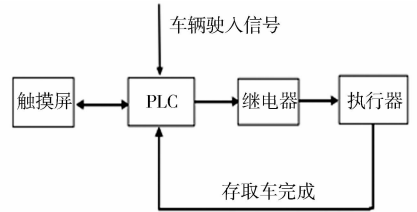


图 1 控制说明图

Fig. 1 Control chart

## 2 系统硬件设计

单巷道立体车库由 HMI、PLC 控制板、堆垛机、车库架组成.

作为模型, 在机械结构上不严格遵守相关规定<sup>[5]</sup>, 而是本着设计理念, 追求高性价比, 有效地展示控制系统的控制效果. 车库简易模型示意图, 如图 2 所示.

图 2 中: 由电动机带动传动丝杆产生 X, Y 轴的动作, 每一个车位都安装传感器, 检测是否有车停放. 当有车停在车位上, 在操作面板的存车车位选择中, 该车位不显示. 为防止电路故障产生安全事故, 采用硬件切断电路更快速、有效. 若是软件切断电路, 继电器触点熔焊在一起无法断开, 不能起到迅速断开电路的作用, 可采用一个急停按钮切断车库和堆垛机电机供电.

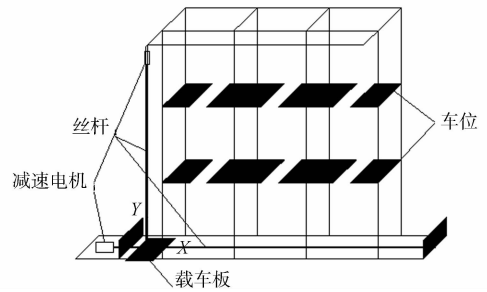


图 2 车库简易模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a simple garage model

### 2.1 电机的选择

按照设计要求, 车的移动和升降都需要选择力矩大、转速平缓的电动机, 而一般直流电机转速较高, 且力矩小, 需配合减速齿轮增加力矩. 常用的减速方式有齿轮减速、行星减速及涡轮减速. 其中, 齿轮减速价格便宜, 行星减速较为昂贵, 而直流齿轮减速电机符合设计要求, 价格相对便宜, 体积小. 故模型设计时选用力矩大、转速低的直流电机作为动力, 替代大型交流电动机, 实现载车托盘斜向运动运行.

### 2.2 电机控制主电路的设计

电机控制主电路全自动运行<sup>[6]</sup>, 无需人工过多干预. 当有控制信号输入控制系统时, PLC 经过程序运算, 输出控制信号. 输出的控制信号发送给中间继电器线圈, 控制中间继电器通断, 从而控制直流齿轮减速电机的正反转运行, 从而实现载车堆垛机运行.

文中设计对电源精度要求不高, 电机控制电路图, 如图 3 所示. 控制电路采用 24 V 全电压, 对人体的危险较小, 但是, 如果减速电机对电源精度要求不高, 需要将 220 V 电压直接转换为 24 V, 同时需要 12 V/5 V 供电, 功率较小. 采用 LM 2576 DC/DC 转换芯片进行电压转换, 同时, 在外围加上相应的元件, 即可正常工作. 由图 3 可知: 同一直流减速电机由两个中间继电器控制, 可以实现电机正反转, 若两继电器同时得电, 也不会出现电源短路的情况, 安全系数较高.

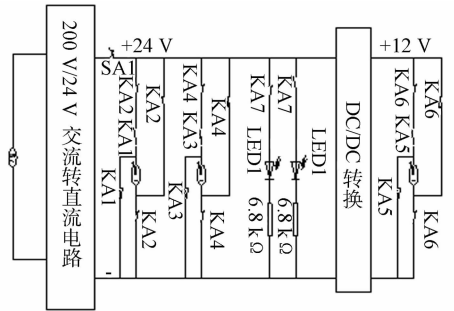


图 3 电机控制电路图

Fig. 3 Motor control circuit diagram

### 2.3 PLC 选型

进行 PLC 选择时, 需考虑性价比、应用性等. 根据设计要求, 需实现车库升降, 即正反转控制; 车库车位检测限位开关 6 个, 载车板限位开关 1 个, 车辆驶入检测开关 1 个, 限位开关的位置检测信号及红外检测信号可作为控制系统的输入; 存取车和车位选择按钮 8 个输入; 3 台直流电动机, 正反转 6 个输出; 红绿灯车辆允许指示输出 1 个. 文中设计采用触摸屏控制, 可省去存取车的 8 个输入. 因此, 总共使用 8 个数字量输入, 8 个数字量输出. 根据 I/O 点数, 使用留有一定的冗余接口和程序容量要求<sup>[7-8]</sup>. 同时, 考虑到



经济性和模型空间的要求,采用西门子 S7-200 系列中的 CPU 224 为控制元件. CPU 224 共有 24 个数字量 I/O 点. 其中,14 点输入,10 点输出,满足设计要求. PLC 外部接线图,如图 4 所示.

S7-200 PLC 采用 220 V 市电供电,输出为继电器输出(RLY). 其中:EL 提示车位已满信号灯; KA1,KA2 控制 1 号减速电机正反转;KA3,KA4 控制 2 号减速电机正反转;KA5,KA6 控制 3 号减速电机正反转; KA7 控制红绿灯;SA1 为急停按钮;L+ 和 M1 为 PLC 内部 24 V 直流电输出端,在紧急情况下,可以迅速切断线圈电源;PLC 输出模块采用外部供电方式,电源由 120 W 开关电源供电;触摸屏通过 RS485 通信线与 S7-200 通信.

### 2.4 触摸屏选型

通过触摸屏幕上的按钮,可调整参数、监视参数或实现动作,方便直接地控制动作. 采用国产的 TP7062KD 型监视与控制通用系统(MCGS)触摸屏,24 V 直流电供电,属于电阻型触摸屏,当手戴着手套,也可以操作,且具备自动息屏及鸣笛提示等功能<sup>[9-10]</sup>.

### 2.5 传动机构选择

在实际生活中,立体车库的堆垛机的传动结构较复杂,运载能力强,而作为模型也有很多选择. 考虑方便加工和经济性等因素,采用丝杆传动. 作为传动装置,由水平和竖直及托盘的一根齿条组成载车板,如图 5 所示. 在方位上,需要实现 X,Z 两个方向的移动. 根据模型选择 T 型丝杆作为传动装置,齿轮、齿条组成载车板. 载车板上的减速电机通过齿轮与齿条转换作用,使托盘能够推出和缩进.

### 2.6 其他硬件说明

当车辆驶入停车场时,需感应到车辆. 此时,可采用电磁感应原理制成的感应线圈,汽车车身大部分为金属,在地磁的感应下,相当于一块大型磁铁. 当汽车进入感应线圈感应范围,线圈产生感应电动势,根据产生的电流大小可以估算汽车的大小. 文中的设计是模拟立体停车库,可采用红外对管对车辆进行模拟检测.

在实际生活中,载车板常暴露在外,处于恶劣的工作环境,对于检测装置,应满足能经受高温低温雨雪,不易损坏、误报低、故障低、性价比高等特点. 模型设计可采用普通限位开关,进行模型检测. 如果仅采取软件切断电路,当继电器触点熔焊在一起无法断开,则不能起到迅速断开电路的作用. 因此,需设置急停按钮,电源引入采用 220 V. 为保障安全,还可设置整个电路的总开关.

## 3 软件设计

### 3.1 控制程序流程图

当有控制信号输入控制系统时,PLC 经过程序运算,输出信号控制中间继电器线圈,控制中间继电器通断,控制直流齿轮减速电机的正反转运行,从而控制载车堆垛机运行. 模型车库设置仅 3 层,底层车位可直接进出,存取车控制仅针对第 2,3 层车位,具体的工作流程图,如图 6 所示.

### 3.2 PLC 控制程序

采用调用子程序的方式写控制程序<sup>[11-12]</sup>,主程序涉及存取车完成及信号灯,子程序分为存车、取车、赋值、调试.

### 3.3 触摸屏组态

采用 17.8 mm 液晶显示屏(800 px×480 px)、四线电阻式触摸屏(1 024 px×1 024 px)和 MCGS

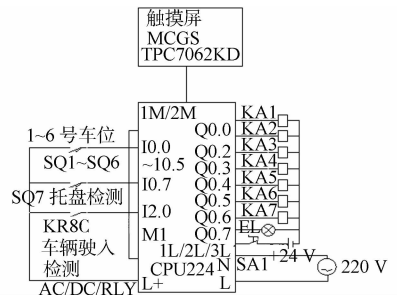


图 4 PLC 外部接线图

Fig. 4 PLC external wiring diagram

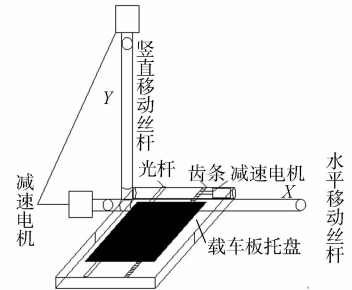


图 5 立体车库传动简示图

Fig. 5 Schematic diagram of dimensional garage transmission

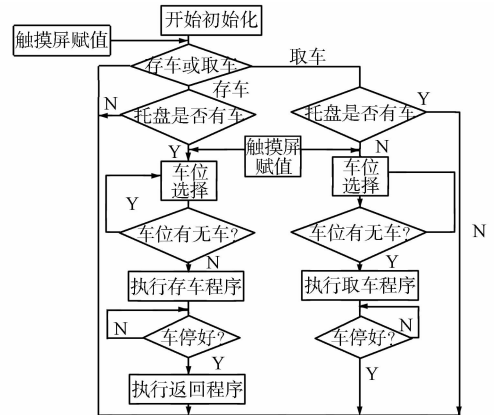


图 6 控制程序流程图

Fig. 6 Control program flow chart

嵌入版系统。该触摸屏有 128 M Flash 和 64 M 的内存,采用 24 V 直流电源供电,功率仅为 5 W。其组态软件由 MCGS 组态环境和 MCGS 运行环境组成<sup>[13]</sup>。

库存取车画面主要分为初始、存车车位选择、取车车位选择、存车等待、取车等待等 5 个画面。初始画面为开机启动显示的画面,当有车驶入时,红色指示灯亮;当载车板无车时,存车按钮不显示,不能进行存车操作。同理,当有车在载车板上时,取车按钮不显示,不能进行取车操作。此外,还可以在界面中设置调试按钮或画面,出现意外时,由工程师登录控制窗口,直接手动控制载车板下降等操作。存车画面与取车画面基本相似,在存车时,只显示可以存车的车位,已经存好的车位不显示,以避免出现不必要的操作错误。当进行取车时,相应的也只显示已经有车存放的车位,没有车存放的车位不显示。

调试界面是为了避免在运行中出现故障而紧急停车,而此时载车板上可能在高处也可能有车辆。为了降低危险程度,可以通过专业人员登录调试界面,通过手动方式控制 3 台电机运转,而登录界面需要登录密码才能进入操作。

## 4 结束语

以 3 层 6 车位单巷道堆垛式立体车库为研究对象,选用可编程逻辑控制器和触摸屏界面共同模拟单巷道堆垛式立体车库的控制系统。该设计模型基本达到设计的要求,能够正确地模拟单巷道堆垛式立体车库的控制系统,更利于观察和分析现实中容易出现的问题。然而,该系统是模型设计,若应用于实际生活中,应结合机械、电子方面的知识,如材料选择、安全保护及精度要求等。此外,还需结合国家相应的规章制度。

### 参考文献:

- [1] 黄颖坤,罗继亮.一种可编程逻辑控制程序的竞态检测方法[J].华侨大学学报(自然科学版),2015,36(2):175-178.
- [2] 齐鹏飞,罗继亮,陈雪琨.PLC 程序形式化的设计与验证[J].华侨大学学报(自然科学版),2013,34(3):241-246.
- [3] 王素粉.基于排队论的升降横移式立体停车库控制策略研究[J].传动技术,2012,26(1):34-37.
- [4] 王兵.基于 PLC 的立体车库控制系统设计[J].硅谷,2011(23):61-63.
- [5] 中国重型机械工业协会停车设备工作委员会.巷道堆垛类机械式停车设备:JB/T 10474-2015[S].北京:机械工业出版社,2015:18-30.
- [6] 倪会娟,罗继亮.采用普通 Petri 网的自动化立体仓库系统的 PLC 程序设计[J].华侨大学学报(自然科学版),2014,35(2):146-150.
- [7] 吴红霞.基于 MCGS 的立体车库监控系统设计[J].自动化应用,2014(10):48-51.
- [8] 李玉林.Introduction 平面移动式立体车库系统设计与实现[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(4):62-65.
- [9] 李丙林,魏红波,尤文.基于 PLC 和触摸屏的大功率开窗机控制系统设计[J].电子科技,2014,27(12):73-76.
- [10] 韩琳楠,李庆伟,刘媛媛.基于 PLC 控制的智能立体车库实验装置研究[J].现代制造,2012(9):56-57.
- [11] 刘伟,张廷林,董小伟,等.基于 PLC 的立体车库自动控制系统的设计[J].起重运输机械,2013(12):20-22.
- [12] 张小娟.基于 PLC 控制立体车库的设计[J].电子设计工程,2014(12):66-68.
- [13] 苏荣君,王虎奇.垂直循环式立体车库车位寻址方式的研究[J].起重运输机械,2011(2):28-29.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605012



# 超荷载条件下成型水泥混合料 拌堤坝弹性恢复机制

王侠<sup>1</sup>, 孙文君<sup>2</sup>

(1. 河北水利电力学院 基础部, 河北 沧州 061001;  
2. 河北水利电力学院 教务处, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 通过对水泥材料、特定温拌剂的添加量、温度拌合技术和拌合摊铺技术等方面的优化分析, 探讨在超荷载条件下堤坝弹性恢复能力的恢复机制. 结果表明: 改进的水泥混合料拌成型技术所修筑的堤坝在超荷载下抗荷载强度提高明显, 弹性恢复机制可以提高成型堤坝在超荷载下的弹性恢复能力.

**关键词:** 堤坝; 水泥混合料; 拌成型; 超荷载; 弹性恢复机制

**中图分类号:** TU 338 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0587-04

## Elastic Recovery Mechanism of Synthetic Cement Mixture Mixed Dam Under Over Load

WANG Xia<sup>1</sup>, SUN Wenjun<sup>2</sup>

(1. Basic Science Department, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China;  
2. Educational Administration Department,  
Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, China)

**Abstract:** The mechanism of the dam elastic recovery ability under over load was discussed by the optimal analysis of the cement material, amount of special warm mix additives, mixing temperature and mixing paving technology. The results show that the strength of the dam constructed by the improved mixing technology of cement mixed material increases significantly under over load, and elastic recovery mechanism can improve the elastic recovery ability of the formed dam under over load.

**Keywords:** dam; cement mixture; mix molding; over load; elastic recovery mechanism

在我国防洪堤坝建设过程中, 传统方法采用常温下水泥混合料作为堤坝表层来加强堤坝的稳定性. 传统水泥混合料主要由一定配比的矿物质与水泥组成. 具体拌合流程: 将各种矿物混合料、一定量的水泥进行配比和拌成型, 在规定的时间内对成型堤坝各项指标和弹性恢复相关性能进行测定<sup>[1-2]</sup>. 传统的水泥混合料拌合一般采用连续搅拌楼(SEA)技术<sup>[3-4]</sup>, 其最大特点是使用的混合料中细料较少, 矿粉和粗料较多, 这一特点增加了混合料的拌合难度. 此外, 由于粗料的比例较大, 如果不能合理地配置细料仓与粗料仓的数量, 就容易发生亏料和溢仓的情况. 在这种条件下, 水泥混合料拌合配料时, 不容易控制粗料仓的开合, 从而不可能最大限度地保持混合料的干燥性, 无法精准地掌握混合料干拌和湿拌的时间, 而且在拌合中, 还要适量地添加纤维, 因此, 在混合料拌合均匀后, 不能储存较长时间<sup>[5]</sup>. 由于 SEA 技术的这些弊端, 容易产生水泥混合料的析漏, 使水泥混合料中的水泥量流失, 所筑基堤坝弹性恢复强

收稿日期: 2016-06-21

通信作者: 王侠(1973-), 女, 副教授, 主要从事建筑与土木工程的研究. E-mail: hebeiwangxia@163.com.

基金项目: 河北省高等学校人文社会科学研究规划项目(GH161029)

度降低,很大程度上影响了防洪堤坝的质量.因此,本文对水泥混合料拌合成型堤坝在超荷载下弹性恢复机制进行了研究.

## 1 弹性恢复机制影响因素的优化

对水泥的选用、添加特定的温拌剂、温度范围的控制、混合料的拌合摊铺等方面进行优化,使之在超荷载条件下提高堤坝的弹性恢复能力.

### 1.1 混合料中水泥的选择和性能测试

选用 ROL-2000 型抗重载细基质水泥,将其与传统的 YC-100 水泥<sup>[6]</sup>进行对比,结果如表 1 所示.表 1 中: $M_c$  为 100 g, 25 °C, 5 s, 0.1 m 条件下的粘合力; $K_c$  为 15 °C, 5 cm·min<sup>-1</sup> 条件下的延展度; $\theta$  为应变软化温度; $\rho$  为密度; $S$  为溶解度; $A_w$  为低温成型度.由表 1 可知:ROL-2000 型抗重载细基质水泥的各项指标都远远优于传统 YC-100 混合水泥.

表 1 不同型号抗重载细基质水泥测试指标对比

Tab. 1 Comparison of test indexes of different type fine cement matrix under over load

性能指标	$M_c$	$K_c$	$\theta/^\circ\text{C}$	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$S$	$A_w$
ROL-2000	95	240	82	1.15	0.04	300
YC-100	83	180	63	0.90	0.01	265
标准范围	88~96	$\geq 160$	$\geq 55$	0.80~1.20	$\leq 0.05$	245~310

### 1.2 水泥混合料特定温度拌合技术

采用间歇式水泥拌合机对水泥混合料进行拌合,根据多次实验结果将拌合温度恒定在特定的范围.混合料拌合温度的设定应根据 Rolbaos 系列公式在不同的施工季节、气候条件、运输条件、运输距离及摊铺设备、碾压设备等因素,在区间内进行调整<sup>[7]</sup>.

温度拌合技术又可以分为热拌和温拌,热拌主要将温度控制在 165 °C,温拌将温度控制在 140 °C.因此,在进行水泥混合料拌合时,需要对温度进行严格控制,在拌合的同时,不影响水泥混合料的性能<sup>[8]</sup>.与此同时,一定要防止产生离析现象,不影响拌和效果<sup>[9]</sup>.

Rolbaos 系列公式表示为

$$\alpha(\theta_1) = [y_1(\theta_1 + 1), y_1(\theta_1 + 2), \dots, y_1(\theta_1 + n)], \quad (1)$$

$$\alpha(\theta_2) = [y_1(\theta_2 + 1), y_1(\theta_2 + 2), \dots, y_1(\theta_2 + n)], \quad (2)$$

$$\alpha(\theta_n) = [y_1(\theta_n + 1), y_1(\theta_n + 2), \dots, y_1(\theta_n + n)], \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \theta_{\max} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial u^2} \sum_{n=1}^n \alpha(\theta_n), \\ \omega &= \theta_{\min} \frac{\partial^2 \Omega}{\partial u \partial v} \sum_{n=1}^n \alpha(\theta_n), \\ \theta &= (\omega - \sigma) \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad \frac{x - \mu}{\sigma} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(1)~(4)中: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  为不同环境温度下微调温度; $\alpha(\theta_1), \alpha(\theta_2), \dots, \alpha(\theta_n)$  为环境温度变化修订系数; $\theta_{\min}, \theta_{\max}$  为环境温度变化最大范围; $\theta$  为根据不同的环境温度修订后的特定温度中心值,该中心值的变化率应控制在 $\pm 10\%$ .

通过式(1)~(4),可以确定拌合温度区间,拌合时要严格控制.在混合料生产过程中,若混合料的干湿程度、拌和系统加热速率、温度传感器的敏感性与准确性等控制不好,出现较大的偏差,要及时查找原因,并迅速修正.

### 1.3 特定温拌剂的添加

在进行水泥混合料拌合时,采用为配合 Rolbaos 系列公式修订的温度而开发的 AEM 型水泥混合料温拌剂. AEM 型水泥混合料温拌剂是一种腊状粘性剂,它的最高熔点不超过 100 °C,可以完全溶解在 Rolbaos 温度范围内最低温度的水泥混合料中. AEM 在水泥混合料中具有网状的晶粒分布结构,可以增加水泥混合料的稳定性,增加堤坝的弹性,提高堤坝在使用温度范围内的抗荷载性能.在添加特定

温拌剂时, 需要注意添加速率, 要求水泥罐车和特定温拌剂同时卸完, 基本上要同步<sup>[10]</sup>.

添加 AEM 型水泥混合料温拌剂后, 堤坝在超荷载下的弹性机制表示为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{\max} &= \delta \sum_{i=1}^n X_i Y_j, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \theta_{\min} &= \delta \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ \sum_{i=1}^n X_i Y_i &= MT_a \frac{x - \mu}{\sigma} (N_0 + 1), \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 &= ET_a \frac{x - \mu}{\sigma} (N_0 - 1), \quad i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\lambda(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{\max} - \theta_{\min}. \quad (6)$$

式(5),(6)中: $\theta_{\max}, \theta_{\min}$ 分别为 AEM 型水泥混合料温拌剂适宜温度范围的最大值和最小值; $\lambda(\theta)$ 为在此温度范围内的抗荷载函数值.

根据式(5),(6)计算的特定温度范围内, 添加 AEM 温拌剂和未添加 AEM 温拌剂的抗荷载特性曲线, 如图 1 所示. 图 1 中: $\theta$ 为温度. 用抗荷载系数对其进行描述, 表示为

$$\tau = \frac{\lambda(\theta)}{W} \times 100\%. \quad (7)$$

式(7)中: $\tau$ 为抗荷载系数; $W$ 为总载荷. 由图 1 可知: 在特定温度下, 添加 AEM 温拌剂的混合料筑成的堤坝比未添加 AEM 的抗负载系数提高近一倍.

### 1.4 新型水泥混合料摊铺技术的引入

水泥混合料拌合后, 需要借助摊铺机在特定的温度下进行持续摊铺作业. 因此, 在摊铺前, 必须对熨平板进行预热, 预热时间控制在 15 min 左右为宜<sup>[11]</sup>. 在进行摊铺时要注意两点: 一是摊铺时, 要尽量维持在一个速度上, 因为摊铺速度发生变化会导致摊铺表面不平衡<sup>[12]</sup>; 二是摊铺方式的选择, 常用的摊铺方式为热接热的方法, 该方法可以增加摊铺后水泥混合料的性能<sup>[13]</sup>.

引入了一种新型水泥混合料摊铺技术. 在摊铺开始时, 由于新型拌合技术下水泥混合料的出口温度不能低于 100 °C, 在该初始温度下, 对摊铺机工作温度进行实时调整, 并对熨平板进行持续加热, 确保摊铺过程中满足混合料的要求.

由于速度是 ROL-2000 型抗重载细基质水泥能否与温拌剂相结合的关键, 根据不同温度对摊铺速度进行自适应调整. 摊铺速度过快, 容易使 ROL-2000 型抗重载细基质水泥表面的粗颗粒向外滑动, 造成堤坝的凹凸; 摊铺速度过慢, 则影响施工效率, 加重施工成本<sup>[14]</sup>. 在铺筑中, 还应使 R-L 型螺旋送料器<sup>[15]</sup>慢速、均匀、持续不断地向两侧分别送料, 使送料器中的料始终维持在 R-L 型螺旋送料器的旋叶片上. 随着摊铺机前进, R-L 型螺旋摊铺器即在摊铺带宽度上均匀地摊铺水泥混合. 配合 ROL-2000 型抗重载细基质水泥与 AEM 型水泥混合料温拌剂新型铺摊技术的相关参数, 如表 2 所示. 表 2 中: $\theta_m$ 为拌合温度; $t$ 为铺筑预热时间; $\theta_{o, \min}$ 为出料最低温度; $\theta_p$ 为铺筑温度; $v$ 为铺筑速度; $d$ 为层间错缝.

表 2 新型水泥混合料拌合成型技术下的铺筑参数

Tab. 2 Paving parameters of synthetic technology of new cement mixture

混合料 型号	$\theta_m / ^\circ\text{C}$	添加 成分	$t / \text{min}$	$\theta_{o, \min} / ^\circ\text{C}$	$\theta_p / ^\circ\text{C}$	$v / \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$			$d / \text{cm}$	
						上层	中层	下层	纵缝	横缝
ROL-2000	100~160	AEM	15	100	100~160	1.5~3.0	2.5~4.5	2.5~4.5	$\geq 10$	$\geq 2$

表 2 的参数是改进型水泥混合料拌合成型技术在铺筑堤坝时必须遵循的基础参数, 也是修筑堤坝在超荷载时, 能够确保弹性恢复的前提条件.

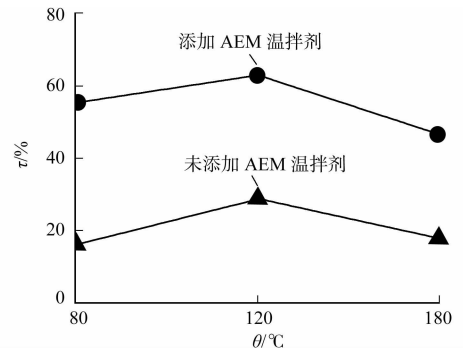


图 1 添加 AEM 温拌剂前后的抗负载对比  
Fig. 1 Comparison of strength before and after adding AEM warm mix agent

## 2 仿真分析

对改进的水泥混合料拌成型堤坝弹性恢复机制进行仿真分析,将改进后和传统弹性恢复方法的相关参数及施工条件进行对比分析,比较不同方法修筑后堤坝的弹性恢复效果.为了凸显改进后水泥混合料成分、拌合温度、AEM 添加剂等主要因素对弹性机制的影响,在施工速度和层间错缝等基础数据相同的条件下,进行仿真分析.传统 SEA 技术的铺筑参数:拌合温度为室温;无添加成分;无铺筑预热;出料最低温度为环境温度;铺筑温度为 80 ℃.

通过计算机辅助计算,可得改进后水泥混合料拌成型技术和传统 SEA 技术的抗荷载能力分别为 96,67 J · m<sup>-2</sup>;弹性恢复系数分别为 0.92,0.71.

对不同水泥混合料拌成型技术下的抗荷载能力和弹性恢复系数对比分析可知:改进的水泥混合料拌成型技术所修筑的堤坝在超荷载下抗荷载强度提高明显,弹性恢复机制也有所提高.说明改进的弹性恢复机制,可以提高成型堤坝在超荷载下的弹性恢复能力.

## 3 结束语

传统水泥混合料拌成型方式修筑堤坝表层软硬程度不均一,在超荷载条件下对堤坝的损伤较大.通过改变水泥混合料的成分,选择合适的拌合温度和摊铺温度以及加入特殊的添加剂等方式对堤坝弹性恢复能力进行改进.实验结果表明:在超荷载状况下,抗荷载强度提高明显,弹性恢复能力也有所提高.改进的弹性恢复机制可以提高成型堤坝在超荷载下的弹性恢复能力,为不同环境温度下堤坝建设提供了科学依据.

### 参考文献:

- [1] 王铁庆,杨人凤,李爱国. 橡胶沥青弹性恢复性能指标的对比试验研究[J]. 公路交通科技,2016(4):32-38.
- [2] 刘静静,黎圣,覃朝科,等. 铅锌硫化矿尾矿用作生产复合硅酸盐水泥混合材料的试验研究[J]. 矿产与地质,2015,29(5):678-681.
- [3] 王连捷,崔军文,孙东生. 腾冲科学钻探孔非弹性应变恢复法三维地应力测量[J]. 地球学报,2016(1):111-115.
- [4] 魏鹏. 不同水泥用量对乳化沥青冷再生混合料性能的影响[J]. 城市道桥与防洪,2014,7(7):328-330.
- [5] 卢红,武海龙,王卫华. 水泥基快硬瓷砖胶中铝酸盐复合胶凝体系的试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2015,36(1):69-73.
- [6] 王官超,杜启振. 基于包络目标函数的弹性波波反演[J]. 石油物探,2016(1):133-141.
- [7] 黄丽媚,郭松,赵骞. 热塑性聚烯烃弹性体的单向形状记忆行为[J]. 化工学报,2016(2):661-666.
- [8] 林生峰. 温拌纤维沥青混合料在旧水泥路面加铺的应用[J]. 广东建材,2015,31(5):17-19.
- [9] 胡尚军. 水泥稳定碎石混合料施工分离析技术研究[J]. 交通科技,2014(6):123-125.
- [10] 杨融,韩鹏. 温拌沥青混合料 SMA 在宁高高速公路改造工程中的应用[J]. 四川水泥,2015(10):326-327.
- [11] 尹锦明,田涛,王永. 强震后铅芯橡胶支座在简支梁桥恢复重建中的应用[J]. 中外公路,2016(1):140-143.
- [12] 边玉强. 高速公路沥青路面施工中双层摊铺技术的应用[J]. 工程建设与设计,2016(2):141-143.
- [13] 杨永红,任亚鹏,王选仓,等. 沥青面层双层摊铺混合料疲劳性能[J]. 建筑材料学报,2015,18(3):458-463.
- [14] 孔纲强,周航,曹兆虎. 扩底楔形桩水平向承载力理论计算方法研究[J]. 现代隧道技术,2016,53(1):119-126.
- [15] 周航,孔纲强,曹兆虎. 椭圆形孔扩张弹性分析[J]. 固体力学学报,2015(1):85-91.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605013



# 采用多因素模糊矩阵算法的数值模拟 与工程风险仿真诊断

矫立超<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 土木工程学院, 天津 300401;  
2. 河南城建学院 管理学院, 河南 平顶山 467044)

**摘要:** 以多因素模糊矩阵算法和仿真技术理论为基础, 从我国建筑工程风险的特点及实际情况出发, 探讨大型工程领域存在的风险. 对多因素模糊矩阵算法在建设工程风险评价中的适用性进行分析, 并以某省大型粮仓储备工程建设风险评价为例, 进行工程仿真诊断. 结果表明: 该算法量化程度高, 可操作性强.

**关键词:** 建设工程; 风险等级; 仿真诊断; 风险评价; 多因素模糊矩阵算法

**中图分类号:** TU 7; F 832      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0591-04

## Numerical Simulation and Engineering Risk Simulation Diagnosis Using Multi-Factor Fuzzy Matrix Algorithm

JIAO Lichao<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;  
2. School of Management, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467044, China)

**Abstract:** Based on the theory of multi-factor fuzzy matrix algorithm and simulation technology, the characteristics and the actual situation of Chinese construction project risk were discussed, the risks in the current large scale engineering field were studied. The applicability of multi-factor fuzzy matrix method in the risk assessment of construction project was analyzed, and a large granary reserve construction risk assessment was taken as an example for the engineering simulation diagnosis. The result shows that the algorithm has high degree of quantization and good operability.

**Keywords:** construction project; risk grade; simulation diagnosis; risk assessment; multi-factor fuzzy matrix algorithm

工程项目建设是一个大规模的生产过程, 参与方多、持续时间较长、环境因素复杂、四新技术采用较多. 工程项目, 尤其是大中型工程项目建设过程中, 有很多随机、模糊因素. 这些不确定的因素构成了工程项目风险的主要来源, 可能导致项目工期延误、成本超支、工程质量等问题, 甚至造成工程事故, 出现人员伤亡, 导致项目整体失败. 不同规模、不同类别的工程项目所面临的风险大小、种类也不尽相同. 因此, 对工程项目建设进行有效的风险数值模拟与仿真诊断是工程项目全过程管理中的重要课题. 作为国家战略物资储备场所, 大型现代化粮仓建设比一般工程项目更加复杂、风险控制点更多. 本文采用多因素模糊矩阵算法进行数值模拟, 对某省大型现代化粮仓建设进行工程风险仿真.

**收稿日期:** 2016-09-03

**通信作者:** 矫立超(1978-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事现代工程项目管理理论与方法的研究. E-mail: jiaolichao2006@126.com.

**基金项目:** 全国统计科学研究计划项目(2013LY127)

# 1 建设工程风险评价的多因素模糊矩阵算法

## 1.1 多因素模糊矩阵算法

多因素模糊矩阵算法,又称模糊多元算法或模糊综合算法,是一种非常有效的决策算法,适合于综合评价受多种因素影响的变量.模糊综合分析与系统理论相结合,具有较强的系统性和定量性,可以解决难量化的模糊理论涉及的多种复杂问题<sup>[1-2]</sup>.在大型工程项目建设中,有很多随机、模糊因素,这些因素随时发生变化,如环境变化、物价上涨、参与方变化、不可抗力等.这些项目特征与模糊综合评价法适用的情况相符.

1) 确定因子权重和因子集合.根据工程项目风险影响因子,采用专家打分法确定评价因子(或指标).因子集可表示为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ .各因素的重要性不同,评价因子应采取不同的权重,可表示为  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ .其中,第  $i$  个评价因子  $a_i$  的权重值为  $u_i$ .

2) 设映射关系  $\sigma(a_1, a_2, \dots, a_n)$  为多因素模糊贴进度,满足假定条件:  $\sigma(a_1, a_2, \dots, a_n) = 1$ ,  $\sum U = 1$ ,  $\sigma(a, b) = (b, a)$ ,  $A \subset B \subset C$ ,  $\sigma(a, c) \leq \sigma(a, b) \Delta \sigma(b, c)$ .

3) 确定综合评价值集合,构建模糊矩阵.评价值集合包含任意评价因子的评价等级,可表示为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ . $r_{i,j}$  表示对某系统或程序评估项目因子  $a_i$  做出的评语等级(或评价)  $v_j$  的评定概率,这个概率是隶属度的大小.整个因子集的隶属度向量由模糊综合评判矩阵  $R$  构成.

4) 模糊综合评价.依据加乘法则的普通理论,综合评定向量  $W = U \times R$ .综合评定向量  $W$  按照加权平均法确定综合评价权重:评语集  $v$  进行量化,按照等级差异度确定  $H$ .规范化综合评价向量  $W$ ,规范化后的  $W_j$ ,即  $v_j$  的权重值.由此综合得到所评价方案的总分值<sup>[3]</sup>  $N = WH^T$ .

## 1.2 多因素模糊矩阵算法在建设工程风险评价中的适用性

假设项目风险管理机构重点考虑的评价因素,如表 1 所示.

表 1 评价因素

Tab. 1 Evaluation factors

因素	说明
安全	工程安全、人员伤亡.定性与定量相结合,进行权重模糊综合评判
质量	工程质量等级.定性定量相结合,进行权重模糊综合评判
成本	赢得值法进行成本分析.定性定量相结合,进行权重模糊综合评判
工期	赢得值法进行成本分析.定性定量相结合,进行权重模糊综合评判

4 个主要评价因子定性因素较多,且可量化.其映射关系  $\sigma(a_1, a_2, \dots, a_n)$  为多因素模糊贴进度.由此可知:其相关性满足多因素模糊矩阵算法假定条件.

评价指标权数分配符合多因素模糊矩阵算法,4 种主要因素风险可划分为 5 个等级,并构成评价等级集合  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\} = \{\text{重大,较大,一般,较小,小}\}$ .由于缺乏 4 个评价指标准确的层次划分依据,其层次具有明显的模糊性,层次之间界限不清.因此,在对 4 种指标层次的衡量中,对于权重的确定,采用多因素模糊矩阵算法,使之能够量化决策者的经验判断.应用数学模型  $W = U \times R$ ,依据最大隶属原则,可得出总的评价结果.

## 2 数值模拟与风险仿真诊断

某市欲投资修建一座大型储备粮仓,包括粮食仓储主体及码头配套工程工作塔、汽车接发站、立筒仓、消防泵房、消防水池等单项工程项目.施工要求较高,要求建成优质工程,工期 2 年.因大型储备粮仓的特殊使用要求,在设计阶段已对其承载力、刚度、荷载进行反复验算与比较,将风险最大限度地控制在工程前期.

粮仓施工过程中存在的风险因素多且复杂<sup>[4]</sup>.在粮仓建设之初,由投资方牵头成立了风险管理机构,对工程进行风险识别,根据因素清单列出主要风险.在风险识别过程中,通过专家会议或对照核对表的方法,找出可能造成影响的项目风险和存在于之前的风险,分析风险对项目的影响和其产生的具体原因.风险识别方法是否正确直接影响到风险管理的全过程<sup>[5]</sup>.为了精确起见,采用专家会议法进行风险



识别, 针对工程的主要风险, 将因子集列为安全( $a_1$ )、质量( $a_2$ )、成本( $a_3$ )、工期( $a_4$ )、概率( $a_5$ ), 则  $A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$ .

表 2  $a_1 \sim a_5$  判断矩阵

Tab. 2 Judgment matrix  $a_1 \sim a_5$

严重风险	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$
$a_1$	1	1	3	4	5
$a_2$	1	1	3	4	5
$a_3$	1/3	1/3	1	3	5
$a_4$	1/4	1/4	1/3	1	3
$a_5$	1/5	1/5	1/5	1/3	1

1) 确定基于多因素模糊矩阵算法的工程风险因子集, 构建判断矩阵. 站在投资方的角度, 采用专家会议法、层次分析法列出评价因子集中诸元素权重的判断矩阵, 如表 2 所示. 根据表 2, 用层次分析方根法求解因子相对权重<sup>[6]</sup>可得  $U = [2.268, 2.268, 1.108, 0.574, 0.306]^T$ . 归一化处理  $u_i$ , 可得  $U_1 = 0.348, U_2 = 0.348, U_3 = 0.170, U_4 = 0.088, U_5 = 0.047$ . 各个因子的权重相对值为  $U = [0.348, 0.348,$

$0.170, 0.088, 0.047]^T$ . 问题的整体评价不可能准确地确定  $v_{i,j}$  的精确值, 只能支持实证估计. 如果有一个错误估计, 将导致一个特征值的判断矩阵也有偏置. 因此, 需要对结果进行一致性检验<sup>[7]</sup>, 即

$$A \cdot U = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 3 & 4 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1/3 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.348 \\ 0.348 \\ 0.170 \\ 0.088 \\ 0.047 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.790 \\ 1.790 \\ 0.900 \\ 0.459 \\ 0.249 \end{bmatrix},$$

$$\lambda = 5.23, \quad CI = (\lambda - n)/(n - 1) = (5.23 - 5)/(5 - 1) = 0.057.$$

式中: CI 为一致性指标;  $\lambda$  为  $A$  的最大特征值. 对于 1~9 阶矩阵, 其平均随机一致性指标(RI)值, 如表 3 所示. 由表 3 可知:  $RI = 1.12$ , 差异度  $CR = CI/RI = 0.057/1.12 = 0.05 < 0.10$ , 符合一致性指标检验.

表 3 随机一致性指标参数 RI 值对应表

Tab. 3 Corresponding values of random consistency index parameter RI

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

2) 确定评语等级. 工程风险仿真数值矩阵可以根据国家、部门、企业的标准和规范制定质量评定标准. 根据项目的实际情况, 将风险等级划分为 5 个层次<sup>[8]</sup>, 则所有评语集为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\} = \{\text{重大, 较大, 一般, 较小, 小}\}$ . 工程的主要风险为  $A$ (现场停电),  $B$ (意外火灾),  $C$ (连续降雨). 以此为例, 得出与评语集合  $V$  对应的工程风险仿真数值矩阵, 如表 4 所示.

表 4 工程风险仿真数值矩阵

Tab. 4 Simulation matrix of engineering risk

风险因素	因子集	V				
		$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$
A	$a_1$	0	0	0	0.10	0.90
	$a_2$	0	0.10	0.20	0.30	0.40
	$a_3$	0.10	0.50	0.25	0.10	0.05
	$a_4$	0.10	0.55	0.25	0.05	0.05
	$a_5$	0.10	0.30	0.40	0.10	0.10
B	$a_1$	0.10	0.40	0.30	0.15	0.05
	$a_2$	0.20	0.35	0.05	0.05	0.05
	$a_3$	0.20	0.35	0.30	0.10	0.05
	$a_4$	0.30	0.30	0.20	0.15	0.05
	$a_5$	0.10	0.10	0.30	0.40	0.10
C	$a_1$	0	0	0	0.20	0.80
	$a_2$	0.10	0.40	0.30	0.10	0.10
	$a_3$	0.10	0.40	0.30	0.15	0.05
	$a_4$	0.10	0.60	0.20	0.05	0.05
	$a_5$	0.10	0.30	0.30	0.20	0.10

3) 综合评价. 按加乘运算法, 可得

$$W_A = U \cdot R = [0.348, 0.348, 0.170, 0.088, 0.047] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.10 & 0.90 \\ 0 & 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.40 \\ 0.1 & 0.50 & 0.25 & 0.10 & 0.05 \\ 0.1 & 0.55 & 0.25 & 0.05 & 0.05 \\ 0.1 & 0.30 & 0.40 & 0.10 & 0.10 \end{bmatrix} = [0.031, 0.182, 0.153, 0.165, 0.470].$$

同理可得

$$W_B = [0.169, 0.351, 0.309, 0.118, 0.052],$$

$$W_C = [0.065, 0.274, 0.187, 0.144, 0.331].$$

4) 根据等级数据,确定最终  $H = [90, 70, 50, 30, 10]^T$ , 可得

$$N_A = W_A \cdot H = [0.031, 0.182, 0.153, 0.165, 0.470] \times [90, 70, 50, 30, 10]^T = 32.78.$$

同理,可得  $N_B = 59.34, N_C = 41.99$ . 风险水平的划分:(80~100)为重大风险;(60~80)为较大风险;(20~60)为一般风险;(0~20)为小风险. 粮库建设项目管理机构可以根据上述标准制定具体的风险管理措施、应对方法<sup>[9-11]</sup>. 由此可知:火灾事故可被视为接近高风险;连续降雨可被视为一般风险;工程断电可被视为较小风险.

### 3 结束语

引入多因素模糊矩阵算法并进行数值模拟,对某省大型现代化粮仓建设进行工程风险仿真. 基于多因素模糊矩阵算法的数值模拟与工程风险仿真量化程度高,可操作性强,是当前工程风险定性化研究的重要补充,对工程项目管理机构及工程参与各方进行风险规避具有重要意义.

#### 参考文献:

- [1] 梁保松,曹殿立.模糊数学及其应用[M].北京:科学出版社,2007:131-132.
- [2] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2000:215-218.
- [3] 张裔智,孙波.基于AHP算法的校园网络模型的定量分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2009,34(4):183-187.
- [4] 黄逸群,林从谋,黄清祥,等.隧道型钢喷混凝土初期支护的可靠度计算方法及应用[J].华侨大学学报(自然科学版),2014,35(2):212-215.
- [5] 易涛,熊坚,万华森.高速公路基本路段交通流微观仿真建模与实现[J].昆明理工大学学报(理工版),2004,29(3):13-19.
- [6] 罗帆,刘小平,杨智.基于系统动力学的空管安全风险情景预警决策模型仿真[J].系统工程,2014,32(1):68-72.
- [7] 刘光忱,游蕾,张靖.基于层次分析法的建筑工程施工安全风险评价[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2013,15(3):106-112.
- [8] 杨莉琼,李世蓉,贾彬.基于二元决策图的建筑施工安全风险评估[J].系统工程理论与实践,2013,33(7):93-98.
- [9] 林陵娜,苏振民,王先华.基于系统动力学的建筑施工项目安全状态识别模型构建[J].中国安全生产科学技术,2011,7(12):101-107.
- [10] 张建平,胡振中.基于4D技术的施工期建筑结构安全分析研究[J].工程力学,2008,25(增刊2):204-212.
- [11] LI Heng, GUO Hongling, MIROSLAW J, et al. Using the IKEA model and virtual prototyping technology to improve construction process management[J]. Construction Management and Economics, 2008, 26(9): 991-1000.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605014



# 响应面法优化酶法提取马鲛鱼油

黄惠莉<sup>1</sup>, 童记强<sup>1</sup>, 汪泳<sup>2</sup>, 马赫<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;

2. 惠安瑞芳食品有限公司, 福建 泉州 362131)

**摘要:** 为了提高马鲛鱼的综合利用价值,采用单因素实验和响应面优化实验对马鲛鱼下脚料中鱼油的提取工艺进行研究,并对其脂肪酸组成进行分析.结果表明:马鲛鱼油提取的适宜工艺条件是 pH 值为 7,中性蛋白酶加酶量为 1.5%,酶解时间为 3 h,液固比为 3:1,酶解温度为 52 ℃,马鲛鱼油提取率为 75.38%.对马鲛鱼油的脂肪酸进行分析,共检出 12 种脂肪酸,其中,不饱和脂肪酸质量分数为 54.13%,二十碳五烯酸(EPA)质量分数为 8.40%,二十二碳六烯酸(DHA)质量分数为 7.06%,EPA 和 DHA 的质量分数较高.

**关键词:** 马鲛鱼油; 酶解; 脂肪酸; 响应面法

中图分类号: TS 224; TQ 644

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2016)05-0595-05

## Optimization of Enzymatic Extraction Conditions of Spanish Mackerel Oil by Response Surface Methodology

HUANG Huili<sup>1</sup>, TONG Jiqiang<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, MA He<sup>1</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Huian Ruifang Food Corporation Limited, Quanzhou 362131, China)

**Abstract:** In order to improve the comprehensive utilization value of spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*), the single factor and response surface optimization experiments were used to study the extraction process of oil from spanish mackerel waste and the fatty acid composition was also analyzed. Experiment results showed that: pH 7.5, dosage of neutral protease enzyme 1.5%, hydrolysis time 3 h, rate of liquid to material 3:1, and hydrolysis temperature 52 ℃ were the optimal processing conditions. Under these conditions, the extraction rate of spanish mackerel oil was 75.38%. Furthermore, by fatty acid analysis of spanish mackerel oil, 12 kinds of fatty acids were determined. The unsaturated fatty acids were 54.13% of the total fatty acids, and EPA was 8.40%, DHA was 7.06%, which showed higher content of EPA and DHA.

**Keywords:** spanish mackerel oil; enzymatic hydrolysis; fatty acid; response surface methodology

马鲛鱼(*Scomberomorus niphonius*)体内含有较多的脂肪酸,尤其是不饱和脂肪酸和蛋白.常食可增强机体免疫力<sup>[1]</sup>.目前,马鲛鱼的利用主要在冻品、鲜销,以及制备马鲛鱼卷或其他鱼食品方面<sup>[2]</sup>.在马鲛鱼制品的加工过程中,下脚料废弃较多,充分开发这些下脚料有利于提高马鲛鱼的附加值.近年来,关于鱼类油脂提取工艺的研究较多<sup>[3-6]</sup>,但利用马鲛鱼下脚料提取鱼油的研究较少<sup>[7]</sup>.目前,鱼油的提取方法主要有压榨法、溶剂法、蒸煮法、淡碱水解法、酶解法与超临界流体萃取法等<sup>[5,8-9]</sup>.酶解法是利用蛋白酶对蛋白质的水解,破坏蛋白质和鱼油的结合关系,从而释放出鱼油.酶解法提取鱼油工艺条件温和,提取出的鱼油品质好,且蛋白质水解液可以再利用.本文通过酶法水解马鲛鱼下脚料,通过响应面法优

收稿日期: 2015-09-28

通信作者: 黄惠莉(1962-),女,教授,主要从事海洋水产资源开发利用的研究. E-mail: hlhuang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省重点科研资助项目(2013N0022)

化酶法水解工艺,并测定其脂肪酸组成.

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 主要试剂和仪器

1.1.1 实验原料 将马鲛鱼下脚料(主要为鱼皮和鱼骨,福建省泉州市惠安瑞芳食品有限公司)于一20℃的冰箱冷冻,再将其切碎,贮藏备用.

1.1.2 实验药品 木瓜蛋白酶(酶活 333.4 kat·g<sup>-1</sup>)、风味蛋白酶(酶活 6.668 kat·g<sup>-1</sup>)、中性蛋白酶(酶活 66.68 kat·g<sup>-1</sup>)、碱性蛋白酶(酶活 6.668 kat·g<sup>-1</sup>)、动物蛋白酶(酶活 0.25 kat·g<sup>-1</sup>)均由南宁庞博生物工程有限公司提供;石油醚(沸点 60~90℃)、盐酸、氢氧化钠、氢氧化钾、甲醇、硫酸、正己烷(分析纯)均由上海国药集团化学试剂有限公司提供.

1.1.3 实验仪器与设备 SXT-02型索氏提取器(上海洪纪仪器设备有限公司);ME204E型电子天平(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司);PK-S22型电热恒温水浴锅(上海精宏实验设备有限公司);HJ-4A型数显恒温磁力搅拌器(江苏省金坛市医疗仪器厂);pH 700型台式pH计(美国优特公司);TG16-WS型台式高速冷冻离心机(长沙市湖南湘仪实验室仪器开发有限公司);GCMC-QP 2010 Plus型气相质谱联用仪(日本岛津公司).

### 1.2 实验方法

1.2.1 马鲛鱼下脚料基本成分的测定 水分测定采用常压干燥法,参照国家标准 GB 5009.3-2010《食品中水分的测定》;粗蛋白质测定采用凯氏定氮法,参照国家标准 GB 5009.5-2010《食品中蛋白质的测定》;粗脂肪测定采用索氏提取法,参照国家标准 GB/T 5009.6-2003《食品中脂肪的测定》;灰分测定可采用灼烧法,参照国家标准 GB 5009.4-2010《食品中灰分的测定》.

1.2.2 酶法提取马鲛鱼油工艺 称取 25 g 马鲛鱼下脚料,放入 250 mL 烧杯中,加一定量的水,调节 pH 值,加入一定量的蛋白酶,控制搅拌速度为 400 r·min<sup>-1</sup>,在一定温度条件下,酶解一定时间.酶解完成后,在 8 000 r·min<sup>-1</sup>的条件下,离心 10 min,分离出上层液,即为马鲛鱼油.最后称量,计算提取率,提取率的计算式为

$$\text{提取率} = \frac{m(\text{鱼油})}{m(\text{下脚料}) \times w} \times 100\%$$

式中: $w$ 为马鲛鱼下脚料的粗脂肪质量分数.

1.2.3 单因素实验 根据实验结果,选择蛋白酶种类、pH 值、温度、液固比、加酶量、酶解时间作为单因素,以鱼油提取率为评价参数,确定酶法提取马鲛鱼油的工艺范围.

1.2.4 响应面优化实验 根据单因素实验的结果,选取加酶量( $\phi$ )、酶解时间( $t$ )、液固比、酶解温度( $\theta$ )等 4 个影响因素为自变量,以鱼油提取率作为响应值,根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,运用 Design Expert 8.0 进行响应面设计. +1, 0, -1 分别代表 4 因素的高、中、低水平,设计响应面实验因素水平,如表 1 所示.

表 1 响应面实验因素水平表

Tab. 1 Experimental factors and levels of response surface methodology

实验水平	因素			
	A ( $\phi$ /%)	B ( $t$ /h)	C (液固比/mL·g <sup>-1</sup> )	D ( $\theta$ /℃)
-1	0.5	1	1:1	45
0	1.0	2	2:1	50
+1	1.5	3	3:1	55

1.2.5 气质联用测脂肪酸组成<sup>[10]</sup> 取 2 滴样品于 10 mL 试管,加 0.5 mol·L<sup>-1</sup>氢氧化钾-甲醇溶液 1.0 mL,摇匀,在 60℃水浴中反应 30 min.取出冷却至室温,加入 3 mL 质量分数为 14%的硫酸-甲醇溶液,摇匀,60℃水浴加热 5 min,冷却至室温,加入 3 mL 正己烷提取上层溶液用于气相色谱分析.

色谱柱为 Rtx-5Ms,载气为高纯氮,进样温度为 260℃,柱流量为 2.05 mL·min<sup>-1</sup>,分流比为 30:1.程序升温条件为 120℃,保持 1 min,以 10℃·min<sup>-1</sup>升温到 200℃,保持 5 min,再以 10℃·min<sup>-1</sup>

升温到 240 ℃, 保持 5 min. 电离方式为电子轰击电离(EI), 离子源温度为 230 ℃, 接口温度为 250 ℃, 质荷比为 45.00~400.00  $m \cdot z^{-1}$ , 检测器电压为 1 kV.

## 2 结果与讨论

### 2.1 马鲛鱼下脚料基本成分

经检测, 马鲛鱼下脚料中粗蛋白质质量分数为 22.76%, 粗脂肪质量分数为 7.22%, 可作为提取油脂的良好原料.

### 2.2 单因素实验

2.2.1 不同蛋白酶对马鲛鱼油提取率的影响 在加酶量为马鲛鱼下脚料质量的 0.2%, 酶解时间为 3 h, 液固比为 1:1, 以及酶最适 pH 值和温度的条件下进行酶解. 不同蛋白酶对马鲛鱼油提取率( $\delta$ )的影响, 如图 1 所示.

由图 1 可知: 木瓜蛋白酶得到的鱼油提取率最高, 约 73%; 其次为碱性蛋白酶和中性蛋白酶. 虽然木瓜蛋白酶的提取率最高, 但木瓜蛋白酶的价格是中性蛋白酶价格的两倍, 因此, 对工业生产而言不是很经济. 而中性蛋白酶是在 pH 值为 7 的条件下, 在水体系下的 pH 值约为 7, 无需加其他物质调节 pH 值, 这适用于工业生产. 因此, 实验采用中性蛋白酶提取马鲛鱼油.

2.2.2 pH 值对马鲛鱼油提取率的影响 在酶解温度为 50 ℃, 液固比为 1:1, 加酶量为马鲛鱼下脚料质量的 0.2%, 酶解时间为 1 h, pH 值分别为 5, 6, 7, 8, 9 的条件下进行实验, 考察 pH 值对鱼油提取率的影响, 结果如图 2 所示.

由图 2 可知: 随着 pH 值的升高, 鱼油提取率上升; 当 pH 值超过 8, 鱼油提取率下降. 这是因为酶在特定条件下都有最适 pH 值, pH 值过高或过低都会导致酶的活性降低, 甚至失活<sup>[11]</sup>. 由于 pH 值在 6~8 时鱼油提取率变化不大, 因此, 在条件优化时, 忽略 pH 值这个单因素.

2.2.3 酶解温度对马鲛鱼油提取率的影响 在 pH 值为 7, 液固比为 1:1, 加酶量为马鲛鱼下脚料质量的 0.2%, 酶解时间为 1 h, 酶解温度分别为 20, 30, 40, 50, 60 ℃ 的条件下进行实验, 考察酶解温度对鱼油提取率的影响, 结果如图 3 所示.

由图 3 可知: 随着酶解温度的升高, 鱼油提取率逐渐升高; 当酶解温度为 50 ℃ 时, 提取率最高; 当酶解温度超过 50 ℃ 时, 提取率反而下降. 这是因为温度的升高有助于提高分子热运动, 使酶能更好地与底物结合<sup>[12]</sup>. 温度过高, 鱼油的颜色也会加深, 影响鱼油品质. 因此, 最适酶解温度选择 50 ℃.

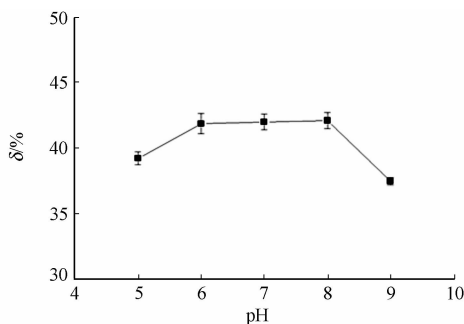


图 2 pH 值对马鲛鱼油提取率的影响  
Fig. 2 Effect of pH on extraction rate of spanish mackerel oil

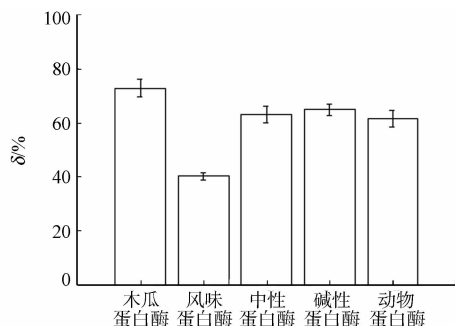


图 1 不同蛋白酶对马鲛鱼油提取率的影响  
Fig. 1 Effect of different kinds of protease on extraction rate of spanish mackerel oil

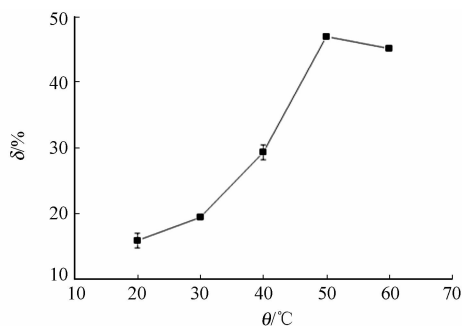


图 3 酶解温度对马鲛鱼油提取率的影响  
Fig. 3 Effect of hydrolysis temperature on extraction rate of spanish mackerel oil

2.2.4 液固比对马鲛鱼油提取率的影响 在 pH 值为 7, 酶解温度为 50 ℃, 加酶量为马鲛鱼下脚料质量的 0.2%, 酶解时间为 1 h, 液固比分别为 1:2, 1:1, 2:1, 3:1, 4:1 的条件下进行实验, 考察液固比对鱼油提取率的影响, 结果如图 4 所示.

由图4可知:随着液固比的增加,鱼油提取率逐渐上升;当液固比上升到2:1时,提取率最高;当液固比继续升高,鱼油提取率反而下降.在反应体系中,当水的质量分数较低时,酶在反应体系中分布不均,不能很好地与底物接触<sup>[13]</sup>;当水的质量分数过高时,酶的相对浓度降低,使酶和底物接触减少,鱼油提取率会下降.因此,最适的液固比选择2:1.

2.2.5 加酶量对马鲛鱼油提取率的影响 在pH值为7,酶解温度为50℃,液固比为2:1,酶解时间为1h,加酶量为马鲛鱼下脚料质量的0%,0.2%,0.5%,1%,3%的条件下进行实验,考察加酶量对鱼油提取率的影响,结果如图5所示.

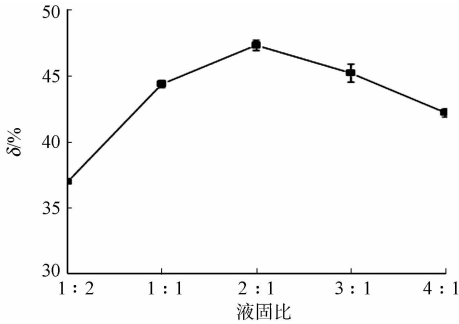


图4 液固比对马鲛鱼油提取率的影响

Fig. 4 Effect of liquid to solid ratio on vextraction rate of spanish mackerel oil

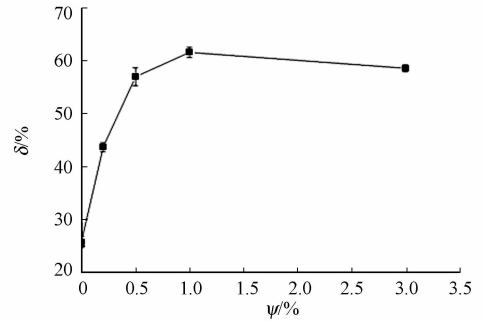


图5 加酶量对马鲛鱼油提取率的影响

Fig. 5 Effect of enzyme dosage on extraction rate of spanish mackerel oil

由图5可知:随着加酶量的增加,鱼油提取率也升高;当加酶量达到1%后,继续增加酶的质量分数,鱼油提取率没有明显变化,有少量下降.随着酶质量分数的增加,更多的蛋白质被降解,被释放的脂肪质量分数也随之增加<sup>[14]</sup>.但当反应达到饱和后,过量的酶会对酶自身产生水解作用,导致提取率有少量降低.因此,最适的加酶量为下脚料质量的1%.

2.2.6 酶解时间对马鲛鱼油提取率的影响 在pH值为7,酶解温度为50℃,液固比为2:1,加酶量为马鲛鱼下脚料质量的1%的条件下,调节酶解时间分别为0.5,1.0,2.0,3.0,4.0h进行实验,考察酶解时间对鱼油提取率的影响,结果如图6所示.

由图6可知:随着酶解时间的增加,鱼油的提取率逐渐升高;当酶解时间达2h时,鱼油提取率达71.2%;继续增加酶解时间,鱼油提取率没有明显变化;随着酶解时间的增加,酶和底物能更加充分地作用.因此,鱼油提取率上升.但酶解时间越长,提取鱼油的工艺生产周期也越长,不利于工艺生产的经济效益.因此,最适的酶解时间选择为2h.

### 2.3 响应面法优化酶解条件

响应面实验结果,如表2所示.表2中:δ为提取率.

对表2的数据进行多项式拟合回归,经优化后得到以鱼油得率(Y)为因变量,以加酶量(A)、酶解时间(B)、液固比(C)、酶解温度(D)为自变量的回归方程,即

$$Y = 64.37 + 4.81A + 1.28B + 4.14C + 2.16D + 8.45AB + 5.28AC + 2.99AD + 1.92BC + 0.92BD + 2.80CD - 7.60A^2 - 3.56B^2 - 3.43C^2 - 11.31D^2.$$

回归方程方差分析表,如表3所示.由表3可知: $P < 0.0001$ ,表明模型具有显著统计学意义,且失拟项  $P = 0.1288 > 0.05$ ,即失拟项无统计学意义.模型  $R^2 = 0.9326$ ,校正  $R_{Adj}^2 = 0.8540$ ,说明这个回归模型拟合地很好.

因此,此模型建立成功,适合用于酶法提取马鲛鱼油的条件优化.其中,A,C,D,AB,AC,A<sup>2</sup>,B<sup>2</sup>,C<sup>2</sup>,D<sup>2</sup>的P值均小于0.05,对鱼油提取率影响具有统计学意义,根据模型的线性数值大小,可以得出各

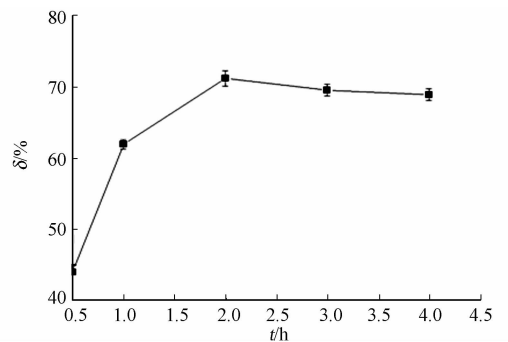


图6 酶解时间对马鲛鱼油提取率的影响

Fig. 6 Effect of hydrolysis time on extraction rate of spanish mackerel oil

因素对鱼油提取率的影响大小为  $A > C > D > B$ , 即加酶量 > 液固比 > 酶解温度 > 反应时间. 加酶量和酶解时间、加酶量和液固比的交互作用对鱼油提取率的影响较大.

表 2 响应面实验结果

Tab. 2 Experimental results of response surface methodology

试验号	A	B	C	D	$\delta/\%$	试验号	A	B	C	D	$\delta/\%$
1	1.50	1.00	2.00	50.00	46.52	15	1.50	3.00	2.00	50.00	69.48
2	1.00	2.00	3.00	55.00	54.03	16	1.50	2.00	2.00	55.00	57.72
3	0.50	2.00	2.00	55.00	42.60	17	1.00	2.00	1.00	55.00	45.27
4	1.00	3.00	2.00	45.00	46.38	18	0.50	3.00	2.00	50.00	42.08
5	1.00	2.00	2.00	50.00	62.86	19	0.50	2.00	2.00	45.00	41.87
6	1.00	2.00	1.00	45.00	49.91	20	1.50	2.00	2.00	45.00	45.03
7	1.00	3.00	3.00	50.00	63.89	21	0.50	1.00	2.00	50.00	52.91
8	1.50	2.00	3.00	50.00	69.46	22	1.00	1.00	3.00	50.00	61.05
9	1.00	1.00	2.00	55.00	49.03	23	1.00	2.00	2.00	50.00	65.41
10	1.00	1.00	2.00	45.00	45.58	24	1.00	2.00	2.00	50.00	64.85
11	0.50	2.00	3.00	50.00	49.69	25	1.00	2.00	3.00	45.00	47.47
12	1.00	1.00	1.00	50.00	57.41	26	1.50	2.00	1.00	50.00	44.69
13	1.00	3.00	2.00	55.00	53.51	27	0.50	2.00	1.00	50.00	46.03
14	1.00	3.00	1.00	50.00	52.55						

表 3 回归方程方差分析表

Tab. 3 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P	显著性
模型	1 828.13	14	130.58	11.86	< 0.000 1	显著
A	277.63	1	277.63	25.22	0.000 3	—
B	19.74	1	19.74	1.79	0.205 4	—
C	206.09	1	206.09	18.72	0.001 0	—
D	55.99	1	55.99	5.09	0.043 6	—
AB	285.44	1	285.44	25.93	0.000 3	—
AC	111.41	1	111.41	10.12	0.007 9	—
AD	35.76	1	35.76	3.25	0.096 6	—
BC	14.82	1	14.82	1.35	0.268 4	—
BD	3.39	1	3.39	0.31	0.589 4	—
CD	31.36	1	31.36	2.85	0.117 2	—
A <sup>2</sup>	308.05	1	308.05	27.99	0.000 2	—
B <sup>2</sup>	67.64	1	67.64	6.14	0.029 0	—
C <sup>2</sup>	62.70	1	62.70	5.70	0.034 3	—
D <sup>2</sup>	682.22	1	682.22	61.98	< 0.000 1	—
残差	132.09	12	11.01	—	—	—
失拟	128.50	10	12.85	7.15	0.128 8	不显著
误差	3.59	2	1.80	—	—	—
总和	1 960.22	26	—	—	—	—

### 2.4 最佳条件预测与验证

根据 Box-Behnken 方法分析, 得到鱼油提取率的最佳反应条件: 加酶量为 1.5%, 酶解时间为 3 h, 液固比为 3 : 1, 酶解温度为 51.98 °C. 此时, 提取率的预测值为 77.41%. 将其最佳反应条件进行调整: 加酶量为 1.5%, 酶解时间为 3 h, 液固比为 3 : 1, 酶解温度为 52 °C, 在此条件下进行 3 次平行实验, 得平均值为 75.38%, 与理论值接近. 这说明采用响应面优化得到的 DAG 数据可靠, 具有预测使用价值.

### 2.5 马鲛鱼油脂肪酸组成分析

对提取的马鲛鱼油进行 GC/MS 分析, 结果如表 4 所示. 表 4 中:  $\eta$  为质量分数. 由表 4 可知: 从马鲛鱼油分离出 12 种脂肪酸, 多不饱和脂肪酸以二十碳五烯酸(EPA)、二十二碳六烯酸(DHA)为主. 由此

可知:马鲛鱼油中 EPA 和 DHA 的质量分数比一般鱼类的高<sup>[11,13-14]</sup>,具有一定的开发利用价值.

表4 马鲛鱼油脂肪酸组成

Tab. 4 Composition of fatty acid of spanish mackerel oil

脂肪酸名称	肉豆蔻酸	十五烷酸	棕榈酸	棕榈油酸	十七酸	硬脂酸	油酸	亚油酸
$\eta/\%$	10.98	0.88	22.98	15.29	0.97	7.89	19.02	0.95
脂肪酸名称	花生酸	二十碳四烯酸	EPA	DHA	饱和脂肪酸	单不饱和脂肪酸	多不饱和脂肪酸	
$\eta/\%$	0.56	3.41	8.40	7.06	44.26	34.31	19.82	

### 3 结论

1) 通过马鲛鱼下脚料提取单因素设计和响应面优化,得到马鲛鱼油提取的预测模型.最佳提取条件:pH 值为 7,中性蛋白酶加酶量为马鲛鱼下脚料质量的 1.5%,酶解时间为 3 h,液固比为 3:1,酶解温度为 52 ℃,马鲛鱼油提取率为 75.38%.

2) 采用 GC/MS 对马鲛鱼油进行分析,检测出 12 种脂肪酸.其中,棕榈酸的质量分数最高,达到 22.98%;不饱和脂肪酸质量分数为 54.13%,油酸质量分数最高.多不饱和脂肪酸以 EPA,DHA 为主,EPA 的质量分数为 8.40%,DHA 质量分数为 7.06%,马鲛鱼油的 EPA 和 DHA 的质量分数比一般粗鱼油更高.

### 参考文献:

- [1] 王攀峰.马鲛鱼加工副产物酶促水解制备铁结合肽的研究[D].杭州:中国计量学院,2014:10.
- [2] 娄永江,杨文鹤,王扬,等.马鲛鱼方便食品的开发[J].食品科技,2000,17(6):31.
- [3] 胡卫强.草鱼内脏油脂的提取及其生物柴油的制备研究[D].湘潭:湘潭大学,2012:6-7.
- [4] MENEGAZZO M L,PETENUCCI M E,FONSECA G G. Production and characterization of crude and refined oils obtained from the co-products of *Nile tilapia* and hybrid sorubim processing[J]. Food Chemistry,2014,157(10):100-104.
- [5] RUBIO-RODRÍGUEZ N,De DIEGO S M,BELTRÁN S,et al. Supercritical fluid extraction of fish oil from fish by-products: A comparison with other extraction methods[J]. Journal of Food Engineering,2012,109(2):238-248.
- [6] SAHENA F,ZAIDUL I S M,JINAP S,et al. Fatty acid compositions of fish oil extracted from different parts of *Indian mackerel (Rastrelliger kanagurta)* using various techniques of supercritical CO<sub>2</sub> extraction[J]. Food Chemistry,2010,120(3):879-885.
- [7] 毛丽芳,朱新亮,桑卫国.亚临界流体萃取马鲛鱼加工下脚料中鱼油的研究[J].宁波大学学报(理工版),2012,25(4):10-15.
- [8] QIAN Junqing,ZHANG Hongyong,LIAO Qiyuan. The properties and kinetics of enzymatic reaction in the process of the enzymatic extraction of fish oil[J]. Journal of Food Science and Technology,2011,48(3):280-284.
- [9] KHODDAMI A,ARIFFIN A A,BAKAR J,et al. Fatty acid profile of the oil extracted from fish waste (head, intestine and liver) (*Sardinella lemuru*) [J]. World Applied Sciences Journal,2009,11(7):127-131.
- [10] 郝苗,金黎明,姜波.气相色谱法测定鲑鱼脂肪酸的含量[J].食品与药品,2007,9(10):22-23.
- [11] 王苗苗,罗庆华,王海磊,等.酶解法提取大鲈尾部油的工艺研究[J].中国油脂,2015,40(4):6-10.
- [12] 李文佳,孟宗,李进伟,等.响应面法优化淡水鱼内脏酶法水解工艺研究[J].中国油脂,2014,39(3):65-69.
- [13] 李梦凡,陶宁萍,刘承初,等.酶解法制备罗非鱼油工艺研究[J].中国油脂,2015,40(7):6-11.
- [14] 姚东瑞,周鸣谦,刘云鹤,等.响应面法优化酶法提取泥鳅鱼油的研究[J].中国粮油学报,2012,27(6):66-70.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)



doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605015



# 采用微藻实验系统的 入侵机制假说整合

李伟<sup>1</sup>, 王秋华<sup>2,3</sup>, 何淑婧<sup>1</sup>

(1. 西南林业大学 云南生物多样性研究院, 云南 昆明 650224;

2. 西南林业大学 土木工程学院, 云南 昆明 650224;

3. 西南林业大学 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 构建实验微藻群落,通过单培养的方式获取各微藻的生长特征参数,以反映其内禀特征和预测其竞争地位.混合培养所有微藻,对微藻竞争结果的理论预测进行实验验证,并开展一系列入侵模拟实验.实验结果表明:纤细角星鼓藻(*Staurastrum gracile*)在竞争过程中始终保持优势地位,并且能够成功入侵单建种群落,但当被引入由多个微藻组成的共建种群落时其竞争优势不再明显.

**关键词:** 养分资源; 竞争能力; 入侵实验; 微藻系统

中图分类号: Q 89

文献标志码: A

文章编号:1000-5013(2016)05-0601-05

## Empiricism on Several Integrated Resource-Based Invasion Hypotheses Using Algal Microcosms

LI Wei<sup>1</sup>, WANG Qiuhua<sup>2,3</sup>, HE Shuqiang<sup>1</sup>

(1. Yunnan Academy of Biodiversity, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** Laboratory-based algal microcosms were established, and the growth parameters of algal species in monoculture were obtained in order to reflect their inherent traits and predict their competitive ability. All algal species were also cultured in mixture to empirically test theoretical predictions regarding their competitive ability, and a series of algal invasion experiments were carried out. The experimental results showed that *Staurastrum gracile* could use limited resources in a more efficient way than other algal species. It was the best competitor, and could successfully invade the established resident community with a low level of diversity. However, it lost its competitive advantage when introduced into the established resident community with a high level of diversity despite its superior competitive ability.

**Keywords:** nutrient resources; competitive ability; invasion experiment; algal microcosms

物种入侵是生态学研究的一个重要内容.入侵种不但会与原生种就有限的资源展开激烈的竞争,导致部分物种的局域绝灭,而且会对入侵地的生态系统产生深远而复杂的影响<sup>[1-5]</sup>.近年来,入侵生物学已成为新兴生态研究的热点领域之一<sup>[6-12]</sup>.目前,生态学家已提出多种解释物种入侵机制的假说,包括基于探索物种自身生物特性的内禀优势假说、基于探索物种间相互关系的天敌逃逸假说、物种竞争假

收稿日期: 2015-12-30

通信作者: 李伟(1978-),男,副研究员,博士,主要从事群落生态学和环境生态学的研究. E-mail:54430368@qq.com.

基金项目: 教育部归国留学人员科研启动基金资助项目(214201);西南林业大学科研启动基金资助项目(111403)

说、增强竞争力进化假说,以及基于探索生态系统抵御入侵性的多样性阻碍假说.然而,整合多种假说,系统探索入侵机理机制方面的研究十分有限<sup>[13-16]</sup>,特别是以养分资源为切入点,开展整合入侵假设的研究较少<sup>[17-18]</sup>.本文构建实验微藻群落,对内禀优势假说、物种竞争假说和多样性阻碍假说进行整合研究.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

选取5种常见的淡水浮游微藻作为实验材料,即纤细角星鼓藻、微星鼓藻、小书状新月藻、颗粒鼓藻和小颤藻.在实验开展前,各微藻置于不含氮素和磷素的伍兹霍尔(WC)培养液<sup>[19]</sup>中培养10 d.

### 1.2 实验方法

1.2.1 养分资源配置 根据雷德菲尔德比例和生态化学计量学原理<sup>[20-21]</sup>,对微藻进行单一培养时,保持各培养液中磷酸根离子浓度恒定,构建硝酸根离子浓度梯度,模拟氮素缺乏条件( $c(N):c(P)<1$ ).类似地,模拟磷素缺乏条件( $c(N):c(P)>300$ ).对微藻进行混合培养时,配置不同氮磷比例的培养液, $c(N):c(P)=16:1$ , $c(N):c(P)=1:1$ , $c(N):c(P)=180:1$ ,分别代表氮素和磷素供给平衡、氮素缺乏和磷素缺乏的情况.单培养实验重复3次,混合培养实验重复5次.

1.2.2 实验条件 选取总容积为125 mL的锥形瓶(内盛50 mL培养液)对实验微藻进行培养.为了减少环境不稳定性对微藻的影响,所有培养锥形瓶均置于光照培养箱中,恒温20℃,光照2500 lx,光暗比12 h:12 h.在每日的光照生长期,每隔2 h,人工摇动和振荡锥形培养瓶1次.

1.2.3 取样方法 在微藻单培养状态下,连续取样15 d.每天取样时,从各锥形瓶中移取0.25 mL营养液进行藻细胞计数,并在取样结束后,补充0.25 mL营养液.各微藻的生长特征参数使用Monod竞争方程<sup>[22-23]</sup>进行量化.混合培养时,采用资源脉冲供给的方式<sup>[24]</sup>,以促进多种微藻的共存.取样工作每7 d开展一次,一共开展7次.每次取样时,从各锥形瓶中移取0.25 mL营养液进行藻细胞计数.

1.2.4 微藻生长特征参数的计算 将单培养条件下的各微藻生长数据进行均值处理,采用Monod生长模型<sup>[23]</sup>进行数据拟合,并计算各微藻的生长特征参数,即

$$y = \mu_{\max} \times s / (K_s + s), \quad (1)$$

$$R^* = d \times K_s / (\mu_{\max} - d). \quad (2)$$

式(1),(2)中: $y$ 为生长比速; $s$ 为限制性养分因子浓度; $K_s$ 为半饱和常数; $\mu_{\max}$ 为最大比生长速率; $d$ 为稀释率.

根据Tilman的竞争理论,对某制约养分因子有最低需求的藻类将具有最小的 $R^*$ 值.换言之,该藻类将表现出最强的对该养分资源的摄取能力,而其在与别的藻类进行竞争的过程中,将保持绝对的优势地位.因此,通过采用 $R^*$ 量化分析各微藻的养分资源摄取能力,可以预测其竞争能力<sup>[25]</sup>.

1.2.5 实验微藻的模拟入侵实验 从内禀优势假说的角度出发,参照各微藻生长特征参数(特别是对养分资源的摄取能力)和混合培养的竞争结果来选定竞争优势种.在模拟入侵实验中,以一个竞争优势种为入侵种,其余的4种微藻则为原生种.原生种群落的构建采用两种方式:一种是将每种原生种进行单一培养;另一种则是将4种原生种进行混合培养(各微藻的初始密度约为60 细胞·mL<sup>-1</sup>).无论采用何种方式,所构建的原生种群落分别置于3种不同氮磷浓度比例的培养液中(参见节1.2.1)进行培养,并在培养14 d后引入竞争优势种(初始密度约为20 细胞·mL<sup>-1</sup>).入侵实验开展后每7 d进行一次取样,整个取样过程一共持续50 d(参见节1.2.3).单培养实验每组做3个平行样,而混合培养实验每组做5个平行样.最后,无论是竞争实验还是入侵实验,为了对各微藻种群数量特征进行比较,综合分析实验末期的4次取样数据,采取自然对数处理消除异方差问题,采用方差分析和进行组间多重比较.

## 2 结果与分析

### 2.1 各微藻的生长特征参数

对某制约养分因子有最低需求(最小 $R^*$ 值)的藻类对该养分因子有最强的摄取能力,各微藻的生长特征参数,如图1所示.由图1可知:当氮素为养分制约因子时,纤细角星鼓藻对氮素的摄取能力

最强(最小的  $R_N^*$ ), 而微星鼓藻最弱(最大的  $R_N^*$ ); 类似地, 在磷素为制约养分因子时, 纤细角星鼓藻对磷素的摄取能力最强(最小的  $R_P^*$ ), 而小颤藻最弱(最大的  $R_P^*$ ).

### 2.2 混合培养竞争结果

无论在氮素缺乏( $c(N) : c(P) = 1 : 1$ )、磷素缺乏( $c(N) : c(P) = 180 : 1$ )或氮磷素供给相对平衡( $c(N) : c(P) = 16 : 1$ )的条件下, 纤细角星鼓藻均为优势种, 保持了较高的种群数量水平, 其他微藻的种群数量则呈现不断下降的趋势. 例如, 在氮磷素供给相对平衡的条件下,  $c(N) : c(P) = 16 :$

1, 纤细角星鼓藻与其他微藻的种群数量特征差异明显( $F_{4,95} = 24.89, P < 0.001$ ). 微藻在混合培养条件下的种间竞争的结果, 如图 2 所示. 图 2 中:  $t$  为实验天数;  $d$  为藻种密度. 由图 2 可知: 纤细角星鼓藻的种群数量( $5.25 \pm 0.30$ )远大于小书状新月藻( $1.60 \pm 1.26$ )、微星鼓藻( $1.75 \pm 1.39$ )、颗粒鼓藻( $2.27 \pm 1.61$ )和小颤藻( $1.82 \pm 1.70$ )的种群数量.

### 2.3 模拟入侵实验及其结果

以氮素和磷素供给相对平衡( $c(N) : c(P) = 16 : 1$ )的情况为例, 在 4 个单建种群落(由小书状新月藻、微星鼓藻、颗粒鼓藻、小颤藻所构成的单一物种群落)形成 14 d 之后, 引入纤细角星鼓藻. 此后, 纤细角星鼓藻的种群数量不断上升, 而各单建种的种群数量则不断下降, 直至从实验系统中消失(竞争排斥作用). 然而, 当纤细角星鼓藻被引入由这 4 种微藻构成的共建种群落中, 尽管不同微藻种群的数量特征差异性依然显著( $F_{4,95} = 41.84, P < 0.001$ ), 但纤细角星鼓藻的竞争优势不再明显. 入侵种与 4 种建群种的种群动态变化, 如图 3 所示. 由图 3 可知: 种群数量( $3.59 \pm 0.20$ )显著低于颗粒鼓藻( $4.35 \pm 0.21$ )和小颤藻( $4.39 \pm 0.42$ )的种群数量.

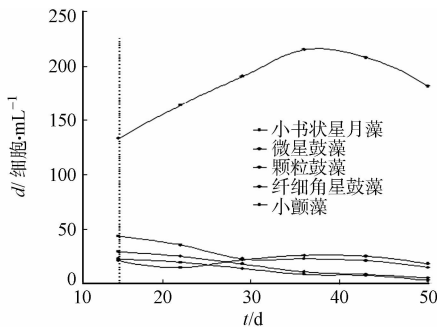


图 2 混合培养条件下的种间竞争结果

Fig. 2 Competitive outcome with experimental algal species cultivated together

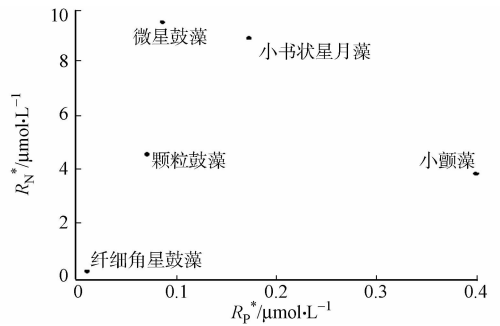


图 1 实验微藻对限制性氮素和磷素的最低需求  
Fig. 1 Minimum requirement of limiting nitrogen and phosphorus by experimental algal species

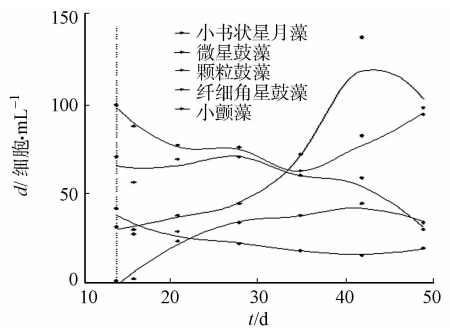


图 3 入侵种与 4 种建群种的种群动态变化

Fig. 3 Population dynamics of invader and four resident species

## 3 分析与讨论

实验结果表明, 各微藻在单一培养条件下的生长特征参数不但反映了其对有限资源的利用能力, 代表着其特有的内禀特性, 而且决定了其在资源竞争过程中的地位. 由于在单培育条件下, 纤细角星鼓藻表现出最强的摄取氮素或磷素资源的能力, 预测其在与别的藻种的竞争过程中是优势种, 而微藻混合培养实验结果也证实了有关微藻竞争能力的预测. 此外, 在模拟入侵实验中, 纤细角星鼓藻能够成功侵入单建种群落, 再次证明了其竞争优势. 然而, 当纤细角星鼓藻被引入由多个微藻组成的共建种群落时, 其竞争优势不再明显. 一种解释是, 相对于单建种群落而言, 共建种群落中的 4 种微藻可以通过生态位互补作用对有限的养分资源进行更加充分的利用, 从而大大减少纤细角星鼓藻入侵的机会. 另外一种解释是, 由于纤细角星鼓藻是在共建种群落构建 14 d 后才被引入, 优先级效应使共建种群落在资源利用方面占据先来者的优势. 考虑到纤细角星鼓藻在单建种群落和共建种群落中的表现差异性, 实验结果更支

持多样性阻碍假说的解释. 由于实验设计中没有考虑到共建种群落的多样性梯度及其所对应的物种构成变化情况,无法量化分析不同微藻抵抗入侵能力的差异性. 然而,根据各微藻对养分资源的摄取能力,作为建群种代表的颗粒鼓藻和小颤藻在入侵模拟实验中发挥了较为关键的作用,即通过充分利用限制性养分资源的方式,减少纤细角星鼓藻入侵的机会.

在开展的模拟入侵实验中,选取的入侵种并不是已对我国水生生物造成严重威胁的外来种. 事实上,试验材料均为我国常见的淡水微藻种类. 在模拟入侵实验中,对养分资源有最强摄取能力的微藻被视作入侵种,这是因为入侵种大多表现出一定的内禀优势. 只有在微藻单一培养和混合培养实验完毕后,才能根据实验结果确定选取哪一种微藻作为模拟实验中的入侵种,这样就避免了人为选择的主观性. 另外,选用的微藻系统是生态研究中常用的模型系统. 虽然该模型系统是对复杂的自然系统的一个简化,但其在揭示生态过程和相关机理方面发挥着重要的作用. 因此,在种群、群落和入侵生态学等研究中广为采用<sup>[26-29]</sup>. 通过控制水体养分资源特征和微藻群落结构的方式模拟生物入侵的过程. 虽然不能代表在自然状态下生物入侵的真实状况,但是在严格控制的实验室条件下,可以对影响入侵的一些重要因素进行效果评价,而这在多种因素相互作用相互影响的自然状态下是难以做到的. 因此,建议未来的入侵研究不但应把多种入侵机制假说进行整合并检验,而且应把野外观察与控制实验有机地结合在一起.

生物入侵是一个复杂的生态过程,多种因素的相互作用决定了某个外来种最终是否能够发展成为入侵种. 目前已提出的各种入侵机制假说都有其自身的局限性,只有通过多种假说进行整合才能较好地解释入侵机制<sup>[12,14]</sup>. 近年来,一些生态学家开始尝试对多个入侵机制假说进行整合<sup>[30-34]</sup>. 除了研究对象和研究系统不同之外,与前人研究的主要差别在于探讨的竞争类型不同. 前人的研究探讨的是物种间的化学竞争作用,即一个物种通过分泌特别的化学物质来抑制另外一个物种,而文中的研究探讨的是物种间的消费竞争作用,即一个物种通过对共享资源的消耗来抑制另外一个物种. 因此,未来的研究应充分考虑物种间的各种竞争类型. 此外,文中的研究尝试性地对几种入侵机制假说进行整合,但并未考虑影响物种入侵的其他重要因素,如物种的释放种群数量、散播速率,以及天敌的种类和数量等. 因此,未来的研究还应加强对这些方面的深入探索.

## 4 结束语

入侵种往往具有某些明显的内禀优势,使它们能够在入侵地发展壮大. 因此,未来的入侵生态学研究应加强对入侵种和原生种功能性状特征的分析 and 比较工作. 同时,还应加强对本土生物的保护,因为较高的本土生物多样性可以有效抵御入侵. 此外,由于不少生态系统中常呈现出多种外来种同时入侵的现象<sup>[18]</sup>,未来的研究还应关注更多的生态系统和更复杂的物种间相互作用关系.

## 参考文献:

- [1] ALPERT P. The advantages and disadvantages of being introduced[J]. *Biological Invasions*, 2006, 8(7): 1523-1534.
- [2] VITOUSEK P M, DANTONIO C M, LOOPE L, et al. Introduced species: A significant component of human-caused global change[J]. *New Zealand Journal of Ecology*, 1997, 21(1): 1-16.
- [3] LONSDALE W M. Global patterns of plant invasions and the concept of invasibility[J]. *Ecology*, 1999, 80(5): 1522-1536.
- [4] MACK R N, SIMBERLOFF D, LONSDALE W M, et al. Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(3): 689-710.
- [5] VILA M, ESPINAR J L, HEJDA M, et al. Ecological impacts of invasive alien plants: A meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2012, 14(7): 702-708.
- [6] KOLAR C S, LODGE D M. Progress in invasion biology: Predicting invaders[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2001, 16(4): 199-204.
- [7] 徐承远, 张文驹, 卢宝荣, 等. 生物入侵机制研究进展[J]. *生物多样性*, 2001, 9(4): 430-438.
- [8] 李博, 陈家宽. 生物入侵生态学: 成就与挑战[J]. *世界科技研究与发展*, 2002, 24(2): 26-36.
- [9] 高增祥, 季荣, 徐汝梅, 等. 外来种入侵的过程、机理和预测[J]. *生态学报*, 2003, 23(1): 559-570.
- [10] REN Mingxun, ZHANG Quanguo. The relative generality of plant invasion mechanisms and predicting future inva-

- sive plants[J]. *Weed Research*,2009,49(5):449-460.
- [11] 李博,马克平. 生物入侵:中国学者面临的转化生态学机遇与挑战[J]. *生物多样性*,2010,18(6):529-532.
- [12] LOWRY E,ROLLINSON E J,LAYBOURN A J,et al. Biological invasions: A field synopsis, systematic review and database of the literature[J]. *Ecology and Evolution*,2013,3(1):182-196.
- [13] HAYES K R,BARRY S C. Are there any consistent predictors of invasion success[J]. *Biological Invasions*,2008,10(4):483-506.
- [14] BARNEY J,WHITLOW T. A unifying framework for biological invasions: The state factor model[J]. *Biological Invasions*,2008,10(3):259-272.
- [15] CATFORD J A,JANSSON R,NILSSON C. Reducing redundancy in invasion ecology by integrating hypotheses into a single theoretical framework[J]. *Diversity and Distributions*,2009,15(1):22-40.
- [16] MOLES A T,FLORES-MORENO H,BONSER S P,et al. Invasions: The trail behind, the path ahead, and a test of a disturbing idea[J]. *Journal of Ecology*,2012,100(1):116-127.
- [17] MARTIN L J,BLOSSEY B,ELLIS E. Mapping where ecologists work: Biases in the global distribution of terrestrial ecological observations[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*,2012,10(4):195-201.
- [18] HAVEL J E,KOVALENKO K E,THOMAZ S M,et al. Aquatic invasive species: Challenges for the future[J]. *Hydrobiologia*,2015,750(1):147-170.
- [19] GUILLARD R R,LORENYEN C J. Yellow-green algae with chlorophyllide C[J]. *Journal of Phycology*,1972,8(2):10-14.
- [20] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *American Scientist*,1958,46(3):205-221.
- [21] STERNER R W,ELSER J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton:Princeton University Press,2002:10-35.
- [22] TILMAN D. Resource competition and community structure[M]. Princeton:Princeton University Press,1982:33-48.
- [23] MONOD J. The growth of bacterial cultures[J]. *Annual Review of Microbiology*,1949,3(1):371-376.
- [24] YANG L H,BASTOW J,SPENCER K O. What can we learn from resource pulses[J]. *Ecology*,2008,89(3):621-634.
- [25] CRAWLEY M J. Analysis of variance, in the R book[M]. 2nd ed. Chichester:John Wiley and Sons,2012:101-124.
- [26] KASSEN R,BUCKLING A,BELL G,et al. Diversity peaks at intermediate productivity in a laboratory microcosm [J]. *Nature*,2000,406:508-512.
- [27] FUKAMI T,MORIN P J. Productivity-biodiversity relationships depend on the history of community assembly[J]. *Nature*,2003,424:423-426.
- [28] JIANG Lin,MORIN P J. Productivity gradients cause positive diversity-invasibility relationships in microbial communities[J]. *Ecology Letters*,2004,7(11):1047-1057.
- [29] BENTON T G,SOLAN M,TRAVIS J M J,et al. Microcosm experiments can inform global ecological problems [J]. *Trends in Ecology and Evolution*,2007,22(10):516-521.
- [30] SUWA T,LOUDA S M. Combined effects of plant competition and insect herbivory hinder invasiveness of an introduced thistle[J]. *Oecologia*,2012,169(2):467-476.
- [31] BOSSDORF O. Enemy release and evolution of increased competitive ability: At last, a smoking gun[J]. *New Phytologist*,2013,198(3):638-640.
- [32] UESUGI A,KESSLER A. Herbivore-exclusion drives the evolution of plant competitiveness via increased allelopathy[J]. *New Phytologist*,2013,198(3):916-924.
- [33] LAU J A,SCHULTHEIS E H. When two invasion hypotheses are better than one[J]. *New Phytologist*,2015,205(3):958-960.
- [34] ZHENG Yulong,FENG Yulong,ZHANG Likun,et al. Integrating novel chemical weapons and evolutionarily increased competitive ability in success of a tropical invader[J]. *New Phytologist*,2015,205(3):1350-1359.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605016



# 剧烈有氧运动对内脏的伤害分析

智虹霓

(内蒙古科技大学 包头师范学院, 内蒙古 包头 014030)

**摘要:** 对剧烈有氧运动和非剧烈有氧运动的 2 组运动员进行连续 4 周的生化指标检测, 分别选取血常规、肌酸激酶、血尿素、肝功能等指标, 研究不同类型的运动对运动员内脏的影响情况. 结果表明: 长期有规律的适当有氧运动对人体的免疫功能产生积极的影响; 剧烈的有氧运动增加人体内的白细胞, 对身体素质的提高产生不利影响; 剧烈有氧运动对运动员内脏的氧转运能力要求高于非剧烈有氧运动对运动员内脏的要求; 剧烈有氧运动对运动员内脏的损伤程度大于非剧烈有氧运动的运动员, 损伤程度与有氧运动的剧烈程度有关.

**关键词:** 有氧运动; 内脏; 伤害; 损伤程度; 生化指标; 运动员

中图分类号: R 87; G 804.21

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2016)05-0606-04

## Visceral Damage Analysis of Intense Aerobic Exercise

ZHI Hongni

(Baotou Teachers' College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014030, China)

**Abstract:** Two groups of athletes including intense aerobic exercise and non-intense aerobic exercise were selected for continuous detection of biochemical indicators over 4 weeks. The routine blood, creatine kinase, blood urea, liver function and other indicators were chosen respectively, to study the influence of different types of exercises on the athletes internal organs. The results show that the appropriate long-term regular aerobic exercise has a positive effect on the body's immune function, while intense aerobic exercise can increase the white blood cells in the human body, and thus has adverse effects on the improvement of physical quality. Meanwhile, the splanchnic oxygen transport ability requirement of the intense aerobic exercise athletes is higher than that of the non-intense ones. Therefore, the visceral damage degree of the intense aerobic exercise is serious than the non-intense aerobic exercise, and the damage degree is associated with the intensity of the aerobic exercise.

**Keywords:** aerobic exercise; internal organs; injury; degree of damage; biochemical indicator; athletes

长时间有规律的体育锻炼能帮助人们改善体质、预防疾病<sup>[1-3]</sup>. 不同年龄段的人群在进行体育锻炼的过程中, 由于锻炼方法和身体素质等多方面的原因, 存在发生运动伤害事故的风险<sup>[4-6]</sup>. 内脏损伤已经成为剧烈有氧运动对人体造成的主要伤害之一, 引起越来越多学者的重视<sup>[7-9]</sup>. 特别是在体育赛事中, 经常有人在比赛过程中出现因内脏伤害而退赛的情况<sup>[10-12]</sup>. 医学上一直用重力性损伤说明这种现象, 认为在剧烈的有氧运动中, 由于体内血液循环加速<sup>[13]</sup>, 血压急剧升高, 此时, 内脏中的氧自由基的增长加剧<sup>[6]</sup>, 内脏中的血液量最高可达安静时的 30 倍以上, 内脏中的毛细血管和静脉血管的扩张和收缩对内脏产生规律性的挤压作用. 同时, 由于血液受到的重力作用, 大量的血液积聚在内脏的血管中, 使内脏中的某一部位承受不了巨大的压力, 发生内脏损伤现象. 本文对剧烈有氧运动和非剧烈有氧运动的 2 组运

收稿日期: 2016-06-21

通信作者: 智虹霓(1974-), 女, 副教授, 主要从事体育训练的研究. E-mail: 525967435@qq.com.

基金项目: 内蒙古教育厅研究项目(NJZY12204)

动员进行连续4周的生化指标检测,研究剧烈有氧运动对内脏的伤害。

## 1 研究对象与方法

1) 研究对象. 以大连市长跑运动员为研究对象,按照训练强度的不同,将其分为剧烈有氧运动组和非剧烈有氧运动组,具体情况如表1所示。表1中: $n$ 为人数; $h$ 为身高; $m$ 为体质量。

表1 研究对象的相关数据

Tab.1 Relevant data of research object

组别	$n$ /人	年龄/岁	$h$ /cm	$m$ /kg	年限/岁
剧烈组	10	16.2±1.2	175.3±1.1	67.2±1.4	3.3±0.2
非剧烈组	10	17.3±1.4	176.3±1.2	66.3±1.5	4.1±0.4

2) 检测指标与检测方法. 在实验过程中,白细胞(WBC)、红细胞(RBC)、血红蛋白(HGb)等3个指标,使用B-2800型生物特征分析仪(深圳迈瑞通通信技术有限公司)进行检测。肌酸激酶(CK)、血尿素(BU)、谷草转氨酶(AST)、谷丙转氨酶(GPT)等5种指标,采用MINILAB生化分析仪进行检测。

3) 统计方法. 采用SPSS 16.0统计软件对实验数据进行统计,统计标准为:显著性水平 $P \leq 0.05$ ;非显著性水平 $P < 0.01$ 。实验结果采用(平均数±标准差)的形式进行描述。

## 2 实验结果分析

### 2.1 白细胞的变化情况

白细胞的检测结果,如表2所示。表2中: $a$ 为细胞数量; $t$ 为训练时间;上标\*表示两组间差异具有统计学意义, $P < 0.05$ 。由表2可知:第3,4周,剧烈有氧运动组中运动员的白细胞比非剧烈有氧运动组运动员的白细胞有明显的提高( $P < 0.05$ ),但都在正常的范围之内。这表明长时间的剧烈有氧运动使运动员身体中的白细胞数量降低。

表2 白细胞与红细胞的检测结果

Tab.2 Test results of white blood cell and red blood cell

$t$	$a$ (白细胞)/ $\times 10^{12}$ 个 $\cdot L^{-1}$		$a$ (红细胞)/ $\times 10^{12}$ 个 $\cdot L^{-1}$	
	剧烈组	非剧烈组	剧烈组	非剧烈组
第1周	4.56±1.03	4.64±0.82	4.53±0.23	4.62±0.32
第2周	4.59±0.87	4.47±1.12	4.49±0.27	4.47±0.36
第3周	4.98±0.78*	5.12±0.73	4.58±0.28	4.62±0.33
第4周	4.93±0.82*	5.66±0.43	4.73±0.24	4.66±0.23

### 2.2 红细胞和血红蛋白的变化情况

红细胞与血红蛋白的检测结果,分别如表2,3所示。由表2,3可知:第2周,两组运动员体内的红细胞均有不同程度地降低;第3周~第4周,红细胞均有不同程度地升高,剧烈有氧运动组升高值更多一些,但没有明显差异;两组运动员体内的血红蛋白液都有先升高后降低,再升高的趋势,都在合理的范围内,剧烈有氧运动组第3周和第4周的升高值略高于非剧烈有氧运动组,但没有明显差异。

表3 血红蛋白检测结果

Tab.3 Test result of hemoglobin

$t$	$\rho$ (血红蛋白)/ $g \cdot L^{-1}$	
	剧烈组	非剧烈组
第1周	136.26±10.43	138.27±10.27
第2周	145.42±10.67	146.56±6.78
第3周	137.64±7.62	135.68±10.52
第4周	140.02±6.32	136.62±9.41

实验结果表明:长时间的非剧烈有氧运动使人体内脏的氧转运系统产生有利的耐性;而剧烈的有氧运动引起内脏红细胞和血红蛋白降低,类似于运动性贫血的现象,对人体的内脏产生一定的损伤。

### 2.3 谷草转氨酶和谷丙转氨酶的变化情况

谷草转氨酶和谷丙转氨酶的变化情况,如表4所示。表4中:上标\*表示两组之间差异具有统计学意义, $P < 0.5$ ;上标\*\*表示两组之间差异具有高度统计学意义, $P < 0.1$ 。由表4可知:第4周,剧烈有氧运动组和非剧烈有氧运动组的谷草转氨酶都存在下降趋势, $P < 0.5$ ;非有氧运动中的谷丙转氨酶明

显高于剧烈有氧运动组,第1,2周,剧烈有氧运动和非剧烈有氧运动差异具有统计学意义, $P < 0.5$ ;第3,4周,差异具有高度统计学意义, $P < 0.1$ 。随着训练时间的不断增加,两组运动员身体内的谷草转氨酶和谷丙转氨酶都有下降趋势,因此,剧烈有氧运动对肝脏的损伤大于非剧烈运动组,损伤的程度与有氧运动的剧烈程度、运动时间有关。

表4 谷草转氨酶和谷丙转氨酶的变化情况

Tab. 4 Change conditions of aspartate transaminase and glutamic-pyruvic transaminase

<i>t</i>	$z$ (谷草转氨酶)/ $\text{nkcat} \cdot \text{L}^{-1}$		$z$ (谷丙转氨酶)/ $\text{nkcat} \cdot \text{L}^{-1}$	
	剧烈组	非剧烈组	剧烈组	非剧烈组
第1周	244.22±85.60	300.56±88.85	372.41±43.84*	483.76±105.85
第2周	257.55±71.18	277.22±91.02	395.91±56.84*	472.43±105.35
第3周	258.72±43.84	329.73±89.51	385.74±23.67**	520.77±70.68
第4周	223.71±54.01*	303.72±85.52	322.40±54.01**	510.94±75.52

## 2.4 血尿素和肌酸激酶的变化情况

血尿素和肌酸激酶的变化情况,如表5所示。由表5可知:第1周,剧烈运动组与非剧烈运动组中的血尿素浓度差异具有统计学意义;第4周,剧烈运动组与非剧烈运动组中的血尿素浓度差异具有高度统计学意义;两组中运动员的肌酸激酶随着运动时间的增加而增加,第1周,非剧烈运动组中运动员体内的肌酸激酶浓度明显高于剧烈运动组, $P < 0.1$ ;第4周,非剧烈有氧运动组的肌酸激酶的浓度也明显高于有氧运动组, $P < 0.1$ 。

表5 血尿素和肌酸激酶的变化情况

Tab. 5 Change conditions of blood urea and creatine kinase

<i>t</i>	$c$ (血尿素)/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$		$c$ (肌酸激酶)/ $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	
	剧烈组	非剧烈组	剧烈组	非剧烈组
第1周	6.54±6.61	6.34±1.62	182.03±2.63**	421.76±156.61
第2周	7.25±1.56	6.42±1.65	178.28±57.72	268.98±121.56
第3周	7.52±1.63	6.87±1.24	184.67±65.28	456.76±156.87
第4周	6.23±0.87	6.26±0.76	165.87±43.27**	413.65±95.26

实验结果表明:运动员内脏的疲劳程度与血尿素的关系较为明显,但与肌酸激酶有着直接的关系;运动员的内脏随着运动时间的不断增加,尤其在剧烈有氧运动中,逐渐克服了惰性,需要消耗更多的物质,因此,代谢加快,在剧烈有氧运动中产生大量的酸性物质。

## 3 内脏损伤的因素与防范

### 3.1 遗传因素

在运动员运动前的体检中,内脏均无异常。4周运动结束后,对所有剧烈运动后发生内脏损伤的运动员进行体检,并未检查出内脏有异常,但是对内脏损伤的运动员进行基因测序后发现,有4个异常的内脏基因出现突变现象。因此,可以认为剧烈有氧运动这种过量的大负荷运动会促进内脏基因发生突变,从而诱发内脏发生损伤。此外,有些遗传病也是诱发内脏损伤的重要因素。

### 3.2 运动的剧烈程度

当运动的剧烈程度超过运动员能够承受的范围时,内脏的代谢速率加快,需氧量升高,内脏容易出现缺氧、缺血等情况。随着运动剧烈程度和运动时间的不断增加,内脏的血氧供应越来越紧张,人体极易出现内脏供血不足的情况,导致内脏损伤。有研究发现,内脏损伤与有氧运动的剧烈程度有关,有氧运动的剧烈程度、运动时间等都是影响人体运动负荷的主要因素,并与内脏损伤有着直接的关系。内脏损伤的危险性随着有氧运动的剧烈程度的增加而增加,竞争性的剧烈有氧运动最容易导致运动性的内脏损伤。对于缺少规律性训练的年轻运动员而言,剧烈的有氧运动可能促使胃、肠、肝、胆等内脏的损伤。内脏损伤的发生可能是致命的,特别是对有隐匿性内脏病症的运动员更具危险性。

### 3.3 性别与年龄

据资料统计,男性运动员在进行剧烈有氧运动时,发生内脏损伤的比例比女性高。这与男性运动员



经常进行剧烈的有氧运动训练有关,男性对剧烈有氧运动的疲劳更为耐受.男性运动员发生内脏遗传性疾病的概率高于女性运动员,如马凡氏综合症等.国外报道剧烈有氧运动中发生内脏损伤的高危年龄段为30~35岁,以40~45岁为高峰期.有研究表明:在我国的运动员人群中,由于剧烈有氧运动而发生内脏损伤的运动员平均年龄为(33.00±16.53)岁,年龄分布高峰在20岁以下和25~29岁.但也有研究表明:中老年是剧烈有氧运动中发生内脏损伤的高危人群,尤其是男性运动员超过45周岁,女性运动员超过55周岁后,这些年龄段的运动员在进行剧烈有氧运动时,应当被纳入中等风险的人群.这是由于剧烈有氧运动的过程会增加呼吸系统的负担和心肺的张力,剧烈的有氧运动成为诱发已患有内脏疾病发生意外损伤的危险因素.

### 3.4 运动方式与内脏损伤的防范

为了避免在运动过程中发生内脏损伤,应该控制有氧运动的剧烈程度,将有氧运动的剧烈程度控制在65%的最大摄氧量的范围内.实验结果表明:剧烈有氧运动是引发内脏损伤的重要因素,而适量的有氧运动能够改善内脏的机能,降低内脏损伤的发生概率.适当的有氧运动是内脏健康的重要保障,而剧烈的有氧运动容易对内脏产生加压反应而加重内脏的负担.但是,部分研究表明,剧烈的有氧运动能够提高人体内脏的机能,而无规律的剧烈有氧运动则无助于提高内脏的机能,容易引发内脏损伤.由此可见,剧烈有氧运动对内脏机能的提高也有着积极的作用.

## 4 结束语

研究了不同类型剧烈有氧运动对运动员内脏的伤害,并得出有效结论.由此推测剧烈有氧运动对运动员内脏产生较严重的损伤影响.该结论可以为运动剧烈程度与内脏损伤机制的研究提供新的理论指导,也为治疗运动员内脏损伤及相关药物研发提供新的思路.

### 参考文献:

- [1] 夏光明,王洲羿,黄虎翔.有氧运动对高血压病并早期肾损害患者降压谷峰比、血清胱抑素C的影响[J].中西医结合心脑血管病杂志,2014,12(8):909-911.
- [2] 凤少明.论有氧运动对心脏功能的影响[J].商品与质量:消费研究,2014,4(7):234.
- [3] 袁红,张淑芳,贾绍辉.Irisin在运动干预对于肥胖的预防与治疗中的作用[J].湖北科技学院学报(医学版),2014,28(4):366-368.
- [4] 李效凯,李世昌,黄涛.有氧运动、饮食干预对FTOrs9939609不同基因型超重和肥胖男大学生体成分、血糖等指标的影响[J].上海体育学院学报,2014,38(6):94-99.
- [5] 黄建华.8周运动与饮食干预对肥胖女大学生体成分、血脂和血胰岛素的影响[J].浙江体育科学,2013,35(4):124-128.
- [6] 邓龙,张孝民.有氧运动对大学生行为障碍的影响[J].赤峰学院学报(自然科学版),2014,30(7):149-151.
- [7] 王正珍,王艳.有氧运动对糖尿病前期人群胰岛素敏感性的影响[J].成都体育学院学报,2013,39(9):1-8.
- [8] 邹凌云,杨柳,何晓玲,等.有氧运动对乳腺癌患者癌因性疲乏疗效的Meta分析[J].中国全科医学,2014(13):1524-1528.
- [9] 侯作旭,张圆,高峰.有氧运动的心血管保护机制及其研究进展[J].生理科学进展,2014,45(4):267-270.
- [10] 李丽,仝武军,樊荣,等.有氧运动通过上调心肌细胞自噬改善衰老心肌收缩舒张功能[J].心脏杂志,2014,26(1):29-34.
- [11] 孙焱,郝选明,耿青青,等.有氧运动改善动脉粥样硬化病变的抗炎机制研究[J].北京体育大学学报,2014,21(4):62-67.
- [12] 高自军,秦爱华.有氧运动对心理亚健康护士的干预技术研究[J].四川体育科学,2014,33(1):59-61.
- [13] 付鹏宇,龚丽景,赵林青,等.有氧运动和饮食干预对肥胖小鼠Visfatin水平的影响及其与氧化应激的关系[J].中国运动医学杂志,2014,33(1):52-57.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605017



# 液压挖掘机的两级平滑 挖掘规划方法

邵辉<sup>1</sup>, 叶贤成<sup>1</sup>, 孙祥云<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 信息与科学工程学院, 福建 厦门 361021;  
2. 邢台职业技术学院 科技发展中心, 河北 邢台 054000)

**摘要:** 针对挖掘机在挖掘过程中遇到大障碍物时无法及时进行动作调整导致挖掘机机械损耗增加的问题, 提出一种以满足挖土量为目标的轨迹规划方法. 利用原像规划及下层前向搜索的两级规划方法进行轨迹规划, 实现平滑挖掘, 并通过 Matlab 仿真实验进行验证. 仿真结果表明: 该方法能对挖掘过程中与障碍物的碰撞及时做出反应, 通过原像规划算法完成避障方向的判断, 运用前向搜索算法完成对挖掘动作的调整和再次轨迹规划, 完成避障; 整个规划过程轨迹平滑, 关节角度无大的突变.

**关键词:** 液压挖掘机; 轨迹规划; 大障碍物; 原像规划; 平滑挖掘

**中图分类号:** TU 621      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0610-05

## Research on Two-Level Planning Method of Smoothly Excavating for Hydraulic Excavator

SHAO Hui<sup>1</sup>, YE Xiancheng<sup>1</sup>, SUN Xiangyun<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Science and Technology Development Center, Xingtai Polytechnic College, Xingtai 054000, China)

**Abstract:** In excavating process, an excavator cannot adjust the action of the bucket timely when large obstacles showed up. This could cause an increase in energy consumption of the machine. To solve this problem, a trajectory planning method for satisfying excavation amount was raised, which used a two-level planning trajectory method of preimage planning and forward search of lower level to achieve a smooth excavation. By using Matlab, simulation tests are performed via this method. The results of the simulation show that this method could make a response timely when excavator collides with obstacles in the process of excavating. Avoiding obstacles by using preimage planning which judges directions for avoiding obstacles and forward search which completes the adjustments of excavating action and secondary trajectory planning. Through the process, not only the planned trajectory is smooth but also the joint angles have few mutation.

**Keywords:** hydraulic excavator; trajectory planning; large obstacle; preimage planning; smoothly excavating

挖掘机作为一种典型的工程机械, 被广泛地应用在交通运输、市政工程、矿业、建筑业等领域, 运用机器人技术的自动挖掘成为新的研究热点. 目前在相关领域, 许多学者在自动挖掘路径优化及自动挖掘运动控制方面取得了一定的研究成果<sup>[1-4]</sup>, 但都是基于土壤松散均匀, 无大障碍物条件下的均匀介质土

**收稿日期:** 2015-07-24

**通信作者:** 邵辉(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人控制、运动规划及智能控制的研究. E-mail: shaohuihull@163.com.

**基金项目:** 福建省科技计划引导性项目(2015H0026); 福建省泉州市科技计划引导性项目(2013Z34); 华侨大学高层次人才科研启动项目(Z1534004)

壤环境. 对于存在大障碍物条件下的非均匀介质土壤环境, 并没有十分有效的自动挖掘轨迹规划解决方案. 传统的机器人在避障轨迹规划领域, 虽已有 A\* 算法、人工势场法、Dijkstra 算法及遗传算法寻优等<sup>[5-8]</sup>成熟的方法, 但挖掘机轨迹规划存在特殊性<sup>[9-11]</sup>, 有别于普通的机器人轨迹规划. 本文提出一种在不同土壤环境下均能满足单次挖土量, 并完成平滑挖掘动作的挖掘机轨迹规划方法.

# 1 单次挖土量的挖掘轨迹规划

## 1.1 轨迹规划方法及挖土量计算

轨迹规划是指根据作业任务要求, 对机械臂末端执行器的运动进行设计, 使之能够从初始状态沿着期望的轨迹运动到达最终状态. 以 JGM 915 型液压挖掘机为主要研究对象, 该型号挖掘机铲斗开口长度为 1 m, 铲斗容积为 0.6 m<sup>3</sup>, 单次满载挖土量约为铲斗容积的 1.5~1.8 倍<sup>[12]</sup>. 运用 D-H 法和拉格朗日方程法, 分别建立挖掘机的运动学与动力学方程, 用于分析挖掘机铲斗斗尖位置、各关节角度及挖掘过程中各关节角速度与关节驱动力之间的关系.

假设挖掘机某关节在运动开始和到达目标时的关节角度、速度和加速度均已知, 可确定关节角度的 5 次多项式变化表达式<sup>[13]</sup>, 即

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5. \tag{1}$$

对式(1)求一阶、二阶导数, 则可分别得到关节速度和加速度的变化表达式. 规划出的挖掘机的运动轨迹需要满足以下 3 个必要条件: 1) 规划出的轨迹必须在机械结构的可达范围内; 2) 运动过程中, 各关节角度的变化必须在给定的范围之内; 3) 挖掘姿态角满足一定条件<sup>[12,14]</sup>.

规划过程中, 需要对挖土量进行计算, 将规划轨迹按采样时间分成若干窄小曲边梯形, 用相应的窄小梯形近似代替窄小曲边梯形, 以窄小梯形的面积之和作为曲边梯形的近似值. 将求得的面积乘以铲斗的开口长度, 即可得挖土量的大小. 假设区间为  $[a, b]$ , 将区间  $n$  等分,  $x_0 = a, \dots, x_n = b$ , 规划轨迹拟合函数  $y = f(x)$  对应的各点函数值为  $y_0, y_1, \dots, y_n$ , 铲斗开口长度为  $h_b$ , 则单次挖土量 ( $V$ ) 的计算公式为

$$V = S \times h_b = \left( \int_a^b f(x) dx \right) \times h_b \approx \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{y_{i-1} + y_i}{2} \times \frac{b-a}{n} \right) \right] \times h_b. \tag{2}$$

## 1.2 挖掘机轨迹规划

在均匀介质条件下, 挖掘机的轨迹规划除了要满足各关节角度的限制, 也要保证按预定挖掘轨迹进行挖掘后, 能够得到与目标值相同的挖土量. 目标值以挖掘机单次满铲挖土量为基准. 挖掘机的实际挖掘过程分为两个阶段: 铲斗铲入土壤达到挖掘深度过程、到达挖掘深度后铲斗回转抬升过程. 根据操作工人的实际经验, 两个阶段得到的挖土量比例约为 1 : 1<sup>[12]</sup>. 满足单次挖土量的挖掘机轨迹规划, 如图 1 所示. 在得到挖掘起始点、挖掘中间点和挖掘末端点的同时, 通过 5 次多项式就可以得到铲斗斗尖的挖掘轨迹. 满足单次挖土量的铲斗斗尖挖掘轨迹效果图, 如图 2 所示.

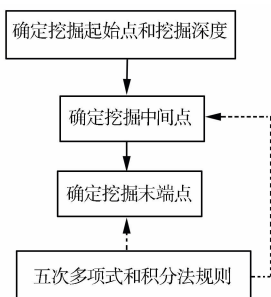


图 1 挖掘作业规划示意图

Fig. 1 Schematic chart of excavating planning

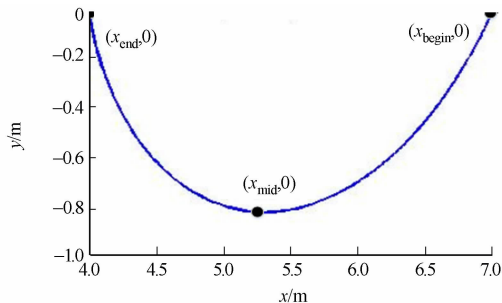


图 2 铲斗斗尖挖掘轨迹效果图

Fig. 2 Bucket tip trajectory of satisfying amount of one excavation

在确定挖掘起始点  $(x_{begin}, 0)$  和挖掘深度  $h$  后, 需要先通过规划得到挖掘中间点  $(x_{mid}, -h)$ , 得到挖掘中间点后, 用相同的方法可得满足条件的挖掘末端点  $(x_{end}, 0)$ . 具体有如下 3 个步骤.

**步骤 1** 单位步长为  $s$ , 循环次数为  $n$ , 初始时,  $n = 1$ . 从  $(x_{begin}, -h)$  开始, 以单位步长  $s$  沿挖掘机机

身方向依次规划挖掘中间点,令横坐标  $x' = x_{begin} - ns$ , 执行步骤 2.

**步骤 2** 利用 5 次多项式, 规划出从起始点  $(x_{begin}, 0)$  到规划好的挖掘中间点  $(x', h)$  之间的铲斗斗尖运动路径.

**步骤 3** 通过积分法, 计算搜索过程的挖土量  $V'$ , 若挖土量满足目标值  $0.5V$ , 则可确定该点为挖掘中间点, 坐标为  $(x_{mid}, -h)$ , 规划结束; 若不满足, 令  $n = n + 1$ , 继续执行步骤 1.

## 2 有障碍物条件下的两级挖掘轨迹规划

### 2.1 障碍物分析

土壤环境可分为均匀介质环境和非均匀介质环境, 节 1.2 提出的方法是基于均匀介质环境进行的讨论. 假定在非均匀介质环境下, 大障碍物出现在铲斗铲入的过程, 障碍物包络圆及原像规划示意图, 如图 3 所示. 图 3 中: obs 为障碍物, 大小超过铲斗容积 30% 的坚硬介质块. 如果障碍物存在以下 2 种情况, 则超出本文的讨论范围. 1) 在存在大障碍物的非均质介质环境下, 土壤介质环境超过挖掘机的挖掘能力. 2) 避障过程中, 当挖掘机关节角达到极限值时, 仍不能顺利完成避障动作, 完成平滑挖掘.

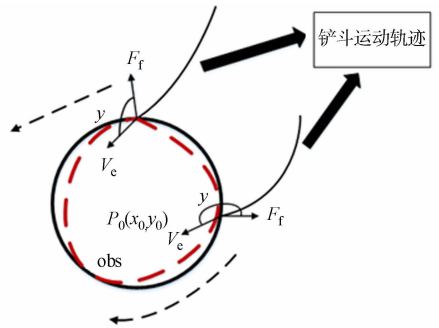


图 3 障碍物包络圆及原像规划示意图  
Fig. 3 Envelope circle of obstacle and schematic diagram of preimage planning

障碍物一般具有不规则的几何形状, 因此, 利用障碍物的规则体包络近似建模. 这种方法虽然扩大障碍物的大小, 但简化对障碍物的分析过程, 有效地提高轨迹规划的效率. 以障碍物 obs 为例, 包络圆为  $S(p_0, r_0)$ , 其中:  $p_0(x_0, y_0)$  为圆心在基坐标系中的坐标;  $r_0$  为圆的半径. 依照该方法, 障碍物在土壤环境中的平面域为

$$S = \{(x, y) \mid (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \leq r_0^2\}. \tag{10}$$

### 2.2 避障轨迹规划

避障轨迹规划的完整步骤, 如图 4 所示. 原像规划<sup>[15]</sup>主要用于分析存在不确定性情况下机器人的操作规划, 经常应用在机器人装配产品的制造业中. 铲斗在触碰到的较大介质块时, 受到障碍物 obs 产生的反作用力, 挖掘阻力会产生

突变(图 3). 假定遇到障碍物时, 铲斗斗尖受力方向是可测得的, 那么, 对铲斗斗尖运动  $V_c$  方向和碰到障碍物时受力  $F_f$  方向的夹角  $\gamma$  进行判断, 当  $\gamma$  为  $0^\circ \sim 180^\circ$  时, 挖掘机将沿着障碍物的上半部分进行避障规划; 当  $\gamma$  为  $180^\circ \sim 360^\circ$  时, 挖掘机将沿着障碍物的下半部分进行避障规划.

完成方向判断后, 剩余的避障轨迹规划由提出的一种前向搜索的轨迹规划方法完成, 设定点集  $P, Q$  保存可选路径点与不可选路径点. 铲斗斗尖的运动状态与路径点一一对应, 通过碰撞检测, 将“自由”或是“碰撞”的信息赋予点集  $P, Q$ , 轨迹规划问题就转化为求从初始位姿点到目标位姿点, 不与障碍点集合  $Q$  发生碰撞的轨迹规划问题.

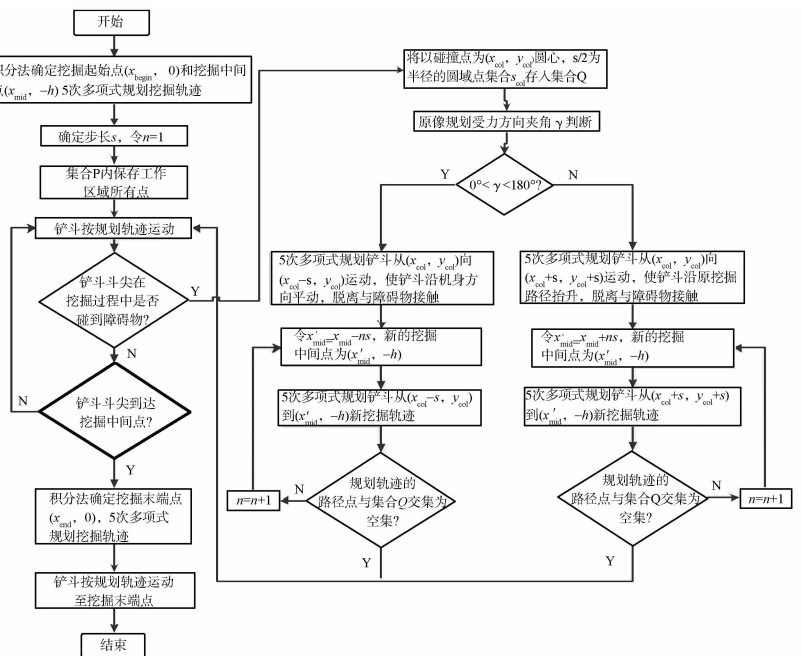


图 4 避障轨迹规划流程图

Fig. 4 Flow chart of obstacle avoidance trajectory planning

在运用前向搜索算法避开障碍物, 完成平滑挖掘后, 需要规划余下的挖掘轨迹. 将障碍物体积作为当前挖土量的一部分, 按节 1.2 的方法, 计算铲斗当前挖土量, 得到目标挖土量与当前挖土量的差值, 并以完成剩余挖土量为目标规划余下的挖掘路径.

### 3 仿真结果分析

利用 Matlab 软件进行编程验证, 选取挖掘起始点坐标为 (7, 0), 障碍物直径为 0.5 m, 挖掘深度为 0.7 m, 步长为 0.05 m, 规划单次挖土量为 0.9 m<sup>3</sup>. 避障的铲斗斗尖运动轨迹, 如图 5 所示. 挖掘过程中挖掘力变化及各关节角度变化, 如图 6 所示.

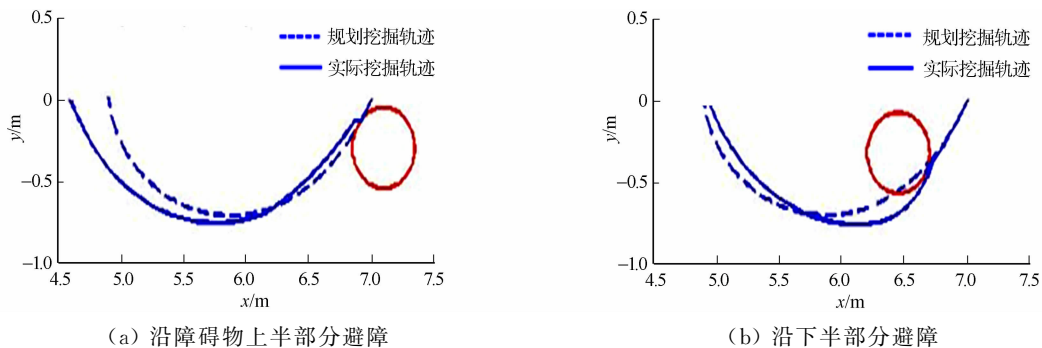


图 5 避障的铲斗斗尖运动轨迹

Fig. 5 Bucket tip trajectory with obstacle avoidance

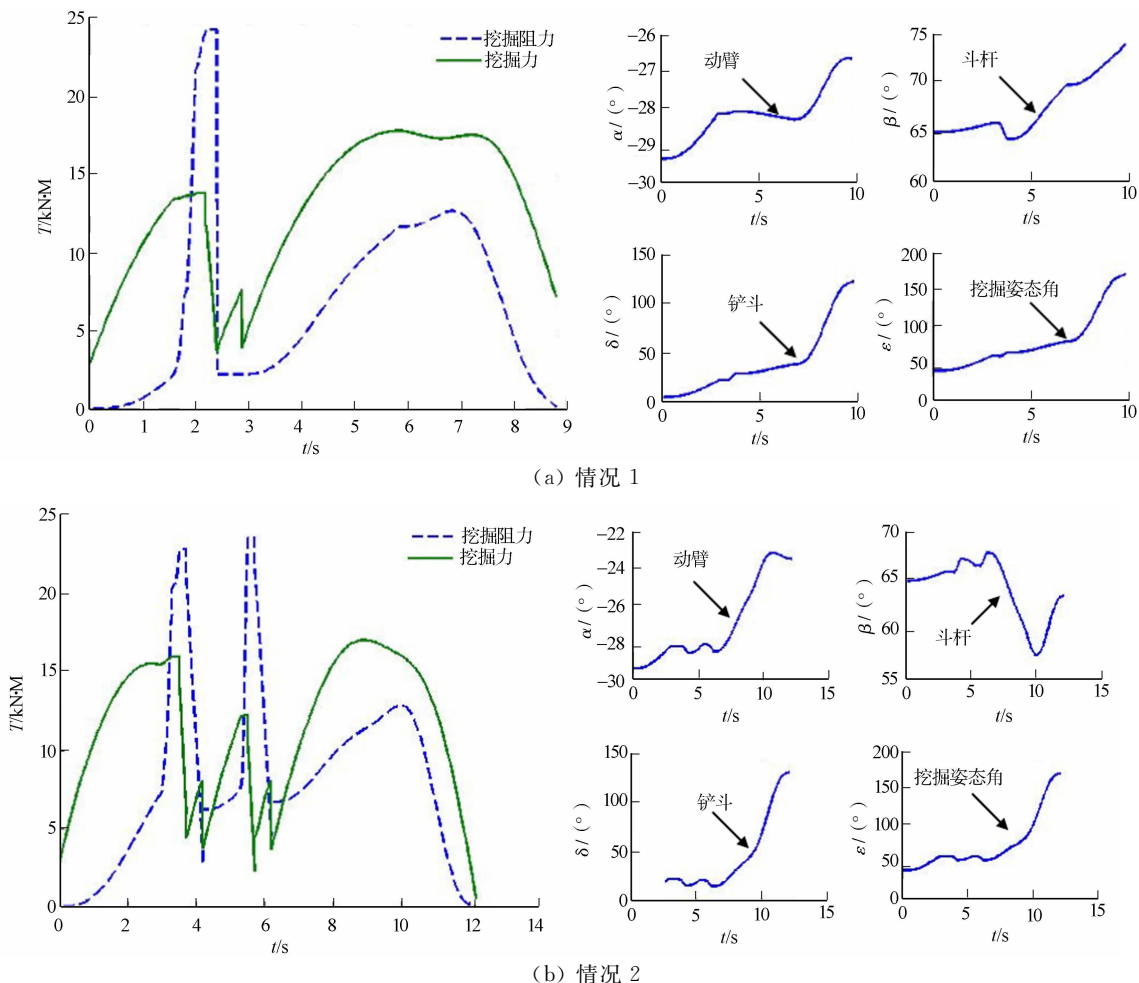


图 6 挖掘力和各关节角度

Fig. 6 Excavating force and joint angle

由图 5,6 可知:挖掘机铲斗斗尖分别在 1.6 s 左右(图 5(a))和 2.8,5.3 s 左右(图 5(b))与障碍物发生碰撞,此时挖掘阻力发生突变,系统能够对碰撞过程中的挖掘阻力突变做出反应.铲斗斗尖分别沿着障碍物的上半沿和下半沿运动,完成避障动作,并按照新的规划轨迹完成挖掘动作,实现挖掘机铲斗的平滑运动.经过积分法计算,两次轨迹规划后得到挖土量分别为 0.909,0.915 m<sup>3</sup>,与设定值差别不大.整个运动过程中,挖掘机各关节角度和挖掘姿态角变化均在合理范围内,挖掘轨迹平滑.通过以上两个仿真试验,证明提出的避障轨迹规划方法能够完成挖掘过程中的避障运动,并达到设定的挖土量.

## 4 结束语

以 JGM 915 型液压挖掘机为主要研究对象,针对挖掘机在挖掘过程中遇到大障碍物时无法及时进行动作调整,顺利完成挖掘作业的问题,提出一种基于原像规划和下层前向搜索的两级挖掘轨迹规划方法,并通过 Matlab 仿真验证.该规划方法为挖掘机自动挖掘和避障轨迹规划提供理论依据,能够为实际的挖掘作业提供指导.

### 参考文献:

- [1] ROWE P S. Adaptive motion planning for autonomous mass excavation[D]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1999:119-149.
- [2] SAEEDI P, LAWREBCE P D, LOWE D G, et al. An autonomous excavator with vision-based track-slippage control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(1): 67-84.
- [3] 冯培恩, 孙守迁, 杨毅, 等. 采掘机器人的规划级控制技术研究[J]. 自动化学报, 1995, 21(1): 33-39.
- [4] 孙祥云, 邵辉, 赵家宏. 采用粒子群优化算法的液压挖掘机高效空中运动轨迹规划方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(5): 498-502.
- [5] DUCHON F, BABINEC A, KAJAN M, et al. Path planning with modified a star algorithm for a mobile robot[J]. Procedia Engineering, 2014, 96(96): 59-69.
- [6] PAN Zhou, LI Jiaqi, HU Kaimin, et al. Intelligent vehicle path planning based on improved artificial potential field method[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 742: 349-354.
- [7] NI Kai, ZHANG Yaoting, MA Yueeng. Shortest path analysis based on dijkstra's algorithm in emergency response system[J]. Telkomnika Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014, 12: 3476-3482.
- [8] LIU Fei, LIANG Shan, XIAN Xiaodong. Optimal robot path planning for multiple goals visiting based on tailored genetic algorithm[J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2014, 7(6): 1109-1122.
- [9] 汤一平, 姜荣剑, 林璐璐. 基于主动式全景视觉的移动机器人障碍物检测[J]. 计算机科学, 2015, 42(3): 284-288, 315.
- [10] 陈胜奋, 谢明红. 工业机器人运动碰撞的仿真实现[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 137-141.
- [11] WANG Yao, HU Yanjuan, FAN Jiuchen, et al. Collision detection based on bounding box for NC machining simulation[J]. Physics Procedia, 2012, 24(1): 247-252.
- [12] 山元弘. IT 施工系统的原型制作(4): 建设机械的自动控制系统的改良与开发技术报告[R]. 茨城: 日本土木研究所, 2008: 3.
- [13] 李团结. 机器人技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 120-121.
- [14] 邵辉, 胡伟石, 罗继亮, 等. 自动挖掘机的动作规划[J]. 控制工程, 2012, 19(4): 594-597.
- [15] LAVALLE S M. 规划算法[M]. 张庆雅, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2011: 468-473.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605018



# 光镊理论模型研究进展

王娟, 任洪亮, 周业鹏

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 根据微粒尺度与入射光波长间的关系, 给出几何光学模型和电磁模型. 详细描述几何光学法、时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)、广义洛伦兹-米理论(GLMT)和瑞利散射方法等计算光镊捕获力的理论, 并列出了  $T$  矩阵法、离散偶极子近似法(DDA)、矩量法(MOM)及耦合偶极子法(CDM)等多种数值计算方法. 研究表明: 在光镊技术中, 这些方法可用于不同性质的光束及微粒的研究, 其研究方法与过程均有所不同.

**关键词:** 光镊; 光学势阱; 几何光学模型; 电磁模型; 瑞利散射理论; 捕获力

中图分类号: TN 249

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2016)05-0615-07

## Research Progress on Theoretical Model of Optical Tweezers

WANG Juan, REN Hongliang, ZHOU Yepeng

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** According to the relationship between the particles size and incident beam wavelength. The ray-optics model and the electromagnetic model were studied, mainly reviewed the ray-optics method, finite difference time domain, finite element method, generalized lorentz-mie theory and Rayleigh scattering theory, which theories were used to calculate the trapping force. And also set out several numerical methods for solving the light scattering field, such as,  $T$ -matrix method, discrete dipole approximation, method of moments and coupled dipole method. The results show that these methods can be used to study different properties of the beams and the particles in the optical tweezers, and the study methods and the processes have some all different.

**Keywords:** optical tweezers; optical potential well; geometric-optical model; electromagnetic model; Rayleigh scattering theory; trapping force

1986 年, 美国科学家 Ashkin 等<sup>[1]</sup>在 AT&T 贝尔实验室发明了光镊. 光镊是强聚焦激光与微粒相互作用形成的梯度力势阱, 是一种无损伤、无接触的微操纵技术, 能在细胞生命活性正常的条件下对其进行捕获和操纵<sup>[2-3]</sup>. 光镊系统能实现生物微作用力及纳米级微小位移的定量测定<sup>[4]</sup>. 根据微粒尺寸大小与入射光波长间的关系, 光镊理论模型可归纳为几何光学(RO)模型<sup>[4]</sup>和电磁(EM)模型<sup>[5]</sup>. RO 模型适用于微粒尺寸大小远大于入射光波长( $R \gg \lambda$ )的情况, EM 模型适用于微粒尺寸大小与入射光波长相近( $R \sim \lambda$ )或远小于入射光波长( $R \ll \lambda$ )的情况. 本文介绍几何光学法、时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)、广义洛伦兹-米理论(GLMT)和瑞利散射理论等求解捕获力的数值方法及进展.

收稿日期: 2014-07-04

通信作者: 任洪亮(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光镊建设和应用、光电检测和应用的研. E-mail: renhongliang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178015); 福建省自然科学基金资助项目(2012J05120); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(JB-ZR1146)

## 1 $R \gg \lambda$ 模型

Ashkin 是应用几何光学模型对光镊进行研究的集大成者<sup>[4]</sup>. 几何光学模型, 如图 1 所示. 将照射到微粒上的光束分解成无数条光线, 用空间光线追迹法分析光镊中微粒的受力情况, 光线在介质交界处的反射、折射和偏振的规律均遵循菲涅耳公式. 由图 1 中的几何关系和系统动量守恒可知: 微粒受到的散射力沿光线传播方向, 即  $Z$  轴方向, 而梯度力指向  $Y$  轴负方向. 将所有光线的散射力和梯度力进行矢量叠加, 可得微粒在会聚光束中总的受力  $\mathbf{F}$ . 合力  $\mathbf{F}$  和捕获效率  $Q$  的关系为  $\mathbf{F} = (n_1 P / c) \cdot \mathbf{Q}$ .

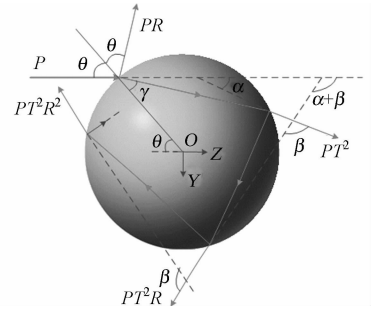


图 1 几何光学模型

Fig. 1 Ray-optics model

被捕获微粒所处环境与入射光束性质的变化都会影响微粒的捕获效率. 若微粒处于水溶液中, 水与微粒的折射率不同会引起球差问题, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 球差的存在使微粒的轴向平衡点向  $Z$  轴负方向偏移一定距离<sup>[6]</sup>. 为进一步研究球差问题, 李银妹等<sup>[7]</sup>研究空气与水界面最优光束半径对微粒轴向捕获力的影响. 徐升华等<sup>[8]</sup>考虑油浸物镜下水与水溶液折射率不同引起的球差问题, 研究光阱中两个球形微粒的轴向受力情况. 结果表明: 内层折射率小于外层折射率时, 捕获空间变小, 但稳定性变高; 内层折射率大于外层折射率时, 光镊的捕获性能降低<sup>[9]</sup>. 根据高斯光束和 LG 光束的光强分布, 分别计算高斯光束和 LG 光束捕获不同微粒时的捕获效率<sup>[10]</sup>. John 等<sup>[11]</sup>研究线偏振高斯光束对介质球微粒在倏逝场中的力和力矩, 比较了微粒半径比入射光波长小 2 倍时, 电磁场理论与几何光学法对力的计算, 对研究微粒的应用和表面相互作用提供了很大帮助.

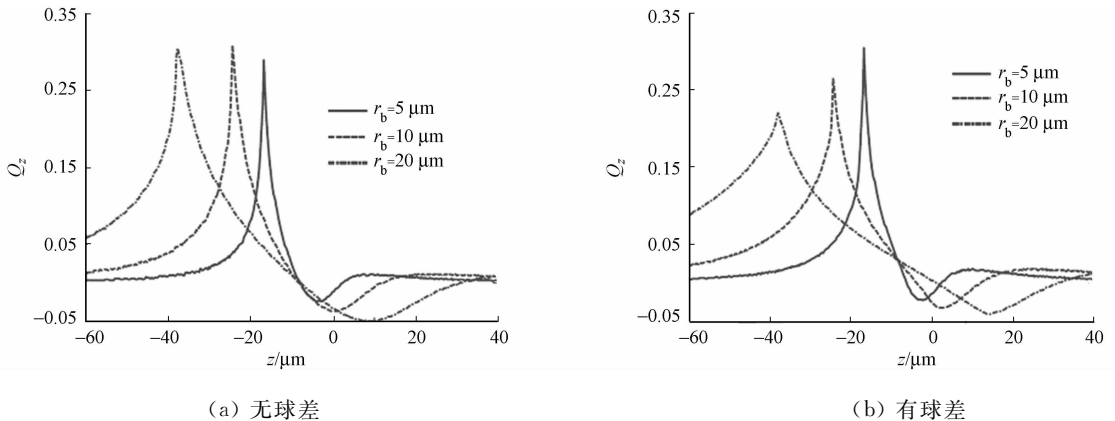


图 2 粒子轴向力随轴向位移的变化

Fig. 2 Axial force versus axis displacement

综上所述, 对微粒所处环境、捕获微粒形状、性质及入射光束模型不同的研究, 使得几何光学模型应用更为广泛, 光镊刚度和捕获力等的计算更为精确, 同时也为新型光镊的研究打下坚实基础.

## 2 $R \sim \lambda$ 模型

实验室常用的粒子(如生物细胞)大小处于微米量级, 这些微粒的尺寸大小与入射光波长比较相近, 研究时一般将其视为电磁散射问题处理, 进行数值计算的方法主要有: 时域有限差分法、有限元法、广义洛伦兹-米理论、 $T$  矩阵法等.

### 2.1 FDTD

FDTD 是由 Yee 首次提出的电磁场数值计算的一种直接时域方法, 如图 3 所示. 应用这种离散方式将含时间变量的麦克斯韦旋度方程转化为一组差分方程, 在时间轴上逐步推进求解空间电磁场<sup>[12]</sup>.

对于一个闭合空间, 其平均作用力可以写成对时间求平均的形式, 即

$$\langle \mathbf{F} \rangle = \left\langle \int_S \left[ \epsilon (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{E} + \mu (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{H} - \frac{1}{2} (\epsilon \mathbf{E}^2 + \mu \mathbf{H}^2) \mathbf{n} \right] ds - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_V \mathbf{E} \times \mathbf{H} dv \right\rangle =$$



$$\frac{1}{T} \sum_T \int_S \left[ \epsilon(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})\mathbf{E} + \mu(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})\mathbf{H} - \frac{1}{2}(\epsilon\mathbf{E}^2 + \mu\mathbf{H}^2)\mathbf{n} \right] ds. \quad (1)$$

式(1)中:  $\epsilon$  为微粒介电常数;  $\mu$  为微粒磁导率;  $\mathbf{n}$  为  $S$  内表面向外的单位矢量;  $ds$  和  $dV$  为面积元和体积元;  $\langle \rangle$  表示对时间求平均; 单色光束在一段时间内的周期为  $2\pi/\lambda$ . 若光场沿  $Z$  轴正方向传播, 采用完全匹配层(PML)<sup>[13]</sup>吸收边界仿真计算区域, 如图 4 所示.

FDTD 方法可计算任意形状、任意成分和各种光学性质的微粒<sup>[14-15]</sup>, 计算过程中不能忽略远场作用

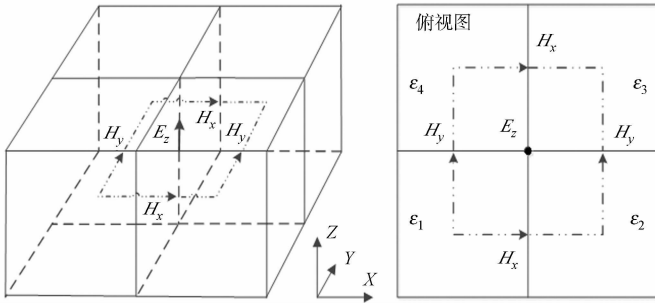


图 3 FDTD 方法中的 Yee 元胞  
Fig. 3 Yee cell of FDTD method

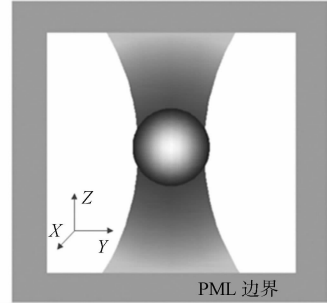


图 4 光镊计算区域  
Fig. 4 Calculation region of optical tweezers

与边界条件. 对同一微粒来说, 在光镊中的位置或方位发生变化时, 要重新计算整个过程. 利用 FDTD 方法可以计算不同形状的捕获目标, 如球形微粒的捕获力, Eom 等<sup>[16]</sup>做了详细研究. Li 等<sup>[17]</sup>利用三维 FDTD 方法和 Maxwell 应力张量模拟计算了纳米线的捕获力, 并对线偏振和径向偏振光的捕获效率进行对比, 得出径向偏振光更适合捕获高折射率的纳米线. FDTD 方法可用于新型光镊捕获微粒的研究, 单锥形光纤光镊捕获酵母细胞实验装置<sup>[18]</sup>, 如图 5 所示. 用于光栅光镊捕获不同尺度大小的金粒子的研究<sup>[19]</sup>, 也可用于凹凸不平的气溶胶微粒中的研究<sup>[20]</sup>. 采用不同的模型进行研究, 不仅拓宽了 FDTD 方法的应用, 也对光镊有更进一步发展.

## 2.2 FEM

FEM 方法是在差分法和变分法的基础上发展起来的一种数值方法, 分为离散和分片插值两方面, 能分析任意大小、形状和结构复杂的曲面或实体, 也能处理复杂的边界条件和程序编制. 实际的电磁场求解边界往往曲折多变, 用数值方法只求得其近似解. Daniel<sup>[21]</sup>用矢量 FEM 方法研究了光学梯度势阱的数值模型. 该方法对微粒所在空间进行划分, 若划分精细度提高时, 计算量会迅速增大. 因此, 该方法比较复杂.

对于介质微粒附近的电磁场, Maxwell 应力张量可以用来计算该介质微粒上的合力. Maxwell 应力张量为

$$\bar{\mathbf{T}} = \frac{1}{2}(\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{H})\bar{\mathbf{I}}(\mathbf{DE} + \mathbf{BH}). \quad (2)$$

式(2)中:  $\bar{\mathbf{I}}$  为单位张量; 介质微粒的合力为  $\mathbf{F} = \int_r \bar{\mathbf{T}} \cdot \hat{\mathbf{n}} d\Gamma$ .

FEM 计算方法也可以用于计算光镊中不同性质的微粒. Ni 等<sup>[22]</sup>模拟并选用酵母细胞进行实验, 光诱导酵母细胞旋转的方向与它所处位置和光电极边缘的距离有关, 发现光诱导酵母细胞旋转的速度与光电极和微粒之间的距离成反比. Peng 等<sup>[23]</sup>用边界元素法(BEM)通过交错耦合算法与 FEM 相互结合. 通过这种技术, 首次模拟了红细胞(RBC)在毛细管中流动, 发现蛋白密度变化和脂质双分子层骨架间的相互作用力比微量细管的期望值低很多, 最大的相互作用力发生在尾部边缘. 同时, 对有关 FEM 方法的文献和程序算法也进行了总结. 利用 FEM, 学者们还研究了空心光束的归一化强度和光纤的偏振特性. 李曙光等<sup>[24]</sup>通过包层区域气孔的不同排列和光子晶体光纤结构参数的改变, 获得不同尺度的空心光束.

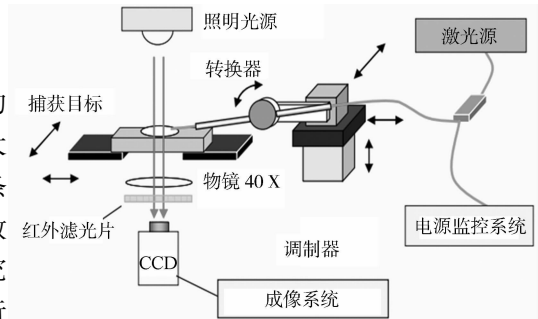


图 5 单锥形光纤光镊实验装置图  
Fig. 5 Experimental setup of single tapered fiber optical tweezers

### 2.3 GLMT

GLMT方法也是计算电磁场常用的数值方法之一,假设入射光束为高斯光束,用Davis公式来描述<sup>[25]</sup>,如图6所示。 $X'Y'Z'$ 坐标系的原点在光束束腰中心,而光束位于XYZ坐标系下展开。

GLMT方法中,关键在于波束系数( $g_n$ )<sup>[25]</sup>的计算。目前,计算 $g_n$ 系数的方法<sup>[26]</sup>有:求积分法、有限级数法、局域近似法和 $s$ -展开法。这些方法有各自的优缺点<sup>[26]</sup>,如利用 $s$ -展开法计算 $g_n$ 系数,计算比较慢,但更具有一般性,即

$$g_n^k = \sum_{j=0}^{j+2} \sum_{l=0}^{l=2k+1} \left( \frac{-2isz_0}{\omega_0} \right)^j (-1)^l s^{2l} \times \frac{(l+j)!}{l!j!} \frac{1}{l!} \frac{(n-1)!}{(n-1-l)!} \times \frac{(n+1+l)!}{(n+1)!} \exp(ikz_0). \quad (3)$$

Gouesbet等<sup>[27]</sup>计算了 $k$ 为1,3,5时的波束系数,并比较了局域光束与标准光束的波束系数。结果表明:只有当序数 $k = \infty$ (即 $s^\infty$ )时才能满足Maxwell方程<sup>[25]</sup>, $g_n$ 系数可以用Maple软件实现计算。Ren等<sup>[26]</sup>用GLMT方法计算了一束沿 $Z$ 轴正方向传播的强聚焦高斯光束对球形微粒的纵向光辐射压力。截面为

$$C_{pr,z} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{2n+1}{n(n+1)} |g_n|^2 \operatorname{Re}(a_n + b_n - 2a_n b_n^*) + \frac{n(n+2)}{n+1} \operatorname{Re}[g_n g_{n+1}^* (a_n + b_n + a_{n+1}^* + b_{n+1}^* - 2a_n a_{n+1}^* - 2b_n b_{n+1}^*)] \right\}. \quad (4)$$

式(4)中: $\lambda$ 为激光束波长; $a_n, b_n$ 为经典Mie系数, $a_n, b_n$ 与微粒的尺寸大小和材料有关。

Nieminen等<sup>[28]</sup>阐述GLMT法是很重要的计算电磁散射场的方法之一。利用GLMT方法,Lock<sup>[29]</sup>应用高数值孔径物镜形成的聚焦光束,计算了沿 $Y$ 轴偏振,沿 $Z$ 轴传播的光束的辐射捕获力。Shane等<sup>[30]</sup>通过模拟和实验研究了高频率超短脉冲激光脉冲持续时间对光学捕获的影响。

综上所述,FEM和FDTD要对微粒所处空间或者微粒本身进行分割,然后叠加求和;GLMT需要利用Maxwell方程计算不同系数和散射截面,还会受级数收敛情况的影响。当微粒在光镊中的位置或方位发生变化时,需要重复计算整个过程,计算过程繁琐复杂,这3种数值计算方法理论比较成熟,已有自己的程序代码和相应的软件,每种方法均可用于计算光镊中微粒的捕获力,且计算精度也较高,在不同计算领域有着广阔的应用前景。

### 2.4 其他数值计算方法

求解光散射场的数值方法还有 $T$ 矩阵法<sup>[31-32]</sup>, $T$ 矩阵法只取决于散射微粒的形状、尺寸大小、折射率及微粒在坐标系中的位置,不受入射场约束。鉴于 $T$ 矩阵法的优势,研究拉盖尔-高斯光束(LG光束)的阶数、微粒大小和微粒折射率对光镊捕获效率的影响,得出阶数不超过4的LG光束捕获效率最高。改变微粒大小与折射率,对LG光束和基模高斯光束的横向和轴向捕获效率做了对比,如随着微粒半径增加,LG光束的轴向捕获效率和捕获域都增大,而高斯光束的捕获域逐渐增大,但最大捕获效率基本保持不变<sup>[33]</sup>。Nieminen等<sup>[34]</sup>对 $T$ 矩阵法在光镊中的应用做了详细研究,并给出相应的程序代码。Mishchenko等<sup>[35]</sup>总结了 $T$ 矩阵法在不同领域的应用及相关文献<sup>[36-39]</sup>。除此之外,还有矩量法(MOM)<sup>[40]</sup>、离散偶极子近似法(DDA)<sup>[41]</sup>、耦合偶极子法(CDM)等<sup>[42]</sup>。

## 3 $R \ll \lambda$ 模型

若微粒折射率为 $n_1$ ,半径为 $R$ ,当 $R \leq \lambda_0/20$ 时,满足瑞利近似条件,可将微粒看做一个简单的感生偶极子,采用瑞利散射理论计算光镊捕获力<sup>[43]</sup>,如图7所示。在XYZ坐标系下,假设电场极化方向与 $X$ 轴平行,束腰为 $\omega_0$ 的光束从 $Z$ 轴负方向到 $Z$ 轴正方向传播,微粒中心为 $O_p$ ,位于坐标系中 $r = (x, y, z)$ 的位置。

微粒与光束作用会产生散射力和梯度力,其散射力为

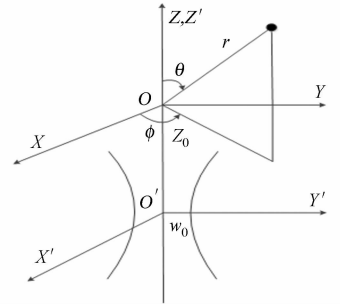


图6 沿 $Z$ 轴传播的聚焦高斯光束  
Fig. 6 Focused Gaussian beam that is propagating along  $Z$  axis

$$F_{\text{scat}}(r, z) = \hat{z} \frac{8n_2 \pi (ka)^4 a^2}{3c} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 I(r, z). \quad (5)$$

式(5)中:  $\hat{z}$  为光束传播方向的单位矢量;  $n_2$  为粒子周围介质的折射率;  $c$  为光在真空中的传播速度; 光强  $I(r, z)$  表示为

$$I(r, z) = \frac{n_2 \epsilon_0 c}{2} |E(r, z)|^2. \quad (6)$$

式(6)中:  $\epsilon_0$  为真空中介电常数;  $m = n_1/n_2$  为相对折射率; 波数为  $k = 2\pi n_2/\lambda_0$ .

梯度力为

$$F_{\text{grad}}(r, z) = \frac{2\pi n_2 a^3}{c} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \nabla I(r, z). \quad (7)$$

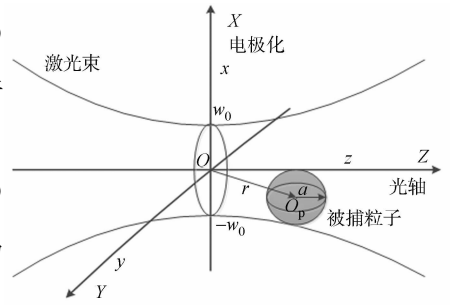
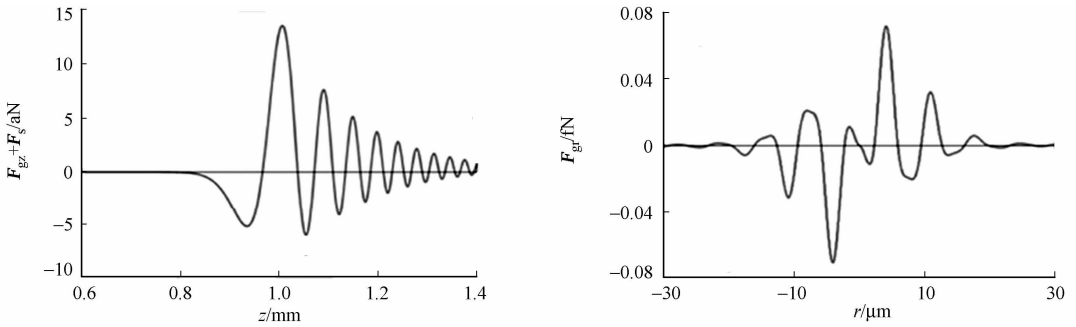


图 7 瑞利模型

Fig. 7 Rayleigh model

近年来,较多学者对瑞利散射理论进行研究,该理论在光镊中的应用也日趋成熟, Jiang 等<sup>[44]</sup> 计算了任意形状瑞利粒子捕获力,如图 8 所示.之后一些学者对生物单分子及细胞<sup>[45-46]</sup>进行了研究.众多学者还研究了强聚焦柱形矢量光束<sup>[47]</sup>、动态脉冲高斯光束<sup>[48]</sup>、傍轴近似高斯光束<sup>[49]</sup>、洛伦兹-高斯光束<sup>[50]</sup>、不连续自聚焦艾里光束<sup>[44]</sup>和环形或空心光束<sup>[42]</sup>等不同模式光束对瑞利粒子的捕获力,这些不同模式的光束为光镊捕获力的计算拓宽了研究范围,同时为光镊在微观领域的发展与应用提供了广阔前景. Fu 等<sup>[51]</sup>研究了三维坐标系下胶体纳米瑞利微粒的捕获和追踪.



(a) 梯度力和散射力之和

(b)  $z_0 = 1.038 \mu\text{m}$  处的横向梯度力

图 8 瑞利粒子辐射力分布图

Fig. 8 Distribution of radiation force on Rayleigh particle

## 4 结束语

光镊操纵、捕获介质微粒在生物学、物理学和化学等领域具有重要应用意义,而光镊背后的物理模型还没有完全得到解决.根据微粒尺度范围,给出几何光学模型和电磁模型,较详细地描述了几何光学法、FDTD、FEM、GLMT 和瑞利散射方法等计算光镊捕获力的理论,同时列出  $T$  矩阵法,DDA, MOM 及 CDM 等多种数值计算方法.在光镊技术中,这些方法可用于不同性质的光束(基模高斯, LG, Bessel 及偏振光束等)及微粒(单分子、细胞、电介质微粒等)的研究,其研究方法与过程均有所不同,这为光镊技术提供了宽领域的发展.课题组主要采用  $T$  矩阵法,研究 LG 光束捕获单个微粒、双层球微粒及多微粒的捕获力情况.

## 参考文献:

[1] ASHKIN A, DZIEDZIC J M, BJORKHOLM J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. Optics Letters, 1986, 11(5): 288-290.

[2] ZHONG Mincheng, WEI Xunbin, ZHOU Jinhua. Trapping red blood cells in living animals using optical tweezers [J]. Nat Commun, 2013, 4: 1768.

[3] REIS L A, RAMOS E B, ROCHA M S. DNA interaction with diaminobenzidine studied with optical tweezers and dynamic light scattering[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2013, 117(46): 14345-14350.

[4] ASHKIN A. Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime[J]. Biophysi-

- cal Journal, 1992, 61(2): 569-582.
- [5] BRATON J P, ALEXANDER D R, SCHAUB S A. Theoretical determination of net radiation force and torque for a spherical particle illuminated by a focused laser beam[J]. Appl Phys, 1989, 66(10): 4594-4602.
- [6] 周业鹏, 任洪亮. 球差对光镊中粒子轴向力的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 623-626.
- [7] ZHONG Mingcheng, WANG Xi, ZHOU Jinhua, et al. Optimal beam diameter for lateral optical forces on microspheres at a water-air interface[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 011403(1-4).
- [8] XU Shenghua, LI Yinmei, LOU Liren. Axial optical trapping forces on two particles trapped simultaneously by optical tweezers[J]. Applied Optics, 2005, 44(13): 2667-2672.
- [9] 周业鹏, 任洪亮, 王娟. 光镊对双层介质球作用力分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 60801(1-6).
- [10] 周业鹏, 任洪亮, 王娟, 等. 拉盖尔高斯光束与高斯光束捕获力比较[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1300-1304.
- [11] JOHN Y W. Ray optics calculation of the radiation forces exerted on a dielectric sphere in an evanescent field[J]. Appl Opt, 1999, 38(25): 5319-5330.
- [12] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011: 9-26.
- [13] 胡耿军, 李静, 龙潜, 等. 时域有限差分法数值仿真单光镊中微球受到的光阱力[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 030301(1-6).
- [14] GAUTHIER R C. Computation of the optical trapping force using an FDTD based technique[J]. Optics Express, 2005, 13(10): 3707-3718.
- [15] ZALJAROAM A R, MANSURIPUR M, MOLONEY J V. Radiation pressure and the distribution of electromagnetic force in dielectric media[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2321-2336.
- [16] EOM S I, TAKAYA Y, HAYASHI T. Novel contact probing method using single fiber optical trapping probe[J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 235-242.
- [17] LI Jing, WU Xiaoping. FDTD simulation of trapping nanowires with linearly polarized and radially polarized optical tweezers[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20736-20741.
- [18] LIU Zhihai, GUO Chengkai, YANG Jun, et al. Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: Fabrication and application[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12510-12516.
- [19] YOTSUTANI R, UKITA H. Finite-difference time-domain analysis of refractive index grating on planar light waveguide circuit with optically trapped gold particles[J]. Optical Review, 2010, 17(1): 41-46.
- [20] YANG Ping, LIOU K N, MISHCHENKO M I, et al. Efficient finite-difference time-domain scheme for light scattering by dielectric particles: Application to aerosols[J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3727-3737.
- [21] DANIEL A W. Numerical modeling of optical gradient traps using the vector finite element method[J]. Journal of Computational Physics, 2000, 159(1): 13-37.
- [22] NI Zhonghua, ZU Shucun, CHEN Ke. Light-induced electro-rotation: Microspheres spin in micro-manipulation using light-induced dielectrophoresis[J]. Science China-Technological Sciences, 2011, 54(11): 3035-3046.
- [23] PENG Zhangli, ASARO R J, ZHU Qiang. Multiscale modelling of erythrocytes in stokes flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 686(332): 299-337.
- [24] ZHANG Xiaoxia, LI Shuguang, LIU Shuo, et al. Generation of hollow beam from photonic crystal fiber with an azimuthally polarized mode[J]. Optics Communications, 2012, 285(24): 5079-5084.
- [25] BARTON J P, ALEXANDER D R. Fifth-order corrected electromagnetic field components for fundamental gaussian beam[J]. J Appl Phys, 1989, 66(7): 2800-2802.
- [26] REN Kuanfang, GRENAN G, GOUESBET G. Prediction of reverse radiation pressure by generalized Lorenz-Mie theory[J]. Applied Optics, 1996, 35(15): 2702-2710.
- [27] GOUESBET G, LOCK J A, GREHAN G. Partial-wave representations of laser beams for use in light-scattering calculations[J]. Applied Optics, 1995, 34(12): 2133-2143.
- [28] NIEMINEN T A, RUBINSZTEIN-DUNLOP H, HECKENBERG N R. Multipole expansion of strongly focussed laser beams[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 79(335): 1005-1017.
- [29] LOCK J A. Calculation of the radiation trapping force for laser tweezers by use of generalized lorenz-mie theory. I. localized model description of an on-axis tightly focused laser beam with spherical aberration[J]. Applied Optics, 2004, 43(12): 2532-2544.
- [30] SHANE J C, MAZILU M, LEE W M, et al. Effect of pulse temporal shape on optical trapping and impulse transfer

- using ultrashort pulsed lasers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 7554-7568.
- [31] LI J L W, ONG W L, ZHENG K H R. Anisotropic scattering effects of a gyrotropic sphere characterized using the  $T$ -matrix method[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(3): 036601(1-16).
- [32] BAREIL P B, SHENG Yunlong. Modeling highly focused laser beam in optical tweezers with the vector Gaussian beam in the  $T$ -matrix method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2013, 30(1): 1-6.
- [33] 王娟, 任洪亮, 周业鹏. 拉盖尔-高斯光束光镊捕获性质的研究[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2014, 3(35): 636-641.
- [34] NIEMINEN T A, LOLE V L Y, STILGOE A B, et al.  $T$ -matrix method for modelling optical tweezers[J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 58(5/6): 528-544.
- [35] MISHCHENKO M I, VIDEEN G, BABENKO V A. Comprehensive  $T$ -matrix reference database: A 2004—2006 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 106(1/2/3): 304-324.
- [36] MISHCHENKO M I, GORDEN V, KHLEBTSOV N G, et al. Comprehensive  $T$ -matrix reference database: A 2006—2007 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, 109(8): 1447-1460.
- [37] MISHCHENKO M I, ZAKHAROVA N T, GORDEN V, et al. Comprehensive  $T$ -matrix reference database: A 2007—2009 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(4): 650-658.
- [38] ZAKHAROVA N T, VIDEEN G, KHLEBTSOV N G. Comprehensive  $T$ -matrix reference database: A 2009—2011 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, 113(14): 1844-1852.
- [39] MISHCHENKO M I, VIDEEN G, KHLEBTSOV N G, et al. Comprehensive  $T$ -matrix reference database: A 2012—2013 update[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 123(1): 145-152.
- [40] KAHNERT F M. Numerical methods in electromagnetic scattering theory[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2003, 79/80(1): 775-824.
- [41] YURKIN M A, HOEKSTRA A G. The discrete dipole approximation: An overview and recent developments[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 106(1/2/3): 558-589.
- [42] KARASEK V, BRZOBOHAT O, ZEMANEK P. Longitudinal optical binding of several spherical particles studied by the coupled dipole method[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2009, 11(3): 1464.
- [43] LIU Zhirong, ZHAO Daomu. Optical trapping rayleigh dielectric spheres with focused anomalous hollow beams[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(6): 1310-1316.
- [44] JIANG Yunfeng, HUANG Kaikai, LU Xuanhui. Radiation force of abruptly autofocusing airy beams on a Rayleigh particle[J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24413-24421.
- [45] CHANG Yiren, LONG H, CHI S. Optical trapping of a spherically symmetric Rayleigh sphere: A model for optical tweezers upon cells[J]. *Optics Communications*, 2005, 246(1/2/3): 97-105.
- [46] SINGER W, NIEMINEN T A, HECKENBERG N R, et al. Collecting single molecules with conventional optical tweezers[J]. *Physical Review E*, 2007, 75(1): 011916(1-5).
- [47] ZHAN Qiwen. Radiation forces on a dielectric sphere produced by highly focused cylindrical vector beams[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2003, 5(3): 229-232.
- [48] WANG Ligang, ZHAO Chengliang. Dynamic radiation force of a pulsed Gaussian beam acting on a Rayleigh dielectric sphere[J]. *Optics Express*, 2007, 15(17): 10615-10621.
- [49] CHEN Jun, NG J, LIU Shiyang, et al. Analytical calculation of axial optical force on a Rayleigh particle illuminated by Gaussian beams beyond the paraxial approximation[J]. *Physical Review E*, 2009, 60(2): 026607(1-9).
- [50] JIANG Yunfeng, HUANG Kaikai, LU Xuanhui. Radiation force of highly focused Lorentz-Gauss beams on a Rayleigh particle[J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9708-9713.
- [51] FU Jinxin, ZHAN Qiwen, LIM M Y, et al. Potential energy profile of colloidal nanoparticles in optical confinement[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 3995-3998.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605019



# 三相组合互感器误差校验中的 影响量分析

丁稳房<sup>1</sup>, 金晓明<sup>1</sup>, 陈铭明<sup>2</sup>, 孙军<sup>3</sup>, 陈江洪<sup>3</sup>, 徐灿<sup>3</sup>

1. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;
2. 江苏省电力公司 电力科学研究院, 江苏 南京 210000;
3. 武汉磐电科技有限公司, 湖北 武汉 430058)

**摘要:** 用三相检定法对三相组合互感器进行误差校验试验, 研究高电压和大电流对电压互感器部分误差校验的影响. 结果表明: 三相检定法能够成功检测出三相三元件组合互感器中电压互感器与电流互感器彼此干扰造成的误差; 电压互感器与电流互感器误差校验时, 相互之间均会产生一定的影响, 且大电流对电压互感器的影响更大. 最后, 指出采用的标准电流互感器及升流变压器均应按高电压配备绝缘, 产品设计时应注意将电压互感器置于正确位置, 使其铁心柱轴向与经过其顶部的载流导体方向平行.

**关键词:** 三相组合互感器; 三相检定法; 相互干扰; 误差校验; 电压互感器; 电流互感器

**中图分类号:** TM 41      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0622-05

## Analysis of Influence Quantity in Error Detection of Three-Phase Combined Transformer

DING Wenfang<sup>1</sup>, JIN Xiaoming<sup>1</sup>, CHEN Mingming<sup>2</sup>,  
SUN Jun<sup>3</sup>, CHEN Jianghong<sup>3</sup>, XU Can<sup>3</sup>

1. College of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Electric Power Research Institute, Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210000, China;
3. Wuhan Pandian Science and Technology Limited Company, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** Three-phase method was used to detect the error of three-phase transformer, and the effect of high voltage and large current on part of the error detection of current transformer and voltage transformer is discussed. The result shows that the three-phase method can test the error caused by voltage transformer and current transformer in three-phase combined transformer successfully. While using voltage transformer and current transformer for error detection, there will occur some error due to the interruption. And it must be pointed out that the effect of large current on voltage transformer is more obvious than that of the high voltage on current transformer. At last, the standard current transformer and enlarge-current transformer used in experiments must be equipped with high voltage insulation unit. And the voltage sensor must be placed in accurate position during the product design process, furthermore the axis of iron stick is parallel with the conductor on the top.

**Keywords:** three-phase combined transformer; three phase detection method; mutual interference; error calibration; voltage transformer; current transformer

**收稿日期:** 2015-12-29

**通信作者:** 丁稳房(1966-), 男, 副教授, 要从事电力系统及自动化的研究. E-mail: wenfangding@163.com.

**基金项目:** 国家电网重点科技计划项目(5210EF140008)

近年来,随着互感器技术的发展,35 kV 及以下的三相组合互感器逐渐开始大量推广应用.它多用于大用户和专用变电站作业关口的电能计量及电网的电压监测,用以实现高电压、大电流到低电压、小电流的信号转变.三相三元件组合互感器由在电气功能上彼此独立的 3 台单相电压互感器和 3 台单相电流互感器组合而成,起着高电压隔离和比率变换的作用<sup>[1-7]</sup>.组合互感器将电流互感器和电压互感器组合在一个狭小空间内,且两者同时运行工作,各互感器单元间不可避免存在电磁影响.因此,要充分考虑三相组合互感器在实际运行中的电磁干扰问题,否则就有可能造成输电线路的部分组合互感器超差运行,致使电能计量不准确.为此,必须按照国家相关标准及行业规定准确检定三相组合互感器<sup>[1-4]</sup>.基于此,本文用三相检定法对三相组合互感器进行误差校验,通过试验研究高电压对电流互感器部分误差校验的影响,以及大电流对电压互感器部分误差校验的影响,并对试验结果进行了分析.

## 1 三相检定法的检定原理

采用三相法对三相组合互感器进行检定的原理框图,如图 1 所示.检定装置包括三相平衡的电压源和电流源部分、三相标准的电压和电流互感器、三相智能互感器校验仪、电流负荷箱、电压负荷箱及被试品部分.

1) 三相平衡电压源部分由三相调压器和三相升压器构成.为了实现三相电压平衡,在三相调压器输出端分别串联 3 台单相调压器.采用三相调压器调节三相电压,当某相电压达到测量点时,调节另两相输出端串联的单相调压器,使得三相电压一致.

2) 三相平衡电流源部分由三相调压器和三相升流器构成.为了实现三相电流平衡,在三相调压器输出端分别串联 3 台单相调压器.采用三相调压器调节三相电流,当某相电流达到测量点时,调节另两相输出端串联的单相调压器,使三相电流一致.

3) 三相标准电压互感器由 3 个单相标准电压互感器星形联接构成,三相标准电流互感器由 3 个单相标准电流互感器联接构成.由于标准电流互感器需要在高压下工作,因此,标准电流互感器的一次、二次绕组须满足相关绝缘要求,即为三相高压标准电流互感器.

4) 三相智能互感器校验仪可以同时采集 3 个电压互感器的差压信号和百分表信号,或 3 个电流互感器的差流信号和百分表信号,同时测量三相组合互感器三相电压或三相电流的误差<sup>[8-10]</sup>.

采用三相检定法在额定工况下对三相组合互感器进行误差智能测量时,同时,对三相组合互感器施加三相电压和三相电流,模拟现场实际运行状态,对其误差进行测量.对三相组合互感器中电流互感器误差测量时,在施加三相额定电压条件下,通过三相升流器升流来进行电流互感器的误差测量;对三相组合互感器中电压互感器误差测量时,在施加三相额定电流条件下,通过三相升压器升压来进行电压互感器的误差测量.三相三原件组合互感器接线图,如图 2 所示.

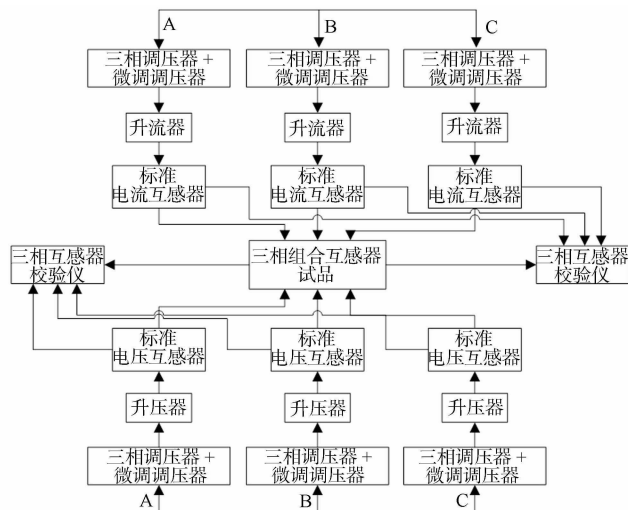


图 1 三相检定法原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of three phase detection method

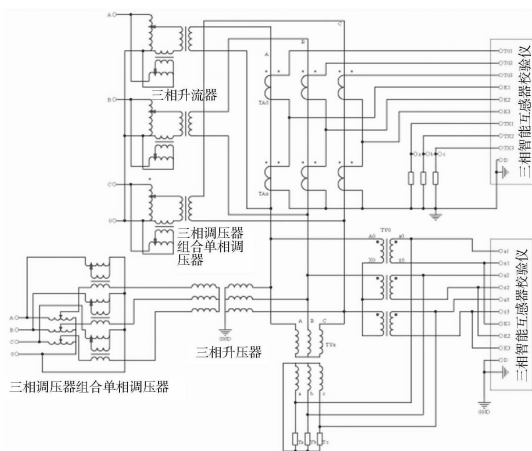


图 2 三相三原件组合互感器接线图

Fig. 2 Wiring diagram of three-phase and three-components combined transformer

## 2 误差校验中的相互干扰试验

选取一台 JLSJWS-10 型的三相三元件, 10 kV 组合互感器, 对其进行误差校验的相互干扰试验. 其中: 电压单元电压变比为 10 kV/100 V; 额定容量为 20 V·A; 准确度等级为 0.2 级; 电流单元电流变比为 600 A/5 A; 额定容量为 10 V·A; 准确度等级为 0.2 级.

### 2.1 电压互感器对电流互感器误差的影响

对三相组合互感器中电流互感器误差测量时, 当三相电压互感器不施加电压, 调节三相电流的输入, 在额定电流( $I$ )的 5%, 20%, 100%, 120% 规程点下对三相电流互感器进行误差测量; 然后, 调节升压器输入端子的调压器, 使三相电压互感器工作在额定电压条件下, 调节三相电流的输入, 在额定电流的 5%, 20%, 100%, 120% 规程点下对三相电流互感器进行误差测量. 电压互感器对电流互感器影响的比差与角差数据, 如表 1 所示. 表 1 中:  $Z$  为二次负荷, 10 V·A 为额定负荷值, 3.75 V·A 为下限负荷值;  $f$  为比差,  $f = \Delta I/I$ ;  $\delta$  表示角差, 即二次电流与一次电流之间的相位差; 3 个电流互感器的二次负荷功率因数均为 0.8.

表 1 电压互感器对电流互感器影响的误差数据

Tab. 1 Error measurement data of voltage transformer to current transformer

相位	$Z/V \cdot A$	参数	仅施加三相额定电流				施加三相额定电压和额定电流			
			5% $I$	20% $I$	100% $I$	120% $I$	5% $I$	20% $I$	100% $I$	120% $I$
A 相	10	$f/\%$	0.044 8	0.043 5	0.050 8	0.052 5	0.073 6	0.048 8	0.052 3	0.053 9
		$\delta/(')$	2.418	1.815	0.544	0.408	1.708	1.378	0.423	0.361
	3.75	$f/\%$	0.065 8	0.064 0	0.063 5	0.063 7	0.087 5	0.068 9	0.064 2	0.064 7
		$\delta/(')$	1.465	1.207	0.533	0.432	0.965	1.060	0.473	0.416
B 相	10	$f/\%$	0.045 8	0.045 1	0.051 7	0.053 0	0.019 1	0.037 8	0.050 4	0.050 7
		$\delta/(')$	2.224	1.607	0.461	0.369	1.735	1.411	0.547	0.612
	3.75	$f/\%$	0.065 6	0.064 5	0.064 3	0.064 6	0.041 8	0.058 1	0.062 9	0.063 7
		$\delta/(')$	1.393	1.163	0.447	0.379	0.999	1.052	0.443	0.409
C 相	10	$f/\%$	0.047 8	0.047 7	0.055 1	0.054 2	0.050 0	0.047 2	0.052 8	0.052 2
		$\delta/(')$	2.086	1.442	0.389	0.712	3.140	1.824	0.801	0.886
	3.75	$f/\%$	0.066 9	0.066 0	0.065 2	0.065 6	0.069 6	0.066 9	0.065 6	0.065 8
		$\delta/(')$	1.444	1.181	0.529	0.599	2.261	1.422	0.712	0.720

### 2.2 电流互感器对电压互感器误差的影响

对三相组合互感器中电压互感器误差测量时, 当三相电流互感器不施加电流, 调节三相电压的输入, 在额定电压( $U$ )的 80%, 100%, 120% 规程点下对三相电压互感器进行误差测量; 然后, 调节升流器输入端子的调压器, 使三相电流互感器工作在额定电流条件下, 调节三相电压的输入, 在额定电压的 80%, 100%, 120% 规程点下对三相电压互感器进行误差测量. 电流互感器对电压互感器影响的比差与角差数据, 如表 2 所示. 表 2 中:  $Z$  为二次负荷, 20 V·A 为额定负荷值, 2.5 V·A 为下限负荷值;  $f$  为

表 2 电流互感器对电压互感器影响的误差数据

Tab. 2 Error measurement data of current transformer to voltage transformer

相位	$Z/V \cdot A$	参数	仅施加三相额定电压			施加三相额定电流和额定电压		
			80% $U$	100% $U$	120% $U$	80% $U$	100% $U$	120% $U$
A 相	20	$f/\%$	-0.008 1	-0.008 5	-0.009 2	-0.006 6	-0.008 8	-0.007 6
		$\delta/(')$	6.10	6.05	6.13	6.11	6.11	6.12
	2.5	$f/\%$	0.009 2	0.007 2	0.006 8	0.012 7	0.007 8	0.007 0
		$\delta/(')$	5.89	5.90	5.91	5.72	5.72	5.72
B 相	20	$f/\%$	0.000 9	0.001 5	0.001 8	-0.001 2	-0.002 6	-0.003 0
		$\delta/(')$	7.17	7.15	7.16	7.17	7.1	7.08
	2.5	$f/\%$	0.004 3	0.003 5	0.003 2	-0.001 1	0.001 1	0.001 5
		$\delta/(')$	8.02	7.95	7.93	7.96	7.85	7.8



续表  
Continue table

相位	Z/ V·A	参数	仅施加三相额定电压			施加三相额定电流和额定电压		
			80%U	100%U	120%U	80%U	100%U	120%U
C 相	20	f/%	0.071 9	0.070 0	0.070 5	0.074 4	0.071 3	0.072 0
		δ/(′)	6.12	6.13	6.15	6.08	6.07	6.03
	2.5	f/%	0.052 3	0.051 8	0.051 9	0.0531	0.055 6	0.056 0
		δ/(′)	5.95	6.01	5.98	5.95	6.00	6.03

比差,  $f = \Delta U/U$ ;  $\delta$  表示角差, 即二次电压与一次电压之间的相位差的相位差; 3 个电压互感器的二次负荷功率因数均为 0.8.

### 3 误差校验中的影响量分析

#### 3.1 电压互感器对电流互感器的影响量分析

对比以上误差测量结果, 对三相组合互感器同时施加三相额定电压和三相电流, 与未施加电压时电流互感器误差测量值对比, 结果如表 3 所示(结果以绝对值表示).

表 3 电压互感器对电流互感器误差测量的影响量分析

Tab. 3 Analysis of influence quantity of current transformer to voltage transformer

相位	Z/V·A	参数	5%I	20%I	100%I	120%I
A 相	10	$ \Delta f /\%$	0.028 8	0.005 3	0.001 5	0.001 4
		$ \Delta \delta /(′)$	0.710	0.437	0.121	0.047
	3.75	$ \Delta f /\%$	0.021 7	0.004 9	0.000 7	0.001 0
		$ \Delta \delta /(′)$	0.500	0.147	0.060	0.016
B 相	10	$ \Delta f /\%$	0.026 7	0.007 3	0.001 3	0.023 0
		$ \Delta \delta /(′)$	0.489	0.196	0.086	0.243
	3.75	$ \Delta f /\%$	0.023 8	0.006 4	0.001 4	0.000 9
		$ \Delta \delta /(′)$	0.394	0.111	0.004	0.030
C 相	10	$ \Delta f /\%$	0.002 2	0.000 5	0.002 3	0.002 0
		$ \Delta \delta /(′)$	1.054	0.382	0.412	0.174
	3.75	$ \Delta f /\%$	0.002 7	0.000 9	0.000 4	0.000 2
		$ \Delta \delta /(′)$	0.817	0.241	0.183	0.121

在对三相三元件组合互感器中电流互感器误差测量时, 被试设备通入三相额定电压与未通入三相额定电压时, 在 5% 误差测量点比差及角差差别均较大, 其他误差测量点比差数据差别不明显, 但角差数据差别较大.

通常测量电流互感器的误差, 只需能产生合适电流的低电压即可. 如将高电压施加于电流互感器一次绕组, 由此电压引起的从一次绕组到二次绕组的电容电流, 一部分流过与二次绕组相连的仪器仪表, 另一部分直接流至二次绕组的接地端, 因而其误差会产生变化. 即使二次绕组有屏蔽, 流过一次绕组的电容电流也将使二次绕组产生感应电流. 特别是在 5% 的额定电流下, 感应电流产生的误差可能还要大. 如果在施加高压的同时测量电流互感器的误差, 则试验所采用的标准电流互感器及产生大电流的升流变压器均应按高电压配备绝缘<sup>[11]</sup>.

#### 3.2 电流互感器对电压互感器的影响量分析

对比以上误差测量结果, 对三相组合互感器同时施加三相额定电流和三相电压, 其与未施加电流时电压互感器误差测量值对比, 其相互影响结果如表 4 所示(结果以绝对值表示).

针对被试品, 在对三相三元件组合互感器中电压互感器误差测量时, 被试设备通入三相额定工作电流与未通入三相额定工作电流时作对比, 误差测量数据差别不大.

对电压互感器而言, 电压互感器附近载流导体所产生的磁场可能影响其误差. 当电流互感器一次载流导体与电压互感器铁心柱轴向呈 90° 夹角的水平布置, 且环绕导体的磁通通过铁心柱穿过开路绕组时, 对误差的影响最大, 这种影响对相位差尤为严重. 因为载流导体产生的磁通在电压互感器中产生的

感应电压矢量对一次电压而言有  $90^\circ$  的相位移<sup>[12]</sup>. 而当载流导体与电压互感器铁心柱平行时,对误差的影响最小,可以忽略. 这对三相组合互感器很重要,产品设计时应注意将电压互感器置于正确位置,即使其铁心柱轴向与经过其顶部的载流导体方向平行.

## 4 结论

试验结果表明:三相组合互感器中,电压互感器与电流互感器误差校验时,相互之间均会产生一定的影响,其中,大电流对电压互感器的影响更大. 三相检定法能够成功检测出三相

三元件组合互感器中电压互感器间、电流互感器间彼此干扰造成的误差,因此,可以对三相三元件组合互感器完成校验,并且可以更好地体现出三相三元件组合互感器运作时的特性,在整体上指出三相三元件组合互感器在现实运作时会发生的问题.

另外,提出了试验所采用的标准电流互感器及产生大电流的升流变压器均应按高电压配备绝缘,以及产品设计时应注意将电压互感器置于正确位置,即使其铁心柱轴向与经过其顶部的载流导体方向平行,既有利于高压试验工作的安全,并对产品的设计提出了合理建议.

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 三相组合互感器: JB/T10432-2004[S]. 北京:机械工业出版社, 2004:7-20.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 三相电压互感器: JB/T10433-2004[S]. 北京:机械工业出版社, 2004:6-17.
- [3] 国家能源局. 三相组合互感器使用技术规范: DL/T 1286-2013[S]. 北京:中国电力出版社, 2013:4-8.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 组合互感器: GB 17201-2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007:5-14.
- [5] 吴安岚. 电能计量基础及新技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2008:17-26.
- [6] 张有顺,冯井岗. 电能计量基础[M]. 北京:中国计量出版社, 1996:15-21.
- [7] 刘鹏,蒋映霞. 三相组合互感器两种检定方法的比较研究[J]. 四川电力技术, 2010, 33(1):79-81.
- [8] 蒋卫,杨华云,江波. 高压三相组合互感器三相检定方法及其实现研究[J]. 电测与仪表, 2011, 48(7):46-49.
- [9] 张能,廖慧敏,吴永云,等. 三相组合互感器检定装置研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2012(4):41-43.
- [10] 卢小芬,周有庆,彭春燕,等. 一种微机保护电流传感器的设计及性能分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 23(3):276-279.
- [11] BRANDOLINI A, FAIFER M, OTTOBONI R. A simple method for the calibration of traditional and electronic measurement current and voltage transformers[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 58(5):1345-1353.
- [12] BERTOLOTTI P, FAIFER M, OTTOBONI R. High voltage multi-purpose current and voltage electronic transformer[C]//IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceeding. Warsaw: [s. n.], 2007:1-5.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605020



# 采用 GPU 的提升纹理缓存命中 光线投射方法

杜松江<sup>1</sup>, 张思超<sup>2</sup>

(1. 长江大学工程技术学院 信息工程学院, 湖北 荆州 434020;

2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 提出一种改善纹理缓存命中率的方法. 首先, 分析图形处理器(GPU)中三维纹理组织的布局特性; 进而提出根据视点的变化动态选择线程配置的策略, 目的在于最小化 warp 级的投射光线纹理访存跨距; 最后, 算法用 CUDA(compute unified device architecture)实现并验证. 实验结果表明: 当视点分别围绕  $x, y, z$  坐标轴旋转时, 改进后算法的帧速率分别为改进前的 1.08, 1.14, 0.98 倍.

**关键词:** 三维纹理; 光线投射; 图形处理单元; 纹理缓存

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2016)05-0627-06

## Improving Texture Cache-Hit Rate of GPU-Based Ray Casting

DU Songjiang<sup>1</sup>, ZHANG Sichao<sup>2</sup>

(1. College of Information Engineering, Yangtze University College of Engineering Technology, Jingzhou 434020, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** This paper presents a method of improving the texture cache hitrate for GPU-based volume rendering. Firstly, we analyze the data layout of 3D texture in GPU. Based on it, a dynamic strategy of selecting the thread block shape according to the viewpoint is proposed. The strategy can minimize the access stride for the warp-level threads. Finally, we realize the method in CUDA (compute unified device architecture) and testify the effectiveness. The experimental results show that when the viewpoint rotates around the  $x$ -,  $y$ -,  $z$ - axis, the frame rates are 1.08, 1.14 and 0.98 time faster than that of static thread block shape configuration, respectively.

**Keywords:** 3D texture; ray casting; graphics processing unit; texture cache

光线投射算法作为体绘制技术中的一种, 在医学、天文、地学等领域有着广泛的应用. 由于算法需要对屏幕上的每个像素做运算, 因此, 光线投射算法的计算量很大, 很难满足实时交互方面的应用. 另一方面, 投射光线之间是相互独立的, 该算法适合并行化实现. Kruger 等<sup>[1]</sup>通过图形应用程序编程接口(application programming interface, API)的功能调用, 将体数据作为三维纹理保存在图形处理器(graphics processing unit, GPU)中, 利用图形流水线的可编程着色器进行算法的实现. 之后, 大量的研究工作都是针对图形流水线模式下的算法进行改进和优化<sup>[2-4]</sup>. 2007 年以来, Nvidia 公司推出支持计算统一设备

收稿日期: 2016-03-15

通信作者: 张思超(1973-), 男, 教授, 博士, 主要从事数据库应用、软件工程的研究. E-mail: dusongjiang2014@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204186)

架构 CUDA (compute unified device architecture) 的 GPU, 该技术使 GPU 从图形领域的应用进一步扩展到了更多的领域. CUDA 编程模型可以使更多的通用算法在 GPU 上得到了实现, 并取得可观的加速效果<sup>[5]</sup>. 在支持 CUDA 的 GPU 上进行光线投射算法加速的研究工作中, Marsalekl 等<sup>[6]</sup> 首先实现了算法的移植, 加速效果优于基于 Shader 的实现. 在不降低绘制速度的前提下, Zhang 等<sup>[7]</sup> 利用 3 次 B 样条改善 CUDA 的光线投射算法的视觉效果. 然而, 通过观察发现, 当体数据规模较大时, 绘制帧数率的变化受视点变换的影响严重. 本文从 GPU 的硬件体系结构和访存模型出发, 最小化 warp 级投射光线访问相邻体数据时的跨距, 从而提高绘制性能.

## 1 CUDA 编程模型

CUDA 编程模型将 CPU 作为主机, GPU 作为协处理器. CPU 负责进行逻辑性强的事务处理和串行计算, GPU 则专注于执行高度线程化的并行处理任务<sup>[8-10]</sup>. CUDA 计算流程通常包括 CPU 到 GPU 数据传递、Kernel 函数执行、GPU 到 CPU 数据传递 3 个步骤.

CUDA 采用单指令多线程(single instruction multiple thread, SIMT) 执行模式, 即 GPU 上的所有线程并行执行内核函数 Kernel<sup>[11]</sup>. 另外, CUDA 将线程组织成块网格、线程块、线程 3 个不同的层次<sup>[12-13]</sup>, 并采用多层次的存储器结构. 存储器包括只对单个线程可见的寄存器和本地存储器、对块内线程可见的共享存储器、对所有线程可见的全局存储器等. 其中, 全局内存可以被绑定为纹理内存, 主要用在图形图像等应用中.

## 2 纹理访存分析及线程配置策略

不同于全局内存的 2 级缓存, 纹理内存提供的缓存主要是缓存空间上相邻的数据<sup>[14]</sup>. 空间相邻的投射光线对体数据采样时, 同样会访问空间上相邻的体素. 因此, 使用纹理内存保存体数据是合适的选择. 然而在交互过程中, 视点并非静止的. 在不同位置访问体数据所表现出的缓存效果也是不同的.

### 2.1 GPU 纹理内存的访存分析

将体数据保存为三维纹理时, 数据在纹理内存中的布局, 如图 1 所示.

令体数据的长宽高都为  $N$ , 且  $N = 2^l$ . 图 1 中: 三维纹理可以看成是二维纹理切片沿  $z$  方向的集合. 在全局内存中, 数据以一维线性的方式保存; 而在纹理内存中, 每个二维纹理切片在纹理存储器中以 Morton 编码的方式组织(箭头所指的)<sup>[15-16]</sup>. Morton 编码具有递归的特性, 因此, 第  $l$  层的纹元编码由第  $l-1$  层的编码决定, 层次之间的结构关系, 如图 2 所示.

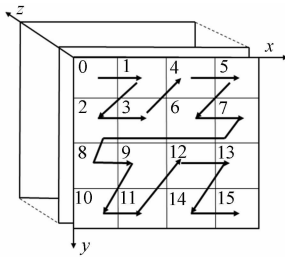


图 1 三维纹理布局

Fig. 1 3D texture layout

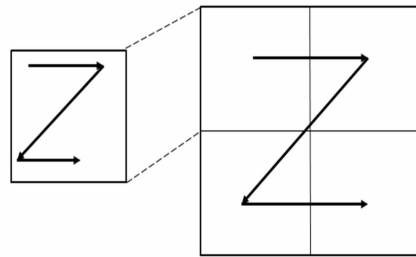


图 2 莫顿编码的层次结构

Fig. 2 Hierarchical structure of Morton code

该编码方式虽然优化了二维访问的空间局部性, 但是造成相邻数据的间隔距离不均匀, 如图 1 中的纹元 1 和 4, 纹元 2 和 3. 将相邻纹元之间的跨度大小分为以下两种情况讨论.

1) 相邻纹元有不同的  $z$  坐标. 这种情况下, 相邻纹元出现在两个相邻的二维切片上. 因为有相同的  $x$  和  $y$  坐标, 相邻纹元之间的跨距都是  $N^2$ .

2) 相邻的纹元有不同的  $x$  或  $y$ . 在该情况下, 相邻纹元出现在同一切片中. 相邻纹元之间的跨度与坐标轴平行有关. 当相邻体素与  $x$  轴平行时, 相邻体素的跨距范围为  $1 \sim 3$ . 然而, 第  $l$  层的最大跨距出现在内部  $l-1$  层的相邻块之间(图 2). 例如, 沿着水平坐标轴的纹元为  $a$  和  $b$ ; 沿着垂直坐标轴的纹元为

$c$  和  $d$ ; 纹元  $b$  和  $d$  的物理索引分别为  $4l-1$  和  $2 \times (4l-1)$ ; 纹元  $a$  和  $c$  的物理索引分别为  $\sum_{k=0}^{l-2} 4^k$  和  $2 \times \sum_{k=0}^{l-2} 4^k$ . 因而, 沿着  $x$  坐标轴的最大跨距为

$$4^{l-1} - \sum_{k=0}^{l-2} 4^k = \frac{2 \times 4^{l-1} + 1}{3}. \tag{1}$$

沿着  $y$  坐标轴的最大跨距为

$$2 \cdot 4^{l-1} - 2 \cdot \sum_{k=0}^{l-2} 4^k = 2 \cdot \frac{2 \times 4^{l-1} + 1}{3}. \tag{2}$$

因为  $N=2^l$ , 故沿着  $x, y$  坐标轴的纹元最大访问跨距分别为  $(N2+2)/6$  和  $(N2+2)/3$ . 由以上分析可知, 沿着  $x, y$ , 或  $z$  坐标轴访问相邻纹元时, 访问跨距近似为  $1:2:6$ . 由于纹理缓存的大小仅为几十 KB, 当体数据切片过大时, 对纹理内存的大跨距访问会造成频繁的缓存命中失效, 使得算法性能的下降.

不同视点访问同一三维纹理切片的示意图, 如图 3 所示. 由图 3 可知:  $c$  视点位置的访存效率最高, 因为相邻的投射光线访问的是沿  $x$  轴平行的相邻体素; 反之,  $b$  视点访存性能最差, 因为相邻的投射光线访问的是不同切片上的体数据. 为提高相邻投射光线在访问纹理内存时的纹理缓存命中率, 访问纹理内存数据时应尽量沿着  $x$  方向进行.

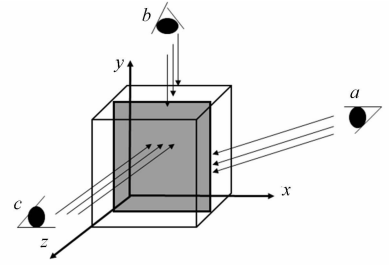


图 3 不同视点访问同一三维纹理切片的示意图

Fig. 3 Sketch of accessing same slice at different viewpoints

### 2.2 线程块及 warp 的几何形状

CUDA 将所有并行线程等分为多个线程块. 一个线程块中的线程由 1 个或多个 warp 组成, 而一个 warp 是连续的 32 个线程. 线程块之间和线程块内部可以组织成一维或者二维的形状. 当将线程块设置为二维形状时, 也间接决定了 warp 的形状. 线程块和 warp 的形状, 如表 1 所示.

表 1 线程块和 warp 的形状

Tab. 1 Geometry shape of thread block warp

线程块形状	warp 形状	高宽比	线程块形状	warp 形状	高宽比	线程块形状	warp 形状	高宽比
1×256	1×32	1:32	8×32	8×4	2:1	64×4	32×1	32:1
2×128	2×16	1:8	16×16	16×2	8:1	128×2	32×1	32:1
4×64	4×8	1:2	32×8	32×1	32:1	256×1	32×1	32:1

由表 1 可知: 线程块的几何形状表现为从垂直到水平的过程; 对应的 warp 形状也做相应的变化.

### 2.3 基于视点的线程块形状动态分配

假定视点位于坐标原点  $O$ , 体坐标轴中的两个轴代表的平面和成像屏幕平行时的 6 种典型情况, 如图 4 所示.

灰色平面为当体坐标轴中的两个轴和成像屏幕平行时, 体数据的二维切片和成像屏幕之间的 6 种状态. 前文描述中, 沿  $x$  轴访问相邻体数据时跨距最小, 因此, 令体数据的  $x$  轴为主轴. 基于视点的动态线程形状配置主要通过以下 3 个步骤确定.

**步骤 1 平行平面检测.** 在视点变换的过程中, 从  $xy$ -,  $xz$ -及  $yz$ -平面中选择和屏幕最为平行的平面, 如图 4(a) 和

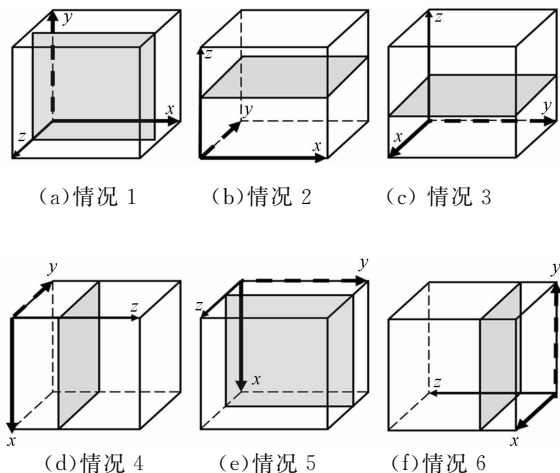


图 4 体数据和成像平面之间的 6 种典型情况

Fig. 4 6 kinds of typical situation between volume axes and screen

图 4(e)中的  $xy$ -平面.

**步骤 2** 确定主轴. 从平行平面中选择访存跨距最小的轴为主轴. 例如, 图 4(a), 图 4(e)中的  $xy$ -平面中, 由于沿  $x$  轴访问比沿  $y$  轴的访问跨距小, 因此, 选择  $x$  轴为主轴.

**步骤 3** 确定线程块的形状. 根据主轴被绘制在屏幕上的方向选择线程块的形状. 如果主轴在屏幕上用垂直线绘制, 选择垂直 warp 的线程块, 如图 4(d), 图 4(e), 线程块形状为  $1 \times 256$ ; 如果主轴在屏幕上用水平线绘制, 选择水平 warp 的线程块, 如图 4(a), 图 4(b), 线程块形状为  $256 \times 1$ . 对于其他处于中间过度状态的情况, 选择垂直和水平混合的 warp 形状. 为此, 将  $0^\circ \sim 90^\circ$  的旋转区域再次细分成 6 组过渡区域, 即每  $15^\circ$  为一个过渡区域.

在交互过程中, 视点的任意旋转变换可以看做是分别绕 3 个坐标轴的旋转变换组合而成. 为进一步说明过渡区域的线程块选择策略分别讨论绕  $x$  轴旋转、绕  $y$  轴旋转、绕  $z$  轴旋转的选择策略. 旋转角度分别为  $\Theta_x$ ,  $\Theta_y$  及  $\Theta_z$ , 细分后的过渡区域的选择, 如表 2 所示.

表 2 线程块几何形状的动态选择  
Tab. 2 Dynamic choices of thread block geometrical shapes

旋转轴	旋转区域					
	$0^\circ \sim 15^\circ$	$15^\circ \sim 30^\circ$	$30^\circ \sim 45^\circ$	$45^\circ \sim 60^\circ$	$60^\circ \sim 75^\circ$	$75^\circ \sim 90^\circ$
$(\Theta_x, 0, 0)$	$32 \times 1$	$32 \times 1$	$32 \times 1$	$32 \times 1$	$32 \times 1$	$32 \times 1$
$(0, \Theta_y, 0)$	$32 \times 1$	$16 \times 2$	$8 \times 4$	$4 \times 8$	$2 \times 16$	$1 \times 32$
$(0, 0, \Theta_z)$	$32 \times 1$	$16 \times 2$	$8 \times 4$	$4 \times 8$	$2 \times 16$	$1 \times 32$

由表 2 可知: 绕  $x$  轴旋转时, 主轴  $x$ -始终平行于屏幕, warp 中的相邻投射光线沿着  $x$  轴访问体素时跨距最小, 缓存命中率也就越大. 因此, 选择水平状 warp 的线程块形状, 即  $256 \times 1$ ; 绕  $y$  轴旋转时, 平行平面由  $xy$  平面逐步过渡到  $yz$  平面, 主轴也由  $x$  轴变为  $y$  轴. 为了尽量减少访存跨距增大引起的命中下降, warp 的形状也由水平状逐渐过渡到垂直状; 同样地, 绕  $z$  轴旋转时, 虽然平行平面始终为  $xy$  平面, 但主轴由水平状变为垂直状, warp 的形状也跟着相应的变化, 与绕  $y$  轴旋转不同的是, 在这个过程中主轴没有发生改变.

旋转角度为  $90^\circ \sim 360^\circ$  时, warp 形状及线程块的形状配置利用几何的对称关系得到.

### 3 算法框架

假设成像屏幕的高和宽分为  $W$  和  $H$ , 整个屏幕成像所需要的线程数量为  $W \times H$ . 一般情况下, GPU 中一个线程 block 中的线程数量远远低于绘制整个屏幕需要的线程数量. 通过将屏幕分块, 采用屏幕块对应线程块的做法可以解决这一问题. 线程块采用二维布局, 维度大小为  $w \times h$ . 同样地, 线程 grid 也采用二维结构, 总共需要的线程块个数为  $\text{ceil}(W/w) \times \text{ceil}(H/h)$  个. 线程 grid 中线程坐标和屏幕上每个像素坐标的对应关系为

$$u = \text{blockIdx}_x \times \text{BLOCK\_SIZE} + \text{threadIdx}_x,$$

$$v = \text{blockIdx}_y \times \text{BLOCK\_SIZE} + \text{threadIdx}_y.$$

除了将体数据作为三维纹理保存外, 充分利用 GPU 中各种存储器的特性, 即传递函数主要用于将投射光线击中的体素值转换为颜色值和不透明度, 将其绑定为类型为 float4 的一维纹理, 只需保存少量颜色值, 其余的值可以利用硬件支持的插值算法生成. 体数据显示到屏幕上是一个三维对象变换为二维图像的过程, 并且每个投射光线所代表的线程都会用到该变换, 利用该存储器的广播功能, 将变换矩阵保存在常量内存中. 投射光线在对体数据进行采样时, 使用寄存器变量保存临时累加值. 最后, 将每个投射光线的计算结果写入全局内存.

### 4 实验和分析

为验证基于 warp 级纹理访存优化的线程块动态配置方法, 实验部分主要通过绘制帧速率的提高说明方法的有效性. 算法所用的计算平台为 Nvidia 开普勒 GK110 架构的 Geforce GT740M 型 GPU; CUDA SDK 为 5.5. GPU 的硬件规格的计算能力为 3.5; CUDA 核心数量为 384; 处理器频率为 1.03

GHz;SM 数量为 2;全局内存为 2 GB;共享内存为 48 KB.

所用数据为  $1\ 024 \times 1\ 024 \times 1\ 024$  的 Hydrogen Atoms 体数据, 每个体素大小为 8 bit. 成像屏幕的大小为  $1\ 024 \times 1\ 024$ .

将视点分别绕  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴旋转  $360^\circ$ , 分别测量不采用动态线程配置时的帧速率和采用动态线程配置后的帧速率. 每个线程块的大小设定为 256, 不采用动态配置的线程块形状为  $16 \times 16$ , 采用动态线程块配置的形状根据前述方法进行变化.

体数据分别绕  $x, y, z$  轴旋转  $360^\circ$  的帧速率结果进行对比, 如图 5 所示. 图 5 中:  $\omega$  为旋转角度;  $v$  为帧速率.

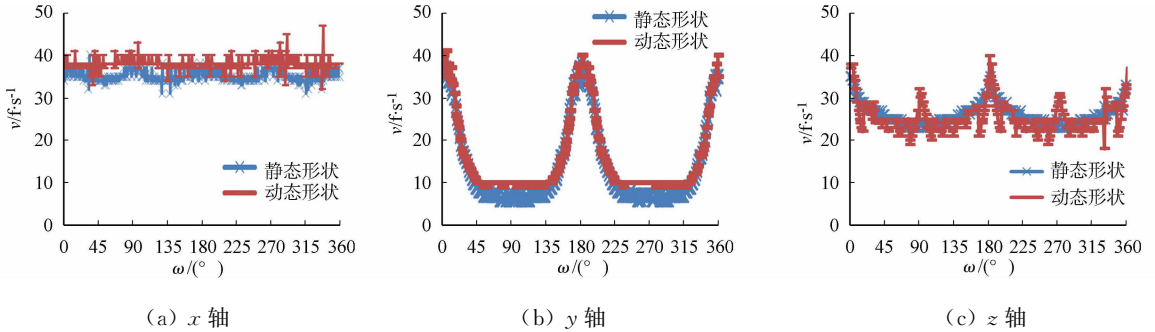


图 5 静态形状和动态形状的帧速率对比图

Fig. 5 Comparison chart of frame rate between static shape and dynamic shape

由图 5(a)可知: 虽然在旋转过程中平行平面一直在变化, 但是由于主轴  $x$  轴一直是水平无变化的, 因此, 整个旋转范围内的绘制帧速率平均高于绕其他两个轴的旋转. 在采用动态配置优化后, 更能适应 warp 中相邻投射光线访问纹理内存的特点, 绘制性能有了进一步的提升.

由图 5(b)可知: 帧速率表现出了很大的差异. 在旋转范围为  $0 \sim 90^\circ$  时, 因为主轴由  $x$  轴逐渐变化成为  $y$  轴, 该变化过程导致 warp 级投射光线访问纹理缓存时的命中率降低, 绘制性能随旋转角度的增加而降低. 当旋转角度由  $90^\circ \sim 180^\circ$  改变时, 主轴又逐渐变回为  $x$  轴, 绘制帧速率也得到回升. 由于体数据本身具有对称性, 当旋转角度为  $180^\circ \sim 360^\circ$  时, 绘制帧速率同样也表现出了对称性. 采用动态配置方法也起到了改善绘制性能的作用.

由图 5(c)可知: 当绕  $z$  轴旋转时, 虽然平行平面没有发生改变, 但是主轴  $x$ -的方向却一直在变化, 算法的绘制性造成一些影响, 总体情况比绕  $y$  轴时要好. 值得注意的是, 当绕  $z$ -轴旋转时, 在理论上动态线程配置是能够适应主轴的旋转改变, 并提升性能, 但实际效果相反, 绘制速率表现出了震荡效应. 造成该现象的原因是线程块的几何形状在旋转角度为  $0^\circ \sim 15^\circ$  时, 选择的是  $256 \times 1$  的水平状线程块, warp 形状高宽比为  $32 : 1$ . 该高宽比下, 线程块的形状有 4 个备选方案.

线程块形状改为  $32 \times 8$ ,  $0^\circ \sim 90^\circ$  旋转区间的运行效果, 如图 6 所示. 由图 6 可知: 修改线程块形状后,  $0^\circ \sim 15^\circ$  这一区间的帧速率变化得到了改善.

最后, 体数据分别绕  $x, y, z$  坐标轴旋转  $360^\circ$  时, 提出方法的总体改进效果, 如表 3 所示.

表 3 提出方法的总体改进效果

Tab. 3 Overall improvement of proposed method		$f \cdot s^{-1}$	
坐标轴	$v$ (静态)	$v$ (动态)	加速比
$x$	35.18	38.01	1.08
$y$	14.07	15.97	1.14
$z$	26.01	25.56	0.98

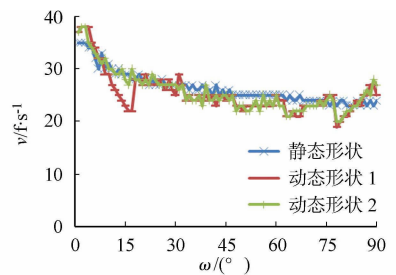


图 6 改进前和改进后的帧速率对比图

Fig. 6 Comparison chart of frame rate Before and after improvement

## 5 结束语

根据视点动态选择线程块, 改善基于 GPU 的光线投射算法在访问纹理内存时的性能. 分析体数据保存为三维纹理后的数据布局及线程块形状和 warp 形状的关系. 在给定视点下, 在旋转变换中确定与成像屏幕平行的平行平

面,进而确定主轴的方法指导线程块的几何形状选择,可以改善 warp 级投射光线在访问纹理缓存时的命中率失效的问题.实验结果表明:该方法能够改善光线投射算法的性能.下一步的工作将继续优化体数据绕  $z$ -坐标轴旋转时的纹理缓存,继续考虑关于线程块 block 级的优化.

#### 参考文献:

- [1] KRUGER J, WESTERMANN R. Acceleration techniques for GPU-based volume rendering[C]//Proceedings of the 14th IEEE Visualization, Washington D C:IEEE Computer Society,2003:287-292.
- [2] SALAMA C R, KELLER M, KOHLMANN P. High-level user interfaces for transfer function design with semantics [J]. Visualization and Computer Graphics,2006,12(5):1021-1028.
- [3] GOBBETTI E, MARTON F, GUITIÁN J A I. A single-pass GPU ray casting framework for interactive out-of-core rendering of massive volumetric datasets[J]. Visual Computer,2008,24(7/8/9):797-806.
- [4] 李国和,段忠祥,吴卫江,等.针对全空子数据体的 GPU 体绘制[J].中国图象图形学报,2014,19(4):577-582.
- [5] OWENS J D, HOUSTON M, LUEBKE D, et al. GPU computing[J]. Proceedings of the IEEE,2008,96(5):879-899.
- [6] MARŠÁLEK L, HAUBER A, SLUSALLEK P. High-speed volume ray casting with CUDA[C]//IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing, Los Angeles:CA Press,2008:185.
- [7] ZHANG Changgong, XI Ping, ZHANG Chaoxin. CUDA-based volume ray-casting using cubic B-spline[C]//International Conference on Virtual Reality and Visualization, Beijing:IEEE Press,2011:84-88.
- [8] 甘新标,沈立,王志英.基于 CUDA 的并行全搜索运动估计算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2010,22(3):457-460.
- [9] 赵丽丽,张盛兵,张萌,等.基于 CUDA 的高速 FFT 计算[J].计算机应用研究,2011,28(4):155-159.
- [10] 肖江,胡柯良,邓元勇.基于 CUDA 的矩阵乘法和 FFT 性能测试[J].计算机工程,2009,35(10):7-10.
- [11] 王蓓蕾,朱志良,孟球.基于 CUDA 加速的 SIFT 特征提取[J].东北大学学报(自然科学版),2013,34(2):200-204.
- [12] JENKINS J, ARKAKAR I, OWENS J D, et al. Lessons learned from exploring the backtracking paradigm on the GPU[J]. Lecture Notes in Computer Science,2011,6853(2):425-437.
- [13] 周洪,樊晓桢,赵丽丽.基于 CUDA 的稀疏矩阵与矢量乘法的优化[J].计算机测量与控制,2010,18(8):1906-1908.
- [14] SANDERS J, KANDROT E. CUDA by example:an introduction to general-purpose GPU programming[M]. Boston:Addison-Wesley Professional,2010:116-117.
- [15] MONTRYM J, MORETON H. The geforce 6800[J]. IEEE Micro,2005(2):41-51.
- [16] MORTON G M. A computer oriented geodetic data base and a new technique in file sequencing[M]. New York:International Business Machines Company,1966:56-60.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:吴逢铁)



doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605021



# ASP.NET 的 SQL 注入攻击及防御

张学义, 钟志宏

(黔南民族师范学院 计算机与信息学院, 贵州 都匀 558000)

**摘要:** 研究 ASP.NET 网站的 SQL 注入攻击的成因、攻击距离,通过实例说明 ASP.NET 程序中的 SQL 注入攻击方式,研究表明:要防范 SQL 注入,最重要的就是要做好危险字符验证的程序、异常编码的处理,屏蔽错误信息,并从代码安全上进行阻止,如设置可靠的 SQL 参数、给数据进行加密处理、查验用户信息、设置存储路径和设置安全措施等,从而加强 ASP.NET 网站的性能和安全,避免 SQL 注入攻击的实现。

**关键词:** ASP.NET; SQL 注入攻击; 防御技术; 异常编码; 代码安全

中图分类号: TP 309.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2016)05-0633-04

## SQL Injection Attacks and Defense Based on ASP.NET

ZHANG Xueyi, ZHONG Zhihong

(School of Computer and Information, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun 558000, China)

**Abstract:** This paper research the causes and attack distance of SQL injection attacks, and illustrates through examples the SQL injection attack methods in on the ASP.NET program. The research shows that hazard character verification and abnormalites codes handling are the most important to prevent SQL injection. By using keywords shield, SQL parameter optimization, data encryption, user information check, storage path setting, and implement safety measures can improve the security of ASP.NET website and effectively prevent SQL injection attacks.

**Keywords:** ASP.NET; SQL injection attack; defense technology; extraordinary code; code security

互联网技术的扩拓总是伴随着网络安全问题,以 ASP.NET 语言为基点 Web 应用程序的数量在不断攀升,随之而来的网络安全破坏(攻击力)也更大了。很多网站程序员在编写 ASP.NET 网站程序时,并没有对用户输入的数据进行检验性测试,或者网站数据库自身存在一些比较大的安全漏洞,以及网站的防火墙并没有能够识别外部攻击。SQL 注入是目前 ASP 系统中存在最多的一种安全漏洞。SQL 注入攻击是指攻击者通过修改原有数据库的数据和参数,使系统识别不出非法入侵,这种找漏洞进入的入侵常被称为漏洞攻击,它会对程序数据库语句执行造成打击<sup>[1]</sup>。本文对 ASP.NET 网站的 SQL 注入攻击进行攻击,并提出相应的防范措施。

### 1 SQL 注入的原因及攻击远离

程序中,SQL 注入很大的原因在于编码和代码存在问题,其主要原因是在编写代码的过程中,对代码完善性的考虑欠周、简洁性及安全性的结果,从而导致脚本程序被入侵者破坏<sup>[2]</sup>。从入侵者方面出发,SQL 注入可以加强防御,所构成的防火墙够坚固,才可以避开防火墙的阻挡,这个操作十分容易,且能

收稿日期: 2016-01-20

通信作者: 张学义(1970-),男,副教授,主要从事计算机网络、信息系统开发的研究。E-mail:zxydygz@163.com.

基金项目: 贵州省普通高等学校地方民族文化数字化应用工程中心开放基金项目资助(qnsy2014gc02)

够实现访问修改数据库的功能.

SQL 注入攻击产生的一个重要的环境,是输入键值打造的动态 SQL 语句经过 Web 应用程序进行数据库操作. 如果编写的代码要使用存储的这一过程,那么,这些存储过程将作为用户输入的输入内容传递,SQL 注入在这样的情况下也容易出现. 举一个常见的 SQL 注入攻击例子进行说明,所描述内容采用了用户输入字符串和拼接查询字符串进行 SQL 的查询<sup>[3-4]</sup>:

```
var User Name;
User Name=Raquest. form("User Name")
var sql="select * from Users where User Name="+User Name+"";
```

使用者根据暗示内容填写一个用户名称,如填写“xiaoming”这几个字节时,输出的结果就是:SELECT \* FROM Users WHERE UserName= 'xiaoming'. 这时,脚本会执行下面查询:

```
SELECT * FROM Users WHERE User Name= 'xiaoming';droptable Users--
```

其中:分号(;)为前面完成与后面查询的开端;“--”为对前面的内容进行解释,基本上理解前面的内容,字符后面的内容可以不计. 代码改正后,如果没有出现问题,服务器就会直接操作,而 SQL Server 操作本语句就会进行查看,并对 Users 进行清除的行为,这样一来,将会产生不可估量的问题.

## 2 实例分析

### 2.1 基于 ASP.NET+SQL Server 的网站攻击实例解析

采用后台登陆窗口的 SQL 注入后台窗口代码<sup>[5]</sup>:

```
string sqlstr="select * from administrators
where name="+name+"and password="+psaa-word+"";
Sql Command comm=new SqlCommand(strsql,conn);
OleDbDataReader dr=comm. Execute Reader();
if (! dr. Read())
Response. Write ("<script> alert (用户名或其对应的密码不正确)
</script>");
else
Response. Write ("<script> alert (成功登录)</script>");
```

其中:conn 为数据库连接的对象;pass-word 为密码;name 为使用者昵称或名字. 若以 administrator 作为操作管理的名字,pass-word 设置为 654321,则数据库接收到来自 ASP.NET 应用的 SQL 语句为:

```
select * from administrators where name='ad-ministrator' and pasword='654321'
```

由此可以在数据库中找到一条符合的数据,能直接登上账号. 如果用户输入的用户名为'haha'OR 3<4--,密码为 456,那么,ASP.NET 应用发送给数据库服务器的 SQL 语句为

```
select * from administrators where name='haha'OR 3<4 --'and password'='456'
```

前面说到“--”是解释内容的,那么,3<4 恒为真,OR 运算中两个数据只要一个是对的,另外一个也是对的. 按照这样的方式,前面的 SQL 语句 where 以后的条件成立,那么 dr. read()返回的结果和 administrators 表就是正确的,意味着可以登录. 这种方式是登录账户及密码都是直接操作的一种手段. 另外,也有一些不同的操作方法,但是其原理都相同,只需要令 dr. read()返回“真”的结果就可以.

### 2.2 数据更新时的 SQL 注入

首先,假设与后台数据库内部存在表 users,其结构如表 1 所示. 表 1 中:用户名用 name 表示;密码用 pass-word 表示;用户等级用 level 表示,1 表示管理员,2 表示正常用户. 当普通用户更新密码时,代码<sup>[6]</sup>如下:

```
strin strsql="update users set pass-word="+password+"where name="+name+"";
```

表 1 用户信息表

Tab. 1 User information table

字段名称	字段含义	数据类型	是否为主键
Name	用户名	char 型	是
Password	密码	char 型	—
Level	用户等级	char 型	—

```
OleDbCommand comm=new OleDbCommand(strsql,conn);  
comm. Execute Non Query();  
:  
:
```

在 conn 处输入数据库的连接对象,其中“password”是数据库的新密码,这个密码在未操作的情况下反馈到数据库并进行动作后,若登录账户 xiaogang 填写的密码是‘789’,level=‘9’,转换成 SQL 语句并发送到数据库为:update users set password=‘789’,level=‘9’ where name=‘xiaogang’.这样的话,原来普通用户 xiaogang 就变更成管理员.

### 3 ASP.NET 网站 SQL 注入防范

#### 3.1 SQL 注入的防范措施

针对 SQL 的实现经过、实现理论和加入攻击的特性制定相应的抵御方法,从代码安全上进行阻止,如设置可靠的 SQL 参数、给数据进行加密处理、查验用户信息、设置存储路径和设置安全措施. ASP.NET 网站通过上述抵御方法,可以有效地加强其性能和安全性,避免 SQL 注入攻击的实现<sup>[7-10]</sup>.

1) 测试输入内容. 程序员测试输入内容的数据大小及类型,强制执行输入内容的限制. 会产生异常通常是因为输入了不符合要求的内容.

2) 测试字符串变量的内容. 只输入允许测试的数据后,才能对字符串变量进行检测. 通常不被允许检测的数据,有以 0 和 1 构成的二进制字符串,“:”(查询分隔符),“/\*...\*/”和“-”等注释符号,“” (字符串分隔符号),以及由“\”开始的转义序列字符.

3) 采用存储过程的方式. 当对数据库进行程序访问时,设置存储路径必须通过参数进行录入,并且尽可能存储路径的形式访问数据库. 在设置 T-SQL 程序代码的储存路径时,要尽可能使用静态 SQL,而非动态 SQL. 当使用动态 SQL 时,输入的参数不能是具有关键字、列名和表名的 SQL 语句或者是其中的一部分,必须是能够建立动态 SQL 的数值. 在访问过程中,严禁直接接入 SQL 后 exec 执行,而应该通过 p\_executesql 和它的形参参数进行访问. 当使用静态 SQL 时,可以自动侦测输入代表安全代码的安全字符后,并且自动进行防御攻击. 长度检查特性和类型验证特性存在于 SQL Server 的 Parameters 集合中. 在使用 Parameters 集合的过程中,长度检查特性和类型验证特性会将可操作代码视为文字,并对不属于该范围的数据进行报警处理.

4) 加强安全性. 安全种类的 SQL 参数在使用程序的拼接语句的过程中,能够有效提高其安全性. 因为一部分因素的影响,导致在访问数据库时,程序不可以按照设置的存储路径进行. 所以,通过安全种类的 SQL 参数,才可以对具有拼接 SQL 语句的程序进行访问.

5) 对敏感数据进行加密存储. 用户对敏感数据进行保存时,实施加密用户输入的数据并检测输入数据的内容的安全性. 以存储在数据库内的数据为基础对比加密后的敏感数据,就会发现和之前已经保存过的数据不同,经过用户加密后的敏感数据能够更加有效地制止 SQL 的注入攻击. System. WEB. Security. FormsAuthentication 加密方式在 ASP. NET 集成环境中,更易于加密数据.

6) 禁止将服务器端错误消息返回给页面浏览者. 程序设计人员可以利用已经在程序内设置的数据为基础,在操作 WEB 程序产生问题时发现起因,并表明严禁数据库中的数据外泄,指向系统显示错误界面. 比如,对 ASP. Net 中的配置文件(WEB. config)进行设置:<custom Errors mode=“Remote Only” default Redirect=“errors. htm”/>. 设置完成后,将一致显示“errors. htm”的自定义的用户界面,而不再显示如源文件存储位置、源错误位置等具体的原因.

7) 安全部署网站系统. a) 数据库服务应部署在专用的物理服务器上,而 Web 应用程序则不同,其必须要在多重的物理服务器上进行部署. 因此,可以利用交换设备的访问控制机制或者防火墙,有效地抵制存储于数据库服务器内的数据包传输至互联网的行为. 在现实数据访问中,既可以通过将 Web 程序与数据库数据分区存放进行实现,也可以通过分别设置 Web 程序和数据库存储进行实现. b) NTFS 格式应作为服务器分区的唯一格式,以最小权限为基本原则,合理配置 Web 程序权限和数据库数据权限. c) WEB 应用程序访问数据库时,应使用具有指定权限的数据库账号. d) 使网络环境更加可靠、安全和 Web 应用程序更加安全健康. 应用层安全的基础是物理层和网络层的安全,所以在保障网站本身安

全可靠的同时,要注重设备检测由程序输入的不安全字符和防火墙的合理化,以及定期对服务器的执行系统产生的补丁进行修补.

### 3.2 SQL注入的防范策略

1) 严格筛选用户录入的数据和上交的参数.在对 Web 页面进行设计时,对数值型参数,要对其是否包含非法字符进行判断,要严格筛选含有分号、双引号、单引号和逗号等标点符号的字符型参数;当一同出现多个字符串,如 select,delete,\*,from,union 等,也不能消除警惕,应以用户录入参数的长短为依据,检查是否为合法程序,如果不是合法代码,就对其进行错误警示.

2) 设置数据库服务器的权限.在 Web 界面连接数据库的时候,尽可能不使用超级管理员身份.一般情况下,不允许 Web 页面干涉系统的存储方式和系统表的读取方式,即使是户表,对权限设置也要慎重考虑,对只需要读操作权限的用户,不给予插入、更新等权限.

3) 将不重要的交互式提交表格页面进行关闭或删除.在编写代码的过程中,程序员屏蔽掉代码层内常见的危险字符,这样就可以阻止或者屏蔽一些简单的网站注入攻击.

4) 作为网站管理员,要及时打补丁并强化数据.应定期、及时地通过相关设施和器具检查 Web 页面收到的攻击,实施监测数据库运行情况,禁止一切无用的功能和服务.

## 4 结论

对于 SQL 注入漏洞的检测条件是有限制的,检测效果重点在于代码覆盖率.通常情况下,会采用黑盒测试技术进行客户端 SQL 注入漏洞检测技术,当然检测效果也是取决于所建立检测漏洞模型是否准确,同时,也需要原代码给予一定的支持,如服务器端源代码的静态检测技术和动态检测技术,及两种检测技术相结合共同检测.但是污点跟踪技术是在发现 SQL 注入漏洞之后,而且也只是会终止进程或是发出报警,无法对抗利用漏洞发起的拒绝服务攻击,而综合检测技术无法追踪漏洞的位置和起因等,它只是提供安全部署的框架.

ASP.NET 网站开发的信息系统被入侵,是因为代码存在的问题被入侵者发现.因此,当程序员在编写程序时,首先,检测对客户端提交的变量参数和字符变量参数;然后,根据以下 6 点防御 SQL 注入的攻击.1) 通过类安全的参数代码机制打造动态 SQL 语句.2) 简短单表输入和查阅字符会降低有害代码强行 SQL 命令的频率.3) 检测填写的权限问题,保证填写的数据是可用的,同时,通过客户端和服务器的双向验证实现更严格的访问控制.4) 代码设置前先做评定,脆弱敏感的信息加上密码后再放置到数据库中,对比填写的密码是否和数据库一致,没有针对性意义的数据没事,有针对性的则要进行防范.5) 对返回数据进行检测,超过的记录都按照出错来进行处理.6) 操作者的权限放置到最基本要求.

### 参考文献:

- [1] 马凯,蔡皖东,姚焯. Web 2.0 环境下 SQL 注入漏洞注入点提取方法[J]. 计算机技术与发展,2013,23(3):121-124,128.
- [2] 丁允超,范小花. SQL 注入攻击原理及其防范措施[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版),2012,14(5):136-139.
- [3] 石聪聪,张涛,余勇,等. 一种新的 SQL 注入防护方法的研究与实现[J]. 计算机科学,2012(增刊1):60-64.
- [4] 王伟平,李昌,段桂华. 基于正则表示的 SQL 注入过滤模块设计[J]. 计算机工程,2011,37(5):158-160.
- [5] 周益宏,陈建勋. 浅析基于 ASP.NET 的网站 SQL 注入攻击及防范措施[J]. 计算机安全,2010(6):93-95.
- [6] 王云,郭外萍,陈承欢. Web 项目中的 SQL 注入问题研究与防范方法[J]. 计算机工程与设计,2010,31(5):976-978.
- [7] 周琰. SQL 注入检测方法的研究与实现[D]. 西安:西北大学,2011:16-20.
- [8] 竺霞芳. 双层防御 SQL 注入攻击的方法[D]. 武汉:华中科技大学,2011:32-38.
- [9] 刘合叶. 多功能 SQL 注入检测系统的实现及攻击防范方法研究[D]. 北京:北京交通大学,2009:48-52.
- [10] 陈柏生,吴可沾,杨育辉. 互联网用户安全登录平台设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2011,32(6):638-640.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605022



# 电信客户流失的组合预测模型

余路<sup>1,2</sup>

- (1. 西南大学 计算机与信息科技学院, 重庆 北碚 400715;
2. 重庆涪陵广播电视大学 教务处, 重庆 涪陵 408000)

**摘要:** 针对电信行业客户流失的问题,设计基于决策树 C5.0、BP 神经网络及 Logistic 回归算法的组合预测模型,并对某电信企业进行客户流失预测. 预测结果表明:与单一客户流失预测模型相比,组合预测模型命中准确率高,预测效果好,更能直观地显示出流失客户的基本特征.

**关键词:** 客户流失; 预测模型; 电信企业; 决策树 C5.0; BP 神经网络; Logistic 回归算法

**中图分类号:** TP 311.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0637-04

## Combination Forecasting Model of Customer Churns in Telecom Industry

YU Lu<sup>1,2</sup>

- (1. School of Computer and Information Science, Southwestern University, Chongqing 400715, China;
2. Teaching Affair Office, Chongqing Fuling Radio and television University, Chongqing 408000, China)

**Abstract:** According to telecommunication customer churn problem, the forecasting model based on decision tree C5.0, BP (back-propagation) neural network and logistic regression algorithm combination is designed, and according to forecasting of the customer churns in some telecom companies, the accuracy is higher and prediction effect is good in combination forecasting model compared to a single customer churn prediction model. It shows the basic features of the customer churn more directly.

**Keywords:** customer churn; forecasting model; telecom industry; decision tree C5.0; back-propagation neural network; logistic regression algorithm

电信市场的竞争愈来愈激烈,为使企业的利润最大化,各通信运营商都把争取更多的客户作为营销的最终目标.但是随着竞争的不断加剧,客户流失成为各企业运营过程中面临的主要问题,不仅使市场份额减少,还会出现客户恶意离网产生欠费行为,增加了企业的运营成本,造成严重的经济损失<sup>[1]</sup>.有分析称,开发一个新的客户比挽留一个老的客户所产生的成本高很多倍<sup>[2]</sup>.因此,做好客户关系管理,防止客户流失是通信行业提升企业核心竞争力的有效手段.针对以往客户关系管理过程中无法监控客户流失的问题,将数据挖掘技术应用到通信客户流失预警分析中,利用其强大的数据分析手段,建立客户消费特征等属性与客户流失可能性之间的关联模型,可实现对客户状态的实时监控.因此,寻求一种有效的建模与评估方案是研究人员关注的重点<sup>[3-5]</sup>.针对决策树、神经网络及逻辑回归 3 种单一算法的模型特点和预测效果,本文尝试建立一种基于 3 种算法的组合预测模型,并应用所建模型对某电信企业进行

**收稿日期:** 2016-06-20

**通信作者:** 余路(1972-),男,讲师,博士,主要从事计算机数据库技术的研究. E-mail: flddyl@126.com.

**基金项目:** 重庆市自然科学技术研究项目(KJ131302)

客户流失预测,以验证模型的有效性.

# 1 数据挖掘理论

## 1.1 数据挖掘的定义

数据挖掘是利用数据分类算法在海量的、随机分布的数据中提取隐含在数据当中的,能为人们提供决策作用的信息的过程<sup>[6]</sup>.数据挖掘包含两方面含义:一是能够处理海量数据;二是具有挖掘探索的能力.因强调从海量数据中获取信息的过程,所以数据挖掘技术更侧重于后者.

## 1.2 数据挖掘算法

1.2.1 决策树分类方法 决策树基于信息增益理论,通过分析样本中的数据挖掘其中的知识和规律,是目前应用最广泛的数据分类算法之一.决策树结构包含了若干个节点和分支,其中,节点表示某个属性上的测试,分支则表示测试的结果.常见的决策树算法有 ID3, C4.5/C5.0 等<sup>[7-9]</sup>,主要用于事件的预测分析.决策树预测过程分两步进行:一是利用训练集建立并进化一棵决策树;二是测试各节点的属性值,对输入数据进行分类,用该类的属性值完成预测对象的估计.

1.2.2 神经网络分类方法 作为一种人脑思想仿真的数据分析模式,神经网络以海量数据并行处理和计算为基础,用于描述认知,决策等智能控制行为.典型的神经网络的模型结构包括输入层、隐含层和输出层,由若干神经元连接而成,如图 1 所示. BP 神经网络是应用最广泛的神经网络算法,其输出表达式<sup>[10-11]</sup>为

$$H = f_i(\sum w_{i,j}x_j + \theta_j). \tag{1}$$

式(1)中: $w_{i,j}$ 为连接权系数; $f_j$ 为激励函数; $\theta_j$ 为神经元的阈值; $x_i$ 为神经元的输入.

BP 神经网络采用有师学习的方式进行训练,能够实现任何复杂非线性映射的功能,其训练过程以输出误差最小为原则,逐层修正各连接权系数和阈值,其训练过程如图 2 所示.

1.2.3 逻辑回归分类方法 逻辑回归的思想来源于多元线性回归,与多元回归连续性变量不同,逻辑回归的因变量是非连续性的变量.逻辑回归主要用来预测某种情况下事件发生的概率,一般用于处理二值型因变量,一般用“1”或“0”代表预测结果<sup>[12-13]</sup>.

设事件发生的影响因素为  $m$  个变量,用向量  $\mathbf{X}' = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_m)$  表示;根据观测量相对于某事件发生的概率为条件概率,用  $P(Y=1|x) = p$  表示,则逻辑回归的模型可表示为

$$P(Y = 1 | x) = \frac{1}{1 + e^{-g(x)}}. \tag{2}$$

# 2 多组合预测模型的建立与评价

## 2.1 组合预测模型的建立

针对典型分类算法的特点,在开放式数据挖掘工具 Clementine 中建立基于决策树、神经网络及逻辑回归算法的组合客户流失模型,构造 Lagrange 函数<sup>[14]</sup>为

$$L(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \sum_{i=1}^3 [(\alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i + \alpha_3 z_i - x_i)^2 + (\alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i + \alpha_3 z_i - y_i)^2 +$$

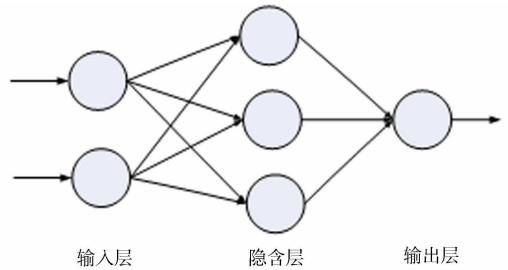


图 1 神经网络模型结构

Fig. 1 Model structure of neural network

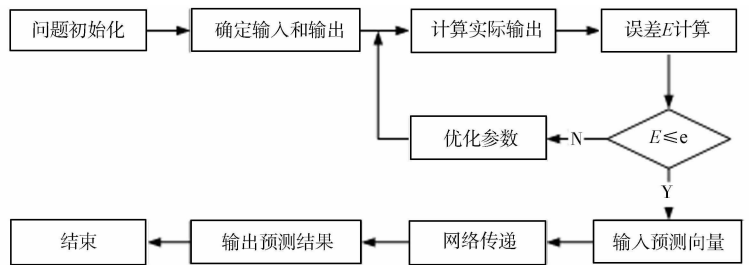


图 2 神经网络的训练过程

Fig. 2 Training process of neural network

$$(\alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i + \alpha_3 z_i - z_i)^2 + \lambda(\alpha_1 x_i + \alpha_2 y_i + \alpha_3 z_i - 1)]. \tag{3}$$

式(3)中： $x_i, y_i, z_i$  分别为 C5.0, BP 和 Logistic 回归算法单一模型的预测值； $\lambda$  为 Lagrange 算子； $\alpha_k$  为组合预测的权重系数，且  $k=1, 2, 3$ 。

将式(3)对组合权重系数求偏导数，得到  $\alpha_k$  的极值  $\alpha_k^*$ ，令  $\varphi_i^*$  为第  $i$  个预测对象的组合预测值，则其表达式为  $\varphi_i^* = \alpha_1^* x_i + \alpha_2^* y_i + \alpha_3^* z_i$ 。利用组合模型预测有以下 5 个步骤。

- 步骤 1 将预处理后得到的数据集进行划分：文中的划分比例为训练集占 60%，测试集占 40%。
- 步骤 2 选用决策树 C5.0、BP 神经网络及逻辑回归 3 个基本分类模型分别对训练集进行建模。
- 步骤 3 将测试集中的样本数据带入前面建好的模型中进行预测，得到预测分析结果。
- 步骤 4 分别将 3 种单一模型的预测结果带入构造好的 Lagrange 函数，得到多算法组合预测模型的权重系数，从而建立组合预测模型。
- 步骤 5 计算预测结果。

基于 Lagrange 函数的多算法组合模型的预测流程，如图 3 所示。

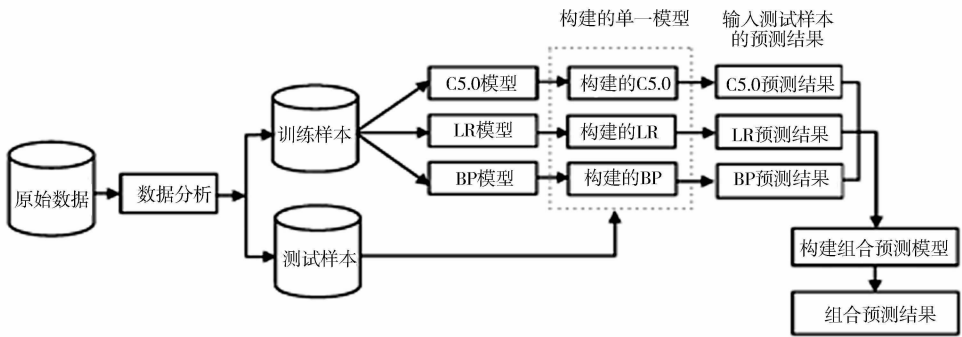


图 3 组合模型预测流程

Fig. 3 Forecasting process of combination model

## 2.2 模型评价

分别采用单一算法模型与多算法组合模型进行预测分析，预测结果如表 1 所示。由于论文篇幅的限制，这里仅列出其中的 10 个预测结果。为进一步分析不同模型算法的预测准确程度，对表 1 中各预测结果进行统计，结果表明：C5.0 模型的命中率为 88.95%；LR 模型的命中率为 87.38%；BP 模型的命中率为 87.11%；组合模型的命中率为 92.07%。

基于 Lagrange 的多算法组合预测模型集合了各单一模型的预测优势，大大提高了客户流失的预测命中率，达到 92.07%，比单一模型的预测命中率提升了近 5%。

假设某电信运营企业的流失客户数为 300 000 个，根据各模型算法的预测命中率进行计算，分别得到单一模型和组合模型预测客户流失的数量及误判率，如表 2 所示。表 2 中： $m$  为流失数量； $n$  为误判人数； $\eta$  为误差率； $w$  为误判损失。

表 1 不同模型算法的客户流失预测结果

Tab. 1 Customer churn prediction results for different model algorithms

编号	流失标志	各模型预测结果			
		C5.0 模型	LR 模型	BP 模型	组合模型
100001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100002	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100003	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100004	1.0	0.0	1.0	1.0	1.0
100005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100006	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100007	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100008	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100009	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100010	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表2 组流失量预测及误判率对比结果

Tab.2 Comparison results for prediction and erroneous judgement rate of group loss amount

模型	$m$	$n$	$\eta/\%$	$w/\text{万元}$
实际流失	300 000	—	—	—
C5.0 模型	265 498	34 502	11.5	103.5
LR 模型	268 652	31 345	10.4	94.0
BP 模型	274 583	25 417	8.5	76.3
组合模型	283 564	16 436	5.5	49.3

由表2可知:在客户流失数量的预测中,多算法组合模型的误判人数明显减小,预测误差率仅为实际数量的5.5%;设每个人的月均消费为30元,那么由组合模型所造成的误判损失也将大大降低,仅是单一模型预测损失的一半左右.由此可见,与单一客户流失预测模型相比,基于Lagrange的多算法组合模型预测效果好,可有效预测客户流失和流失倾向,达到预测期望,企业可针对预测结果制定相应的避免客户流失的对策.

### 3 结束语

客户流失是通信行业运行过程中常见的问题,直接影响到运营商的企业效益.数据挖掘可以根据客户信息、消费行为等历史数据判断客户流失的可能性,避免因营销手段的盲目性造成的成本浪费.对决策树C5.0、BP神经网络和Lagrange回归算法3种典型数据分类方法进行分析,针对单一模型客户流失预测建模的特点,建立了基于Lagrange函数的组合预测模型.预测结果表明:所建立的组合模型对电信客户流失预测命中率大幅提高,预测效果好,能有效获取客户的流失倾向,使电信企业营销方案的制定更具针对性.

#### 参考文献:

- [1] 夏国恩. 客户流失预测的现状与发展研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(2): 151-153.
- [2] 张线媚. 数据挖掘在电信行业客户流失预测中的应用[J]. 微型机与应用, 2015, 34(15): 99-102.
- [3] 刘光远, 苑森森, 董立岩. 数据挖掘方法在用户流失预测分析中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(9): 154-156.
- [4] 郭俊芳, 周生宝. 基于联合决策树的客户流失预测模型设计[J]. 计算机与现代化, 2010(5): 5-7.
- [5] 尹婷, 覃锡忠, 贾振红, 等. 基于WEKA的客户流失预测研究[J]. 激光杂志, 2013, 34(5): 44-46.
- [6] 仲继. 电信企业客户流失预测模型研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011: 21-22.
- [7] 张晓滨, 高峰, 黄慧. 基于客户细分的客户流失预测研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(24): 5755-5758.
- [8] 王晓华. 电信数据挖掘的数据质量评估技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010: 7-10.
- [9] 潘大胜, 屈迟文. 一种改进ID3型决策树挖掘算法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 71-73.
- [10] CONG H E, REN Lihong, DING Yongsheng. Performance prediction of carbon fiber protofilament based on SA-GA-SVR [J]. Journal of Donghua University, 2014, 31(2): 92-97.
- [11] 李爱群, 乔晗, 王汝传, 等. 基于分布式混合数据挖掘的电信客户流失分析[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(10): 43-46.
- [12] 朱龙. 利润约束的关联规则挖掘算法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2015, 36(9): 522-526.
- [13] THANGAPARVATHI B, ANANDHAVALLI D, SHALINIE S M. A high speed decision tree classifier algorithm for huge dataste[C]// IEEE-International Conference on Recent Trends in Information Technology. [S. l.]: IEEE Press, 2011, 10(6): 695-700.
- [14] 迟准. 电信运营企业客户流失预测与评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013: 73-74.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)



doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605023



# ARM TrustZone 的轻量级 嵌入式虚拟化架构

王亮

(西藏民族大学 信息工程学院, 陕西 咸阳 712082)

**摘要:** 针对现存的基于软件的虚拟化解决方案存在的不足, 利用 ARM 标准硬件技术和赛灵思 ZC702 商业平台, 实现通用操作系统(GPOS)与轻量级实时操作系统(FreeRTOS)同时运行. 测试结果表明: 虚拟机从 RTOS 到 GPOS 的上下文切换系统开销是  $3.10 \mu\text{s}$ , 相反过程为  $2.64 \mu\text{s}$ , 内存占用也仅为 1 KB; 由虚拟机监视系统(VMM)引入的性能开销低和内存占用较小; 利用 ARM TrustZone 技术可实现一个具有低成本和高可靠性的轻量级虚拟化解决方案.

**关键词:** 嵌入式系统; 虚拟化技术; 实时操作系统; 处理器; 软件模块

**中图分类号:** TP 311.52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0641-04

## Towards Lightweight Embedded Virtualization Architecture Exploiting ARM TrustZone

WANG Liang

(School of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, China)

**Abstract:** According to the existing solution scheme of software based virtualization, the arm standard hardware technology, combined with the mature technology of Xilinx ZC702 business platform, the general-purpose operating system (GPOS) and real-time operating system (FreeRTOS) system running at the same time are realized. Test data shows that the virtual machine from the RTOS to GPOS system context switching overhead is  $3.10 \mu\text{s}$ , opposite is  $2.64 \mu\text{s}$ , memory is only 1 KB; the performance overhead introduced by the virtual machine monitor (VMM) is low and with a smaller memory footprint; ARM TrustZone technology is exploited to implement a lightweight virtualization solution with low overhead and high determinism.

**Keywords:** embedded systems; virtualization; real-time operating system; processor; software module

虚拟化技术可以使得同一处理器并行执行多个虚拟机(virtual machine, VM), 并允许多个操作系统(operating system, OS)并存于同一硬件平台<sup>[1]</sup>. 虚拟化技术多被用在企业和云计算空间, 最大限度地提高资源的可用性<sup>[2]</sup>. 随着新型嵌入式设备的大量涌现, 对系统技术要求也日益提高, 系统不仅应具备通用计算能力和功能扩展能力, 而且还要满足对实时性和可靠性的技术要求. 因此, 嵌入式虚拟化技术应运而生. 典型的嵌入式虚拟化解决方案<sup>[3-8]</sup>本质上遵循两种不同的技术实现方式: 全虚拟化和超虚拟化<sup>[9]</sup>. 对于全虚拟化, 客户操作系统不需要作任何的修改, 管理程序或者虚拟机监控程序(virtual machine monitor, VMM)需要作出捕捉指令, 协调硬件执行操作. 因此, 全虚拟化性能比使用裸机硬件慢. 对于超虚拟化, 管理程序实现了操作系统对底层硬件的共享访问, 并将虚拟化有关的代码集中在操作系

**收稿日期:** 2016-06-20

**通信作者:** 王亮(1968-), 男, 副教授, 博士, 主要从事计算机网络工程的研究. E-mail: wzjwllw@163.com.

**基金项目:** 西藏科技厅科研项目(2015ZR-14-20)

统本身,因此,可直接从管理程序请求服务.这种静态方法,执行性能明显提高,但系统自定义修改难度较大,研发成本较高、研发周期较长和后期维护难度较大.目前,嵌入式领域关注重点为硬性限制,研究重点也集中在基于硬件的辅助虚拟化技术,开发具有高性能的嵌入式虚拟化解决方案<sup>[10-14]</sup>.较成熟的嵌入式虚拟化案例是采用 Intel, ARM, AMD 等硬件厂商的虚拟化技术配合 ARM TrustZone 和 Intel TxT(trusted execution technology)技术.本文提出一种基于 Trust Zone 的虚拟化架构实现方案,它允许通用操作系统(GPOS, Linux)与实时操作系统(RTOS, FreeRTOS)并行运行,并基于标准硬件搭建系统平台,使得性能功耗和内存占用比较小.

## 1 ARM TrustZone

支持 TrustZone 技术的 ARM 处理器型号主要包括 ARM1176, Cortex-A5/A7/A8/A9/A15 及最新的 64 位 Cortex-A53/A57. 该技术基于硬件支持的安全性扩展,利用虚拟化技术,将一个物理核心虚拟成两个虚拟内核,并提供两个完全独立的执行环境:安全可信的安全环境和非安全的普通执行环境. TrustZone 通过启用或禁用协处理器 CP15 的安全配置寄存器(secure configuration register, SCR)的 NS 位转换处理器的执行状态.当 NS=0 时,处于安全状态;当 NS=1 时,处于非安全状态.为实现处理器在安全状态和非安全状态的转换,引入监控模式.监控模式被用来控制系统的安全状态和数据的访问权限,负责保存当前上下文状态.进入监控模式,需要一种新的权限指令,即安全调用(secure monitor call, SMC).硬件层面,TrustZone 技术从 CPU 内核开始设置系统安全,以确保普通环境与安全环境之间的完全隔离.

## 2 TrustZone 虚拟化架构

Frenzel 等<sup>[15]</sup>将 TrustZone 技术应用于嵌入式系统虚拟化,认为 TrustZone 技术能够提供基于可信硬件专用的系统虚拟化架构,尤其针对具有两个虚拟机的情况.由于虚拟机数量与处理器支持的独立状态完全对应,使得多媒体操作系统(如 Linux, Android)可在非安全环境中运行,而安全关键软件则在安全环境中运行.同时,监视模式可对处理器进行全面观测,执行 VMM 不再需要修改驻留在非安全环境的操作系统.但是,尽管基于特权模式运行,GPOS 仍不能直接访问安全环境资源,其权限仍然要比 VMM 组件低. TrustZone 技术使得系统开销降低,并加快虚拟机之间的上下文切换.

### 2.1 体系结构描述

基于 TrustZone 技术的嵌入式虚拟化架构,如图 1 所示.图 1 中:RTOS (FreeRTOS), GPOS (Linux)和 VMM 为 3 个主要的软件.首先,GPOS 运行于非安全的普通执行环境,保证良好的人机交互界面及基于互联网的应用和服务;其次,RTOS 运行于安全的执行环境,为系统软件应用提供安全实时保证;最后,VMM 组件以监控模式运行于安全的执行环境,负责管理每个虚拟机的虚拟机控制块(virtual machine control block, VMCB).当虚拟机由物理处理器来执行时,VMM 在对应 VMCB 中保存虚拟处理器的当前状态,从 VMCB 中恢复与当前 VM 相应的处理器状态.

### 2.2 执行流程

系统在安全环境下,由引导程序启动,该程序主要负责初始化硬件设备,建立内存空间的映射图、为最终操作系统内核的运行准备好系统的软硬件环境.中断控制器(generic interrupt controller, GIC)在安全环境下,调用快速中断指令(fast interrupt requests, FIQ),在非安全环境下,调用普通中断指令(interrupt requests, IRQ).执行流程图,如图 2 所示.通过禁用 SCR 寄存器的 FIQ 和 IRQ 位,保证异常 FIQ/IRQ 不会造成监视模式的切换,并使得 VM 切

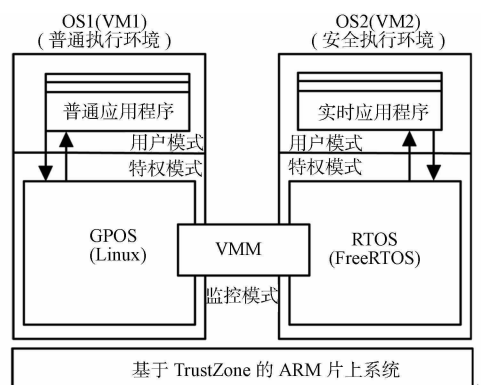


图 1 嵌入式虚拟化架构

Fig. 1 Embedded virtualization architecture

换仅调用 SMC 指令, 引导程序执行后, RTOS 启动, 并开始调度系统程序. 当实时任务被中断或挂起, 空闲任务执行一个系统调用, 用来唤醒 VMM 和执行 SMC 指令. 同时, 处理器进入到监视模式, 并开始执行 VMM, 跳转至监控模式向量表的特定处理程序. 因此, 为切换至非安全环境, 处理器执行 SMC 处理程序.

完成上述执行流程后, 系统进行上下文切换操作. 实际上, 安全环境的处理器状态保存于相对应的 VMCB 中, 从非安全环境的 VMCB(Linux) 中还原. 但是, 程序的首次执行是个特例, 出于最优化的目的, 只对安全环境的处理器状态进行保存. 设置特权模式 (supervisor mode, SVC), 并更新链接寄存器的 GPOS 内核的启动地址. 然后, 通过 VMM 调用 FIQ 指令, 对 SCR 寄存器的 NS 位使能, 并跳转至非安全环境状态的初始化或还原地址. 值得注意的是, 缓存中一直都没有进行操作. TrustZone 允许安全环境和一般环境的缓存条目共存, 并支持在缓存控制器指定一个 NS 标记位关联缓存中所有数据. 这种方法在虚拟机之间切换时不需对高速缓存进行刷新, 并有助于加快上下文切换.

由图 2 可知: 在非安全环境, 当 FIQ 得到触发时, GPOS 开始启动运行. 由于 SCR 寄存器的 FIQ 位已经启用, FIQ 触发使处理器进入监控模式, 跳转至监控模式向量表的 FIQ 处理程序. 同时, VMM 开始执行, 并准备上下文切换. 首先, 通过禁用 SCR 寄存器的 FIQ 和 NS 位, 保存非安全环境的处理器状态于相对应的 VMCB 中, 确认 FIQ 请求, 并从 VMCB 还原安全环境上下文. 其次, 处理器切换回 RTOS 内核, 调度任务再次启动. 处理器将一直运行于安全环境, 直到空闲任务执行新的系统调用, 处理器重新执行所有先前描述的执行流程.

### 3 测试分析

基于赛灵思 (Xilinx) ZC702 对虚拟化架构运行测试, 搭载功能强大的双核 ARM Cortex-A9 处理器, 运行频率为 800 MHz, 支持多核硬件架构, 使用单个芯片即可构建高性能片上系统. 系统测试内容主要包括系统性能和内存占用, 系统性能通过性能监视单元 (performance monitoring unit, PMU) 获得, 内存占用则是利用赛灵思工具链获得.

为了评估由 VMM 执行产生的系统开销, 进行两次上下文切换操作.

1) 切换到非安全环境. 从安全环境切换到非安全环境, VMM 执行上下文切换操作, 将控制权交给操作系统 Linux 内核. 时钟周期的计数是从安全环境下的 SMC 指令调用时刻至处理器访问非安全环境的地址瞬间.

2) 切换到安全环境. 从非安全环境切换到安全环境, VMM 执行上下文切换操作, 将控制权交给 FreeRTOS 内核. 时钟周期的计数是从非安全环境的 FIQ 异常的确切时刻至处理器在安全环境下运行的时刻.

每个试验重复 20 次, 测试结果包括最小值、最大值、平均值及测量值的标准偏差. 就 Cortex-A9 处理器而言, 尽管 VMM 在每次执行的指令相同, 但由于体系结构的动态特征, 执行指令的时钟周期的次数是变化的.

VMM 运行统计, 如表 1 所示. 表 1 中:  $t_{\min}$  为最小值;  $t_{\max}$  为最大值;  $\mu$  为平均值;  $\sigma$  为测量值的标准偏差. 由于所用处理器的时钟频率为 800 MHz, 结合测量的平均值进行计算, 得到安全环境到非安全环境切换和非安全环境到安全环境切换的平均执行时间分别为 3.10, 2.64  $\mu\text{s}$ . 考虑到 FreeRTOS 内进行任务切换所需的时间为 2.02  $\mu\text{s}$ , 虚拟机进行上下文切换平均时间仅超出 53.4% 和 30.6%. 当 VMM 运行时禁用所有中断源, 在安全环境到非安全环境上下文切换时, 如果触发 FIQ 请求, 意味最差情况下中断执行时间为 6.02  $\mu\text{s}$ .

VMM 内存 ( $n$ ) 统计, 如表 2 所示. 由表 2 可知: 与 RTOS 相较而言, VMM 的内存占用相对较小;

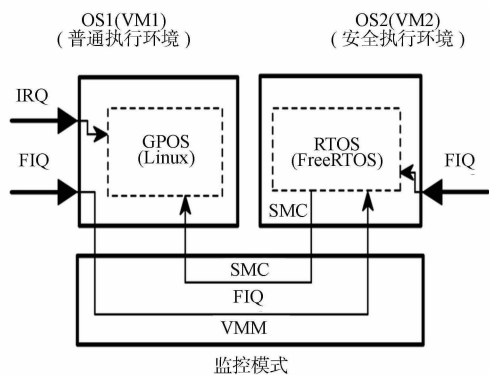


图 2 执行流程图

Fig. 2 Execution flow chart

VMM 所需的内存分别约为 FreeRTOS 的 1.30% 和 Linux 的 0.04%。

表1 VMM 运行统计

Tab.1 VMM operating statistic

转换状态	$t_{\min}/s$	$t_{\max}/s$	$\mu$	$\sigma$
Switch to NS world	2 431	2 568	2 478	52.5
Switch to S world	2 081	2 245	2 109	48.9

表2 VMM 内存统计

Tab.2 VMM memory statistic

系统	$n(\text{text})$	$n(\text{data})$	$n(\text{bss})$	$n(\text{Total})$
VMM	848	0	244	1 092
FreeRTOS	17 646	16	66 000	83 690
Linux	2 874 978	52	4 120	2 879 150

## 4 结束语

嵌入式系统的最新发展方向之一就是虚拟化技术. 基于 TrustZone 技术, 利用 ARM 标准硬件技术, 结合技术成熟的赛灵思 ZC702 商业平台, 实现了 GPOS 与 FreeRTOS 的系统同时运行. 虚拟机从 RTOS 到 GPOS 的上下文切换系统开销是  $3.10 \mu s$ , 相反过程的为  $2.64 \mu s$ , 内存占用也仅为 1 KB, 证明由 VMM 引入的性能开销低和内存占用较小. 当前系统架构具有优越性, 但就最优而言, 还有亟需解决的问题. 下一步研究思路是基于现有结构下针对共享设备集成新的访问机制, 摒除每个外设专用于同一执行环境的限制. 研究虚拟机数目和系统架构支持的虚拟处理器数量之间的相关性, 扩展虚拟化架构以满足多用户支持和多核心支持. 基于服务客户端技术, 利用 TrustZone API 建立两个操作系统之间的标准通信机制, 使得可信任执行环境与扩展 VMM 相关联, 最终实现针对目标安全的完整框架.

## 参考文献:

- [1] 张国亮, 王展妮, 王田. 应用计算机视觉的动态手势识别综述[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 653-657.
- [2] 钟必能, 陈雁, 沈映菊, 等. 在线机器学习跟踪算法的研究进展[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 41-45.
- [3] HEISER G. The role of virtualization in embedded systems[C]// Proceedings of the 1st Workshop on Isolation and Integration in Embedded Systems. New York: Association for Computing Machinery, 2008: 11-16.
- [4] 韦照川, 李德明. 嵌入式系统发展概述[J]. 科技信息, 2010(1): 839.
- [5] MASMANO M, RIPOLL I, CRESPO A, et al. Xtratum: A hypervisor for safety critical embedded systems[C]// Proceedings of the 11th Real Time Linux Workshop. Nanjing: Real Time Linux Workshop, 2009: 153-159.
- [6] STEINBERG U, KAUER B. NOVA: A microhypervisor based secure virtualization architecture[C]// Proceedings of the 5th European Conference on Computer Systems. Paris: EuroSys, 2010: 209-222.
- [7] 叶常春. 嵌入式虚拟化技术[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(3): 41-45.
- [8] 叶存奎. USB 设备协议栈的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011: 1-60.
- [9] 周亦敏, 隋伟鑫. ARM 架构中 TrustZone 安全处理技术的研究[J]. 微计算机信息, 2009, 24(36): 69-71.
- [10] VARANASI P, HEISER G. Hardware supported virtualization on ARM[C]// Proceedings of the Second Asia Pacific Workshop on Systems. Tokyo: User Evaluation, 2011: 231-236.
- [11] HERLIHY M, SHAVIT N. 多处理器编程的艺术[M]. 金海, 译. 北京: 机械工业出版社, 2009: 218-220.
- [12] 林小茶, 李光. 基于嵌入式技术的信任根研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(16): 165-168.
- [13] 任爱芝. 基于 ARM 的可信嵌入式系统设计[J]. 电脑编程技巧与维护, 2011(20): 24-25.
- [14] ALVES T, FELTON D. TrustZone: Integrated hardware and software security[J]. ARM White Paper, 2004, 3(4): 18-24.
- [15] FRENZEL T, LACLPRZUMSLI A, WARG A, et al. ARM TrustZone as a virtualization technique in embedded systems[J]. Twelfth Real Time Linux Workshop, 2010(6): 76-79.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605024



# 大型电站分散控制系统人机界面的设计与实现

蒋满群<sup>1</sup>, 高炜<sup>2</sup>

(1. 无锡太湖学院 艺术学院, 江苏 无锡 214001;  
2. 华电江苏能源有限公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 设计 2 台 1 000 MW 超超临界发电机组中央控制室和基于 maxDNA 控制系统的人机界面. 中央控制室包含 6 个功能分区, 基于 maxDNA 控制系统的人机界面包含标示区、控制区、输入输出区、信息区, 并首次应用于 1 000 MW 发电机组. 结果表明: 设计的中央控制室和人机界面遵循了机组运营要求、岗位功能分区、人机工程要求、高安全等级的原则, 系统运行至今效果良好, 并应用于国内 6 家电厂.

**关键词:** 中央控制室; 分散控制系统; 人机界面; 电站

**中图分类号:** TB 47      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0645-04

## Design and Application of Man-Machine Interface for Distributed Control System of Power Plant

JIANG Manqun<sup>1</sup>, GAO Wei<sup>2</sup>

(1. College of Art, Taihu University of Wuxi, Wuxi 214001, China;  
2. China Huadian Corporation Jiangsu Branch, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Design two sets of 1 000 MW ultra supercritical generating units of the central control room and based on maxDNA control system which used the man-machine interface. The central control room contains 6 function zones. The man-machine interface of the maxDNA control system includes the marking area, the control area, the input/output area and the information area, and also it is the first application in 1 000 MW power generating. The results show that: the design of the central control room and man-machine interface both follow these principles, including the requirements of the unit operation, the position of functional partition, the man-machine engineering requirements, and a high level of security, the operation has good result and applying in 6 domestic power plant so far.

**Keywords:** centralized control room; distributed control system; man-machine interface; power plant

电站中央控制室作为全厂监视和控制中心,是人与设备信息交换的主要场所,要求宽敞、明亮、舒适,便于人对设备的集中监视和处理.控制室在厂房内的布局随着工业设计、建筑设计的发展有所差异,但其主要功能未产生变化,即对机组运行进行监视.分散控制系统(distributed control system,DCS)出现于 20 世纪 70 年代,并迅速得到推广.DCS 主要由数据采集系统、汽轮机数字电液调节系统、炉膛安全控制系统和发电机控制系统组成<sup>[1]</sup>.国内某新建 2 台 1 000 MW 等级超超临界发电机组,其中央控制室设计在两台机组设备的中央区域以节约建造成本.该机组首次将 maxDNA 系统应用于 1 000 MW 等

**收稿日期:** 2016-06-21

**通信作者:** 蒋满群(1979-),女,讲师,博士,主要从事工业设计与产品设计的研究. E-mail:sheep\_jiang@163.com.

**基金项目:** 中国华电集团公司科技项目(CHDKJ15-01-16);无锡太湖学院教改项目(JGYJ2015030)

级的发电机组,进行集中控制.本文以该电厂施工过程为背景,利用人机工程学原理和方法,设计一套基于 maxDNA 系统的人机界面.

## 1 系统设备概况

该新建 1 000 MW 等级超超临界发电机组主要由汽轮机、锅炉、发电机和其他辅机构成.锅炉为东方电气集团生产的 1 000 MW 超超临界直流锅炉,型号为 DG3024/28.35-II 1.汽轮机为上海汽轮机厂与西门子联合制造的超超临界 HMN 型 1 000 MW 等级汽轮机,最大出力可达 1 030 MW.

## 2 中央控制室及人机界面设计

### 2.1 设计要求

目前,大型发电机组均采用中央控制室方式进行机组运行状态监控.电站中央控制室是对机组启停、调整及事故处理的枢纽.人机界面是值班员监视机组运行工况,并对现场设备及运行状态进行调整的主要信号反馈通道<sup>[2]</sup>.中央控制室和人机界面有以下 3 个特点.

1) 受控设备多.根据同类型火力发电机组设备信息统计比较发现,300 MW 机组设备总数约 4 500 个,而 1 000 MW 等级发电机组设备总数约 15 000 个.

2) 调节过程慢.根据超超临界发电机组的运行情况分析,人机界面之间的信息传递时间约为 5 s, maxDNA 系统计算周期为 500 ms,这就使得该系统的人机信息交换时间更长.

3) 智能化要求高.人机界面在完成信息传递的同时,还会提醒机组安全和经济效益指标.人机界面的软件设计应满足 GB/T 20527.1-2006《多媒体用户界面的软件人类工效学》标准的要求;重要操作应提供反馈信息并要求确认等<sup>[3]</sup>.

### 2.2 设计流程和原则

中央控制室、人机界面的设计复杂而严谨,涉及热控、建筑、电气、人机工程、通讯等学科.控制室的布局主要依据电站控制室的功能需求,遵循相关国家标准设计原则,严格遵循设计法规和人机工程原理,结合设备特点和电站生产要求,并进行科学评价和验收<sup>[4]</sup>.设计流程,如图 1 所示.

中央控制室的总体设计在满足各方需求的前提下,依据 GB/T 22188.3-2010《控制中心的人类工效学设计》、GB/T 14774-1993《工作座椅一般人类工效学要求》等技术规范进行设计.控制室及人机界面设计原则如下.

1) 机组运营要求.在保证设备运行所要求的前提下,控制室设计应满足设备布局要求、值班员操作空间要求、发电设备检查和维护空间要求.

2) 岗位功能分区.中央控制室要按照机组运行、重大操作情况下的人员配置进行设计,以满足不同岗位人员不同操作内容、等级的需求,如值班长、级组长、值班员之间的岗位差异造成的操作指令不同.

3) 人机工程要求.大型电站中央控制室应满足人机工程学原理,确保控制室内设备配置、环境舒适度等满足心理学要求.

4) 高安全等级.不同设备对应不同的安全等级.控制室在配置不同设备时,必须进行可靠的物理隔离,尤其在重要信合通讯设备周围应进行有效的电磁隔离.

### 2.3 中央控制室设计

该电厂新建的两台 1 000 MW 等级超超临界机组,是典型的单厂双机配置.

根据该厂运行及设备选型要求和 maxDNA 厂家提供的技术参数,初步设计中央控制室的功能分区为值班员区、冗余操作区、按钮区、消防装置区、值班长装置区和工程师站.

1) 值班员区.值班员是机组正常运行的核心人员保证,在正常及重大操作过程中对机组运行工况、

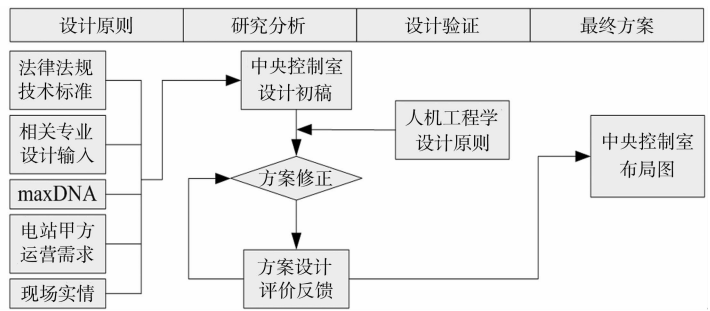


图 1 设计流程图

Fig. 1 Design flow chart

设备操作等负责. 值班员区具体分为 1 号机组值班员区 2 人, 2 号机组值班员区 2 人, 脱硫值班员区 1 人, 网控值班员区 1 人. 每人配置 3 台工业计算机.

2) 消防装置区. 根据《消防法》规定, 消防装置区应为 24 h 监视, 但电厂建设方受到人员数量限制, 无专人对消防装置进行监视. 因此, 中央控制室设计消防装置集中自动监视装置, 镶嵌于值班员值班区左墙内部, 尺寸为 1.6 m×2.0 m×0.2 m.

3) 值班长区. 值班长对 2 台机组总体运行工况负责, 包括机组负荷、燃料情况等, 同时, 负责与上级电网调度沟通, 确定机组运行方式. 值班长 1 人, 值班长区设置 4 台计算机, 4 部电话, 2 台打印机. 值班长区设置于值班员区中央后方 5 m 处.

4) 工程师站. 根据机组独立原则, 每台机组设置一座工程师站, 同时, 2 台机组设置一座公用辅助工程师站. 工程师站主要完成机组 DCS 参数优化、控制回路校正、参数报警值修改等任务. 辅助工程师站主要完成辅助系统参数优化和控制回路校正, 如视频监控、暖通系统监视等.

其他区域如值班员区按钮盘面、视频监控等, 由电站人员自行根据实际需要进行设计改造. 该电厂中央控制室设计图, 如图 2 所示.

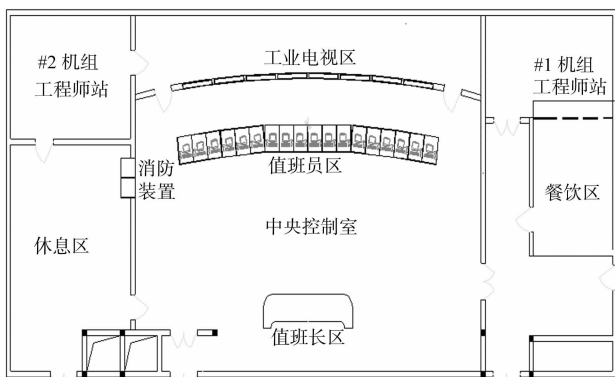


图 2 中央控制室设计图

Fig. 2 Flow chart of central control room

### 2.4 人机界面设计

基于人机工程学的人机界面设计主要处理人体相关问题. 人机界面设计前, 收集值班员、值班长人体形态特征参数、年龄分级特征、心理表现特征等<sup>[5]</sup>. 人机界面设计在考虑道人机工程的同时, 也应满足人机间交互性原理要求, 包括交互技术、交互设备、交互界面等<sup>[6-7]</sup>. 电站控制室人机界面工作原理, 如图 3 所示.

人机界面显示方式的组合与选择应按照如下原则<sup>[8-9]</sup>: 重要操作及报警消息设计; 显示的数值及开关信息应基于具体的显示媒体、语言设计, 如表格、柱状图的显示等; 对于关联性较强的数值应突出其关联性和差异性; 对重要保护装置应借助图像等流媒体; 关键参数及重要事件等应在显著位置设计声光报警.

界面舒适度主要指界面对眼睛、大脑的刺激程度, 且设计界面能否满足操作需求, 尤其在事故工况下的画面快速切换等. 人眼在观察事物时, 获得的亮度感觉与背景亮度有较大关系, 且人眼察觉亮度变化的能力有限, 称为亮度遮蔽特性<sup>[10]</sup>.

不同操作界面, 应该设计、配置相同的功能位置, 用于用户快速进行页面切换及重要信息获取, 并且相同功能位置布置在相同的区域. maxDNA 人机界面功能分布<sup>[11]</sup>, 如图 4 所示.

maxDNA 人机界面, 如图 5 所示. 该界面为电站发电机组总貌图. 每个界面图上部均为机组重要参数标示功能区, 标示区下方为输入/输出功能区, 控制区占用最大面积用于重要信息获取及命令执行, 界面底部为信息区, 主要用于信息获取、查询等. 在界面的最右侧上方为 DCS 时间, 下方为机组重要操作反馈及报警信息显示.

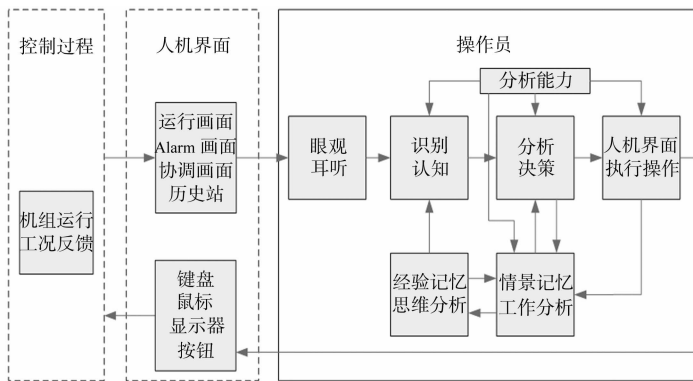


图 3 人机界面工作原理

Fig. 3 Working principle of man-machine interface



图 4 maxDNA 人机界面功能分布  
Fig. 4 MaxDNA functional distribution of man-machine interface

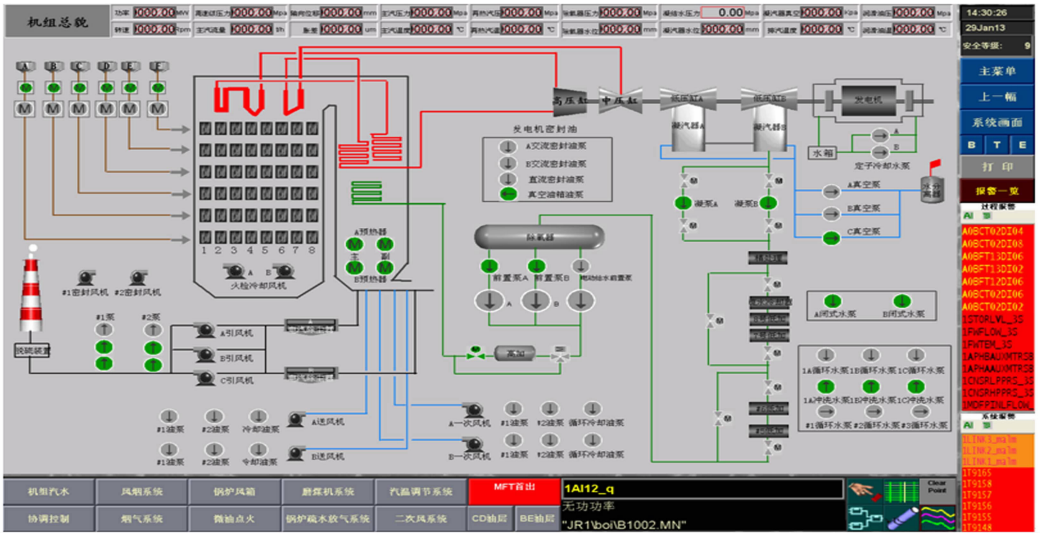


图5 maxDNA 人机界面

Fig. 5 Man-machine interface of maxDNA

### 3 结束语

依据人机工程学,对某新建电站设计一套中央控制室及基于 maxDNA 控制系统的人机界面.设计的中央控制室分为值班员区、冗余操作区、按钮区、消防装置区、值班长装置区和工程师站等 6 大区域.同时,单厂双机配置的设计为同类机组中央控制室的建造提供了借鉴和参考<sup>[12-13]</sup>.该控制室占地面积小、适应性强,能够满足人体主观要求及舒适度要求.基于 maxDNA 控制系统的人机界面设计了标示区、输入/输出区、信息区、控制区以满足人机信息交换要求,设计充分考虑了运行需求、亮度遮蔽特性等,设计的人机界面为值班员提供了高效、便捷、舒适的操作界面,运行至今效果良好.中央控制室及人机界面已于 2013 年 1 月投入使用.目前,该控制室及人机界面已经应用于国内 6 家同类发电机组.

### 参考文献:

- [1] 夏春艳,颜声远,李庆芬,等.核电厂主控室人机界面评价实验研究[J].中国安全科学学报,2008,18(8):109-114.
- [2] 肖伯乐.微机集散控制系统在火电厂的应用[J].发电设备,1992(11):9-12.
- [3] 刘立坤.智能型船舶电站控制器的研究[D].大连:大连海事大学,2010:36.
- [4] 王富强,李晓理,张秋生,等.直流锅炉超超临界机组协调系统多变量预测控制方法[J].热力发电,2016(4):48-53.
- [5] 高智彦,张学刚.核电厂主控室数字化运行画面的设计策略[J].核科学与工程,2010(增刊1):62-67.
- [6] 李鹏程,张力,戴立操,等.核电厂数字化人-机界面特征对人因失误的影响研究[J].核动力工程,2011,32(1):48-52.
- [7] 朱海岩.600MW 等级燃煤示范电厂主厂房的设计[J].吉林电力,2001(2):16-18.
- [8] 方卫宁,徐媛媛,田生彩.基于工效学的机车显示、控制器界面计算机辅助优化设计[J].铁道学报,2004,26(6):20-24.
- [9] 李迎梅.基于工业控制网络的水处理监控系统设计与实现[D].武汉:武汉理工大学,2006:33-37.
- [10] 王玮,石胜辉.人类视觉特性的数字水印新方案[J].华侨大学学报(自然科学版),2016,37(3):304-307.
- [11] 何滔,张宇飞.MaxDNA 集散控制系统在火力发电厂中的应用[J].工业控制计算机,2013,26(7):6-7.
- [12] 王林.安庆电厂 1# 机组 DCS 系统升级改造[J].轻工科技,2013(9):55-56.
- [13] 庄义飞.maxDNA 集散控制系统 DPU 通信故障分析及优化[J].仪器仪表用户,2014(6):68-70.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)



doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201605025



# 采用时空重排扫描统计量的 犯罪集聚可视分析

张永田, 吴升

(福州大学 福建省空间信息工程研究中心, 福建 福州 350003)

**摘要:** 首先,基于时空重排扫描统计量方法,对福州市 2014 年案事件数据进行日尺度与小时尺度的时空重排扫描统计,得到不同尺度下的犯罪时空集聚区.然后,结合数据可视化技术,对分析结果进行多尺度、多视角的交互式可视化设计.结果表明:用户可以通过选择日期尺度,按月或按月日期段、周日期段查看犯罪热点空间分布;也可以通过选择小时尺度,按时段查看周日期或节假日犯罪热点的空间分布.

**关键词:** 扫描统计; 犯罪热点; 交互式; 可视分析; 空间尺度; 时空聚集

**中图分类号:** P 208      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0649-05

## Visual Analysis of Crime Clusters Based on Space-Time Permutation Scan Statistic

ZHANG Yongtian, WU Sheng

(Spatial Information Research Center of Fujian, Fuzhou University, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Firstly, based on space-time permutation scan statistic method, this paper analyzes crime of Fuzhou City in 2014 in days and hours, the space-time crime clusters in different scales are obtained. Then, combine with the data visualization technology and propose interactive visualization design for the results of the analysis in multi-scale and multi perspective. The results show that the method above enables users to view crime hot space distribution by date scale in monthly, month-date segment or week-date segment and by hour scale in week-date segment or holiday segment.

**Keywords:** scan statistic; crime hot spots; interactive; visualization; space scale; spatio-temporal aggregate

随着公安部“金盾工程”二期的完成,全国公安通信网络和信息系统应用水平得到进一步的提升,案件信息每年以 100~120 万条的速度递增<sup>[1]</sup>.面对不断增长的海量信息,缺乏有效的数据挖掘及可视化分析手段使公安部门陷入了“库中有数而心中无数”的困境.传统的犯罪空间数据挖掘方法将时间和空间信息割裂开,无法全方位、立体地挖掘更深层的、富有价值的信息.此外,犯罪可视化与犯罪数据分析出现相互脱节的现象<sup>[2]</sup>,特别是交互式可视化的设计方面尤为欠缺.扫描统计法是空间统计学的重要方法之一,众多学者对其进行了相关研究<sup>[3-11]</sup>.这些研究得到的犯罪集聚热点空间范围广,时间跨度大,对犯罪预防的指导意义不大.本文选取更小的时间、空间尺度,针对目前犯罪时空数据挖掘方法与犯罪时空数据交互式可视分析的不足<sup>[12]</sup>,应用时空重排扫描统计方法探测犯罪的时空集聚特性.

**收稿日期:** 2015-09-09

**通信作者:** 吴升(1972-),男,教授,博士,主要从事时空数据分析与可视化、数字区域与智慧城市、应急信息系统的研究. E-mail: ws0110@163.com.

**基金项目:** 国家“863”重大科技项目(2012AA12A208)

## 1 方法原理

运用时空重排扫描统计法探测案事件的集聚区域. 利用一个圆柱体扫描窗口, 其底面中心对应于探测的地理区域中的一点, 高则对应于相应的时间区间. 底面半径逐渐增大, 使扫描的空间区域不断扩大, 直至设定的最大半径. 同时, 圆柱体的高度也逐渐增加, 每次增加一个规定的时间单位, 直至预设的上限为止. 扫描窗口的变化过程在整个研究区域内重复进行, 最终将生成数量庞大的扫描窗口. 采用广义似然比(GLR)判断每个扫描窗口内的案事件数量是否异常, 其值反映该窗口为集聚的可能性, 具有最大函数值的窗口即最有可能是集聚的<sup>[13]</sup>. 然后, 利用蒙特卡罗假设检验方法对得到的候选集聚区域进行非随机性的置信度分析, 最终得到合理的犯罪集聚区<sup>[8]</sup>. 具体的建模过程<sup>[14]</sup>如下所示.

某一研究区  $z$  在  $d$  天中的案件数为  $C_{z,d}$ , 则所有区域在所有时间范围内的总案件量  $C$  为

$$C = \sum_z \sum_d C_{z,d}. \quad (1)$$

每个单位区域每天的预期案件量  $\mu_{z,d}$  为

$$\mu_{z,d} = \frac{1}{C} (\sum_z C_{z,d}) (\sum_d C_{z,d}). \quad (2)$$

式(2)中:  $\sum_z C_{z,d}$  为  $d$  天中整个研究区的案件量;  $\sum_d C_{z,d}$  为区域  $z$  中整个时间范围内的案件量.

则圆柱体扫描窗口  $A$  内的预期案件量为

$$\mu_A = \sum_{(z,d) \in A} \mu_{z,d}. \quad (3)$$

令  $C_A$  为圆柱体窗口  $A$  中的实际案件量,  $C_A$  服从均数为  $\mu_A$  的超几何分布, 其概率函数为

$$P(C_A) = \frac{\binom{\sum_{z \in A} C_{z,d}}{C_A} \binom{C - \sum_{z \in A} C_{z,d}}{C - C_A}}{\binom{C}{\sum_{z \in A} C_{z,d}}}. \quad (4)$$

当  $\sum_{z \in A} C_{z,d}$  和  $\sum_{d \in A} C_{z,d}$  相对于  $C$  而言非常小时,  $C_A$  近似服从均值为  $\mu_A$  的泊松分布. 基于此, 可采用泊松广义似然函数判定圆柱体窗口  $A$  中的案件量是否为集聚, GLR 的表达式为

$$\text{GLR} = \left\{ \frac{C_A}{\mu_A} \right\}^{C_A} \left\{ \frac{C - C_A}{C - \mu_A} \right\}^{C - C_A}. \quad (4)$$

广义似然函数值反映窗口为集聚的可能性. 因此, 在所有的候选集聚窗口里, 最大的窗口最不可能是随机发生的, 最有可能是有效集聚的. 通过计算扫描统计量能够得出大量的可能为集聚的窗口, 但为了验证探测到的集聚窗口的非随机性, 还需要对这些区域进行置信度分析. 扫描窗口统计量的无效假设为: 案件量在时间和空间上的分布完全随机. 要得到扫描窗口统计量的概率分布极为困难, 即使对一维的时间扫描统计量而言, 其概率分布也十分复杂.

因此, 通常情况下, 可运用蒙特卡罗假设检验方法进行  $P$  值的计算. 首先, 根据总的案件数生成  $N$  个随机分布的数据集, 每个数据集都能够得出各自最大的似然函数值, 再将真实数据集中窗口的 GLR 与  $N$  个随机生成的数据集的  $N$  个最大似然函数值进行由小到大的排序. 若真实数据集某窗口的 GLR 排在第  $Q$  位, 则  $P$  值为  $Q/N + 1$ . 因此,  $Q$  的排序越靠前,  $P$  值越小, 说明集聚窗口属于随机的可能性越小. 例如, 利用蒙特卡罗方法生成 999 个随机分布数据集, 某窗口的广义似然比排在第 30 位, 则  $P = 30/999 + 1 = 0.003$ , 则该集聚窗口为随机的概率为 3%; 若排序为 10, 则随机的概率为 1%.

## 2 多时间尺度时空集聚可视分析方法

研究区域为福州市行政管辖区中的鼓楼区、仓山区、台江区全境, 以及晋安区与马尾区的部分街道(北纬  $25^{\circ}57' \sim 26^{\circ}24'$ , 东经  $119^{\circ}10' \sim 119^{\circ}39'$ ). 研究区域面积大约为  $408 \text{ km}^2$ , 常住人口大约为 276.3 万<sup>[13]</sup>. 数据为经过脱敏脱密处理后的 2014 年福州市案件数据.

### 2.1 日尺度犯罪时空

利用 SaTScan 9.3 软件对 2014 年福州各月案事件数据进行时空重排扫描统计分析. 扫描窗口的最

大空间上限为 300 m, 即底面半径最大为 300 m; 窗口的时间跨度为 1~15 d, 时间变化步长为 1 d; 蒙特卡罗法模拟次数为 999, 当  $P < 0.05$  时, 认为犯罪集聚. 以 1 月份盗窃案件为例, 时空重排扫描统计后的结果, 如表 1 所示. 表 1 中:  $r$  为半径;  $n$  为案件数.

表 1 1 月份盗窃电动车案件聚集区探测结果

Tab. 1 Detection results of stealing electric bikes clusters in January

序号	中心经纬度坐标/(°)	$r/m$	开始日期	结束日期	$n$	$P$
1	119.458 28, 25.993 40	114.3	2	2	3	0.027 2
2	119.304 13, 26.092 97	168.3	15	16	6	0.009 0
3	119.305 90, 26.096 02	236.0	22	22	4	0.028 2
4	119.355 92, 26.065 74	226.5	25	25	3	0.031 8
5	119.285 44, 26.067 16	220.1	26	29	4	0.022 0
6	119.285 27, 26.094 48	84.6	31	31	3	0.018 0

由表 1 可知: 通过蒙特卡罗方法计算得出的 6 个犯罪热点的  $P$  值为 0.009 0~0.031 8, 表明这些热点集聚区域为随机的概率是 0.90%~3.18%, 即集聚区属于随机的可能性非常小, 因此, 具有很高的非随机性, 是有意义的集聚区.

为了从多角度查看月尺度下各个犯罪热点的时空分布情况, 设计以下 3 种交互可视方式.

1) 按月查看犯罪热点空间分布. 如图 1 所示. 用户可以通过左上部分的“月份轴”或“上月”、“下月”箭头选择某一月份. 然后, 选取案件类别中的某一类案件(缺省为所有种类案件). 此时, 甘特图用空心矩形表示不同犯罪热点所在的日期段, 右侧地图用空心圆形表示该月所有犯罪热点的空间分布, 圆的大小代表了热点范围(扫描半径).

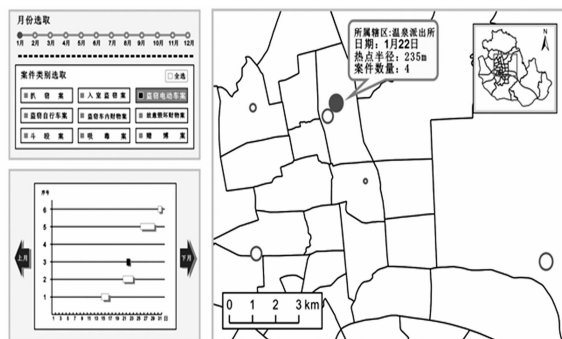


图 1 1 月份盗窃电动车案件聚集区可视分析  
Fig. 1 Visual analysis of stealing electric bikes clusters in January

用户可以在甘特图上选取该月的某个日期段, 右侧地图以灰色圆形显示所选日期对应的热点位置; 或者在右侧地图上选择某个热点, 可查看该热点的所属辖区、日期、热点半径、案事件数量等详细信息, 左侧甘特图上将用灰色矩形显示该热点发生的日期段.

2) 按月日期段查看犯罪热点空间分布, 如图 2 所示. 用户可以通过左上部分的“月日期轴”选取日期段(如 6~8 日), 然后, 选取案件类别中的某一类案件(缺省为所有种类案件).

此时, 年历图上所有 6~8 日出现犯罪热点的都用矩形框加以强调. 右侧地图用空心圆形表示当年所有 6~8 日出现犯罪热点的空间分布. 用户也可在地图上选取某一热点查看该热点详情, 年历图将以灰底矩形框着重显示该热点对应的月日期段.

3) 按周日期段查看犯罪热点空间分布, 如图 3 所示. 用户可以通过左上部分的“周日期轴”选取一定日期段(如周一), 也可选取案件类别中的某一类案件(缺省为所有种类案件).

此时, 年历图上当年在周一出现赌博犯罪热点的日期用矩形框加以强调, 右侧地图用空心圆形表示当年在周一出现犯罪热点的空间分布. 用户也可在地图上选取某一热点查看该热点详情, 年历图将以灰底矩形框着重显示该热点对应的周日期段.

## 2.2 小时尺度犯罪时空

利用 SaTScan 9.3 软件对 2014 年福州案事件数据按“小时”进行时空重排扫描统计分析. 半径上限为 300 m, 时间跨度为 1~3 h, 时间变化步长为 1 h; 蒙特卡罗法模拟次数为 999, 当  $P < 0.05$  时, 认为犯罪集聚. 以周六案事件数据为例, 时空重排扫描统计后的结果, 如表 2 所示.

由表 2 可知: 8 个犯罪热点的  $P$  值为 0.013 0~0.049 9, 表明了这些热点集聚区域为随机的概率是 1.30%~4.99%, 属于随机的可能性很小, 具有较高的非随机性.

在时段热点的可视化设计方面, 可以通过时钟图直观地反映热点的案发时段, 如图 4 所示. 将圆分

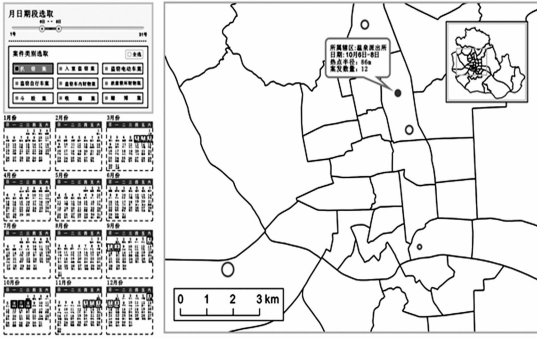


图2 6~8日扒窃案件聚集区可视分析  
Fig.2 Visual analysis of pickpocket clusters on 6 to 8

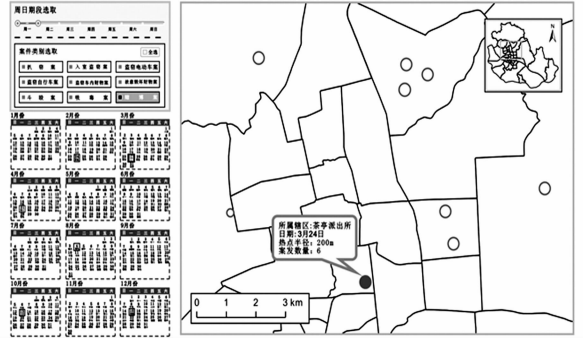


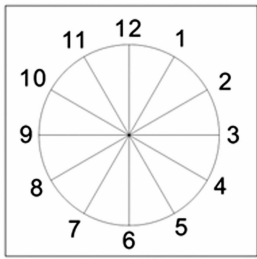
图3 周一赌博案件聚集区可视分析  
Fig.3 Visual analysis of gambling clusters on Monday

为12个区域,如图4(a)所示.图4(b),(c)中:灰色区域表示热点时段;圆环内部的“AM”表示午前0~12时,“PM”表示午后12~0时.由图4(b),(c)可知:午前犯罪热点出现在9~10时;午后犯罪热点出现在7~8时.

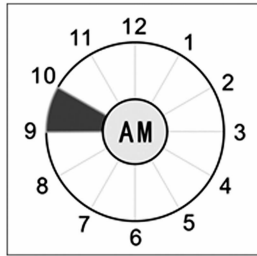
表2 周六入室盗窃案件聚集区探测结果

Tab.2 Detection results of burglary clusters on Saturday

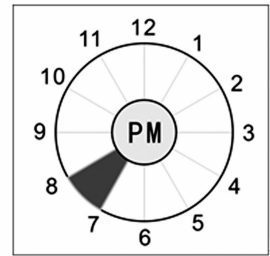
序号	中心经纬度坐标/(°)	r/m	开始时间	结束时间	n	P
1	119.288 92,26.061 87	126.8	0:00	0:59	2	0.013 0
2	119.305 51,26.060 88	220.1	2:00	3:00	2	0.024 0
3	119.277 99,26.077 98	102.9	4:00	4:59	2	0.026 5
4	119.293 38,26.038 51	65.3	11:00	11:59	2	0.049 3
5	119.309 91,26.110 10	253.2	15:00	16:00	4	0.027 9
6	119.326 91,26.034 65	142.2	20:00	20:59	3	0.030 7
7	119.302 24,26.064 45	77.9	22:00	22:59	2	0.039 7
8	119.264 08,26.109 07	55.3	23:00	23:59	2	0.049 9



(a) 时段热点划分



(b) 午前热点时段



(c) 午后热点时段

图4 时段热点可视化设计

Fig.4 Visual design of time periods hotspot

为了方便用户从多个角度对小时尺度的犯罪热点进行时空分析,设计按周日期查看犯罪热点空间分布,如图5所示.

由图5可知:用户可通过左上部分的“时钟图”设置某一时段范围(如15~16时),可选取某一周日期(缺省为所有周日期)或是将选项卡切换到节假日,选取某一节假日,再选取某一案件类别(缺省为所有种类案件),右侧地图用空心圆形表示当年在周六15~16时出现犯罪热点的空间分布.用户也可选取地图上的某一点查看详情.

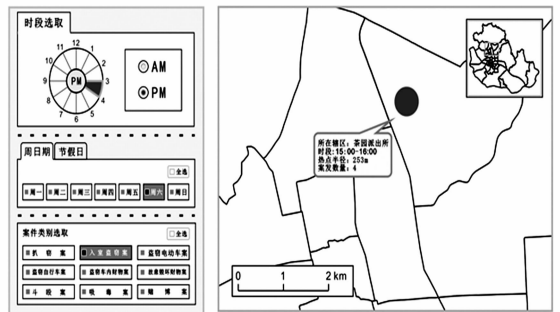


图5 周六15~16时入室盗窃案件聚集区可视分析  
Fig.5 Visual analysis of burglary clusters from 15 to 16 pm on Saturday

### 3 结束语

基于时空数据挖掘理论、信息可视化技术,运用时空重排扫描统计方法,对福州市主城区2014年案事件进行时空聚集性分析.对案事件数据分别进行日尺度及小时尺度的时空重排扫描统计,将得到的分析结果运用信息可视技术对犯罪聚集区进行表达.通过对数据挖掘的结果进行多尺度、多视角的交互可视化设计,方便用户对犯罪热点进行多角度的查看分析,为公安部门科学决策提供技术支持.下一步将研究犯罪的预测,将研究区域格网化,分析各种场景(如商场、医院、KTV、网吧等)对犯罪的影响并结合有效的预测模型,对各个网格犯罪的案发概率进行计算,为公安部门进一步细化警力配置提供依据.

#### 参考文献:

- [1] 程春惠.公安犯罪案件文本挖掘关键技术研究[D].杭州:浙江大学,2010:1-2.
- [2] 李代超,吴升.面向不同主题的犯罪大数据可视分析[J].地球信息科学学报,2014(5):735-745.
- [3] NAUS J I. The distribution of the size of the maximum cluster of points on a line[J]. Journal of the American Statistical Association,1965,60(310):532-538.
- [4] KULLDORFF M, HEFFERNAN R, HARTMAN J. A space time permutation scan statistic for disease outbreak detection[J]. Plos Medicine,2005,2(3):216-224.
- [5] NAKAYA T, YANO K. Visualising crime clusters in a space-time cube: An exploratory data-analysis approach using space-time kernel density estimation and scan statistics[J]. Transactions in GIS,2010,14(3):223-239.
- [6] LEITNER M, HELBICH M. The impact of hurricanes on crime: A spatio-temporal analysis in the city of Houston, Texas[J]. Cartography and Geographic Information Science,2011,38(2):213-221.
- [7] 王占宏.基于扫描统计方法的上海犯罪时空热点分析[D].上海:华东师范大学,2013:89-97.
- [8] ZEOLI A, PIZARRO J, GRADY S, et al. Homicide as Infectious disease: Using public health methods to investigate the diffusion of homicide[J]. Justice Quarterly,2014,31(3):609-632.
- [9] 王培安,罗卫华,白永平.基于空间自相关和时空扫描统计量的聚集比较分析[J].人文地理,2012(2):119-127.
- [10] 唐咸艳,李峤,黄秋兰,等.时空扫描统计量三维可视化的实现[J].中国卫生统计,2015(4):693-694.
- [11] 李小洲,王劲峰.空间扫描统计量方法中候选聚集区域生成的快速算法[J].地球信息科学学报,2013(4):505-511.
- [12] 福州市统计局.福州统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2012:22-23.
- [13] 殷菲.时-空扫描统计量在传染病早期预警中的应用研究[D].成都:四川大学,2007:20-21.
- [14] LEITNER M. Crime modeling and mapping using geospatial technologies[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013:320-436.
- [15] 周丽君,张兴裕,马越,等.前瞻性时空扫描统计量与时空重排扫描统计量在传染病聚集性探测中的适用性探讨[J].现代预防医学,2012(5):1068-1070.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.201605026



# 采用多目标差分进化的移动 Ad Hoc 网络节能路由算法

魏文红, 秦勇

(东莞理工学院 计算机学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 为了在节点的能量消耗和最优路由之间找到一个平衡,根据多目标差分进化算法原理,提出一种基于多目标差分进化的移动 Ad Hoc 网络节能路由算法.该算法把路由代价和网络生存时间作为 2 个优化目标,采用适应值变换的约束处理技术、非支配排序和拥挤距离技术进行优化.在优化过程中,提出适合差分进化算法的变异、交叉和选择策略.结果表明:该算法在网络生存时间和最优路由方面具有较好的优势,并保证了较高的包传递率.

**关键词:** 多目标; 差分进化; 移动 Ad Hoc; 路由; 生存时间

**中图分类号:** TP 393      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)05-0654-05

## Energy Efficient Routing Optimization Algorithm for MANET Based Multi-Objective Differential Evolution

WEI Wenhong, QIN Yong

(School of Computer, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** To find a balance between energy consumption and optimal routing, according to the principle of multi-objective differential evolution algorithm, an energy efficient routing algorithm for MANET based on multi-objective differential evolution. In this algorithm, the shortest routing paths and network lifetime are considered as two objectives, and the fitness transformation, non-dominated sorting and crowding distance technologies are adopted to optimize the above objectives. In the optimization process, the modified mutation, crossover and selection operations in differential evolution are proposed for. Compared with other routing optimization algorithms, this algorithm can achieve better result between network lifetime and optimal routing, and provide higher packet transmission.

**Keywords:** multi-objective; differential evolution; mobile Ad Hoc; routing; lifetime

移动 Ad Hoc 网络是一种多跳的、自组织的网络,每个节点既是主机,又是路由器,节点之间的通信通过无线信号覆盖的多跳路由进行.如果对方节点不在自己的信号覆盖范围内,则可借助其他节点进行转发.移动 Ad Hoc 网络由于搭建容易,被广泛应用于各种领域.在移动 Ad Hoc 网络中,根据路由表协议的驱动方式,可以将路由协议分为表驱动路由协议和按需启动路由选择协议<sup>[1-4]</sup>.按需启动路由在有节点需要发送信息时,才进行路由发现过程,鉴于移动 Ad Hoc 网络动态的网络拓扑结构,按需路由选

**收稿日期:** 2016-02-03

**通信作者:** 魏文红(1977-),男,副教授,博士,主要从事网络与并行分布计算、智能优化处理的研究. E-mail: weiwh@dgut.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61103037, 61300198); 广东省自然科学基金资助项目(S2013010011858); 广东省高校科技创新项目(2013KJ CX0178)

择比表驱动路由选择具有更大的优势. 许多学者对各类移动 Ad Hoc 网络路由协议, 特别是基于蚁群算法的移动 Ad Hoc 网络路由协议进行了广泛地研究<sup>[4-10]</sup>. 近年来, 基于遗传算法和粒子群算法的移动 Ad Hoc 网络的路由算法也受到关注<sup>[11-13]</sup>, 但利用差分进化算法研究移动 Ad Hoc 网络的节能路由算法却未见报导. 本文基于差分进化算法, 利用多目标求解技术, 同时考虑节点能量消耗的约束, 提出基于多目标差分进化的节能路由算法(MOR-DE).

## 1 问题模型

移动 Ad Hoc 网络模型都可以用一个加权无向图  $G=(V, E)$  表示. 其中,  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_p\}$  表示网络中的节点集;  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_q\}$  表示网络中的链路集. 此外, 采用权值向量  $w$  表示链路间的代价、时延和带宽等.

假设  $s \in V$  为路由的源节点,  $d \in \{V-s\}$  为路由的目标节点,  $|V|$  为节点总数,  $|E|$  为链路总数,  $\mathbf{R}^+$  为正实数集合, 则某一条链路  $e$  上路由代价、时延和带宽函数分别为

$$\text{Cost}(e); E \rightarrow \mathbf{R}^+, \quad \text{Delay}(e); E \rightarrow \mathbf{R}^+, \quad \text{Bandwidth}(e); E \rightarrow \mathbf{R}^+.$$

在路由过程中, 假定  $p(s, d)$  表示源节点  $s$  到目标节点  $d$  的路径, 则整个网络的路由代价函数、时延和带宽函数为

$$\text{Cost}(G) = \sum_{e \in E} \text{Cost}(e), \quad (1)$$

$$\text{Delay}(p(s, d)) = \sum_{e \in p(s, d)} \text{Delay}(e), \quad (2)$$

$$\text{Bandwidth}(p(s, d)) = \min(\text{Bandwidth}(e)), \quad e \in p(s, d). \quad (3)$$

再假设节点  $i$  的度为  $\text{Deg}_i$ ; 剩余能量为  $\text{Eny}_i$ ;  $\varphi_{i,j}$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的数据流;  $\theta_{i,j}$  表示节点  $i$  传输一个数据包到节点  $j$  所消耗的能量.

假定  $\varphi_{i,j}$  和  $\theta_{i,j}$  的值在所有的节点中都相等, 则节点  $i$  和  $j$  之间能量消耗为  $C_{i,j} = \varphi_{i,j} \times \theta_{i,j}$ . 因此, 整个网络的生存时间表示为

$$\text{Tot\_life}(G) = \min_{i,j \in v} \left\{ \frac{\text{Eny}_i}{\sum_{j \in \text{Deg}_i} C_{i,j}} \right\}. \quad (4)$$

由式(4)可知: 节点的度越大, 节点的能量消耗也越大.

一般情况下, 在移动 Ad Hoc 网络中, 路由代价与网络生存时间是 2 个相互冲突的因素. 因此, 可以考虑把这 2 个因素建模为多目标优化问题, 同时, 把链路上的时延和宽带考虑成约束条件. 最终, 目标函数可表示为

$$\left. \begin{aligned} \text{Min: } f(G) &= \{ \text{Cost}(G), -\text{Tot\_life}(G) \}, \\ \text{s. t. } \text{Delay}(p(s, d)) &\leq \text{QD}, \\ \text{Bandwidth}(p(s, t)) &\geq \text{QB}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在约束条件中, 链路中最大的时延应该小于或等于时延阈值 QD, 最小带宽应该大于或等于某条链路中的最小带宽阈值 QB.

## 2 MOR-DE 算法

### 2.1 路径编码

在移动 Ad Hoc 网络中, 路由是从源节点到目的节点的路径组成. 每条路径可以表示 1 个种群个体, 则所有的路径集即可表示差分进化算法中的一个种群. 由于路由中路径的长度未必都是相等的, 而种群个体的维度却是相同的, 所以对于路径长度小于个体维度情况, 可以采用后面补“0”的方式使路径长度等于个体的维度.

### 2.2 算法描述

MOR-DE 算法采用约束处理技术、非支配排序、拥挤距离和路径编码, 基于多目标差分进化算法原理实现.

1) 种群初始化. 对于移动 Ad Hoc 网络模型  $G$ , 随机生产 NP 条源节点  $s$  到目标节点  $d$  的路径, 采用路径编码方法对这 NP 条路径进行编码, 即产生了具有 NP 个个体的初始种群.

2) 变异策略. 差分进化算法中的变异操作是采用差分向量来产生一个变异个体, 以  $\text{rand}/1$  为例介绍变异过程. 首先, 从种群任意选择 3 个个体  $x_1, x_2$  和  $x_3$ , 对于  $x_3$ , 以概率  $p$  随机地选择 1 个中间节点, 如  $s_j$ . 然后, 沿着  $x_2$ , 从目标节点向源节点方向, 查找相同的节点  $s_j$ . 如果节点  $s_j$  被找到, 则把  $x_3$  中从  $s_j$  到  $d$  的这段路径与  $x_2$  中从  $s_j$  到  $d$  的这段路径交换; 如果没有找到相同的节点  $s_j$ , 则一直重复该过程, 直到找到为止. 经过该操作之后,  $x_2$  和  $x_3$  就变成 2 条新的路径. 同理, 对于  $x_2$ , 以概率  $p$  随机地选择一个中间节点, 如  $s_i$ . 然后, 沿着  $x_1$ , 从目标节点向源节点方向, 查找相同的节点  $s_i$ . 如果节点  $s_i$  被找到, 则把  $x_2$  中从  $s_i$  到  $d$  的这段路径与  $x_1$  中从  $s_i$  到  $d$  的这段路径交换; 如果没有找到相同的节点  $s_i$ , 则一直重复该过程, 直到找到为止. 经过上述 2 个操作之后,  $x_1, x_2$  和  $x_3$  就变成 3 条新的路径, 变异操作完成. 当所有的路径不等长时, 变异策略同样适用.

3) 交叉策略. 对于交叉策略, 以概率 CR 从种群中选择 2 个个体  $x_1$  和  $x_2$ , 在  $x_1$  和  $x_2$  中随机地选择 2 个节点  $s_i$  和  $s_j$  作为交叉的起始端点. 然后, 交换从节点  $s_i$  和节点  $s_j$  之间的路径. 如果在  $x_1$  和  $x_2$  中没有发现相同的节点  $s_i$  和  $s_j$ , 则选择过程就一直持续, 直到发现为止.

4) 选择策略. 采用约束处理技术计算父代和子代个体的目标函数值. 当子代个体支配父代个体, 则用子代个体替换父代个体; 如果父代个体支配子代个体, 则丢弃子代个体; 如果父代个体与子代个体之间是非支配的关系, 则父代个体和子代个体同时存档.

综上所述, 算法的伪代码如下:

Algorithm 1: Pseudo code of MOR-DE algorithm

搜索网络模型  $G$  中从源节点  $s$  到目标节点  $d$  的路径集  $x_i (1 \leq i \leq \text{NP})$ ;

对路径集  $x_i$  进行编码; // 例如  $x_1 = ss_1^1, s_2^1, \dots, d, x_2 = ss_1^2, s_2^2, \dots, d$ .

生成初始种群  $P_0 = (x_1, x_2, \dots, x_{\text{NP}})$ ;

计算种群  $P_0$  的目标函数适应值和约束违反程度;

$t=0$ ; //  $t$  表示代数.

repeat

$t=t+1$ ;

$P_t = P_{t-1}$ ;

for 种群  $P_t$  中的每一个个体 do

    运用变异策略求出变异向量;

    运用交叉策略求出交叉向量;

    运用选择策略求出子代;

end

$P_t = P_{t+1}$ ;

计算种群  $P_t$  的目标函数适应值和约束违反程度;

采用非支配排序和拥挤距离排序技术从种群  $P_t$  中选择 NP 个个体组成新的种群  $P_t$ ;

until  $t > G_{\max}$ ; //  $G_{\max}$  表示最大的代数.

输出: 种群  $P_t$ .

原始差分进化算法的时间复杂度为  $O(G_{\max} \cdot \text{NP} \cdot n)$ . 其中,  $G_{\max}$  为最大的代数. 非支配排序的时间复杂度为  $O(k \cdot \text{NP}^2)$ . 其中,  $k$  为目标数. 文中,  $k=2$ .

由于拥挤距离排序的时间复杂度  $O(k \cdot \text{NP} \cdot \log \text{NP})$ , 故 MOR-DE 的时间复杂度为  $O(G_{\max} (\text{NP} \cdot n + 2 \cdot \text{NP}^2 + \text{NP} \cdot \log \text{NP}))$ , 即  $O(G_{\max} \cdot \text{NP}^2)$ .

### 3 实验结果分析

为了验证 MOR-DE 算法的有效性, 将 MOR-DE 算法与 SAMP-DSR<sup>[7]</sup>, QAMR<sup>[9]</sup>, ACECR<sup>[10]</sup> 算法



进行实验比较. 实验环境为 Matlab 2013b 仿真平台, Intel Core Quad CPU 2.83 GHz, 4.00 GB 内存. 采用 Waxman's 随机生产器构建 1 个随机的移动 Ad Hoc 网络结构模型.

### 3.1 参数设置

参数设置如下: 1) 网络规模  $N=10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100$ ; 2) 链路代价  $C=\text{rand}(2, 10)$ ; 3) 链路时延  $D=2/3 \times C$  ms; 4) 链路带宽  $B=\text{rand}(50, 200)$  Kbit  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; 5) 节点能量  $E=40$  min; 6) 链路最大时延  $QD=\text{rand}(60, 80)$  ms; 7) 链路最小带宽  $QB=\text{rand}(100, 150)$  Kbit  $\cdot$  s<sup>-1</sup>.

### 3.2 结果分析

由于多目标算法求解的结果 1 个满足所有目标的折中解集, 所以 MOR-DE 算法与单目标算法 SAMP-DSR, QAMR 和 ACECR 等在比较过程中, 选取了 MOR-DE 算法解集中的边界结果与其进行比较. 如果 MOR-DE 算法解集中的边界结果都优于那些单目标算法的解, 那么 MOR-DE 算法的其他解必定更优于其他算法.

MOR-DE 算法与 SAMP-DSR, QAMR, ACECR 算法在路由代价和网络生存时间方面的比较结果, 如表 1 所示. 表 1 中:  $t$  为生存时间.

由表 1 可知: 当网络节点数大于 40 时, MOR-DE 算法获得所有更优的解; 当网络节点数小于 30 时, MOR-DE 获得与 QAMR 和 ACECR 算法非支配的解.

表 1 算法获取的最优解比较

Tab. 1 Comparison of optimal solutions obtained by algorithms

网络规模	MOR-DE		SAMP-DSR		QAMR		ACECR	
	路由代价	$t/s$	路由代价	$t/s$	路由代价	$t/s$	路由代价	$t/s$
10	52.120	25.351	52.721	23.561	52.835	23.912	51.364	25.142
20	55.305	20.422	56.153	18.965	56.414	16.905	55.635	20.326
30	61.859	16.042	62.968	14.128	63.689	12.911	62.489	16.301
40	69.254	13.263	72.843	11.825	74.695	9.737	71.061	12.935
50	81.396	11.052	85.285	9.525	85.997	8.008	83.089	10.660
60	95.559	9.215	99.254	7.365	100.879	5.965	98.298	8.354
70	110.335	7.954	115.098	6.015	117.038	4.693	114.222	7.254
80	128.088	6.846	133.652	4.811	136.462	3.459	131.522	6.343
90	146.336	6.137	150.458	3.952	156.710	2.897	148.558	5.552
100	166.792	5.706	171.079	3.501	180.336	2.468	169.406	5.004

对 MOR-DE, SAMP-DSR, QAMR, ACECR 等 4 种算法进行 Friedman 测试及 Wilcoxon 符号秩检验测试<sup>[14]</sup>, 测试结果如表 2, 3 所示.

由表 2 可知: 无论是对于路由代价目标, 还是网络生存时间目标, MOR-DE 的排名都处于第一的位置.

由表 3 可知: MOR-DE 获得的  $R^+$  值明显比  $R^-$  值要大, 这说明 MOR-DE 算法明显优于 SAMP-DSR, QAMR 和 ACECR 算法.

为了验证算法的收敛性, 对 4 种算法的收敛性进行测试, 其收敛图(网络节点为 40), 如图 1 所示. 图 1 中:  $n_1$  为代数. 由图 1 可知: MOR-DE 算法的收敛速度是最快的, 说明 MOR-DE 算法在收敛性方面明显优于其他 3 种算法.

4 种算法的包递率( $\eta$ ), 如图 2 所示. 由图 2 可知: 当网络节点数( $n_2$ )较小时, 4 种算法的包递率相差不明显, 但随着网络节点数的慢慢增大, MOR-DE 算法的优势越加明显.

表 2 Friedman 测试结果

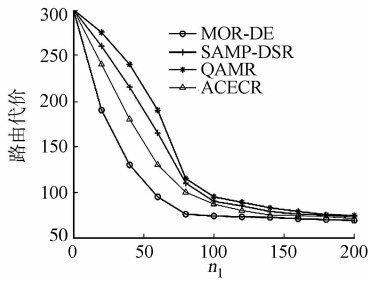
Tab. 2 Test result of Friedman

目标	算法			
	MOR-DE	SAMP-DSR	QAMR	ACECR
路由代价	1.1	3.0	4.0	1.9
$t/s$	1.1	3.1	3.9	1.9

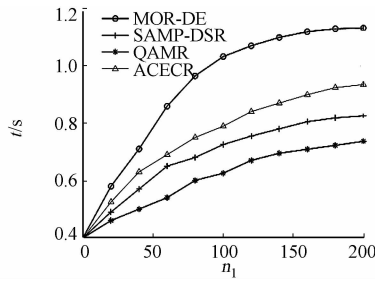
表 3 Wilcoxon 符号秩检验测试结果

Tab. 3 Test result of Wilcoxon signed-rank

算法	目标	$R^+$	$R^-$
MOR-DE-to-SAMP-DSR	路由代价	55.0	0
	$t/s$	55.0	0
MOR-DE-to-QAMR	路由代价	55.0	0
	$t/s$	55.0	0
MOR-DE-to-ACECR	路由代价	52.0	3.0
	$t/s$	52.0	3.0



(a) 路由代价



(b) 网络生存时间

图1 4种算法的收敛图

Fig. 1 Convergence graph of four algorithms

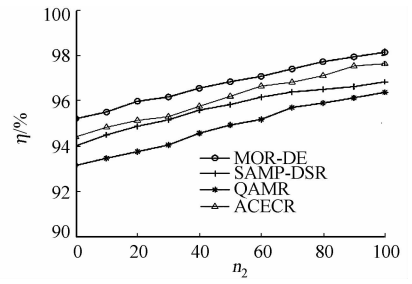


图2 4种算法的包传递率

Fig. 2 Packet transmission ratio of four algorithms

## 4 结束语

提出一种基于多目标差分进化算法的移动 Ad Hoc 网络节能路由算法 MOR-DE, 修改了差分进化算法的变异、交叉和选择策略, 使算法能够适应问题模型. 与 SAMP-DSR, QAMR, ACECR 算法进行比较, MOR-DE 算法在路由代价和网络生存时间方面取得一个较好的平衡, 且具有较高的包传递率.

### 参考文献:

- [1] MURTHY J J, GARCIA L A. A routing protocol for packet radio networks[C]// 1st Annual ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York: ACM Press, 1995: 86-95.
- [2] JOHNSON D B, MALTZ A D, BROCH J. The dynamic source routing protocol for multi-hop wireless Ad Hoc networks[M]. New York: ACM Press, 2001: 139-172.
- [3] PERKINS C E, ROYER E M. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing[C]// 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. Piscataway: IEEE Press, 1999: 90-100.
- [4] SHOKRANI H, SAM J. A survey of ant-based routing algorithms for mobile Ad-Hoc networks[C]// The International Conference on Signal Processing Systems. Piscataway: IEEE Press, 2009: 323-329.
- [5] WANG Jianping, OSAGIE E, THULASIRAMAN P, et al. A hybrid ant colony optimization routing algorithm for mobile Ad Hoc network[J]. Ad Hoc Networks, 2009, 7(4): 690-705.
- [6] 周少琼, 徐祎, 姜丽, 等. 蚁群优化算法在 Ad Hoc 网络路由中的应用[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 332-334.
- [7] KHOSROSHAHI-ASL E, MAJID N, ATIEH S P. A dynamic ant colony based routing algorithm for mobile Ad-Hoc networks[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2011, 27(5): 1581-1596.
- [8] CHATTERJEE S, SWAGATAM D. Ant colony optimization based enhanced dynamic source routing algorithm for mobile Ad-Hoc network[J]. Information Sciences, 2015, 295: 67-90.
- [9] KRISHNA P V, SARITHA V, VEDHA G, et al. Quality-of-service-enabled ant colony-based multipath routing for mobile Ad Hoc networks[J]. IET Communications, 2012, 6(1): 76-83.
- [10] ZHOU Jipeng, WANG Xuefeng, TAN Haisheng, et al. Ant colony-based energy control routing protocol for mobile Ad Hoc networks[C]// Wireless Algorithms, Systems, and Applications. Berlin: Springer, 2015: 845-853.
- [11] 詹思瑜, 李建平. 基于遗传算法的 Ad Hoc 路由协议优化[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(1): 24-27.
- [12] 朱晓建, 沈军. 基于粒子群优化的 Ad Hoc 网络最小能耗多播路由算法[J]. 通信学报, 2012, 33(3): 52-58.
- [13] DEEPALAKSHMI P, SHANMUGASUNDARAM R. An ant colony-based multi objective quality of service routing for mobile Ad Hoc networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2011, 2011(1): 1-12.
- [14] DERRAC J, GARCLA S, MOLINA D, et al. A practical tutorial on the use of nonparametric statistical tests as a methodology for comparing evolutionary and swarm intelligence algorithms[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2011, 1(1): 3-18.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

# 《华侨大学学报(自然科学版)》征稿简则

《华侨大学学报(自然科学版)》是华侨大学主办的,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术刊物.本刊坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其是华侨大学等高等学府在基础研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务.本刊主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、数学和管理工程等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容.

## 1 投稿约定

- 1.1 作者应保证文稿为首发稿及文稿的合法性;署名作者对文稿均应有实质性贡献,署名正确,顺序无争议;文稿中所有事实均应是真实的和准确的,引用他人成果时,应作必要的标注;不违反与其他出版机构的版权协议及与其他合作机构的保密协议;无抄袭、剽窃等侵权行为,数据伪造及一稿两投等不良行为.如由上述情况而造成的经济损失和社会负面影响,由作者本人负全部责任.
- 1.2 自投稿日期起2个月之内,作者不得另投他刊.2个月之后,作者若没有收到反馈意见,可与编辑部联系.无论何种原因,要求撤回所投稿件,或者变更作者署名及顺序,需由第一作者以书面形式通知编辑部并经编辑部同意.
- 1.3 作者同意将该文稿的发表权,汇编权,纸型版、网络版及其他电子版的发行权、传播权和复制权交本刊独家使用,并同意由编辑部统一纳入相关的信息服务系统.
- 1.4 来稿一经刊用,作者须按规定交纳版面费,同时编辑部按篇一次性付给稿酬并赠送该期刊物.本刊被国内外多家著名文摘期刊和数据库列为收录来源,对此特别声明不另收费用,也不再付给稿酬.
- 1.5 其他未尽事宜,按照《中华人民共和国著作权法》和有关的法律法规处理.

## 2 来稿要求和注意事项

- 2.1 来稿务必具有科学性、先进性,论点鲜明、重点突出、逻辑严密、层次分明、文字精练、数据可靠.
- 2.2 论文题名字数一般不超过18字,必要时可加副题.文中各级层次标题要简短明确,一般不超过15字,且同一层次的标题应尽可能“排比”.
- 2.3 署名作者应对选题、研究、撰稿等作出主要贡献并能文责自负,一般以不超过3名为宜.作者单位应标明单位、所在城市、省份及邮政编码.
- 2.4 摘要应包括研究的目的、使用的方法、获得的结果和引出的结论等,应写成独立性短文且不含图表和引用参考文献序号等.其篇幅一般以150~250字左右为宜,关键词以4~8个为宜.
- 2.5 量和单位符号等要符合国家标准和国际标准.
- 2.6 能用文字说明的问题,尽量不用图表;画成曲线图的数据,不宜再列表.图表应有中英文标题.
- 2.7 参考文献仅选最主要的,且已公开发表的,按规范的内容、顺序、标点书写列入,并按其在文中出现的先后次序进行编号和标注.参考文献不少于10篇,未公开发表的资料不引用.
- 2.8 英文摘要尽可能与中文摘要对应,包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词.用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论,并符合英文写作规范.
- 2.9 文稿首页地脚处依次注明收稿日期;通信作者为可联系作者的姓名、出生年、性别、职称、学历、研究方向、电子邮件地址;基金项目为课题资助背景及编号,可几项依次排列.
- 2.10 投稿请直接登陆学报网站([www.hdxb.hqu.edu.cn](http://www.hdxb.hqu.edu.cn))在线投稿.

- 《中文核心期刊要目总览》
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 中国科技论文在线优秀期刊
- ISTIC 中国科技核心期刊
- 全国优秀科技期刊
- 华东地区优秀期刊

本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- “STN 国际”数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国科技论文统计期刊源
- 中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 德国《数学文摘》(Zbl MATH)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘
- 中国物理文摘

华侨大学学报(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)

(NATURAL SCIENCE)

(双月刊, 1980年创刊)

(Bimonthly, Started in 1980)

第37卷第5期 (总第151期) 2016年9月20日

Vol. 37 No. 5 (Sum. 151) Sep. 20, 2016

主管单位: 福建省教育厅

**Competent Authority:** Department of Education of Fujian Province

主办单位: 华侨大学

**Sponsor:** Huaqiao University  
(Quanzhou 362021, Fujian, China)  
(Xiamen 361021, Fujian, China)

(中国福建泉州 362021)

(中国福建厦门 361021)

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

**Edited and Published by** Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science)

电话: 0595-22692545  
电子信箱: journal@hqu.edu.cn  
网址: www.hdxh.hqu.edu.cn

Tel: 0595-22692545

E-mail: journal@hqu.edu.cn

Http://www.hdxh.hqu.edu.cn

主 编: 乌 东 峰

**Editor in Chief:** WU Dongfeng

印 刷: 泉州晚报印刷厂

**Distributed by** China Publication Foreign Trading Corporation  
(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

国内发行: 福建省泉州市邮政局

订购处: 全国各地邮政局(所)

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

(北京 782 信箱, 邮政编码 100011)

刊 号: ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N

代 号: 国内邮发 34-41  
国外 NTZ 1050

ISSN 1000-5013

国内定价: 8.00 元/期  
48.00 元/年

