

- 中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

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

郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE

2017.5

第38卷 第5期
Vo1.38 No.5
2017年9月出版

ISSN 1671-6833



9 771671 683175

目 次

电气与控制工程

- 基于互信息和 Just-in-Time 优化的回声状态网络 张 衡, 王河山(1)
- 基于 Spark 的标准化 PCA 算法 董建华, 王国胤, 雍 熙, 史晓雨, 李庆亮(7)
- 基于局部特征的驾驶证自动识别系统 马 岭, 蒋慧琴, 刘玉敏(13)
- 非接触式红外测温灶具防干烧系统设计 李毅丰, 毛晓波, 杨怡航, 朱 枫(18)
- 基于发育网络的人脸朝向识别研究 王东署, 谭达佩, 韦晓琴(23)
- 多传感器信息融合在焊接质量控制中的应用 刘广瑞, 周文博, 田 欣, 郭珂甫(28)
- 基于谱聚类算法的城市充换电站分布决策 张忠会, 刘故帅, 熊剑峰, 刘小宛, 徐高超(32)
- 基于粒子群算法的烧结炉系统辨识及神经网络控制 曹 奔, 袁忠于, 刘 洪(39)

土木与交通工程

- 高速公路拓宽中桩类型优选与板桩适应性分析 李海滨, 柯胜旺, 申艳军(44)
- 钢纤维混凝土路面接缝传荷性能衰减规律的试验研究
..... 王建宁, 窦远明, 孙吉书, 魏 明, 翟玉玺(50)
- 钢桥面铺装层粘接强度超声波无损检测技术研究 吕彭民, 吴玉文, 宋年波(55)
- 大型预应力混凝土矩形渡槽槽身结构型式研究 陈玉英(61)
- 基于响应面法的车内噪声分析与优化 陆森林, 任栢翔(65)

其他

- 功能离子液体催化 CO_2 与环氧化合物的加成反应 吴晶敏, 李伟杰(71)
- 地温空调井群运行对地下水影响的实验与模型研究
..... 窦 明, 曹亚新, 米庆彬, 朱志刚, 付 博(76)
- 快递与第三方智能快递柜合作机制的演化博弈分析 李玉民, 杨 露, 王新露(81)
- 带批处理机的多阶段柔性流水车间调度优化 王君妍, 王薛苑, 轩 华(86)
- 飞碟游乐设备驱动轴疲劳失效分析 刘治华, 刘博见, 许伟超, 张银霞, 陶德岗(91)

CONTENTS

【Electrical and Control Engineering】

- Optimized Echo State Network on the Basis of Mutual Information and Just-in-Time ZHANG Heng, WANG Heshan (1)
- Normalized PCA Algorithm Based on Spark DONG Jianhua, WANG Guoyin, YONG Xi, SHI Xiaoyu, LI Qingliang (7)
- Automatic Recognition System of Driver's License Based on Local Features MA Ling, JIANG Huiqin, LIU Yumin (13)
- Design of a Cooker Anti-overheating System Based on Non-contact Infrared Temperature Measurement LI Yifeng, MAO Xiaobo, YANG Yihang, ZHU Feng (18)
- Study of Face Orientation Recognition Based on Development Network WANG Dongshu, TAN Dapei, WEI Xiaoqin (23)
- Multi-sensor Information Fusion Technology in the Measurement of Weld Penetration LIU Guangrui, ZHOU Wenbo, TIAN Xin, GUO Kefu (28)
- The Application of Spectral Clustering Algorithm to Distributive Decision for Charging and Battery Swap Station ZHANG Zhonghui, LIU Gushuai, XIONG Jianfeng, LIU Xiaowan, XU Gaochao (32)
- Sintering Furnace System Identification Based on Particle Swarm Algorithm and Neural Network Control CAO Ben, YUAN Zhongyu, LIU Hong (39)

【Civil and Transportation Engineering】

- Piles Kind Optimal and Sheet Pile Adaptability Analysis in Highway Extension Projects LI Haibin, KE Shengwang, SHEN Yanjun (44)
- Test Study on Attenuation Law of Joint Load Transfer Efficiency of Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement WANG Jianning, DOU Yuanming, SUN Jishu, WEI Ming, ZHAI Yuxi (50)
- Research on the Ultrasonic Non-destructive Test Technology of Bonding Strength for the Steel Bridge Deck Pavement Layer ... LYU Pengmin, WU Yuwen, SONG Nianbo (55)
- Research of Large-scale Prestressed Concrete Rectangular Aqueduct Body Structure Type CHEN Yuying (61)
- Analysis and Optimization of Vehicle Inner Noise Based on Response Surface Method LU Senlin, REN Zhixiang (65)

【Others】

- The Cycloaddition Reaction of CO₂ and Epoxy Compound Catalyzed by Hydroxyl and Carboxyl Functional Ionic Liquid WU Jingmin, LI Weijie (71)
- Experimental and Modeling Study on Influence of Ground Temperature Air-conditioning Well Group Operation to Groundwater Flow DOU Ming, CAO Yaxin, MI Qingbin, ZHU Zhigang, FU Bo (76)
- Evolutionary Game Analysis on Cooperation Mechanism of Express Enterprises and Third-party Smart Express Cabinet Enterprises LI Yumin, YANG Lu, WANG Xinlu (81)
- Multi-stage Flexible Flowshop Scheduling with Batching Machines WANG Junyan, WANG Xueyuan, XUAN Hua (86)
- Fatigue Failure Analysis of the Driving Shaft of Amusement Equipment LIU Zhihua, LIU Bojian, XU Weichao, ZHANG Yinxia, TAO Degang (91)

基于互信息和 Just-in-Time 优化的回声状态网络

张 衡, 王河山

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了提高回声状态网络(ESN)的适应性, 提出基于互信息(MI)和 Just-in-Time(JIT)的优化方法, 对 ESN 的输入伸缩参数以及输出层进行优化, 所得网络称为 MI-JIT-ESN. ESN 的优化方法分为两部分: 一是基于网络输入与输出之间的互信息, 对网络的多个输入伸缩参数进行调整; 二是基于 JIT 优化的局部输出层, 对 ESN 的隐层输出数据进行局部重新建模, 从而提升 ESN 输出层的回归拟合精度. 将 MI-JIT-ESN 应用于青霉素补料分批发酵过程建模. 结果显示, MI-JIT 优化方法能提高模型的适应性, 并优于其他比较方法.

关键词: 回声状态网络; 互信息; Just-in-Time; 优化; 建模; 青霉素发酵

中图分类号: TP183

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.018

0 引言

发酵过程广泛应用于化工、制药、食品、环境科学等行业, 补料分批发酵是发酵工业代表性的操作方法^[1]. 发酵过程机理复杂, 又具有极强的非线性、时变性以及非确定性, 同时缺少关键生物参数实时测量仪器. 发酵过程的优化与控制需要对营养物和产物等重要参数进行精确预测. 因此, 数据驱动的建模方法广泛地应用于补料分批发酵过程, 并取得了一定的成果. 常见的数据驱动方法包括偏最小二乘法^[2-3]、支持向量回归^[4-5]、神经网络等^[6-7]. 递归神经网络(RNN)能记忆历史信息并能体现出动态特性, 非常适用于发酵过程建模.

作为一种新型递归神经网络—回声状态网络(echo state network, ESN)^[8]利用“动态储备池”代替传统神经网络的隐层, 提取输入的相关特征并提供期望输出动态信息, 可以有效处理非线性系统辨识^[9]和混沌时间序列预测问题^[10]. ESN 储备池由大量的稀疏连接神经元组成, 通常有几十到几百个神经元, 连接权值随机产生. 与传统递归神经网络相比, ESN 最大的优势是只需训练输出权值, 简化了训练过程, 解决了前者训练算法过于复杂以及记忆渐消问题^[11], 因此, ESN 网络更适

用于对发酵过程中重要生物参数进行建模预测.

实际应用中, ESN 良好的适应性起了关键作用. 除了结合经验知识进行的尝试以及交叉验证法之外, 众多学者还提出大量的改进方法对储备池和输出权值进行优化. 对储备池的优化包括: 内部拓扑结构的改善^[12], 以及对储备池关键参数(包括规模、内部连接权矩阵谱半径、输入伸缩参数等)进行优化^[13]. 对输出权值的优化包括: 用智能算法^[14]计算权值, 以及对结构连接的调整等^[15], 这些方法一定程度上改善了网络性能. 为了提高 ESN 网络对多输入多输出(MIMO)系统的适应性, 笔者提出基于互信息(MI)和 Just-in-Time(JIT)学习的优化方法, 对 ESN 网络的输入伸缩参数以及网络输出层进行优化, 并将优化所得网络 MI-JIT-ESN 应用在青霉素补料分批发酵过程建模中.

1 回声状态网络

1.1 网络结构

ESN 的网络结构通常分为 3 层: 输入层、状态储备池以及输出层. 假设输入层和输出层神经元个数分别为 r 和 m , 储备层规模即神经元个数为 n . 笔者采用的 ESN 网络表达式为

$$x(k) = f(W^{\text{res}}x(k-1) + W^{\text{in}}u(k)); \quad (1)$$

$$y(k) = W^{\text{out}}x(k) + b, \quad (2)$$

收稿日期: 2016-12-25; 修订日期: 2017-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603343)

通信作者: 王河山(1987—), 男, 河南郑州人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事神经网络建模优化研究, E-mail: whs7713578@163.com.

式中: $x(k)$ 、 $u(k)$ 、 $y(k)$ 分别为 k 时刻储备池的状态变量、网络输入和网络输出; $f(\cdot)$ 为储备池激活函数, 通常为双曲正切函数; \mathbf{W}^{res} 是储备池的内部连接权值, 为随机产生的、稀疏连接的高维方阵(稀疏度通常在 0.01 ~ 0.05 之间, 谱半径小于 1), 一经产生则保持不变; \mathbf{W}^{in} 是输入权值矩阵, 随机产生而且保持不变; \mathbf{W}^{out} 和 \mathbf{b} 分别为输出权值矩阵和输出偏置向量。

1.2 网络训练

ESN 的训练过程可以转换为线性回归问题。依次输入 M 训练样本后, 从 M_0 步开始收集储备池状态以及对应的期望输出, 构成增广状态矩阵 \mathbf{S} 和期望输出矩阵 \mathbf{D} ,

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \tilde{x}(M_0) \\ \tilde{x}(M_0 + 1) \\ \cdots \\ \tilde{x}(M) \end{bmatrix},$$

其中: $\tilde{x}(k) = [x(k)^T \quad 1]^T$ 。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d(M_0)^T \\ d(M_0 + 1)^T \\ \cdots \\ d(M)^T \end{bmatrix}.$$

因此, 输出权值和偏置可由下式求得,

$$[\mathbf{W}^{\text{out}} \quad \mathbf{b}]^T = (\mathbf{S}^T \cdot \mathbf{S})^{-1} \cdot \mathbf{S}^T \cdot \mathbf{D}. \quad (3)$$

2 基于互信息和 JIT 优化的回声状态网络

2.1 互信息理论

互信息(mutual information) 是信息论里一种用来体现两个事件集合之间相关性的理论概念^[16]。给定两个随机变量 X 和 Y , 若它们各自的边缘概率分布和联合概率分布分别为 $p(x)$ 、 $p(y)$ 和 $p(x, y)$, 则它们之间的互信息 $I(X; Y)$ 定义为

$$I(X; Y) = \sum_x \sum_y p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)}. \quad (4)$$

笔者采用 Pockock 的互信息工具箱计算互信息, 其中将多维变量转化为一个联合随机变量, 更好地计算了两个事件集合之间的互信息^[17]。

2.2 Just-in-Time 学习

JIT 学习算法是目前很流行的一种在线过程监控建模方法, JIT 学习模型是根据当前需测量数据和历史训练数据的最近空间距离来建立多个局部模型的建模方法。JIT 学习模型可以更好地处理过程的非线性特性, 从而提升整个过程的测量和预测精度。

笔者对 ESN 的输出层进行 JIT 学习优化, 由于 ESN 的输出层维数较高(通常在 100 以上), 输出层进行回归拟合时, 处理的数据量很大, 通过 JIT 建立输出层的局部回归模型可以有效地提升 ESN 回归拟合时的精度。

2.3 MI-JIT-ESN 建模过程

将用于学习的数据归一化, 并分为 3 部分: 训练数据、验证数据和测试数据。

建立 MI-JIT-ESN 模型的主要步骤如下:

(1) 初始化 r 输入 m 输出的 ESN 网络。默认输入缩放参数均为 1, 储备池规模和谱半径可由经验法或试凑法确定。

(2) 基于互信息的输入伸缩参数优化。①计算输入与输出间互信息。依据训练数据中的输入数据与输出数据, 计算每一个输入变量与输出之间的互信息, 得到互信息 $I = [I_1 \quad I_2 \quad \cdots \quad I_r]$ 。令

$$\beta = [\beta_1 \quad \beta_2 \quad \cdots \quad \beta_r] = \frac{\alpha}{I_{\max}} \cdot I, \quad (5)$$

式中: α 为调整系数; I_{\max} 为最大互信息值。②对 β 进行调整。从 0.1 开始以 0.1 为间隔逐步增大 β , 直到验证误差增大, 即 ESN 网络对验证数据的处理能力下降为止, 所得到的缩放参数为 $\hat{\beta}$ 。③保存以 $\hat{\beta}$ 为输入缩放参数的新网络。

(3) 更新所得网络的状态。收集得到的增广状态矩阵 \mathbf{S} 可以表示为

$$\mathbf{S} = [s_1, s_2, \cdots, s_n, s_0]. \quad (6)$$

式中: s_0 为均是 1 的列向量, $s_l (l = 1, 2, \cdots, n)$ 为储备层第 l 个神经元的输出列向量。期望输出矩阵 \mathbf{D} 表示为

$$\mathbf{D} = [d_1, d_2, \cdots, d_m]. \quad (7)$$

式中: $d_j (j = 1, 2, \cdots, m)$ 为输出层第 j 个神经元的输出列向量。

(4) 在网络训练阶段得到 ESN 输出层的所有状态, 即训练数据库 $\mathbf{S}_{\text{train}}$, 然后针对每一组新的验证数据, 用距离测度方法在训练数据库 $\mathbf{S}_{\text{train}}$ 中选取和当前验证样本最近距离的子训练样本集, 子训练样本集的长度为 L , L 的值采用试凑法确定, 建立局部 ESN 输出回归模型。

(5) 对每个输出重复步骤(4), 得到最终的网络结构, 即 MI-JIT-ESN 模型。

3 应用

3.1 青霉素补料分批发酵过程

采用 MI-JIT-ESN 方法对青霉素补料分批发酵过程进行建模。本研究中, 过程数据来自基于内

核的 Pensim 发酵仿真平台^[18].

研究中,选用空气流量、搅拌功率、底物流加速率、底物温度、溶解氧浓度、排气二氧化碳浓度、培养体积、发酵罐中 pH 值、发酵罐中温度和产生的热量这 10 个可在线测量的变量作为输入变量,选用底物浓度、菌体浓度、青霉素产物浓度这 3 个无法在线测量的关键生物变量作为输出变量进行建模研究. 用 Pensim 平台生成 10 个批次的数据用来建立和优化模型,另外 5 个批次的数据用来评估模型的准确性和可靠性. 一个批次的反应时间为 400 h,采样时间为 0.5 h,所以每个批次有 800 个样本点. 同时,利用测试数据的均方根误差 (RMSE) 来判断所建模型的性能. 含有 N 个样本点的一个批次中,第 j 个输出变量

$$\text{RMSE}_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y_{aj}(k) - y_{pj}(k))^2}, \quad (8)$$

式中: $y_{aj}(k)$ 、 $y_{pj}(k)$ 分别为 k 时刻第 j 个输出的实际值和模型预测值.

3.2 青霉素发酵过程的 MI-JIT-ESN 模型

首先将默认状态下 10 个批次的学习数据分别归一化,其中 6 个批次数据用来训练,4 个批次作为验证数据. 建立 10 输入、3 输出、初始储备池规模为 500 的 ESN 网络结构,并初始化,内部连接权重矩阵谱半径定为 0.9.

(1) 伸缩参数的调整. 由输入与输出数据互信息可得到伸缩参数 $\hat{\beta}$, 基于 MI 信息的试凑法过程如图 1 所示. 可得这次选择 $\alpha = 0.6$, 此时 10 个输入伸缩参数为:

$$[\hat{\beta}_1 \ \hat{\beta}_2 \ \cdots \ \hat{\beta}_{10}] = [0.04 \ 0.02 \ 0.26 \ 0.02 \ 0.25 \ 0.60 \ 0.34 \ 0.15 \ 0.06 \ 0.38]. \quad (9)$$

JIT 局部回归模型的建立. 笔者的输出层训练数据长度为 4 800, 维度为 500 维,在不同的子样本训练集长度下,分别建立局部回归模型,并用验证集进行测试,测试结果如表 1 所示.

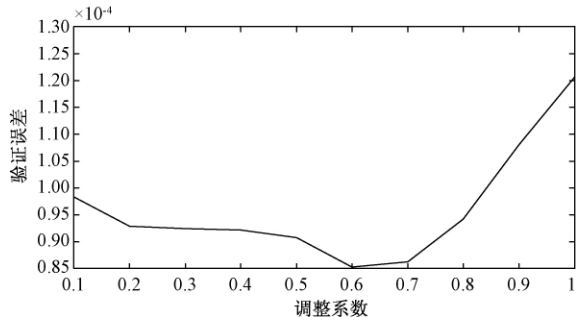


图 1 网络验证误差随调整系数 α 变化情况

Fig. 1 Network validation error with the change of adjustment factor α

表 1 MI-JIT-ESN 模型在不同子样本训练集长度下的测试结果

Tab. 1 The performance of MI-JIT-ESN models in different subsample length

L	基质浓度	生物量浓度	青霉素浓度
4 800	0.028 5	0.002 3	0.013 7
4 600	0.028 0	0.001 9	0.012 9
4 400	0.027 8	0.001 9	0.012 5
4 200	0.027 5	0.001 8	0.012 2
4 000	0.027 0	0.001 7	0.012 0
3 800	0.026 1	0.001 5	0.011 5
3 600	0.026 3	0.001 6	0.012 0
3 400	0.026 6	0.001 8	0.012 4
3 200	0.027 1	0.002 0	0.012 7
3 000	0.027 3	0.002 1	0.013 0

由表 1 可知,在子训练集样本长度为 3 800 时,验证数据的测试效果最好. 最终 L 取 3 800 建立局部回归模型,然后再对网络进行测试.

3.3 结果与对比

(1) 采用未参与建模优化过程的全新测试数据来检验所得 MI-JIT-ESN 模型的效果.

优化后的 MI-JIT-ESN 模型与未优化的 ESN 模型对 3 个关键生物量: 底物浓度、菌体浓度、青霉素浓度的一个批次内预测效果如图 2~4 所示. 可以看出 MI-JIT-ESN 模型很好地同时预测了青霉素补料分批发酵过程中的 3 个关键生物量. 为了更好地显示优化效果,图 5 展示了未优化 ESN 模型和 MI-JIT-ESN 模型对一个测试批次 3 个关键生物量的预测误差之间的对比. 表 2 为优化前后的模型对多个不同批次的测试 RMSE 值. 与未优化 ESN 模型相比,笔者所提出的 MI-JIT-ESN 模型大大提高了对青霉素发酵过程中生物量的预测效果.

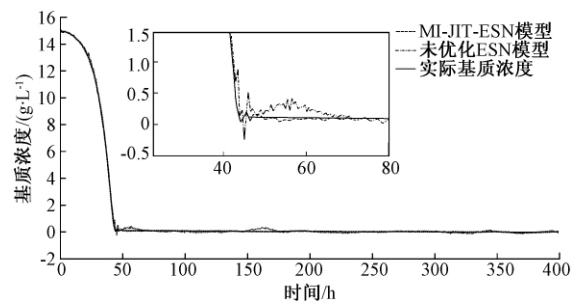


图 2 采用未优化 ESN 和 MI-JIT-ESN 方法对一个测试批次基质浓度的预测效果对比

Fig. 2 Trend plots of substrate concentration predictions at one testing batch using unoptimized ESN and MI-JIT-ESN methods

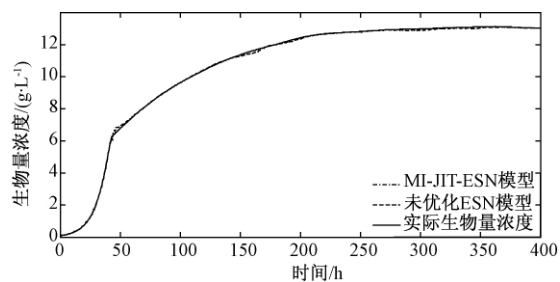


图3 采用未优化 ESN 和 MI-JIT-ESN 方法对一个测试批次生物量浓度的预测效果对比

Fig.3 Trend plots of biomass concentration predictions at one testing batch using unoptimized ESN and MI-JIT-ESN methods

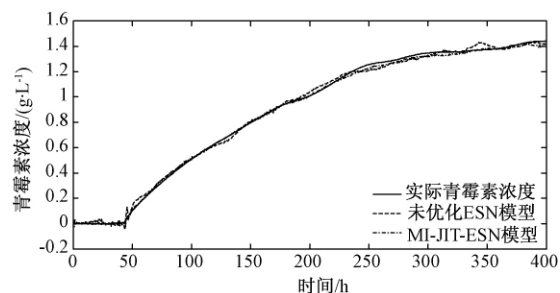


图4 采用未优化 ESN 和 MI-ESN 方法对一个测试批次青霉素浓度的预测效果对比

Fig.4 Trend plots of penicillin concentration predictions at one testing batch using unoptimized ESN and MI-JIT-ESN methods

(2) 在不同初始底物和菌体浓度条件下,青霉素发酵过程反应很不同.为进一步检验模型的性能,对低工况、中工况、高工况进行了仿真研究,具体设定条件如表3所示(其余条件采用默认值)。

表2 MI-JIT-ESN 模型与未优化 ESN 模型的测试 RMSE 值对比

Tab.2 Comparison of testing RMSE values using unoptimized ESN and MI-JIT-ESN methods

编号	基质浓度		生物量浓度		青霉素浓度	
	ESN	MI-JIT-ESN	ESN	MI-JIT-ESN	ESN	MI-JIT-ESN
1	0.152 7	0.040 9	0.053 1	0.001 9	0.026 0	0.010 2
2	0.087 6	0.017 5	0.049 5	0.001 3	0.014 9	0.009 8
3	0.091 3	0.021 4	0.056 4	0.001 8	0.022 7	0.013 3
4	0.114 6	0.021 1	0.054 7	0.001 1	0.020 4	0.010 4
5	0.172 2	0.030 8	0.080 0	0.001 7	0.021 1	0.015 7
平均值	0.123 9	0.026 3	0.058 8	0.001 6	0.021 0	0.011 9

将 MI-JIT-ESN 模型与传统递归神经网络 Elman 网络模型以及前向网络 BP 网络模型作对比, Elman 神经网络和 BP 神经网络的隐层神经元个数都选 15 个,训练算法都采用传统的 LM 算法.比较标准为 5 个测试批次的平均 RMSE 误差 MRMSE,如表4所示.表4所列结果为多次试验平均值,可以看出,大部分情况下,MI-JIT-ESN 模型优于

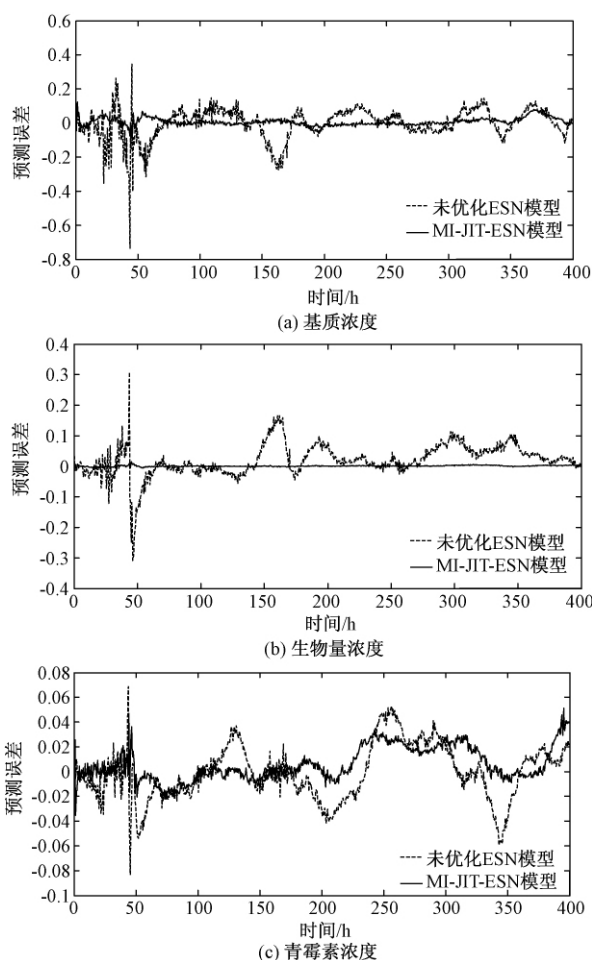


图5 采用未优化 ESN 和 MI-JIT-ESN 方法对一个测试批次 3 个关键生物量的预测误差对比

Fig.5 Prediction errors of three key biological variables at one testing batch using unoptimized ESN and MI-JIT-ESN methods

表3 不同工况的初始条件

Tab.3 The initial conditions of different working conditions

初始条件	基质浓度 / ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	生物量浓度 / ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	基质进给率 / ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)
低工况	4.5 ~ 5.5	0.004 ~ 0.005	0.035
中工况	14 ~ 16	0.09 ~ 0.12	0.045
高工况	23 ~ 27	0.18 ~ 0.22	0.070

传统神经网络模型,尤其在菌体浓度的预测和高工况即初始底物和菌体浓度较大的情况下。

表4 不同神经网络模型的测试 MRMSE 值对比
Tab.4 Comparison of testing MRMSE values using different neural network methods

初始条件	NN 模型	基质浓度	生物量浓度	青霉素浓度
低工况	MI-JIT-ESN	0.033 1	0.002 4	0.012 5
	Elman	0.020 2	0.032 5	0.012 7
	BP	0.047 7	0.660 1	0.089 3
中工况	MI-JIT-ESN	0.030 1	0.001 8	0.013 0
	Elman	0.043 9	0.064 4	0.015 4
	BP	1.229 7	0.771 8	0.110 7
高工况	MI-JIT-ESN	0.029 0	0.003 3	0.018 5
	Elman	0.070 1	0.069 9	0.021 3
	BP	2.104 0	1.112 6	0.156 2

为了验证 MI-JIT-ESN 模型的性能,笔者选取了一些最新文献中的青霉素发酵过程预测模型,例如: Relevance Vector Machine (RVM)^[19]、BI-SVR^[20]、核偏最小二乘法(KPLS)和 MGMM^[21],并与其作比较,比较结果如表5。

表5 正常工况下 MI-JIT-ESN 模型和不同青霉素发酵模型的测试 MRMSE 值对比
Tab.5 Comparison of MRMSE values of quality variable predictions using MI-JIT-ESN and other methods on normal conditions

方法	基质浓度	生物量浓度	青霉素浓度
RVM	—	0.192 7	0.042 8
KPLS	0.541 0	0.897 0	0.195 0
MGMM	0.073 0	0.092 0	0.038 0
BI-SVR	0.085 0	0.071 0	0.011 0
MI-JIT-ESN	0.020 9	0.001 5	0.012 0

从表5中我们可以看出,MI-JIT-ESN 在青霉素建模过程中性能良好,因此,笔者所提的 MI-JIT-ESN 建模方法在青霉素批处理建模过程中是一个更优的选择,同时,笔者所提的模型也适合和青霉素批处理建模相似的建模过程。

4 结论

笔者提出一种基于互信息和 JIT 学习的优化方法对 ESN 进行优化,以提高其对 MIMO 系统的适应性。该方法中,不仅基于网络的输入与输出之间的互信息对网络的多个输入伸缩参数进行调整优化;而且基于 JIT 学习,对 ESN 输出层回归部分进行局部重新建模,达到结构优化的目的。将该方

法运用到对青霉素补料分批发酵过程中关键生物参数的建模中,与优化前的 ESN 模型的测试效果比较,取得良好的优化效果,达到了提高适应度的目的。另外,在不同情况下的建模结果体现出了 MI-JIT-ESN 模型的有效性与准确性,而与其他传统神经网络建模方法的对比也体现出了 MI-JIT-ESN 模型的优越性。

参考文献:

- [1] LEE J, LEE S Y, PARK S, et al. Control of fed-batch fermentations [J]. Biotechnology advances, 1999, 17(1): 29-48.
- [2] 周彩荣,刘中平. 偏最小二乘-速差动力学分光光度法同时测定 S_n^{2+} 与 S_n^{4+} [J]. 郑州大学学报(理学版), 2015, 47(1): 97-102.
- [3] 李宗坤,陈乐意,孙颖章. 偏最小二乘回归在渗流监控模型中的应用 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2006, 27(2): 117-119.
- [4] 杨高飞,徐睿,秦鸣,等. 基于 ARMA 和卡尔滤波的短时交通预测 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 36-40.
- [5] 李凌均,陈超,韩捷,等. 全矢支持向量回归频谱预测方法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(3): 78-82.
- [6] 胡燕,宋晓琰,马刚. 基于 K-means 和时间匹配的预测模型 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(2): 17-21.
- [7] 王杰,陈春宇. 基于神经网络逆系统的循环流化床内模控制 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(2): 71-75.
- [8] JAEGER H. The "echo state" approach to analysing and training recurrent neural networks-with an erratum note [R]. Bonn, Germany: German National Research Center for Information Technology GMD Technical Report, 2001(148): 34.
- [9] JAEGER H. Adaptive nonlinear system identification with echo state networks//Advances in neural information processing systems [C]. 2002: 593-600.
- [10] JAEGER H, HAAS H. Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication [J]. Science, 2004, 304(5667): 78-80.
- [11] PENG Y, WANG J, PENG X. Survey on reservoir computing [J]. Acta electronica Sinica, 2011, 39(10): 2387-96.
- [12] RODAN A, TINO P. Minimum complexity echo state network [J]. IEEE Transactions on neural networks, 2011, 22(1): 131-44.

- [13] VERSTRAETEN D, SCHRAUWEN B, Haene M, et al. An experimental unification of reservoir computing methods [J]. *Neural networks*, 2007, 20 (3) : 391 – 403.
- [14] WANG J S, HAN S, GUO Q P. Echo state networks based predictive model of vinyl chloride monomer convention velocity optimized by artificial fish swarm algorithm [J]. *Soft computing*, 2014, 18(3) : 457 – 68.
- [15] DUTOIT X, SCHRAUWEN B, VAN C J, et al. Pruning and regularization in reservoir computing [J]. *Neurocomputing*, 2009, 72(7) : 1534 – 46.
- [16] GUO W. Structural optimization algorithm for rbf neural network based on mutual information [J]. *Computer science*, 2013, 40(6) : 252 – 5.
- [17] BROWN G, POCKOCK A, ZHAO M. Conditional likelihood maximisation: a unifying framework for information theoretic feature selection [J]. *The journal of machine learning research*, 2012, 13(1) : 27 – 66.
- [18] BIROL G, ÜNDEY C, Cinar A. A modular simulation package for fed-batch fermentation: penicillin production [J]. *Computers & chemical engineering*, 2002, 26(11) : 1553 – 65.
- [19] LIU N, ZHANG J, YAN J. Weighted kernel regression for semi-supervised soft-sensing modeling of fed-batch processes [J]. *Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2012 (43) : 67 – 76.
- [20] YU J. A Bayesian inference based two-stage support vector regression framework for soft sensor development in batch bioprocesses [J]. *Computers & chemical engineering*, 2012(41) : 134 – 144.
- [21] YU J. Multiway gaussian mixture model based adaptive kernel partial least squares regression method for soft sensor estimation and reliable quality prediction of non-linear multiphase batch processes [J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2012 (51) : 13227 – 13237.

Optimized Echo State Network on the Basis of Mutual Information and Just-in-time

ZHANG Heng, WANG Heshan

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

Abstract: To improve the adaptability of echo state network (ESN) , an optimization method based on mutual information (MI) and Just-In-Time (JIT) learning was proposed in this paper to optimize the input scaling and the output layer of ESN. The method was named as MI-JIT optimization method and the obtained new network was MI-JIT-ESN. The optimization method mainly consists of two parts. Firstly, the scaling parameters of multiple inputs were adjusted on the basis of MI between the network inputs and outputs. Secondly, based on JIT learning, a partial model of output layer was established. The new partial model could make the regression results more accurate. Further, a multi-input multi-output MI-JIT-ESN model was developed for the fed-batch penicillin fermentation process. The experimental results showed that the obtained MI-JIT-ESN model performed well, and that it had better adaptability than ESN model without optimization and other neural network models.

Key words: echo state network; mutual information; Just-in-Time learning; optimization; model; penicillin fermentation

文章编号: 1671-6833(2017)05-0007-06

基于 Spark 的标准化 PCA 算法

董建华^{1,2}, 王国胤¹, 雍熙³, 史晓雨¹, 李庆亮⁴

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 电子信息技术研究所, 重庆 400714; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 水利部 水利信息中心, 北京 100053; 4. 西昌卫星发射中心, 海南 文昌 571300)

摘要: 主成分分析(PCA)是数据挖掘中常用的数据降维技术,它将原来多个变量转化为少数的几个综合指标,介绍了主成分分析的原理、Spark 的分布式架构以及 Spark 的 MLlib 分布式矩阵 PCA 算法,通过改进设计提出了一种带有标准化处理的 SNPCA 算法,并在多核 CPU 环境下进行了测试验证,实验结果证明了该算法的有效性。

关键词: 主成分分析; Spark; 分布式; 标准化处理

中图分类号: TU316.4

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.001

0 引言

主成分分析(principal component analysis, PCA)作为一种常用的多指标统计方法,是由 Karl Pearson^[1] 1901 年提出的,它将原来多个变量转化为少数几个综合指标。从数学的角度看,它是一种降维处理技术,能够最大限度地保留原始数据信息,对高维变量进行综合和简化,并客观地确定各个指标的权重,从而避免了降维过程中的主观随意性。

随着大数据量计算任务的需求,多核处理下的 PCA 并行计算逐渐成为数据挖掘中必不可少的分析方式,比较著名的方法是 Hadoop 的 Mahout^[2] 和 Spark 的 MLlib 库^[3] 实现的并行 PCA 算法。近几年,以降低时间复杂度和通信复杂性为目的,在分布式平台上设计可扩展的 PCA 算法模型,成为多核处理下 PCA 算法研究的重点^[4-5]。

Apache Spark 于 2009 年诞生 AMPLab,其官方的定义为“Spark 是一个通用的大规模数据快速处理引擎”^[6]。2013 年推出的 Spark 0.8 在全面兼容 Hadoop^[7] (包括 Hadoop 的 HDFS 文件系统和存储数据库)的基础上,利用更多

的内存处理机制大幅提高了系统性能,进而提高了在大数据环境下数据处理的实时性,同时保证了高容错性和高扩展性。依靠 Scala 强有力的函数式编程、Actor 通信模式、闭包、容器、泛型,借助统一资源分配调度框架 Mesos 和 YARN^[8],并融合了 MapReduce 和 Dryad^[9],Spark 最后成了一个简洁、直观、灵活、高效的大数据分布式处理框架。

Hadoop/MapReduce 依靠 HDFS 来实现分布式环境下中间数据的交互,Spark 则通过共享的虚拟内存来实现中间数据的快速交换^[10]。相比而言,Spark 具有更好的扩展性,同时 Spark 需要更强的 CPU 以及苛刻的 I/O 等条件来支持它的运行环境。Spark 现有 PCA 存在的问题是:在 Spark 的 MLlib 组件中,分布式矩阵 PCA 算法的计算是直接对样本矩阵读入后转换为分布式矩阵来处理的,并没有对样本矩阵进行标准化操作。笔者提出一种带标准化处理的 PCA 算法 SNPCA(Spark's normalized principal component analysis)来实现对 Spark 分布式矩阵的标准化操作,该算法借助 Spark 的分布式计算平台,提高了大数据环境下主成分分析的实时处理能力。

收稿日期: 2017-04-10; 修订日期: 2017-07-11

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61602434); 三峡库区水生态环境感知系统及平台业务化运行(2014ZX07104-006); 重庆市基础科学与前沿研究技术重点专项(cstc2015jcyjB0244); 中国科学院青年创新促进会资助项目(No. 2017393)

作者简介: 董建华(1987—),男,中国科学院博士研究生,主要从事云计算技术、数据挖掘、人工智能等研究, E-mail: 928991386@qq.com.

1 主成分分析方法

主成分分析的目的是减少数据集的维数,把原有高维的数据变量集重新组合为相互无关的综合变量集,这些不相关的综合变量的数量小于或等于原始变量的数量,综合变量所表征“信息量”的大小用方差来衡量.通常情况下,主成分分析算法可以看作是一种揭露数据的内部结构、从而更好地解释其综合变量之间关系的方法,主要计算步骤如下^[11].

(1) 建立原始变量观测数据构成的矩阵.

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 对原始变量数据构成的矩阵进行标准化处理来消除不同量纲的影响.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sqrt{\text{var}(x_j)}}, \quad (2)$$

式中: \bar{x}_j 为第 j 个列向量的均值,即

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}.$$

$\text{var}(x_j)$ 为第 j 个列向量的方差,即

$$\text{var}(x_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2.$$

(3) 计算标准化数据的相关系数矩阵,求相关系数矩阵 R 的特征值 $(\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_p)$ 和相应的特征向量 $a_i = (a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{ip})$, $i = 1, 2, \cdots, p$, 用雅克比方法、SVD 分解法^[12]等.

(4) 选择重要的主成分分量. 主成分分量的方差贡献率 c_i 定义如下:

$$c_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i}. \quad (3)$$

第 i 个主成分分量 F_i 的累积贡献率为:

$$\delta_i = c_1 + c_2 + \cdots + c_i. \quad (4)$$

通常选择使累积贡献率达到 85% 的主成分变量,计算出主成分变量的表达式为:

$$\begin{cases} F_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1p}x_p \\ F_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2p}x_p \\ \vdots \\ F_p = a_{p1}x_1 + a_{p2}x_2 + \cdots + a_{pp}x_p \end{cases}, \quad (5)$$

式中: x_1, x_2, \cdots, x_p 表示变量矩阵经过标准化处理的值. 主成分变化后新的主成分变量彼此不相

关,且方差依次递减.

2 Spark Mlib 库中的分布式矩阵 PCA 算法

本节将以 Spark 中 RowMatrix 类型的分布式矩阵为例来研究 MLib 中的分布式 PCA 算法, Spark 中,其它两个分布式矩阵类型 indexed-RowMatrix、CoordinateMatrix 与之类似,在此从略. RowMatrix 中求解 PCA 的函数方法为:

computePrincipalComponents (k: Int): Matrix^[6].

其具体过程是通过先求 RowMatrix 类型矩阵 (标识为矩阵 A) 的格拉姆矩阵,进而求得矩阵 A 的协方差矩阵,再使用 ScalaNLP 的 SVD 方法求解特征值、特征向量,得到分布式矩阵 A 的主成分分量,其算法流程如图 1 所示.

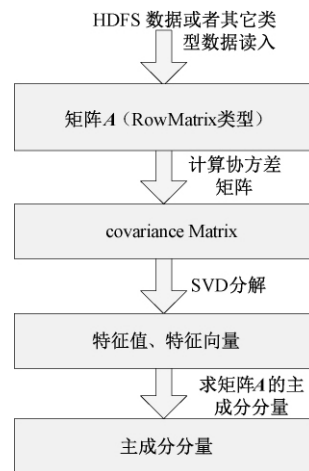


图 1 Spark 的 MLib 组件中 PCA 算法流程

Fig.1 Flow chart of PCA from Spark's MLib component

在 Spark MLib 库中的分布式矩阵 PCA 算法中,通过对矩阵 A 进行不断迭代来实现协方差矩阵求解,其余部分则是串行算法(在提交的计算节点上串行处理完成). 协方差矩阵的求解是直接对矩阵 A 进行的操作,通过将读入的数据转换为 RowMatrix 类型矩阵来实现,并没有对样本矩阵进行标准化操作,鉴于此,我们将引入 SNPCA 算法来实现对 Spark 分布式矩阵的标准化操作.

3 基于 Spark 的标准 PCA 算法—SNPCA

在数据预处理阶段,通常将数据进行标准化 (normalization) 处理后再进行数据分析. 数据的标准化是指将数据按比例缩放,调节不同的尺度测量值到一个公共的范围,使数据值落入一个小的特定区间(将不同范围的数据统一到同一个区

间参考系下进行比较才有意义^[13]). 数据的标准化在处理某些指标的比较和评价中也经常涉及到,通过去除数据的范围和单位量纲的限制,以便不同量级或单位的指标能够进行比较和加权,在许多情况下使用标准化后的变量进行主成分分析会显著地改善分析效果. 对数据进行标准化处理的常见方法有“按小数定标标准化”、“Z-score 标准化”和“min—max 标准化”等^[14].

文献[15]的研究表明,对于样本矩阵($n \times p$ 型, p 远小于 n), 计算 PCA 的最好方法是先计算出所有的统计量(时间复杂度为 $O(p^2n)$), 再对相关系数矩阵或协方差矩阵($p \times p$ 型) 进行 SVD

分解^[16](时间复杂度为 $O(p^3)$). 在第1章求解 PCA 的步骤中,依照公式(2)中数据标准化进行求解需要对样本数据读入的矩阵进行3次扫描,即求出列向量的均值和方差值再代入公式(2)进行标准化. 在大数据量的情况下,事物的观察数据量动辄上万,这种操作显然是不可接受的,要尽量提高数据的扫描效率,才能适应快速分析大数据任务的需要. 鉴于此,我们以 Spark 的 MLlib 库和开源的数值计算库 ScalaNLP 为基础,设计改进了基于 Spark 的标准化 PCA 算法—SNPCA 算法来实现对大数据样本矩阵进行标准化的 PCA 操作,算法的主要步骤如图2所示.

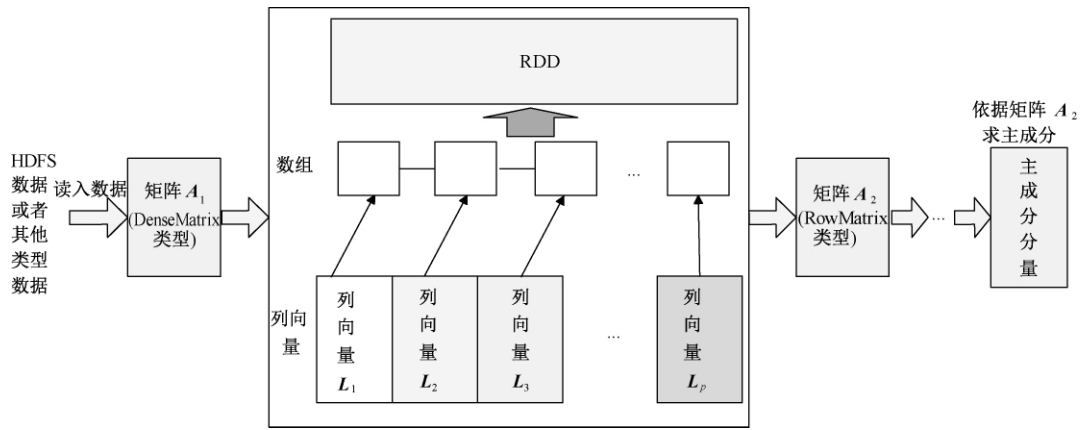


图2 改进的 SNPCA 算法流程图

Fig.2 Flow chart of improved SNPCA algorithm

在 SNPCA 算法中,读入的数据将转换为 DenseMatrix 类型的矩阵 A_1 , 矩阵 A_1 的各个列向量 L_1, L_2, \dots, L_p 链接在一个数组上从而构成“向量数组”结构,再放入 RDD 中对每个列向量并行地求解公式(2)所表征的列向量均值、方差等统计量,进而对每一个列向量进行标准化处理,这些存在于 RDD 中的列向量将会被重构成 RowMatrix 类型的矩阵 A_2 ,再依照图1的流程求解相关系数矩阵、特征值、特征向量,最后根据这些统计参数和各个列向量 L_1, L_2, \dots, L_p 求出主成分分量. 下面列出算法的具体步骤及其所需时间.

(1) 从 Spark 的 nameNode 节点驱动程序读取数据文件/数据库创建 DenseMatrix 类型的矩阵 A_1 . A_1 存在于 Spark 驱动程序所在的 nameNode 节点上.

(2) 把矩阵 A_1 的列向量 L_i ($i = 1, 2, \dots, p$) “挂载”到长度为 p 的数组上,使用该数组转化为 Spark 的 RDD (可以通过 SparkContext 类的 `def parallelize [T] (seq: Seq [T], numSlices: Int)`:

RDD [T]方法),借助该 RDD 来并行计算列向量的均值、方差,进而对每一个列向量进行标准化处理. 假设资源池可以提供 q 个 core,在 Spark 并行环境下,每个 core 对矩阵中每个元素进行运算平均时间消耗为 T_i . 则该步骤整体需要的计算时间为 $3(pn/q) T_i$.

(3) 计算列向量转换成的 RowMatrix 矩阵 A_2 的格拉姆矩阵,进而计算 A_2 的相关系数矩阵. 对于矩阵 A ,求其格拉姆矩阵的公式为 $Q = A^T * A$ ^[17]. 由于 Spark 的 MLlib 提供的 API 是以并行迭代的方式计算格拉姆矩阵,假设 A_2 被分成 d 个分区, nameNode 和 dataNode 可以提供 q 个 core,格拉姆矩阵被并行处理需要的时间为 $(p^2n/q) T_i$. 注意: Spark 在逻辑上是基于分区数并行的,实际的并行是基于核数的,并行度为 $\min\{d, q\}$,通常 d 为核数 q 的 2.3 倍,所以并行度就是核数 q . 由格拉姆矩阵计算相关系数矩阵(表示为 ρ)^[18],设 Spark 串行运算条件下,每个 core 对矩阵中每个元素进行运算的平均时间消耗为 T_c ,则需要时间为 $(p^2) T_c$.

(4) 在 Spark 的 NameNode 上对相关系数矩阵进行 SVD 分解. 依据 SVD 公式 $[U, S, V] = \text{SVD}(\rho)$, 设 SVD 分解后由特征值组成的矩阵为 S , 由特征向量组成的矩阵为 $U^{[19]}$, 该 SVD 分解需要时间 $(p^3) T_c$.

(5) 求主成分. 根据公式(5)求主成分分量 $F = X * A$, 则得到主成分分量构成的矩阵 F 为 $F = A_2 * U$ (当然也可以根据特征值的贡献率进行筛选主成分分量), 该过程所需时间为 $(p^2 n / q) T_i$.

在步骤(1)~(5)中, 算法的并行是在 A_1 求列和、列向量方差、标准化, 以及由矩阵 A_2 求解格拉姆矩阵和最后求解主成分分量这 3 个过程中. 由于 p 远小于 n , 所以在整个计算步骤中, 算法的整体复杂度在性能方面的瓶颈还取决于算法的并行阶段. 下面将对整体算法的效率进行分析. 一般地, 程序加速比的定义^[20]如下:

$$S_N = \frac{T_1}{T_N}, \quad (6)$$

式中: S_N 为加速比; T_1 为单处理器下程序运行的时间; T_N 为有 N 个处理器并行运行时的时间. 由于 Spark 的运行调度是以核为粒度的, 所以在 Spark 运行环境下, 对应的加速比公式中 T_1 是串行算法运行时间消耗, T_N 是 N 核时并行运行所消耗的时间. SNPCA 算法的时间消耗是前面(1)~(5)过程中时间消耗的总和, 所以核数为 q 时 SNPCA 总时间消耗为:

$$T_q = 3(pn/q) T_i + (p^2 n / q) T_i + (p^2) T_c + (p^3) T_c + (p^2 n / q) T_i + k = 2(p^2 n / q) T_i + 3(pn/q) T_i + (p^2) T_c + (p^3) T_c + k.$$

当 q 为 1 时, SNPCA 串行运行的时间消耗为:

$$T_1 = 2(p^2 n) T_i + 3(pn) T_i + (p^2) T_c + (p^3) T_c + t.$$

所以核数为 q 时并行加速比为:

$$S_q = (2(p^2 n) T_i + 3(pn) T_i + (p^2) T_c + (p^3) T_c + t) / (2(p^2 n / q) T_i + 3(pn/q) T_i + (p^2) T_c + (p^3) T_c + k). \quad (7)$$

因此, 当核数 q 比较大时, 算法的并行优势会比较明显.

4 仿真实验

4.1 仿真实验环境及数据集

4.1.1 SNPCA 算法时间性能实验

在 Spark 分布式运行环境下, Spark 的分区数一般为总核数的 2~3 倍, 读取的数据文件一般来源于 HDFS, 在读取 HDFS 数据文件的时候每一个

Block(128 M) 为生成的 RDD 的一个分区. 考虑到虚拟机集群中通信和调度等因素影响, 实验效果会很差, 为验证算法的并行效率, 我们选择在一个 DELL 服务器(4 核)环境下做仿真实验, 模拟的随机数据构成 $240\,000 \times 200$ 的样本矩阵(大小为 286 MB), 通过控制不同的核数来看作业处理的仿真效果. 另外, 为了增强对比试验, 使用 ScalaNLP 的线性代数包构建的 PCA 串行算法(Breeze PCA, BPCA)和 Spark1.3.0 本身提供的 PCA 算法(Spark's PCA, SPCA, 该算法没有进行数据的标准化处理)一并进行试验对比. 在分配核数为 q 的时候, 算法 SPCA 的时间消耗为 $(p^2 n / q) T_i + O(p^2) T_c + (p^3) T_c + k$. 由于 p 远小于 n , 所以其加速比为:

$$S_q = \frac{T_1}{T_q} \approx q. \quad (8)$$

DELL 服务器配置如下:

4 Cores

Inte(R) Core(TM) i7-4770

RAM: 16 G

OS: win8, 64bit

frequency: 3.4 GHz

Dise size: 250 GB

Shared memory: 2 559 MB

SNPCA、BPCA、SPCA 算法在上述仿真实验环境下的运行时间对比如图 3 所示.

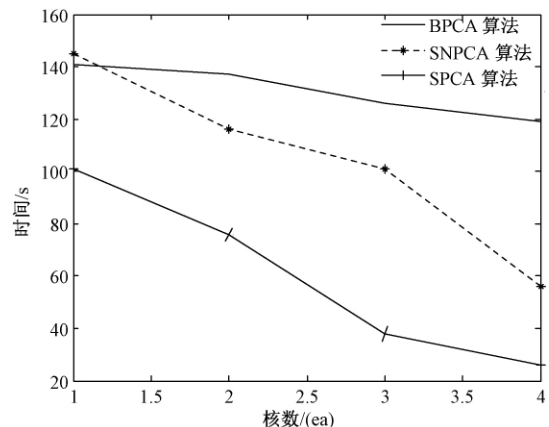


图 3 SNPCA 等 3 种算法的运行时间对比

Fig.3 Time consumption of the three Algorithms

4.1.2 SNPCA 算法与 SPCA 算法内存消耗量比较

一般地, 分析某一程序在 Spark 运行环境下的空间消耗是比较困难的, 因为程序的运行受分布式集群的运行环境、资源共享、JVM GC 效率、SWAP 分区等因素的影响. 通常 Spark 集群中 Driver 所在的节点会具有较高的系统性能, 而

SNPCA 算法在 Driver 端程序运行的空间复杂度是一个多项式,下面将针对 SNPCA 算法在 Spark 集群的单个计算节点上的内存消耗进行试验,并与 SPCA 算法进行比较. 可以通过获取在操作系统上运行产生的 RES (resident memory usage) 与 SHR (shared memory) 之差的平均值来计算 SNPCA 算法所消耗的内存. 仿真数据为 200 维、条数依次为 [1,2,3,4,5,6,7,8,9,10] 万条的 10 个数据集,大小依次为 [11.9, 23.7, 35.9, 47.7, 59.7, 71.4, 83.4, 95.1, 108.1, 119.2, 131.1] MB. 在 Spark 运行环境下,SPCA 算法和 SNPCA 算法在处理不同大小数据集时单个计算节点上所消耗的内存量对比情况如图 4 所示.

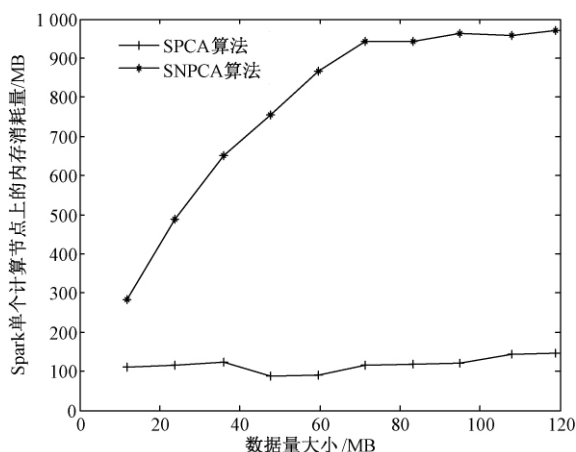


图4 SPCA 算法和 SNPCA 算法在集群的单个工作节点上内存消耗量对比

Fig.4 Memory consumption comparison between SPCA and SNPCA on single worker node

4.2 仿真实验结果及分析

在仿真实验中,BPCA 算法是串行算法,SPCA 算法是 Spark 提供的没有进行数据标准化的 PCA 算法.从图 3 我们发现,Spark 1.3.0 提供的 SPCA 算法符合公式(8)的加速比,且基于 Spark 编程模型的 SNPCA 算法随着核数的增加也实现了快速处理的目的.算法 BPCA 对多核表现并不敏感,因为它本身就是一个串行算法.另外,可以看出 SNPCA 算法的性能介于 BPCA 算法和 SPCA 算法之间,SNPCA 算法的性能通常比 BPCA 算法好,除非在单核的时候,因为 Spark 的分布式机制决定了即使在单核的时候仍然对数据进行了分区,在不同分区上的迭代运算产生不可避免的交互运算、各个分区与资源管理器等的通信引起时间消耗.总体来看,我们仍然可以推断出,SNPCA 算法不仅实现了带标准化的 PCA 功能,并且表现出不错的算法性能,适用于大型数据集的 PCA 运算.

从图 4 容易看出,SNPCA 算法在 Spark 集群的单个节点上的内存消耗量要远大于 SPCA 算法,这是因为 SNPCA 算法涉及了几个 collect 的操作,消耗了因分布式数据传递引起的大量内存开销,但是考虑到随着数据量上升开销幅度上升得不快,其算法仍在一定程度上提高了大数据下主成分分析的处理能力.

5 结论

提出了在 Spark 下具有数据标准化处理的 SNPCA 算法,通过“空间换时间”,实现了在时间上的节约,为 Spark 运行环境下进行大数据的 PCA 处理提供了解决途径.另外,如何继续改进算法使得在分布式 RDD 中直接进行标准化处理(而不是通过 collect 机制)来进一步提高效率,这一点还有待于进一步研究.

参考文献:

- [1] KARL P. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. Philosophical magazine, 1901, 2(6): 559-572.
- [2] SEAN O, ROBIN A, TED D, et al. Mahout in action [M]. Vivgimia: Manning Publications, 2011.
- [3] XIANGRUI M, JOSEPH B, BURAK Y, et al. Mllib: machine learning in apache spark [J]. JMLR, 2016, 17(34): 1-7.
- [4] TAREK E, MAYSAM Y, ASHRAF A, et al. SPCA: scalable principal component analysis for big data on distributed platforms [C]//Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data. ACM, 2015: 79-91.
- [5] SIDDHARTH MALHOTRA B. SPCA: scalable principle component analysis for big data [C]//Qatar Foundation Annual Research Conference. 2014 (1): ITSP0517.
- [6] SPARK. APA CHE Spark [EB/OL]. [2016-06-11]. <http://spark.apache.org/>.
- [7] 蔡金收,陈铁军,郭丽.一种基于投票极限学习机的人脸识别混合算[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 37-41.
- [8] BENJAMIN H, ANDY K, MATEI Z, et al. Mesos: a platform for fine-grained resource sharing in the data center [C]. NSDI. 2011(11): 22-22.
- [9] MICHAEL I, MIHAI B, YUAN Y, et al. Dryad: Distributed data-parallel programs from sequential building blocks [C]. ACM SIGOPS Operating Systems Review. ACM, 2007, 41(3): 59-72.
- [10] TAREK E, MOHAMED H. Analysis of PCA algo-

- rithms in distributed environments [R]. Qatar foundation: Qatar computing research instistue, 2015.
- [11] 江政, 周勇. 基于 FPGA 的电能质量监测装置设计 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 29-33.
- [12] 王敏, 周树道, 叶松. 基于小波变换方向信息的奇异值图像去噪研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, 33(3): 121-124.
- [13] 马立平. 现代统计分析方法的学与用(三): 统计数据标准化——无量纲化方法 [J]. 北京统计, 2000(3): 34-35.
- [14] CHAOSIMPLE. [EB/OL]. [2016-04-19]. <http://www.cnblogs.com/chaosimple/archive/2013/07/31/3227271>.
- [15] CARLOS O. Statistical model computation with UDFs [J]. Knowledge and data engineering, 2010, 22(12): 1752-1765.
- [16] CARLOS O, NAVEEN M, CARLOS G-A, et al. Fast PCA computation in a DBMS with aggregate UDFs and LAPACK [C]. Proceedings of the 21st ACM international conference on Information and knowledge management. ACM, 2012: 2219-2223.
- [17] GRAMIAN M. http://en.wikipedia.org/wiki/Gramian_matrix. Accessed July 2016
- [18] CARLOS O, NAVEEN M, CARLOS G-A. PCA for large data sets with parallel data summarization [J]. Distributed and parallel databases, 2014, 32(3): 377-403.
- [19] JAN J G. On the relationships between SVD, KLT and PCA [J]. Pattern recognition, 1981, 14(1): 375-381.
- [20] JACK J D, IAIN S D, DANNY C S, et al. Numerical linear algebra for high-performance computers [M]. Siam, 1998.

Normalized PCA Algorithm Based on Spark

DONG Jianhua^{1,2}, WANG Guoyin¹, YONG Xi³, SHI Xiaoyu¹, LI Qingliang⁴

(1. Institute of Electronic Information & Technology, Chongqing Institutes of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Water Information Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 4. Xichang Satellite Launch Center, Wenchang 571300, China)

Abstract: Principal Component Analysis (PCA) is a well known model for dimensionality reduction in data mining, it transforms the original variables into a few comprehensive indices. In this paper, we study the principle of PCA, the distributed architecture of Spark and PCA algorithm of distributed matrix from spark's MLlib, then improved the design and present a new algorithm named SNPCA (Spark's Normalized Principal Component Analysis), this SNPCA algorithm computes principal components together with data normalization process. We carried out benchmarking on multicore CPUs and the results demonstrate the effectiveness of SNPCA.

Key words: PCA; Spark; distributed; normalization

文章编号: 1671-6833(2017)05-0013-05

基于局部特征的驾驶证自动识别系统

马 岭^{1,2}, 蒋慧琴^{1,2}, 刘玉敏^{2,3}

(1. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 数字化影像技术研究中心, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 商学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对待识别号码存在于文字、阴影线、方框等实际复杂背景中时, 现有算法识别精度低、普适性及鲁棒性不强等问题, 设计并实现了一种高速驾驶证自动识别系统. 首先通过自适应二值化与形态学处理相结合解决因光照不匀、噪声、倾斜及具有阴影线字符导致的分割难点, 进而利用 Blob 分析提取驾驶证上的重要局部特征, 最后综合利用字符先验信息和相关匹配算法提高识别率. 实际测试结果表明, 系统识别率高, 并据此开发出了投向市场的实用产品.

关键词: 纹理消除; 二值化; 图像分割; Blob 分析; 字符识别

中图分类号: TP391.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.013

0 引言

文字识别(OCR)在许多领域有重要应用, 例如, 身份证号码的自动识别^[1]; 联机搜索手写体文本中的关键词识别^[2]; 视频中的文字识别^[3]以及基于车牌识别的诸多应用系统^[4-8]. 其共性难题在于实际复杂场景下怎样高速精准地提取最小识别特征. 目前, 常用算法包括阈值法^[4]、投影法^[5]和连通域分析法等. 阈值法和投影法的特点是处理速度快, 但对光照不匀、噪声及倾斜的字符敏感, 分割精度和鲁棒性有限. 因此, 工程上常把阈值法和投影法与其他方法结合以改善分割精度. 文献[4]提出一种基于全局阈值法与BP神经网络相结合的车牌识别系统; 文献[5]提出基于投影的车牌字符分割方法, 需要综合利用字符排列规则和字符间距等先验知识解决字符分割和粘连问题; 文献[6]提出通过高斯低通滤波器和一个新的类拉普拉斯变换减少不均匀光照和噪声对字符分割的影响, 并使用主成分分析提高识别效率, 对不同颜色的车牌识别呈现出很好的鲁棒性. 上述方法在改进精度的同时, 计算复杂度也随之增加, 文献[7]提出基于GPU的牌照字符识别算法, 取得了很好的实时效果, 但硬件成本也随之提高.

本研究基于OCR技术设计并实现一种高性

价比的驾驶证自动申请与更新系统, 通过硬件设计以采集到包含最小可识别特征的局部驾驶证图像. 针对驾驶证上的数字号码存在于文字、阴影线、方框等复杂背景中, 现有算法识别精度低、普适性及鲁棒性不强等问题, 首先通过自适应二值化与形态学处理相结合解决因光照不匀、噪声、倾斜及具有阴影线字符导致的分割难题, 进而利用Blob分析提取驾驶证上的重要局部特征, 最后综合利用字符先验信息和相关匹配算法提高识别率. 实验结果表明, 其识别精度和效率均满足开发驾驶证自动申请与更新装置的技术要求.

1 系统设计方案

驾驶证自动识别与更新系统通过拍摄驾驶证图像并识别驾驶证上的数字号码, 自动生成驾驶证更新申请书, 它包括硬件系统和软件系统两部分.

1.1 硬件系统设计

该系统的硬件由驾驶证图像采集单元和进行图像处理与数据管理的普通计算机组成. 图像采集单元包括驾驶证插入口、USB相机、镜头、光源和传感器. 在进行硬件设计时, 使相机与驾驶证的相对位置固定, 尽可能保证在相对固定角度下, 获得包含最小可识别特征的局部驾驶证图像, 以便

收稿日期: 2017-01-20; 修订日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金-河南联合基金重点支持项目(U1604262); 国家自然科学基金资助项目(71672182)

作者简介: 马 岭(1963—), 男, 河南叶县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事模式识别研究, E-mail: ielma@zzu.edu.cn.

提高识别速度.

系统采集的实际待处理图像如图 1 所示,包含了驾驶证上的完整数字号码信息.



图 1 采集的局部驾驶证图像

Fig. 1 The image of a local driving license

1.2 软件系统设计

笔者设计的软件系统用户界面如图 2 所示. 具有图像读入、文字读取、字符模板登录、识别条件设定与参数保存等功能. 包括识别引擎和应用管理 2 个模块. 识别引擎由图像采集和图像处理单元构成,用于采集图像,读取驾驶证信息并进行字符识别. 识别引擎通常在后台运行,可以确认相机角度、照明状态并设置识别条件. 应用管理模块用于与识别模块通讯,启动及关闭识别系统,获取并显示识别结果等.



图 2 驾驶证识别系统的主用户界面

Fig. 2 The main user interface for system

2 驾驶证字符识别算法

驾驶证字符识别算法如图 3 所示,主要包括 3 部分: 字体登录模块、识别条件设置模块和文字识别模块.

字体登录模块与识别条件设置模块的运行可以根据图 2 所示的主用户操作界面进行. 首先采集一些用来学习的驾驶证图像样本,读入系统,选中字体后,笔者设计的系统会自动计算识别条件,然后将计算出的识别条件登录保存到数据库,作为文字识别算法的先验知识备用. 点击开始,文字识别模块会根据事前登录的字体和数字列字符数、长度等先验信息自动对图像进行预处理,分割字符,识别并输出结果到管理模块.

2.1 字体登录

虽然打印驾驶证采用统一的 OCRB 字体,但考虑到打印机的制造商、型号不同,打印出的字体

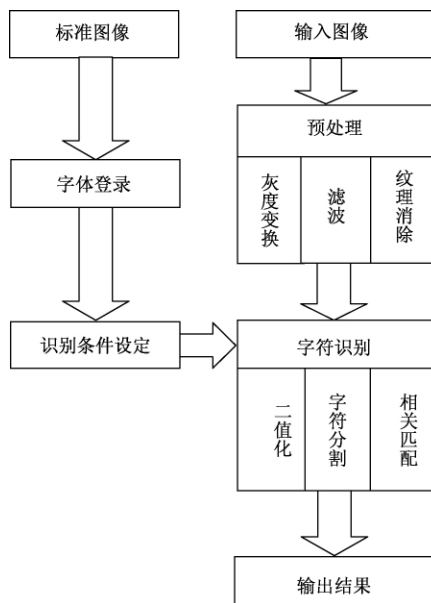


图 3 驾驶证识别算法框图

Fig. 3 Block diagram of recognition algorithm

会有差异,为了提高系统的鲁棒性,笔者事前登录了多种字体,分别用这些字体进行匹配并计算各种字体的得分,最后采用得分最高者作为识别结果.

2.2 识别条件设定

为了防止误识别,提高识别率,本系统在识别字符之前将待识别号码文字列的字符数、长度、高度、字符间距等先验信息输入计算机,识别时将识别得到的各字符串与之前输入的字符串信息进行比较,输出与设定条件最相似的字符串. 由于采用自动分割方法,用户只需用鼠标选定要识别的字符串,系统会自动计算相关条件.

2.3 识别模块

识别模块包括预处理、分割与驾驶证字符识别 3 部分.

2.3.1 预处理

由于驾驶证图像采集单元使用的是彩色相机,采集到的图像(如图 1)是 24 位真彩色图像,为了提高处理速度,我们基于原图像中的红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色,采用式(1)所示的加权平均方法,将彩色图像转换成灰度图像,并进行均值滤波处理,处理后的结果如图 4 所示.

$$gray = cr \cdot R + cg \cdot G + cb \cdot B, \quad (1)$$

其中: $cr = 0.299$; $cg = 0.587$; $cb = 0.114$ 为红、绿、蓝三原色的加权系数.

由图 4 可以清楚地观察到,经过常规预处理后,待识别驾驶证号码仍存在于文字、阴影线、方框等实际复杂背景之中,特别是在数字号码中,还



图4 灰度转换及滤波处理结果

Fig.4 The processed results

有一些字符带有阴影线,因此,如何消除阴影线的影响,是精确提取驾驶证数字号码的关键,笔者提出采用形态学处理方法去除这些阴影线.

2.3.2 纹理消除

笔者采用形态学的膨胀(dilation)与收缩(erosion)操作以期降低阴影线的影响.膨胀操作如式(2)所示,将图像中的每个像素的灰度值用它的邻域内9个像素中的灰度最大值替代.与膨胀相反,收缩是将图像中的各个像素的灰度值用它的邻域内9个像素中的灰度最小值替代.

$$[f \oplus b](x, y) = \max_{(s, t) \in b} \{f(x - s, y - t)\}. \quad (2)$$

利用式(2)进行形态学处理的结果如图5所示.图5清楚地显示,经过形态学处理后阴影线被去除了.

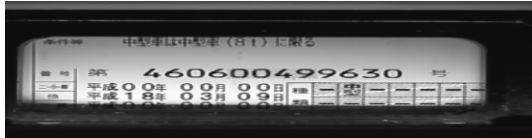


图5 形态学处理后结果

Fig.5 Results of morphological processing

2.3.3 字符分割

由于照明系统的亮度会随着使用时间增长而变弱,图像灰度会逐渐变化,此外,光照难免会有不均,因此,采用固定阈值进行二值化不适用于这种长久使用的装置.本系统在比较评价各种二值化算法的基础上,提出一种改进的自适应二值化算法对字符进行分割预处理,其特点是自适应二值化与 Blob 分析相结合.

二值化的关键在于阈值 $T(i, j)$ 的计算,本文中阈值 $T(i, j)$ 的计算方法如式(3)所示,是根据图像局部区域灰度分布来计算对应点的阈值,

$$T(i, j) = m(i, j) \cdot \left[1 + k \cdot \left(\frac{s(i, j)}{R} - 1 \right) \right]. \quad (3)$$

式中: $m(i, j)$ 为注目位置的灰度平均值; $s(i, j)$ 为注目位置的灰度标准偏差; k 为可调整参数,可以根据对比度强弱来调整; R 为灰度变化的动态范围.采用该方法进行自适应二值化后的结果如图6所示.

我们测量图6所示的每一白色 Blob 的长度和高度,并根据事先登录先验信息及可能的噪音 Blob 容许值,去掉一些 Blob,以提取出重要局部特征,提取结果如图7所示.



图6 自适应二值化结果

Fig.6 The results of adaptive binarization



图7 分割结果

Fig.7 The segmented results

2.3.4 字符识别

字符识别的原理是利用字符分割的结果与模板库中的字符模板进行匹配,找出匹配度最佳者作为识别结果,笔者采用相关匹配算法,其相似度阈值计算方法如公式(4)所示.

$$R_{ft} = \frac{1}{n} \sum_{x, y} \frac{(f(x, y) - \bar{f})(t(x, y) - \bar{t})}{\sigma_f \sigma_t}. \quad (4)$$

这里假定 $t(x, y)$ 为事前登录字符的图像, $f(x, y)$ 为分割得到的字符图像, \bar{f}, \bar{t} 为 $f(x, y), t(x, y)$ 的平均值; σ_f, σ_t 为 $f(x, y), t(x, y)$ 的标准偏差; R_{ft} 为两个图像 $f(x, y)$ 和 $t(x, y)$ 的相关系数值, R_{ft} 越大表明两个图像的相似度越高.只有当两个字符达到一定的相似度时,我们才认为两者是同一字符,这个值我们称为相似度阈值.

识别部分的特点是根据分割结果实时自动计算字符串的局部特征及其与水平方向之间的角度,然后统一变换到水平方向,再利用正规化相关匹配算法对字符进行分类,从而解决了对具有一定角度的倾斜字符易误判的难题.

3 试验与分析

开发一个实际应用系统,对所提算法的有效性和鲁棒性均有很高要求,不仅对正常情况下的图像采集要求高识别率,而且对光照不均、噪声、模糊、倾斜等各种有干扰图像,也要求不会出现误判.

由于字符分割与识别是驾驶证自动识别与更新系统的两大关键技术,下面利用笔者的分割算法和识别算法,分别进行大量的有效性试验.

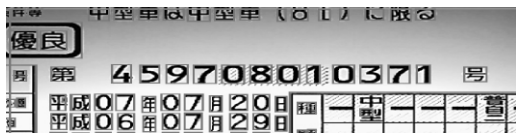
3.1 分割有效性试验与分析

用笔者提出的预处理算法和文献[5]中所述的经典投影法进行对比试验. 试验所用的图像数据库由 100 枚驾驶证图像构成, 按技术指标要求划分为系统必需正确识别的可读图像 74 枚及系统不能误识别的非可读图像 26 枚两种类型. 所谓可读图像, 即是人眼能正常识别的图像, 包括大小变化、亮度变化、角度变化、图像模糊等情况下的驾驶证图像. 非可读图像是特别制作的模拟字符数过多、过少, 中间字符缺失、刮伤, 图像方向错误, 取像时插入不完全等可能发生的特例图像.

图 8 为其中一组试验数据和其对应的笔者预处理算法的分割结果. 分别为测试用的一般图像、光照不均、噪声、模糊图像、倾斜图像及尺寸缩小后的图像示例和笔者分割算法的试验结果.



(a) 一般图像



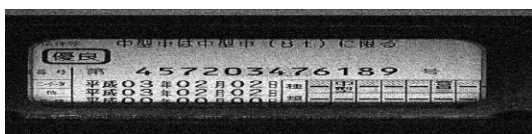
(b) 一般图像分割结果



(c) 光照过暗的图像



(d) 光照过暗图像分割结果



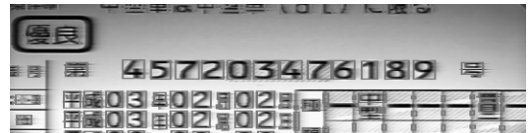
(e) 噪声图像



(f) 噪声图像分割结果



(g) 模糊图像



(h) 模糊图像分割结果



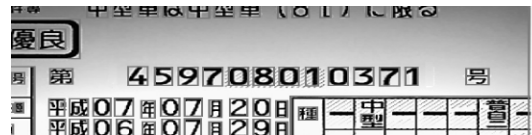
(i) 倾斜 6° 的图像



(j) 倾斜 6° 图像分割结果



(k) 缩小 10% 的图像



(l) 缩小 10% 的图像分割结果

图 8 试验数据及分割结果

Fig. 8 Test data and the segmentation results

投影法具有计算速度快和容易实现的特点, 在开发实际系统时也常使用. 为了增加可比性, 我们去除其他因素的影响, 仅将驾驶证号码剪切出来, 利用投影法进行分割试验. 试验结果表明, 分割正确率仅能达到 71%, 对光照不均、噪声、模糊、倾斜等有干扰的图像常出现分割不出字符或字符粘连等误分割问题. 误分割示例如图 9 所示, 其中图 9(a)、(b) 分别表示噪声图像示例和利用投影法的分割结果.

以上的对比试验表明,笔者算法与常用的投影法对比显示了很好的优越性,不仅对一般图像分割效果理想,对光照不均、倾斜、噪声等各种有干扰图像都能进行很好的分割,有效性和鲁棒性均能达到开发实际系统的技术指标要求。



(a) 噪声图像



(b) 投影法分割结果

图9 噪声图像及投影分割结果

Fig. 9 The noise image and the segmented results by projection method

3.2 识别有效性试验与分析

利用现场采集到的大量的实际驾驶证图像和上述分割试验所用测试图像分成两组,第一组74枚全部为设计指标中必须正确识别的可读图像,第2组356枚,混入一些不可读图像.对笔者算法的整体识别性能进行试验,试验结果如表1所示。

表1 识别试验结果

Tab. 1 The recognition results

项目	第一组	第二组
总图像枚数/枚	74	356
可正确识别枚数/枚	74	344
误识别枚数/枚	0	0
无法识别枚数/枚	0	12
识别率/%	100	96.6

由表1结果可知,笔者算法的误识别率为0.对不能识别的图像进行确认,正好是那些不可读图像,其示例如图10所示。



图10 一个字符被刮伤的图像

Fig. 10 A character scratched image

图11是任意选定的一幅可读驾驶证图像的识别结果示例。

进一步,我们已据此开发出了驾驶证自动申请与更新的成熟产品.该产品在投入实际应用的

数年间,仅有一例由于字符刮伤严重而导致误识别,并已对应解决.因此,该算法经实际应用环境的检验,具有很好的效果。



图11 图像的识别结果

Fig. 11 Recognition results

4 结论

为了减轻交通管理部门人工处理驾驶证申请与更新的繁重负担,笔者提出了一种驾驶证自动识别系统,首先采集到包含最小可识别特征的局部驾驶证图像,进而通过自适应二值化与形态学处理相结合解决因光照不均、噪声、倾斜及具有阴影线字符导致的分割难题,最后,综合利用字符先验信息和相关匹配算法提高识别率.试验结果表明,误识别率为0。

参考文献:

- [1] 肖西华,江志兴,梁旭,等. 移动平台下的身份证图像字符分割方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(24): 201-204.
- [2] CHENG C, ZHU B, NAKAGAWA M. Digital ink search based on character-recognition candidates compared with feature-matching-based approach [J]. Ice trans. inf. & syst, 2013, 96(3): 681-689.
- [3] 易剑,彭宇新,肖建国. 基于颜色聚类和多帧融合的视频文字识别方法 [J]. 软件学报, 2011, 22(12): 2919-2933.
- [4] 张坤艳,钟宜亚,苗松池. 一种基于全局阈值二值化方法的BP神经网络车牌字符识别系统 [J]. 计算机工程与科学, 2010(2): 88-91.
- [5] 陈涛,杨晨晖,青波. 基于投影和固有特征结合的车牌字符分割方法 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5): 45-47.
- [6] AMIR S, MANSUR V. A new and robust method for character segmentation and recognition in license plate images [J]. Expert system with application, 2011, 38: 13497-13504.
- [7] 柯海丰,应晶,基于R-ELM的实时车牌字符识别技术, [J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 8(7): 1209-1216.

(下转第22页)

文章编号: 1671-6833(2017)05-0018-05

非接触式红外测温灶具防干烧系统设计

李毅丰, 毛晓波, 杨怡航, 朱 枫

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为防止锅具干烧引发灶具炸裂、火灾等重大安全问题, 设计了一种灶具防干烧系统。该系统采用红外温度传感器 MLX90614 对锅具底部进行非接触式实时温度监测, 实时温度数据由 STM32 单片机通过 SMBus 总线进行采集和处理。温度监控模块在锅底温度超出正常加热区间后会声音报警, 达到干烧阈值温度后则通过串行接入灶具热电偶温度检测回路的控制电路切断燃气气路。实验结果表明, 该系统能在达到预设温度时切断燃气气路, 有效避免灶具干烧。

关键词: 非接触式; 红外测温; 灶具; 防干烧

中图分类号: TP277

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.021

0 引言

作为清洁能源, 燃气已经成为居民生活的主要能源。但使用锅具烹饪食物时, 常会由于忘记关闭灶具而引发安全问题。为此, 我国专门制定了家用燃气灶具标准^[1]来规范燃气灶具生产, 有效预防了由于溢锅等原因导致燃气灶熄灭引发的燃气泄漏事故。该标准规范了灶具燃气意外熄灭的安装防护, 但没有涉及燃气过度燃烧造成的锅具干烧问题。锅具干烧轻则损坏锅具, 重则引发火灾, 是危害厨房安全的一大隐患。针对这一问题, 海尔厨电采用燃气灶头上加装防干烧探头直接测量锅具温度, 实现干烧检测与防护^[2]。宁波方太厨具有限公司采用在邻近待测温锅具或待测温食物附近设置压电式无源无线温度传感器^[3]来设计锅具防干烧系统。以上两种系统分别采用了接触式和非接触式测温方案, 海尔的接触式测温探头居于燃气灶头中央, 改变了传统燃气灶头的结构, 不具通用性。另外, 接触性测温的关键是探头与锅底要有良好的热传导性能, 当探头与锅底接触紧密时可以满足这一要求, 但长时间使用后, 探头与锅底之间会积累油污或食物残渣的焦化物, 造成测温不准而使防干烧功能失效。文献^[4]根据压电式无源无线温度传感器的工作原理

提出的测温系统将压电式无源无线温度传感器设置在邻近待测温锅具或待测温食物的位置, 但该系统需要安装在专用的锅具上, 这样虽不用在面板或灶具燃烧器上开孔, 但要求专用锅具配合才能使用, 限制了通用性。

红外测温技术基于黑体辐射定律, 通过测量物体自身辐射的红外能量来测定其表面温度。日前, 红外测温已经被广泛应用到水下、仓储、医疗、生产等诸多领域^[5-9], 有关提高温度传感器测试精度的研究也有多种方案^[10-11]。针对目前灶具防干烧系统中存在的问题, 笔者设计了一种非接触红外测温灶具防干烧系统, 无需对现有灶具灶头和锅具进行改造, 仅在灶具面板上增开一个窗口, 通过窗口由温度传感器实时监测锅底的红外辐射信号, 从而测定锅底温度。该系统不干扰被测锅具的温度场, 且响应速度快、精度高。

1 干烧检测方法

干烧是指锅具在加热过程中, 与锅具接触的液体成分完全蒸发后, 灶具持续对锅具进行加热而造成锅具温度持续升高的现象, 可分为两种情况:

(1) 锅具内有食物且有液体(如水), 但与锅具内底直接接触的食物较黏稠, 液体不能在锅具

收稿日期: 2017-03-11; 修订日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473265); 河南省高等学校重点科研资助项目(17A413011); 郑州大学大学生创新创业训练计划项目(201610459008)

通信作者: 毛晓波(1965—), 男, 郑州大学教授, 研究方向为仿生机器视觉、智能仪器仪表, E-mail: mail_mxb@zzu.edu.cn.

内底对流,形成干烧;

(2) 直接加热纯液体物质,待液体蒸发完后继续加热形成干烧。

加热时温度示意图如图1所示。使用锅具加热食物时,锅内食物的初始温度一般是从室温附近开始不断上升,如图1中虚线的阶段A所示,锅底加热面的温度变化如图1中实线的阶段A。在锅内温度加热至液体沸腾后,如锅具内液体与锅底充分接触并能对流蒸发,锅具内底会维持在液体的沸点温度附近,如图1中虚线的阶段B,从而锅具外底也会维持在由不同材质和热容确定的某一温度,如图1中实线的阶段B所示。当发生干烧时,由于锅内液体的冷却作用消失,锅内锅外的温度迅速上升,如图2中阶段C所示。

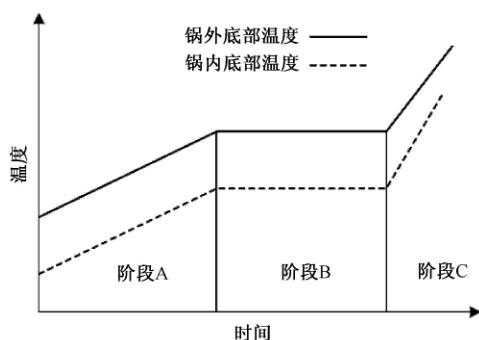


图1 加热食物时锅底内外温度示意图

Fig.1 Schematic diagram of the temperature inside and outside the pot when heating the food

由于各种锅具热容不同,锅内食物成分多种多样,发生干烧时锅底的温度会大不相同。为简化试验,表1为用FLUKE MT4 MAX+测温仪实测不同锅具直接对水进行加热过程中阶段B的一组数据。

表1 不同锅具大火加热沸水时锅底内外温度

Tab.1 Different temperature inside and outside the pot bottom when boiling water with big fire

锅具类型	锅底食物面/℃	锅底加热面/℃
单层底不锈钢锅	99.2	262.4
双层底不锈钢锅	99.8	228.8
尖底铁炒锅	100.5	218.1
平底陶瓷煎锅	99.3	258.8
耐高温陶瓷砂锅	101.0	324.6

表1中锅底食物面加热温度与水的沸点100℃接近,锅底下面即加热面的温度相差较大,尖底铁炒锅与耐高温陶瓷砂锅的温差106.5℃。造成锅底内外温差的原因是液体沸点的存在,不同锅具温差不同的原因则是由于锅具材料的热传

导能力和不同体量锅具的热容的差异。因此,不能通过直接测定的锅底加热面的温度来判定干烧的发生时刻。

在图1中,干烧发生在阶段B和阶段C的交界,可根据食物加热过程中阶段B到阶段C的温度变化来判定锅具是否发生干烧,即检测锅底温度由阶段B转换到阶段C的时刻。对于正常加热过程这一规律没有问题,但如果开始加热时锅内没有食物或液体,图1中就不会有阶段B。鉴于此,另附加一个锅底加热温度阈值 T_G ,根据表1数据,可设干烧阈值为360℃,一旦达到阈值 T_G ,即判定发生干烧。

2 系统硬件设计

非接触式测温防干烧系统由STM32单片机、MLX90614红外测温、热电偶熄火保护装置、语音报警模块、OLED显示屏幕等5个模块构成。其硬件结构框图如图2所示。

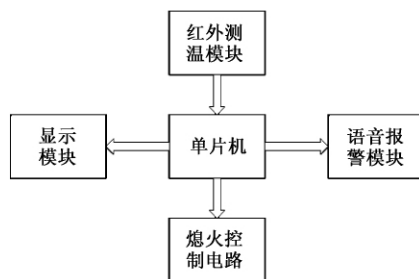


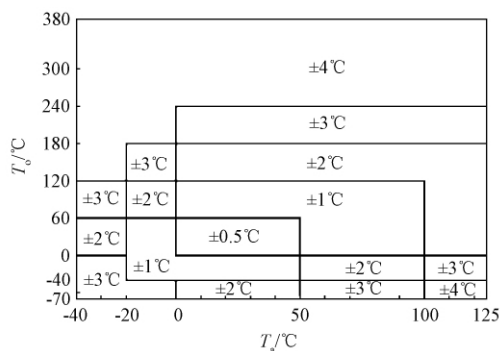
图2 系统硬件结构框图

Fig.2 System hardware block diagram

2.1 红外测温模块

红外测温模块选用的MLX90614传感器为TO-39封装形式的无接触式红外线温度感应芯片,包括1个红外热电堆感应器和1个信号调制器。信号调制器内含17位低噪声放大器ADC和DSP元件,能够进行高精度温度测量。MLX90614有SMBus和PWM两种数字输出方式,默认为SMBus方式。在无特殊设定时,10位的PWM输出方式温度测量范围为20~120℃,解析度0.14℃。MLX90614在-40~125℃环境温度及-70~382.2℃物体温度范围内进行出厂校准。MLX90614测温精度随着环境温度和被测物体温度的不同而变化^[12]。MLX90614传感器测温精度范围如图3所示。

图3中 T_a 为环境温度, T_o 为被测物体温度。可以看出,在0℃以上时,随着被测物体温度的升高,MLX90614传感器测温精度由 ± 0.5 ℃变为 ± 4 ℃,测温精度不断降低。根据表1,干烧时锅

图3 MLX90614 测温精度(T_a , T_o)Fig. 3 Measurement accuracy of MLX90614
(T_a , T_o)

具底部加热面温度在218℃以上,结合设定的360℃干烧阈值上限,对应的MLX90614传感器测温精度为 $\pm 4^\circ\text{C}$ 。

2.2 熄火控制电路

《家用燃气灶具》标准^[1]规定:燃气灶具均需要配备熄火保护装置,灶具熄火保护装置应满足开阀时间不大于15 s,闭阀时间不大于60 s。根据火焰在燃烧时的热、光、离子等特征,目前有热电偶、光敏和离子等火焰检查方式^[13],热电偶常用于开放式环境燃烧的火焰检查,如燃气灶具;离子检测常用于密闭式环境燃烧的火焰检查,如燃气热水器。不管是哪种火焰检测方式,在火焰均匀燃烧时都会形成稳定电流回路来保持供气通路中的电磁阀门打开。一旦灶具熄火,不管是意外事件还是正常关闭,离子或光电火焰检测方式会立即失去电磁阀电流回路,由于热电偶本身热容的存在,会在环境空气的冷却下,热电偶产生的电势逐步降低而失去电流回路,这个过程只有几秒钟,失去电流回路后,电磁阀会在弹簧的作用下关闭供气通路,从而防止燃气泄漏。

为了独立于燃气灶具的熄火保护装置,本系统的防干烧熄火控制回路通过在电磁阀驱动回路中串行接入一个小型信号继电器的常闭开关来实现。

2.3 语音报警模块和显示模块

考虑到语音报警时语音时长较短,选用能存储120 s语音信号的ISD4002-120芯片来录制语音报警信息。语音输出选用音乐蜂鸣器。

显示模块采用OLED屏幕,可视尺寸27 mm×26 mm,分辨率为128×64点阵,工作电压为3.3 V。屏幕不需要高压,功耗较低。

灶具防干烧系统由于电池供电,其主要目的是在干烧发生时切断燃气通路,为延长干电池供电时间,语音报警模块和显示作为辅助可选模块。

3 软件设计

3.1 单片机工作流程

单片机系统由灶具打火开关启动,初始化后进入温度监控模块,监控模块判定锅具干烧后向串接在燃气通路电磁阀驱动回路中的小型信号继电器发出控制信号,通过电磁阀切断供气通路,之后通过OLED屏幕显示干烧时最高温度,并通过语音报警模块播放预置声音。单片机程序流程如图4所示。

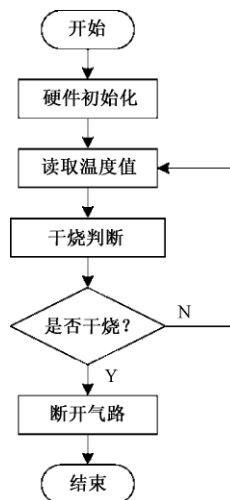


图4 单片机程序流程图

Fig. 4 Flow chart of the microcontroller program

3.2 自适应干烧判定算法

实际温度与测量温度如图5所示。实测中传感器测得锅底温度会有偏差,如图5中实线所示。直接用实测温度难以确定干烧时刻。

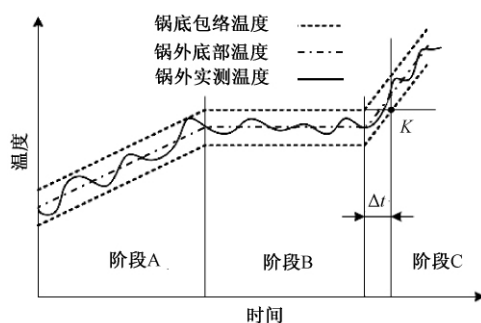


图5 锅底实测温度与实际温度关系图

Fig. 5 The measurement and actual temperature
of the pot bottom

用每次采样得到的温度值进行加权平均得到温度值 T_w ,再用新测到温度值逐步修改该平均值。

$$D_{CD} \leftarrow T_N - T_w;$$

$$T_w \leftarrow T_w + \delta \times D_{CD},$$

式中: T_N 为新测到的温度值; D_{CD} 为本次测量的温度值; δ 是介于 0 和 1 之间的因子,用以控制新的样本对加权平均值的影响。经测试, δ 取为 1/8 或 1/16 时效果较好。

通过以上算法,可以滤掉直接测到的温度值的波动,在此基础上,给定一个 10 ℃ 的温度区间,形成图 5 虚线所示的包络线,当阶段 B 的上包络线与阶段 C 的下包络线相等时,即交点 K 处,判定干烧发生,此时,距阶段 B 结束的时间为 Δt 。

3.3 传感器清洁

本系统采用非接触式红外传感器来实时锅底的温度检测,当红外传感器窗口被意外遮挡时,测到的温度值是遮挡物的温度。显然,该温度值接近室温。还有一种情况,在灶具上没有锅具,燃气空烧时也测不到正常的加热温度。检测到这两种情况时,系统设置 5 min 定时,并提示传感器清洁,定时到后如没有得到人工干预则自动关闭燃气通路。

4 系统测试

对表 1 所用 5 种锅具加水进行大火加热测试,得到如表 2 所示断气温度。

表 2 不同锅具大火烧水时切断燃气时锅底温度
Tab.2 Different cut-off temperatures of pot bottom when boiling water with big fire

锅具类型	锅底加热面/℃	干烧升温/℃
单层底不锈钢锅	285.5	23.1
双层底不锈钢锅	256.3	27.5
尖底铁炒锅	247.2	29.1
平底陶瓷煎锅	286.4	27.6
耐高温陶瓷砂锅	352.5	27.9

由表 2 可以看出,干烧时升温较阶段 B 加热时的恒温高出 30 ℃ 以内会自动切断燃气。

观察锅内水被烧干到切断燃气,单层底不锈钢锅用时 2 s,耐高温陶瓷砂锅用时 13 s,其它锅具在 5 s 左右。分析原因,应该是不同锅底的热容不同,耐高温陶瓷砂锅热容最大,所以用时最长。

几种锅具自动断火没有对锅底造成干烧损伤,在清理锅底水垢时也没有形成死垢,由此可以看出,对以上几种被测锅具,防干烧系统效果良好。

5 结论

(1) 采用 MLX90614 测试模块和 STM32 单片机,设计了非接触式红外测温灶具防干烧系统。通过串行接入灶具热电偶回路的开关电路,能在干烧即将发生时快速切断燃气供气,防止锅具干

烧事故。

(2) 通过自适应干烧判定算法,对红外传感器实时测温的波动进行过滤,解决了实时测温值波动造成的干烧误判。

(3) 为避免传感器被意外遮掩造成温度监测失效,在灶具打火时刻设置定时器,如锅具在定时结束仍未达到规定阈值温度,系统会报警提醒使用者清理传感器灶具窗口表面,该报警信号同样适用于灶具空烧。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 家用燃气灶具: GB 16410-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] 张鹏. 防干烧过热保护在大火力家用燃气灶上的应用综述和开发研究 [J]. 电器, 2012 (S1): 541-545.
- [3] 宁波方太厨具有限公司. 一种防止锅具干烧的无线测温装置及其工作方法: CN105784155A [P]. 2016-07-20.
- [4] 王琼. 无源无线声表面波温度传感器的设计 [D]. 杭州: 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院, 2011: 6-9.
- [5] 蒋军. 一种非接触式红外通讯电路设计与实现 [J]. 微处理机, 2016(2): 86-89.
- [6] 谷红伟, 李瑛, 许文海, 等. 露天煤垛内部高温非接触式红外测量方法 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (S1): 123-129.
- [7] 李晓媛, 孟昕元, 苏星, 等. 基于 HKG-07A 红外脉搏传感器的智能睡眠唤醒仪 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(3): 30-33.
- [8] 王佳. 基于 MLX90615 和 STM32 的多点红外温度测量系统设计 [J]. 现代电子技术, 2013, 36(14): 146-148, 151.
- [9] 张恒艳, 谢文博, 赵阳, 等. 基于观测器不确定 T-S 模糊系统的跟踪控制 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 15-20.
- [10] 郑贵林, 刘丽莎. 基于 MLX90614 的非接触式测温仪 [J]. 自动化与仪表, 2014(10): 12-15.
- [11] 邓万字, 李力, 牛慧娟, 等. 基于 Spark 的并行极速神经网络 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 47-52.
- [12] MELEXIS. MLX90614 family Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39 [EB/OL]. (2015-06-29) [2017-03-20]. <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/data-sheets/mlx90614>.
- [13] 王宇. 燃气灶火焰检测方式探讨 [J]. 煤气与热力, 2013, 33(2): 25-27.

Design of a Cooker Anti-overheating System Based on Non-contact Infrared Temperature Measurement

LI Yifeng, MAO Xiaobo, YANG Yihang, ZHU Feng

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

Abstract: In order to prevent the serious safety problem caused by the dry pot burning and stove explosion and firing, an anti-overheating system was designed. The system of infrared temperature sensor MLX90614 on the bottom of the pot was used to realize the non-contact real-time temperature monitoring. The real-time temperature data was collected and processed by the STM32 microcontroller and SMBus. When the temperature of the bottom of the boiler was beyond the normal heating range, the temperature monitoring module could send a voice alarm. When the threshold value of the dry burning temperature was reached, the gas circuit could be cut off by the control circuit serially connected in the thermocouple temperature detection circuit. Experimental results showed that the proposed system could cut off the gas path once the preset temperature reached and prevent the dry pot burning effectively.

Key words: non contact; infrared temperature measurement; cooker; anti overheating

(上接第 17 页)

Automatic Recognition System of Driver's License Based on Local Features

MA Ling^{1,2}, JIANG Huiqin^{1,2}, LIU Yumin^{2,3}

(1. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Digital Medical Image Technique Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. Business School, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to meet the practical requirements of automatic application and renewal of driver's license, a high speed system for automatic recognition of driver's license was designed and implemented. The hardware was designed to capture the image of the driver's license that contained the smallest identifiable features. Because of the complex background such as the shadow line and so on in the driver's license images, the existing recognition algorithms had the low recognition accuracy, universality and robustness problems. This paper first solved the segmentation difficulties for uneven illumination, noise, tilt and shadow line character by combined adaptive binarization and morphological processing. Then, the Blob analysis was used to extract the important local features of the driver's license, and the recognition accuracy was further improved by using the prior information and the correlation matching algorithm. The experimental results showed that not only the false recognition rate was 0, but also the practical products was developed, and the better social effects were achieved.

Key words: texture elimination; binarization; image segmentation; blob analysis; character recognition

基于发育网络的人脸朝向识别研究

王东署, 谭达佩, 韦晓琴

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对人脸识别中人脸的朝向、位置以及背景光线不固定的特点, 提出了一种基于发育网络的人脸朝向识别新方法. 对图像进行处理后发现人眼的特征非常突出, 故选择眼睛的位置作为人脸朝向的特征向量, 利用发育网络模型对不同背景光线图像中人脸的朝向进行识别. 通过和其它方法的测试结果对比, 该方法可以有效地解决不同光照条件下人脸朝向识别问题, 并具有快速、稳定、高效的特点, 且识别率高达 100%.

关键词: 发育网络; 人脸朝向识别; 光线背景; 特征向量; 识别率

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.023

0 引言

在人脸识别研究中, 鉴于现实情况的要求, 主要是研究人脸正面模式, 人脸正面的意思是指在拍摄过程中人脸一直正对着摄像机. 但在采集样本图像时, 由于人脸的朝向是变化的, 光线背景也是各式各样的, 所以其最终获得的特征向量以及图像所包含的信息也会有变化, 这给人脸识别算法提高了难度. 在人脸检测时可以对不同朝向的人脸图像进行分类, 这样做可以缩小人脸识别算法中的搜索空间^[1].

在人脸朝向识别的研究中, 已有各种不同的方法. 文献[2]提出一种基于中心轮廓的 3D 人脸姿态估计算法, 定义了一个用于评价脸部轮廓的客观函数, 并利用 Hough 变换来搜索参数空间中的对称平面, 可有效地应用于人脸朝向估计. 文献[3]提出一种由粗到细的人脸姿态估计框架, 在粗细层上分别利用单位圆和三维球体建立流形拓扑模型, 该方法在人脸朝向识别上表现优越. 文献[4]提出一个分层时态图形化模型, 可以估计连续头部姿态角的人脸, 适应任何脸部分类任务. 文献[5]提出一个新的基于图像的连续人脸姿态估计嵌入方案, 利用稀疏编码方案对脸部特征和姿态标签进行线性嵌入.

目前国内研究中较有代表性的有: 陈锐等^[6]提出一种在相对自然的环境条件下进行人脸朝向方向分析的算法, 并基于摄像头来粗略和精细地分析朝向. 张彤等^[7]利用 BP 神经网络对人脸的朝向进行识别, 能达到一定的识别率. 谭乐平等^[8]提出基于 LVQ 神经网络的人脸朝向识别方法, 利用图像的二值信息作为网络的输入, 识别率高达 90% 以上. 朱宇鑫等^[9]将概率神经网络 (PNN) 用于人脸朝向识别, 结果表明 PNN 在人脸朝向识别方面表现优异. 然而以上利用神经网络来进行人脸朝向识别的研究都未考虑在不同光照条件下对人脸朝向进行识别. 目前仅有朱宇鑫^[10]研究了基于神经网络的不同光线背景下人脸朝向识别, 识别率不理想, 鲁棒性以及对环境适应能力较弱.

为了有效区分人脸的朝向, 笔者提出一种基于发育网络的人脸朝向识别新方法. 该方法旨在创建发育网络, 选择眼睛的位置信息作为特征向量输入网络, 对人脸朝向进行识别.

1 发育网络

1.1 发育网络模型

2001 年首次提出自主心智发育的概念^[11]. 笔者采用发育网络^[12]展开研究. 模型主要由 X 、

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174085)

作者简介: 王东署(1973—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机器人自主发育研究, E-mail: wangdongshu@zzu.edu.cn.

Y、Z 3 个区域构成,具体结构如图 1 所示.

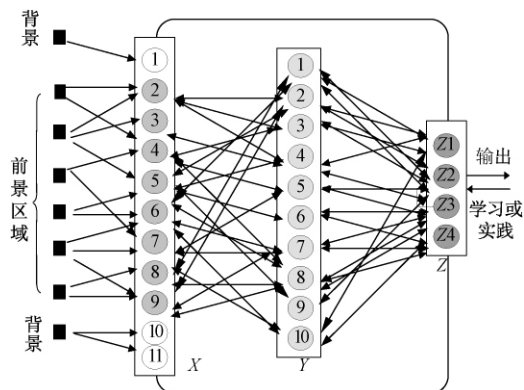


图 1 发育网络模型结构图

Fig. 1 The structure diagram of developmental network model

1.2 发育网络算法

发育网络算法^[13]是以叶成分分析方法(lobe component analysis, LCA)为基础的.

(1) 当 $t=0$ 时,对于网络 A 中所有的区域,初始化网络的自适应部分 N 和神经元的响应向量 r ,其中: $A = \{X, Y, Z\}$; $N = (V, G)$, V 和 G 分别是神经元的突触权值和年龄.

(2) 当 $t=1, 2, \dots$ 时,对于网络 A 中所有的区域,反复地执行如下两个步骤:

①利用算法函数 f 计算并更新 N 和 r

$$(r', N') = f(b, t, N), \quad (1)$$

式中: b (bottom-up) 是自下而上的输入;而 t (top-down) 是自上而下的输入.

②对于网络 $A = \{X, Y, Z\}$ 中所有的区域,进行如下的更新:

$$N \leftarrow N' \quad r \leftarrow r'$$

对于网络 $A = \{X, Y, Z\}$ 中所有区域的神经元都有自身的权值向量 $v = (v_b, v_t)$, 可用于计算响应值,计算公式如下:

$$r(v_b, b, v_t, t) = \frac{v_b}{\|v_b\|} \cdot \frac{b}{\|b\|} + \frac{v_t}{\|v_t\|} \cdot \frac{t}{\|t\|} = \dot{v} \cdot \dot{p}, \quad (2)$$

式中: v_b 是自下而上的权值; v_t 是自上而下的权值; \dot{v} 是权值向量 $v = (v_b, v_t)$ 经过归一化后的单位向量; \dot{p} 是输入向量 $p = (b, t)$ 经过归一化后的单位向量. 内积可以衡量 \dot{p} 和 \dot{v} 相似的程度,也就是匹配程度,内积得到的数值位于 $[-1, 1]$ 之间.

获胜神经元 j 的位置可按式计算:

$$j = \arg \max_{1 \leq i \leq c} r(v_{bi}, b, v_{ti}, t), \quad (3)$$

式中: j 表示被激活的神经元,其连接权值按如下公式更新:

$$v_j \leftarrow \omega_1(n_j) v_j + \omega_2(n_j) y_j \dot{p}. \quad (4)$$

式中: $\omega_2(n_j)$ 和 $\omega_1(n_j)$ 分别是学习率和保持率; y_j 是神经元 j 被激活后重置的响应向量; n 是神经元的激活年龄; $\omega_1(n_j) + \omega_2(n_j) = 1$; $\omega_2(n_j) = 1/n_j$. \dot{p} 的采样均值由如下公式计算:

$$v_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_j} \dot{p}(t_i), \quad (5)$$

式中: t_i 为激活时间,获胜神经元执行 $n_j \leftarrow (n_j + 1)$.

2 特征值提取

2.1 试验样本选择

笔者选择了 5 种不同朝向人脸图像样本, 5 种朝向分别表示为左边、左前、正前、右前和右边. 这些图像样本有各种不同的光线背景,如图 2 所示.

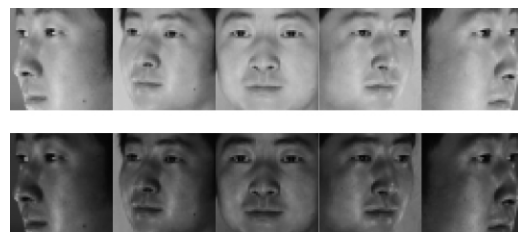


图 2 5 种不同朝向图像

Fig. 2 Five kinds of different orientation images

2.2 特征值提取

利用 Matlab 的函数将图像转化为 $0 \sim 1$ 矩阵,通过观察发现人眼的特征非常突出,其数据是最多的,所以选取眼睛的位置作为特征向量. 首先将图像横向划分为 6 个部分,纵向划分为 8 个部分,如图 3 所示. 然后将划分好的图像转化为 6×8 的 $0 \sim 1$ 矩阵,对其做边缘检测可发现眼睛的位置就在矩阵横向的第二部分,并将该部分 8 个子矩阵的数据进行求和得到一个 8 维的特征向量输入网络^[14]. 考虑到某些图像不规范,眼睛位置不在横向第二部分,故而先采用人眼检测方法^[15]找出眼睛所在位置,再用离散程度分析法^[16]计算该位置眼睛数据的平均值和离散程度,根据这两个数值的大小选择眼睛所在位置最接近的横向部分再按前文方法计算特征值.

3 试验和结果分析

3.1 试验设计

通过上文对发育网络和特征值提取的介绍,笔者设计了相应的试验过程,如图 4 所示.

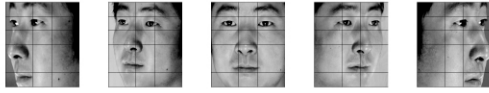


图3 图像的划分

Fig.3 The division of images

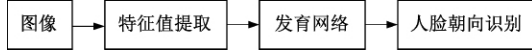


图4 试验结构框图

Fig.4 The diagram of structure

3.1.1 网络的输入和输出模式设计

对于给出的人脸朝向试验样本,图像中人脸的朝向分别是左边、左前、正前、右前和右边.发育网络的输入就是提取的特征值,即 X 层的值为特征值,输出到 Y 层.由上文可知特征向量是一个 8×1 的行向量,即 X 层的维数为8.图像样本只有5种朝向,可以设置输出的形式为1、2、3、4、5,分别与左边、左前、正前、右前和右边相对应.

3.1.2 网络设置

(1) 用 Matlab 编程实现发育网络的创建, X 层作为输入结点.

(2) Y 、 Z 层神经元的数量分别设置为16个和5个. Y 层神经元的数量可以任意改变,通过改变 Y 层神经元的数量找出最优的网络参数.因为该试验的图像样本中只有5种朝向,所以 Z 层神经元的数量固定为5个.

(3) 初始化设置: X 、 Y 、 Z 层的输入都设置为0,各层之间的连接权值都设置为0,网络中所有神经元的年龄全部设置为0,令匹配度的门限值为0.9.可以改变匹配度的门限值来找出最优的网络参数.

(4) 试验图库:笔者采集10个人不同朝向、光照的150张图像,选取其中50张光照相同而朝向不同的图像作为训练样本,其余100张图像作为测试样本.

3.1.3 网络训练和测试

训练过程中 Z 层一直受外界指导和监督,如图5所示.首先对图像进行特征提取,得到特征值作为 X 层的值输出到 Y 层. X 层输出 b 到 Y 层,而 Y 层输出 t 到 Z 层.由公式(2), b 和 t 分别与 X 、 Y 层和 Y 、 Z 层之间的连接权值相乘再相加可得响应向量 r ,然后找出响应值最大的位置 j ,激活相应位置的神经元,即 $r_j = 1$,其它位置的神经元响应值都置为0,并更新被激活神经元 j 的连接权值,年龄增加一个单位值.

测试过程中各层之间的连接权值固定不变,

网络处于被“冻结”状态,如图6所示.

图像经过特征提取后得到特征向量赋予 X , X 层的值分别与 Y 层神经元的权值相乘得到响应值,响应值最大的神经元获胜,权值不更新. Y 到 Z 类似于 X 到 Y 的做法, Z 层中所有获胜神经元的位置与1、2、3、4、5对应,通过输出与目标的匹配结果来判断识别率.

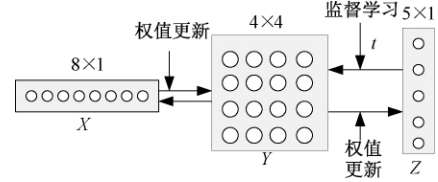


图5 训练图

Fig.5 The diagram of training

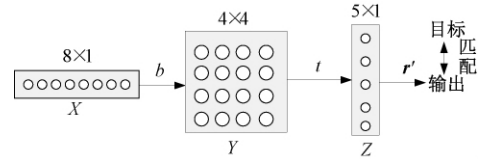


图6 测试图

Fig.6 The diagram of testv

3.2 结果分析

3.2.1 试验结果

笔者通过设置网络参数,进行了大量的试验,以下列出其中一个测试结果.利用上文笔者设置的试验图库选取训练集和测试集,图像为 i_j 形式, i 表示人, j 表示人脸的5种朝向.部分测试集为:2_4 1_1 3_2 8_5 7_2 4_3 9_3 2_5 2_1 5_4 6_5 9_2 8_1 2_3 6_2 9_1 1_4 10_5 8_2 10_1 5_3 6_4 8_3 3_5 7_4. 试验设置的网络参数是: Y 层神经元个数为16,匹配度门限值为0.9,网络训练次数为5.试验得到的结果为:ans = 4 1 2 5 2 3 3 5 1 4 5 2 1 3 2 1 4 5 2 1 3 4 3 5 4.

由结果可知,识别没有出现错误,识别率为100%.因此在网络参数选择合适的情况下,任意运行程序,每次运行得到的识别率都能达到100%.算法模型中的参数主要有匹配度门限值和 Y 层神经元的数目, Y 层不同的神经元个数和匹配度门限值对识别结果的影响如表1所示.

由表1可以发现,当 Y 层神经元个数较少以及匹配度门限值较低时,识别率偏低.当 Y 层神经元个数少于朝向个数,训练时某个神经元要兼顾学习至少两种以上的朝向特征,结果两种以上的朝向特征就会共同占有该神经元,测试时两种以上的朝向特征使该神经元被激活,然而该神经元未能识别是哪一种朝向,只能按训练时的先后

顺序指定输出的朝向,从而导致识别出现错误.当匹配度门限值偏低时,两个朝向特征本不相似,但是很容易越过门限值的门槛,使得 Y 层神经元判断错误,致使识别率偏低.门限值为1,神经元个数为5时,由于门槛高,神经元数目少,以致识别出现混乱.可见,合理设置神经元个数和匹配度门限值,才能取得最佳结果.笔者通过试验验证了训练次数对笔者识别率没有影响.

表1 识别结果

Tab.1 The results of recognition %					
Y层神经元个数	匹配度门限值				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1×1	20	20	20	20	20
2×2	60	80	80	80	60
1×5	60	100	100	100	60
3×3	60	100	100	100	100
4×4	60	100	100	100	100

为了验证图像形状对特征的稳定性以及笔者方法对其它数据库的识别效果,笔者选用CMU PIE数据库和MIT人脸库的部分图像进行测试. PIE人脸库采集68个人不同姿态、光照的4万多张图像,而MIT数据库包含16个人不同姿态、光照和大小的2 593张图像.从这2个数据库中各选择680张5种不同朝向的图像作为测试集,部分图像分别如图7(a)、(b)所示.通过试验可得 X 到 Y 的权重,如图8所示.



图7 不同姿态和光照的图像

Fig.7 Images of different pose and illumination

图8 X 到 Y 的权重Fig.8 Weights from X to Y

从图8可知,由两组不同规范的图片得到的特征只有5种,这说明人眼的位置在水平方向上倾斜较小角度不会影响结果,因为眼睛部位约在图片的1/6到1/3处.试验显示,对PIE和MIT数据库测试所得结果相同,识别率为100%,与笔者采集图像进行试验所得结果一致.

3.2.2 4种方法识别效果的对比

为了更好地体现识别的效果,选择笔者采集的150张图像作为训练集,从CMU PIE和MIT人

脸库中各选择680张5种不同朝向的图像作为测试集.使用笔者特征提取方法,利用BP、LVQ和PNN神经网络与发育网络的识别效果进行对比,图9为各网络参数对识别率的影响示意图.

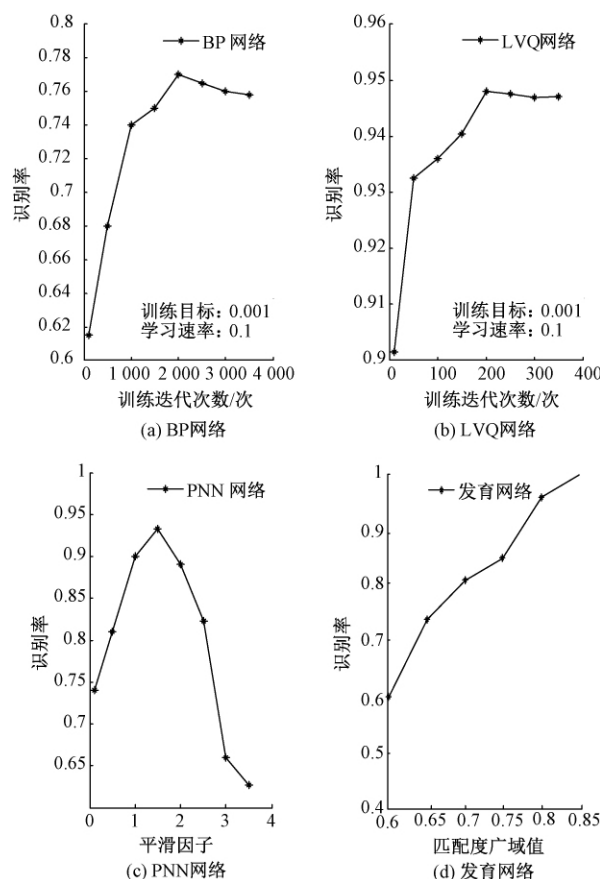


图9 网络参数对识别率的影响

Fig.9 Effect of network parameter on recognition rate

由图9可得出各个网络的最优参数: BP网络训练迭代次数为2 000; LVQ网络训练迭代次数为200; BP、LVQ的训练目标和学习速率都分别为0.001、0.1.而PNN只有一个参数—平滑因子,其最优值为1.5.每个网络都选择最优参数进行试验,每种方法都运行15次,结果见表2.

表2 4种方法识别率的对比

Tab.2 The comparison of recognition rate for four

方法	最小值	最大值	平均值
BP神经网络	70.15	85.59	76.32
LVQ神经网络	92.35	97.94	94.12
PNN神经网络	90.44	96.00	93.09
发育网络	100.00	100.00	100.00

发育网络通过训练学习将人脸朝向的特征信息存储在神经元的权值,是对知识的记忆;测试的时候,根据输入与已学特征的匹配度来判断正误,输出无需期望值作比较,在线学习.相对于以比

较、聚类、统计方法为原理的神经网络,发育网络的准确性高,鲁棒性好,容错力强。

4 结论

笔者模拟了人类大脑发育的功能以及大脑对物体的识别能力,提出了基于发育网络的人脸朝向识别新方法。试验结果表明,发育网络不仅能很好地学习物体的特征,而且还能很好地识别不同光照条件下的人脸朝向。网络的鲁棒性以及对环境适应能力非常强,是其它网络无法比拟的。本文中人脸朝向的分类较少,增加不同人脸朝向将是未来的研究方向,应引起研究者的关注。

参考文献:

- [1] 王蒙军. 人脸朝向识别的脉冲耦合神经网络分析 [C] // 天津市生物医学工程学会第三十二届学术年会论文集. 天津: 生物医学工程与临床出版社, 2012: 40 - 40.
- [2] LI D Q, PEDRYCZ W. A central profile-based 3D face pose estimation [J]. Pattern recognition, 2014, 47(2): 525 - 534.
- [3] PENG X, HUANG J Z, HU Q, et al. From circle to 3-sphere: head pose estimation by instance parameterization [J]. Computer vision and image understanding, 2015(136): 92 - 102.
- [4] DEMIRKUS M, PRECUP D, CLARK J J, et al. Hierarchical temporal graphical model for head pose estimation and subsequent attribute classification in real-world videos [J]. Computer vision and image understanding, 2015(136): 128 - 145.
- [5] DORNAIKA F, CHAHLA C, KHATTAR F, et al. Discriminant sparse label-sensitive embedding: application to image-based face pose estimation [J]. Engineering applications of artificial intelligence, 2016(50): 168 - 176.
- [6] 陈锐, 李辉, 侯义斌, 等. 由人脸朝向驱动的多方向投影交互系统 [J]. 小型微型计算机系统, 2007, 28(4): 706 - 709.
- [7] 张彤, 卢雯雯, 肖南峰. 基于 BP 网络的人脸朝向识别方法 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2010, 24(6): 62 - 65.
- [8] 谭乐平, 文军. 基于 LVQ 神经网络的人脸朝向识别方法 [J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2012, 30(4): 387 - 389.
- [9] 朱宇鑫, 顾军, 刘晨思. 基于概率神经网络(PNN)的人脸朝向识别 [J]. 科技风, 2014, 63(7): 80 - 81.
- [10] 朱宇鑫. 基于神经网络的人脸朝向识别问题研究 [D]. 苏州: 苏州大学机电学院, 2014.
- [11] WENG J Y, MCMLELLAND J, PENTLAND A, et al. Autonomous mental development by robots and animals [J]. Science, 2001, 291(5504): 599 - 600.
- [12] WENG J Y. Natural and Artificial Intelligence: introduction to computation brain-mind [M]. Michigan: BMI Press, 2012.
- [13] 蔡金收, 陈铁军, 郭丽. 一种基于投票极限学习机的人脸识别混合算法 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 37 - 41.
- [14] 史峰, 王小川, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 30 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [15] 尹方平. 复杂背景下的人眼检测方法 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(10): 225 - 228.
- [16] 刘昊, 方雯逸. 基于 BP 神经网络的人脸朝向分类的新思路 [J]. 计算机科学, 2012, 39(11A): 366 - 369.

Study of Face Orientation Recognition Based on Development Network

WANG Dongshu, TAN Dapei, WEI Xiaoqin

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

Abstract: Based on the characteristic of face orientation, position and the light background in face recognition, a new method of face orientation recognition based on development network is proposed. The characteristic of human's eye was very prominent, so the position of eyes was chosen as the face orientation feature vector. And the development network model was used to recognize human's face orientation in the different light background images. The result showed that this method could effectively solve the difficult problem of face orientation recognition under varying illumination conditions by comparing with the test results of other methods, which was fast, stable and effective. The recognition rate was as high as 100%.

Key words: development network; face orientation recognition; light background; feature vector; recognition rate

文章编号: 1671-6833(2017)05-0028-04

多传感器信息融合在焊接质量控制中的应用

刘广瑞, 周文博, 田 欣, 郭珂甫

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 利用 BP 神经网络, 将电弧传感器和超声波传感器所获观测信息以及焊接电流、焊接速度、焊缝坡口等焊接参数信息进行有效融合, 得到焊缝熔深预测模型。为了对焊缝熔深进行精确控制, 结合传统 PID 控制器与模糊控制器的优点, 设计了参数自调整模糊 PID 控制器, 仿真结果表明: 建立的焊缝熔深预测模型能够实时、快速、准确地测量得到焊缝熔深信息, 在系统性能各方面参数自调整模糊 PID 控制器相比于传统 PID 控制器有着显著优势。

关键词: 电弧传感; 超声波传感; 信息融合; BP 神经网络; 参数自调整模糊 PID 控制器

中图分类号: TG434.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.025

0 引言

随着自动化、智能化的不断发展, 信息融合越来越多地受到学术界和工业界的广泛关注。多传感器信息融合为机器人在动态的、不确定的或未知环境中的工作提供了一种解决途径。焊接质量控制一直是自动化焊接中的一个重要研究课题。单一传感器无法全面有效地获取焊接过程状态信息, 在焊接过程中使用不同传感器侧面获取焊接状态信息, 通过融合技术将获取的焊接过程状态信息进行融合处理, 获得比单一传感器更加精确地描述焊接过程状态的融合信息^[1]。有很多研究人员已经将多传感器信息融合技术有效地应用到焊接过程中^[2-4]。经研究分析, 影响焊缝熔深的主要因素有焊接电流、焊接速度、焊缝偏差、坡口角度以及焊接材料熔化速率等; 焊接电流、焊缝偏差信息可以利用电弧传感器获取, 焊接材料熔化速率可以利用超声波传感器间接得到。笔者将旋转电弧传感器和超声波传感器获得的观测信息进行融合得到焊缝熔深预测模型, 结合设计的参数自调整模糊 PID 控制器, 能在焊接过程中对焊缝熔深进行实时测量与控制, 以提高焊接质量。

1 电弧传感焊缝偏差测量原理

电弧传感器直接从焊接电弧信号中获取焊缝偏差信息, 结构简单, 实时性好。根据以往研究, 电弧传感器可以分为 3 类: 并列双丝式、旋转式和摆动式。并列双丝式电弧传感器是根据并列的两根焊丝电流或电压的差值确定焊缝左右偏差的大小和方向, 从而实现横向跟踪; 根据两根并列焊丝的电流或电压的和值可确定焊缝的高度偏差, 从而实现纵向跟踪。摆动式和旋转式电弧传感器是根据电弧在工件上扫描时, 焊炬距离工件表面的高度变化引起电弧参数(电流、电压等)的变化, 以此来确定电弧参数与焊缝偏差之间的关系, 从而进行焊缝跟踪。并列双丝式电弧传感对两个焊接参数的一致性要求比较高, 并列双丝须具有良好的绝缘性, 对双丝间距也有严格的要求, 因而使用收到很大的限制。与摆动式电弧传感器相比, 旋转式电弧传感器具有较高的扫描频率和较好的灵敏度, 因此旋转式电弧传感器更适合高效率的焊接作业。潘际銮院士^[5]通过理论分析和试验研究在三个假设的前提下推导出了电弧传感器的动态物理学模型, 给出了关于电弧传感器动态输入输出关系的定量数学描述。

收稿日期: 2016-10-27; 修订日期: 2016-12-26

基金项目: 农业部公益性行业农业科研专项(nyhyzx-005); 河南省科技计划资助项目(1623004100)

作者简介: 刘广瑞(1966—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 从事自动控制系统、机器人、数字化液压等方面的教学和研究工作, E-mail: lgrui2006@163.com.

2 超声波传感焊缝熔深测量原理

目前,超声波传感在焊缝熔深测量的研究中,一般是利用剪切波在焊件内的渡越时间来计算焊缝熔深.电磁声换能器是一种将机械能与电能相互转化的装置,既能发射超声波也能接收超声波.早期的焊缝熔深测量研究使用压电换能器(PZTs),需要利用耦合剂将它与待检工件连接起来,致使应用受到了很大限制.激光脉冲器利用热弹效应或热蚀效应在物体内部或表面产生超声波.由于单个的激光脉冲发射能量小,产生的超声波信号弱,电磁声换能器(EMAT)作为超声波接收装置具有较低的灵敏度,单个激光脉冲已无法满足要求.若将多个激光源叠加照射到工件表面,每一个激光源产生的超声波就会相互作用,在工件内产生一个三维干涉图.每个激光源相当于阵列中的一个阵元,通过改变阵元的位置和发射时间能产生新的三维干涉图,这样就能通过控制阵元的空间和时间达到增强超声波在工件内特定区域振幅的目的.图1为超声波在焊件中传播路线图.

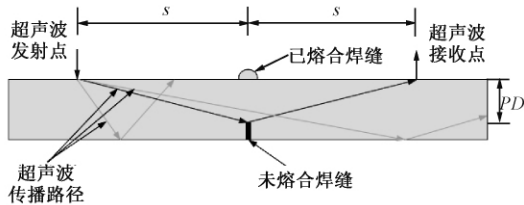


图1 超声波在焊件中传播路线图

Fig.1 Path of the ultrasonic wave

超声波渡越时间法测量焊缝熔深通常采用超声横波或纵波在焊件中的传播时间来计算焊缝深度.若超声波发射点与焊缝的距离等于超声波接收点与焊缝的距离,则超声横波或纵波在焊件中的传播时间可表示为:

$$t = \frac{2\sqrt{s^2 + PD^2}}{C_{S,L}}, \quad (1)$$

焊缝熔深可表示为:

$$PD = \sqrt{\left(\frac{t \cdot C_{S,L}}{2}\right)^2 - s^2}. \quad (2)$$

式中: t 为超声横波或纵波在焊件中的传播时间; PD 为焊缝熔深; s 为超声波发射点与焊缝的距离或超声波接收点与焊缝的距离; $C_{S,L}$ 为超声横波或纵波在焊件中的传播速度. 其中, s 、 $C_{S,L}$ 均为已知量,通过超声波接收器测得超声波在焊件中的传播时间 t ,即可求出焊缝熔深 PD . 此超声波测量

焊缝熔深方法是在焊接过程完成之后进行的,不具实时性,无法对焊接过程中焊缝熔深进行实时控制,但是可以通过测量小时间段内焊缝熔深的变化间接得到焊接材料纵向熔化速率.

3 基于BP神经网络的焊缝熔深预测模型

BP神经网络^[6] (backpropagation neural network, BPNN) 是1986年提出的利用误差反向传播训练算法的神经网络. 该网络一般含有3层或3层以上结构,包括:输入层、隐含层和输出层;输入信息从输入层经隐含层逐层处理,并传向输出层. BP神经网络中多利用S函数的连续可导性作为活化函数,便于引入最小二乘学习算法,使网络输出值与实际值均方误差达到最小.

自动化焊接过程中,通常焊缝熔深是难以实时测量与控制的. 经研究分析,影响焊缝熔深的主要因素有焊接电流 I 、焊接速度 v 、焊缝偏差 e 、坡口角度 α 、焊接材料熔化速率 t_{TOF} 等. 利用BP神经网络建立焊缝熔深预测模型, BP神经网络模型如图2所示. 输入层节点数量 $j=5$; 隐含层两层,每层节点数量 $i=i'=8$; 输出层节点数量 $k=1$. 在网络学习过程中,针对BP网络可能陷入局部最小值,收敛速度慢等缺点,笔者采用改进的BP算法,引入自调整学习率算法和动量梯度下降算法,使用改进算法后的权值修正公式为:

$$W(t+1) = W(t) + 2\alpha\eta(t-1) [(1-\beta_1)D(t) + \beta_1 D(t-1)], \quad (3)$$

式中: $W(t)$ 为 t 时刻权值向量; $\alpha = \text{sign}[D(t)D(t-1)]$; η 为学习率; β_1 为自适应调节系数, $\beta_1 = 1 - [(t-1)/t]^n$, n 为正整数; $D(t) = \partial E / \partial W(t)$ 为 t 时刻的负梯度.

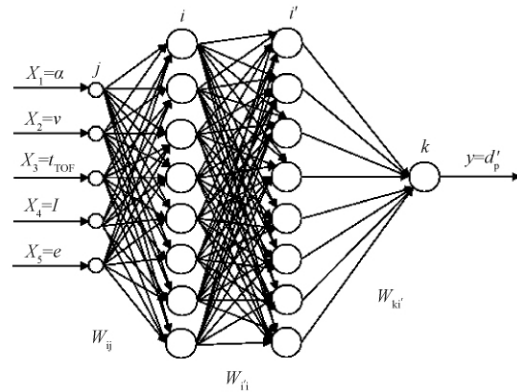


图2 神经网络模型结构

Fig.2 Structure of neural network model

采用改进的BP算法,其目的是使神经网络输出与焊缝熔深目标值之间的均方差 E 最

小,即:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^n (d'_p - d_p)^2 \leq \varepsilon, \quad (4)$$

式中: d'_p 为网络输出值; d_p 为试验测得实际值; p 为样本数; n 为最大样本数; ε 为任意小的正实数,即为给定的允许偏差,笔者取 $\varepsilon = 10^{-3}$. BP 神经网络训练流程如图 3 所示.

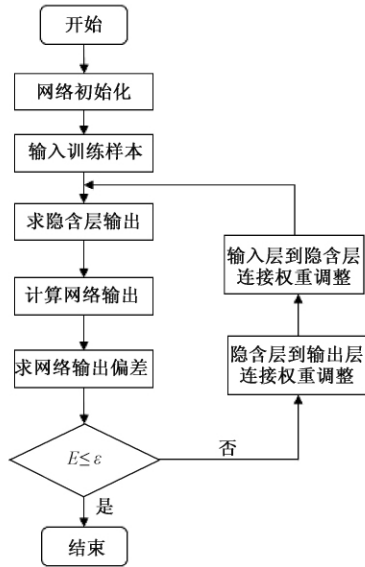


图 3 神经网络训练过程流程图

Fig.3 Flowchart of neural network training process

当隐含层第一层和第二层活化函数均选择 S 函数,输出层活化函数选择比例函数,采用上述改进的 BP 算法对焊缝熔深 BP 神经网络模型训练,训练误差变化曲线如图 4 所示.

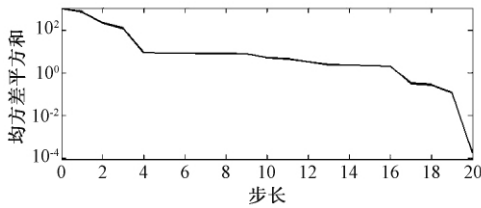


图 4 网络训练误差变化曲线

Fig.4 Error curve

由图 4 可知,经过简单的 20 步就能使网络输出均方误差和达到 10^{-3} 以下,收敛速度能满足使用要求.

4 控制器设计

由于 PID 控制器具有很好的通用性和鲁棒性,因而许多研究人员将 PID 控制器应用于各种控制系统中.但是,经典 PID 控制器的 3 个控制参数(比例系数 K_p 、积分作用系数 K_i 、微分作用系数 K_d) 在控制过程中都是不变的,因而在多变量、非

线性、强耦合系统中的应用有着很大的局限性,很难获得满意的控制效果.笔者的被控对象为焊接机器人,为简化问题,将焊接速度的控制等效为对直流伺服电机的控制,而直流伺服系统是一个非线性强耦合的控制系统,故 PID 控制器无法满足笔者的控制要求.模糊控制器不依赖被控对象的精确数学模型,具有超调小,能够很好地克服非线性带来的影响等优点.笔者将二者结合起来,既能发挥 PID 控制器鲁棒性好的优点,也能发挥模糊控制器适应性强的优点.参数自调整模糊 PID 控制器结构如图 5 所示.

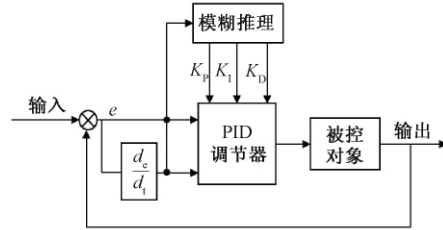


图 5 参数自调整模糊 PID 控制器结构

Fig.5 Structure of self-tuning fuzzy PID controller

模糊控制器的输入参数为焊缝熔深偏差 e 和焊缝熔深偏差变化率 e_c ; 输出参数为 PID 参数修正因子 K_p 、 K_i 、 K_d . 焊缝熔深偏差 e 和焊缝熔深偏差变化率 e_c 的基本论域分别为 $[-0.8, 0.8]$ 和 $[-0.06, 0.06]$; K_p 的基本论域为 $[-50, 50]$, K_i 的基本论域为 $[-20, 20]$, K_d 的基本论域为 $[-35, 35]$. e 的模糊集为{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB}; e_c 的模糊集为{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}; e 和 e_c 的论域为{ $-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$ }; K_p 、 K_i 、 K_d 的论域为{ $-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ }. 焊缝熔深偏差 e 的模糊集选取 8 个元素,区分了 NO 和 PO 是为了提高稳态精度^[7].

根据工程人员实际经验,制定 PID 控制器各参数调整值的模糊控制规则,如表 1、表 2、表 3.

表 1 ΔK_p 的模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table of ΔK_p

e_c	e							
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	NS	NS	NM	NB
NM	PM	PM	PS	PS	NS	NS	NM	NM
NS	PS	PS	PS	PS	NS	NS	NS	NS
O	O	NS	NS	NB	NB	NS	NS	O
PS	NS	NS	NS	NS	PS	PS	PS	PS
PM	NM	NM	NS	NS	PS	PS	PM	PM
PB	NB	NM	NS	NS	PS	PS	PM	PB

表2 ΔK_I 的模糊规则表
Tab.2 Fuzzy rule table of ΔK_I

e_c	e							
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NS	PS	PS	PM	PB
NM	NM	NM	NS	NS	PS	PS	PM	PM
NS	NS	NS	NS	NS	PS	PS	PS	PS
O	O	PS	PS	PB	PB	PS	PS	O
PS	PS	PS	PS	PS	NS	NS	NS	NS
PM	PM	PM	PS	PS	NS	NS	NM	NM
PB	PB	PM	PS	PS	NS	NS	NM	NB

表3 ΔK_D 的模糊规则表
Tab.3 Fuzzy rule table of ΔK_D

e_c	e							
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	PS	PS	PM	PB
NM	NM	NM	NS	NS	PS	PS	PM	PM
NS	NS	NS	NS	NS	PS	PS	PS	PS
O	O	O	O	O	O	O	O	O
PS	PS	PS	PS	PS	NS	NS	NS	NS
PM	PM	PM	PS	PS	NS	NS	NM	NM
PB	PB	PM	PS	PS	NS	NM	NM	NB

根据以上规则建立 56 条控制规则,示例如下:

(1) If (e is NB) and (e_c is NB) then (ΔK_p is PB) (ΔK_I is NB) (ΔK_D is NB);

(2) If (e is NM) and (e_c is NB) then (ΔK_p is PB) (ΔK_I is NB) (ΔK_D is NM);

(3) If (e is NS) and (e_c is NB) then (ΔK_p is PM) (ΔK_I is NM) (ΔK_D is NM);

(55) If (e is PM) and (e_c is PB) then (ΔK_p is PM) (ΔK_I is NM) (ΔK_D is NM);

(56) If (e is PB) and (e_c is PB) then (ΔK_p is PB) (ΔK_I is NB) (ΔK_D is NB).

以直流伺服电机为被控对象,初始值 $K_p = 100, K_I = 30, K_D = 105$, PID 焊缝跟踪控制系统阶跃响应曲线与参数自调整模糊 PID 控制系统阶跃响应曲线的对比如图 6 所示。由图 6 可知,与传统 PID 控制器相比,参数自调整模糊 PID 控制器有很大的优势。使用焊缝跟踪与焊缝熔深控制相结合的方法,在提高焊缝跟踪精度的同时也能很好地提高焊接质量。

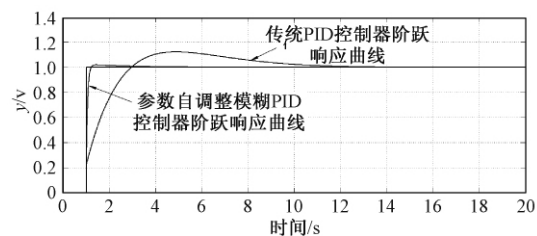


图6 定值 PID 与参数自调整 PID 控制系统阶跃响应对比图

Fig.6 Comparison of traditional PID controller and self-tuning fuzzy PID controller

5 结论

利用 BP 神经网络建立了基于多传感信息融合的焊缝熔深预测模型,精度较高,运算速度快,能很好地完成焊缝熔深在线监测与控制任务。相比与传统 PID 控制器,参数自调整模糊 PID 控制器在提高系统性能方面有着显著的优势。以上研究结果表明,将电弧传感和超声波传感信息融合应用于焊接过程在线监测与控制能有效提高焊接质量。

参考文献:

- [1] 陈善本,陈波,马宏波,等.多传感器信息融合技术在焊接中的应用及展望[J].电焊机,2009,39(1):58-63.
- [2] CAI G R, DU D, TIAN Y, et al. Defect detection of X-ray images of weld using optimized heuristic search based on image information fusion [J]. Transactions of the China welding institution, 2007, 28(2): 29-32.
- [3] CHANG Y L, SU H, LIN B, et al. Spot welding quality fuzzy control system based on multisensor information fusion [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2007, 20(4): 36-39.
- [4] CHEN B, WANG J F, CHEN S B. Prediction of pulsed GTAW penetration status based on BP neural network and D-S evidence theory information fusion [J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2010, 48(1): 83-94.
- [5] 廖宝剑,吴世德,潘际銮.电弧传感器理论模型及信息处理[J].焊接学报,1996,17(4):263-270.
- [6] 鄂加强,左红艳.神经网络模糊推理智能信息融合及其工程应用[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [7] 李世勇.模糊控制[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.

(下转第 38 页)

文章编号: 1671-6833(2017)05-0032-07

基于谱聚类算法的城市充换电站分布决策

张忠会, 刘故帅, 熊剑峰, 刘小宛, 徐高超

(南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 城市充换电站的分布一直是电动汽车推广的关键问题之一. 本文在考虑交通流量、距电源点的距离、地块负荷和城市区块定位4个指标的情况下, 基于谱聚类算法建立了站址分布决策数学模型. 首先对数据进行无量纲化处理, 建立样本空间矩阵 S . 然后, 利用相似矩阵 W 和度矩阵 D 得到矩阵 S 的规格化 Laplace 矩阵, 将其前2个和前3个特征向量分别映射到二维和三维坐标, 观察地块分区情况. 最后, 利用 k-means 得到地块分区的谱系图, 并通过节点压降分析验证算法有效性. 算例采用江西某市实际配电网, 研究表明, 该分布决策方法有一定合理性, 为配电网规划提供了一定的经验.

关键词: 谱聚类算法; 充换电站; Laplace 矩阵; 地块分区; 电压偏移量

中图分类号: TM715

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.022

0 引言

环境保护的压力和化石能源紧缺给电动汽车的发展带来了契机, 2015年7月我国政府提出在2020年完成1.2万座充换电站、480万台充电桩接入需求的配电网建设目标^[1]. 充电设备大规模接入城市配电网, 将会对配电网规划产生不可忽视的影响, 所以, 研究城市充换电站分布决策势在必行.

目前, 已有很多研究城市充换电站分布的成果. 在考虑交通流量因素方面, 文献[2]采用截流选址模型, 提出电动汽车充电需求不是集中在配网节点上, 而是在交通网络中流动; 文献[3]提出了交通满意度模型, 在交通权重距离最小的情况下, 对获得最大交通需求量做了研究. 在城市充换电站规划与配电网规划协同方面, 文献[4]在考虑建设成本的基础上, 同时考虑了系统网损和交通流量, 提出交通流量最大往往不能保证系统网损最小; 文献[5]在选址时考虑了配电网和充电站建设及运行的双重成本, 但是没有将城市配电网进行合理的分区划分. 在研究充电站分布方面, 文献[6]从运营商和用户两者利益出发, 利用 Voronoi 图自动划分充电站服务范围; 文献[7]提出一种两步优化方法, 分别研究了充电需求、地理和配电网的电能质量

因素等综合评定优化方案. 文献[8-9]还考虑了充电耗时成本和用户等待成本, 但是没有考虑城市的用地性质等因素.

笔者首先以交通流量、距电源点的距离、地块负荷和城市区块定位4个指标构成样本空间, 将城市配电网进行合理的划分, 然后根据地块的指标属性进行聚类, 将样本空间的规格化 Laplace 矩阵的前两个和前三个特征向量分别映射到二维和三维坐标中, 用相关系数评估分区效果, 最后通过 k-means 算法给出地块谱系图, 从而得到城市充换电站的分布决策方案.

1 谱聚类算法

谱聚类算法是近年来应用非常广泛的数据分析方法^[10], 给定一组数据 x_1, \dots, x_n , 定义数据 x_i 和 x_j 的相似度为 S_{ij} , 根据样本各自的相似度, 将其分成不同的组, 同组数据之间相似度高, 不同组数据之间相似度低, 当数据量较大时, 构造相似图 G , G 的每个节点对应1个数据点, 当 s_{ij} 大于0或某一阈值 C 时, 将数据 x_i 和 x_j 连接起来, 用权重 s_{ij} 表示连接时边的大小. 将相似度高的数据聚在一起, 如此重复, 直到所有数据聚类完成.

2 谱聚类算法在充换电站分类中的应用

2.1 分类决策指标

决策指标包括交通流量、距电源点的距离、地

收稿日期: 2017-04-16; 修订日期: 2017-05-26

作者简介: 张忠会(1962—), 男, 江西南昌人, 南昌大学教授, 主要研究方向为电力系统自动检测、控制及规划, E-mail: 18979118968@qq.com.

块负荷和城市区块定位4个指标,从不同角度对充换电站分布决策进行全面评估。

(1) 交通流量

为进行交通流量调研,首先对目标区域进行交通小区划分,划分原则:①小区内土地利用性质相似;②小区边界尽量利用主干道作为界线;③小区面积大小适宜,笔者选择 1 km^2 为标准面积。

根据实际调研结果,获得城市道路的交通需求矩阵(O 矩阵),

$$O = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^n f(i), \quad (1)$$

式中: $f(i)$ 表示交通小区 i 在 t 时刻的交通流量。

(2) 距离电源点的距离

距离电源点距离是影响电能质量的重要因素。电动汽车充电负荷集中于配网末端节点时对配网的影响要远大于充电负荷集中分布在电源节点时的影响^[11]。

假设第 k 座充换电站的服务半径为 r , r_{\max}^k 表示地块 i 距离最近的电源点的距离,则 $r_i < r_{\max}^k$ 时,地块 i 由第 k 座充换电站服务,因此,相近的地块将由同一充换电站服务,如图1所示。处于 r_4 中的地块可以选择处于 r_4 中的充换电站,但不可以选择 r_7 中的充换电站。

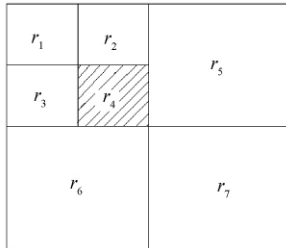


图1 充换电站服务区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of service area for charging and battery swap station

(3) 地块负荷

城市充换电站的规划是配电网规划中的一部分,充换电站的分布需要满足配电网规划的整体性和长期性的要求,所以在布点时,需要考虑配网未来的负荷发展情况,满足城市配网发展的需求^[12]。

本文中地块负荷 P_i 的预测采用空间负荷预测法,在城市中心地区,35 ~ 110 kV 变电站的配电区域较小,且各小地块的负荷密度具有差异性(区域性发展特点较显著),采用平均负荷密度进行变电站的布点是不科学的,按照地块的

用地性质分析用电性质可以较准确地反映电力需求增长的空间分布。功能块的划分应结合负荷密度以道路及河道为界,功能块的命名为 I、II、III…。然后依据不同用地性质,将功能块分为若干地块,地块的命名为 I-01、I-02、…、II-01、II-02、…、III-01、III-02。空间负荷预测公式如下:

$$P_i = \rho \frac{\alpha_k s_i}{100}, \quad (2)$$

式中: α_k 表示用地性质为 k 时单位建筑面积负荷指标, kW/ha; ρ 表示负荷同时率; s_i 表示地块 i 的实际地理面积, km^2 。

(4) 城市区块定位

根据城市规划设计原则,将城市区块划分为8类(即商业、工业、商住、居住、教育、行政、住绿和绿地)作为充换电站分布的划分依据之一。不同用地性质具有不同的规划负荷指标^[13],根据负荷指标制定城市区块指标值如表1所示。

表1 城市区块指标值

Tab.1 Index value of the city block position

区块	商业	工业	商住	居住	教育	行政	住绿	绿地
指标值	9	8	7	6	5	5	3	1

(5) 数据归一化处理

为便于叙述,将第 i 项指标原始数据记为 $\{q_i(n)\}_{n=1}^N$,各项指标原始数据量纲不同,数量级差悬殊,为使其具有可比性,首先对原始数据进行归一化处理。笔者采用 min-max 标准化法,归一化之后数据与原始数据具有相同的数据特性。

$$q'_i(n) = \frac{q_i(n) - \min(q_i(n))}{\max(q_i(n)) - \min(q_i(n))}, \quad (3)$$

式中: $q'_i(n)$ 表示归一化之后的数据; $\max(q_i(n))$ 与 $\min(q_i(n))$ 分别表示第 i 项指标原始数据中的最大值和最小值。

2.2 充换电站分布决策

谱聚类算法从低交通流量、城市区块定位、功能块的预测负荷和距离电源点的距离4个指标衡量地块的亲属程度,将亲属程度最高的合并为一类,如此重复,直到所有地块都归为一类。

(1) 构建 Laplace 矩阵

将归一化处理后的指标数据构成样本空间 S ,然后如公式(4)和(5)所示,构造相似矩阵 W 和度矩阵 D ,由相似矩阵和度矩阵共同得到规格化 Laplace 矩阵,如公式(6)所示。

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j; \\ (S_i - S_j) \times (S_i - S_j)^T & i \neq j, \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_i 为矩阵 S 第 i 行向量; S_j 为矩阵 S 第 j 行向量。

$$D_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^n w_{ij}, & i = j; \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (5)$$

式中: w_{ij} 是矩阵 W 中的元素。

$$L_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ -\frac{w_{ij}}{\sqrt{d_i} \sqrt{d_j}}, & i \neq j, \end{cases} \quad (6)$$

式中: d_i 为度矩阵 D 中的元素; L_{ij} 为规格化 Laplace 矩阵 L 中的元素。

(2) 充换电站分布评价函数

为表征充换电站分布好坏,笔者引入相关系数 R ,

$$R = \frac{\sum_{i < j} (W_{ij} - \bar{W}) \sum_{i < j} ((\tilde{W}_{ij}) - \bar{\tilde{W}})^2}{\sqrt{\sum_{i < j} (W_{ij} - \bar{W})^2 \times \sum_{i < j} ((\tilde{W}_{ij}) - \bar{\tilde{W}})^2}}, \quad (7)$$

式中: W_{ij} 为向量 i 和向量 j 之间的欧式距离矩阵; \tilde{W}_{ij} 为向量 i 和向量 j 之间的相关距离; \bar{W} 和 $\bar{\tilde{W}}$ 分别为矩阵 W 和 \tilde{W} 的平均值。 R 的大小反映聚类效果好坏, R 越接近 1 说明聚类效果越好。

(3) 谱聚类算法分区流程及算法步骤

谱聚类算法应用于变电站分布决策的步骤如下:

a) 考虑低交通流量、城市区块定位、功能块的预测负荷和距离电源点的距离 4 个指标建立指标样本空间;

b) 根据 Euclidean 距离构造样本空间的 Laplace 矩阵;

c) 计算相关系数, 评估充换电站的分布效果;

d) 采用 k-means 算法对特征向量进行聚类, 画出分区谱系图, 得到层次分明的充换电站分布决策。

3 充换电站接入对配电网压降的影响

3.1 模型假设

根据未来中国电动汽车的发展趋势^[14], 电动汽车的类型 k 主要分为私家车、公务车、出租车、公交车等。假设不同类型电动汽车的电池容量、单台充电功率、充电开始时间及其分布函

数、起始荷电状态 (state of charge, SOC) 的分布函数等如表 2 所示, 其中 SOC 分布函数均为正态分布函数。

表 2 不同类型电动汽车参数设定

Tab. 2 Parameter settings for different types of electric vehicles

电动汽车类型	电池容量 / (kW·h)	充电功率 / kW	所占比例	充电开始时间	开始时间分布函数
私家车	40	5	0.84	8:00; 12:00; 18:00	泊松分布; 均匀分布
公务车	40	5	0.12	18:00	均匀分布
出租车	40	8	0.03	01:00; 12:00	泊松分布; 均匀分布
公交车	120	40	0.01	0:00	泊松分布; 均匀分布

在没有约束充换电站分布时, 假设电动汽车不受约束地随机接入配电网的各个节点, 根据以上假设条件, 通过以下步骤可得到电动汽车每天的负荷曲线。

(1) 根据渗透率 ε 获得某城市配电网中电动汽车总数量 $n = \frac{\varepsilon p}{\sum_{k=1}^4 m_k p_k}$, 然后根据《2013 中国汽车产业发展报告》^[15] 的预测可知不同类型电动汽车的占比 m_k , 从而得到类型 k 的电动汽车的数量 $n_k = m_k \times n$ 。

(2) 以 min 为单位, 计算单位时间内充电负荷, $Y_t = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{n_k} p_k$, 其中, p_k 表示第 k 种车型单位时间内的充电功率。

(3) 计算每天充电负荷 $Y = \sum_t Y_t$, 如图 2 所示。

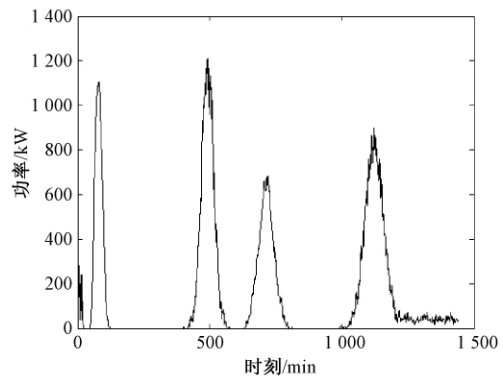


图 2 电动汽车充电负荷曲线

Fig. 2 Charging curves of electric vehicle

3.2 节点压降分析

电动汽车充电负荷接入配电网之后节点电压偏移量 ΔU 为

$$\Delta U = \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_i - U_i^{\text{spec}}}{U_i^{\text{spec}}} \right)^2, \quad (8)$$

式中: U_i^{spec} 表示配网节点 i 的电压期望值; U_i 表示节点 i 实际电压值,采用前推回代法计算节点电压. 配网节点电流与节点电压计算公式如下:

$$i_j^* = \frac{P_j^* - jQ_j^*}{U_j^*} + \sum_m^n I_m^*; \quad (9)$$

$$U_j^* = U_i^* - I_j^* \times Z_{ij}^*, \quad (10)$$

式中: $\sum_m^n I_m^*$ 表示节点 j 注入其下一层节点的电流标么值之和; Z_{ij}^* 表示节点 i, j 之间支路阻抗标么值之和.

电压收敛判据为:

$$\max(|U_n^*(k+1) - U_n^*(k)|) < \varepsilon, \quad (11)$$

式中: k 为当前迭代次数.

4 算例分析

笔者采用江西某市为算例,该市三江水南片区有 220 kV 变电站 1 座,110 kV 变电站 1 座,总变电容量为 230 MVA,10 kV 线路 14 条,线路总长度 110.16 km,2014 年片区总负荷 19.14 MW.

4.1 分区过程分析

结合交通小区分区结果和功能块的划分结果得到三江水南片区地块分区结果,如图 3 所示.



图3 实例地块标号图

Fig.3 Graph labeling of the actual calculation example

由图 3 可知,三江水南片区分为 3 个区,其中 I 区包括 35 个地块,II 区包括 46 个地块,III 区包括 19 个地块. 220 kV 变电站与 110 kV 变电站分别位于 I-13 和 II-23. 以 I 区为例说明谱聚类算法的应用过程.

三江水南 I 区 4 个指标的原始数据如表 3 所示. 笔者采用规格化 Laplace 矩阵,将矩阵的前 2 个和前 3 个特征向量映射到二维和三维空间,同时引入 k-means 算法,清晰地观测地块分区结果,

如图 4 和图 5 所示.

表 3 实例 I 区指标数据

Tab.3 Data indicators of 1st partition of the actual calculation example

编号	交通流量/ (百辆/天)	距离电源点的 距离/km	负荷 /MW	城市区 块定位
I-1	1.49	9	0.47	8
I-2	2.53	9	0.42	8
I-3	1.33	9	0.31	8
I-4	2.01	8	0.43	8
I-5	1.41	9	0.44	8
I-6	2.82	6	0.42	8
I-7	1.13	5	0.42	8
I-8	1.78	5	0.47	8
I-9	5.77	8	0.11	6
I-10	5.32	6	0.14	6
I-11	5.27	5	0.20	6
I-12	7.21	2	0.29	6
I-13	6.18	2	0.25	6
I-14	5.24	9	0.15	6
I-15	4.90	9	0.16	6
I-16	10.31	11	0.52	7
I-17	4.56	8	0.11	6
I-18	4.59	7	0.15	6
I-19	4.64	6	0.18	6
I-20	10.06	12	0.54	7
I-21	11.30	13	0.58	9
I-22	11.53	11	0.59	5
I-23	11.39	12	0.54	9
I-24	11.11	10	0.55	9
I-25	10.35	10	0.58	9
I-26	10.63	9	0.54	3
I-27	11.68	9	0.50	9
I-28	8.30	6	0.46	9
I-29	8.66	6	0.49	9
I-30	8.38	6	0.43	9
I-31	8.77	6	0.47	9
I-32	8.35	4	0.43	9
I-33	8.87	4	0.41	9
I-34	6.46	2	0.27	6
I-35	6.11	2	0.22	6

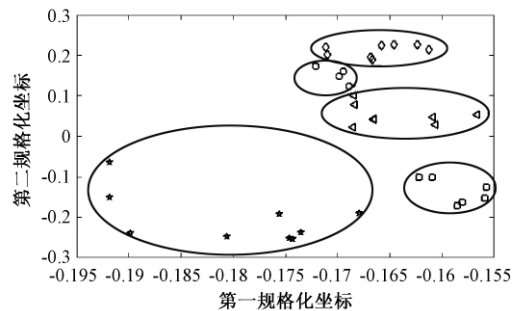


图4 二维特征空间分区聚类结果

Fig.4 Partition results in 2D eigenvector space

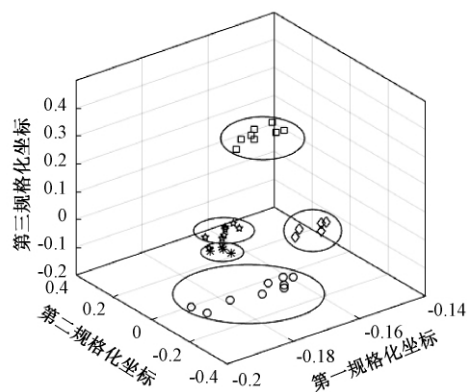


图5 三维特征空间分区聚类结果

Fig.5 Partition results in 3D eigenvector space

从交通流量、城市区块定位、功能块的预测负荷和距离电源点的距离 4 个指标衡量地块的亲属程度,将亲属程度最高的合并为一类,如此重复,直到所有地块都归为一类.分区结果如图 6 所示.

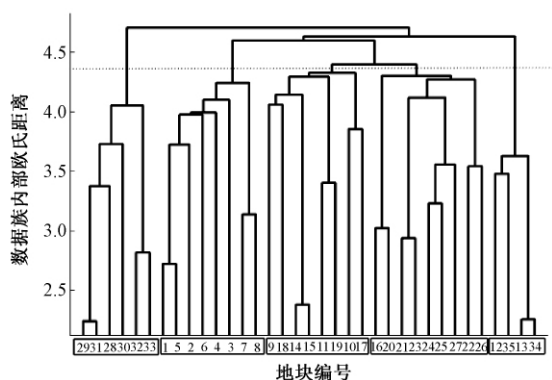


图6 地块分区谱系图

Fig.6 Clusteranalysis dendrogram of parcels

由图 6 可知,通过聚类分析,Ⅰ区 35 个地块划分为 5 个部分,每个部分具有相似的指标特性,由同一座充换电站服务.充换电站分布决策与服务区域划分如图 7 所示.

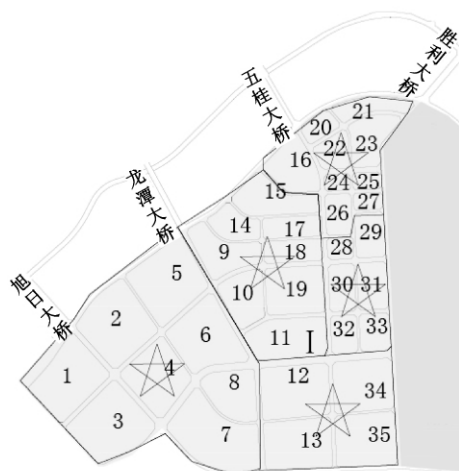


图7 充换电站分布结果及服务区域划分
Fig.7 Results of charging stations location and services division

三江水南Ⅱ区和Ⅲ区计算过程相似,此处省略过程.3 个片区充换电站分布结果如表 4 所示.

表4 分区结果

Tab.4 Results of partition

片区	分区结果	相关系数
Ⅰ区	1-8	0.802 4
	9-11,14,15,17-19	
	16,20-27	
	28-33	
Ⅱ区	12,13,34,35	0.821 8
	1-19	
	20-23;	
	24-26,44-46;	
Ⅲ区	27,32,33,38,39;	0.869 5
	28-31,34-43	
	1-11	
	12-19	

由表 4 可知,三江水南Ⅱ区和Ⅲ区分别由 5 座和 2 座充换电站服务,相关系数均大于 0.8,聚类效果明显.

4.2 Ⅰ区节点压降分析

以三江水南Ⅰ区为例说明优化充换电站分布之后,节点电压的改善情况.该片区 10 kV 主干线 4 条,10 kV 分支线 3 条,其中节点 13 为电源节点,节点拓扑关系如图 8.

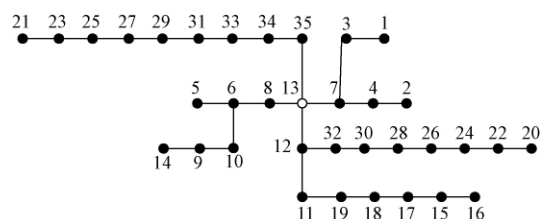


图8 Ⅰ区节点拓扑关系

Fig.8 Topology of bus system of districts one

对于三江水南Ⅰ区,优化充换电站布点之前,电动汽车充电负荷随机接入系统各个节点,采用谱聚类算法得到最优布局之后,电动汽车负荷平均分布在充换电站所在的 5 个节点处,根据公式 (8) 得到优化前后节点电压降落情况如图 9 所示.

由图 9 可知,相比于充换电站优化前,优化后节点压降平均改善率 1.49%;优化前存在 5 个低电压节点,优化后电压下限节点全部得到改善,说明对配电网进行合理划分之后,充换电站布点得到优化,系统节点电压得到明显改善.

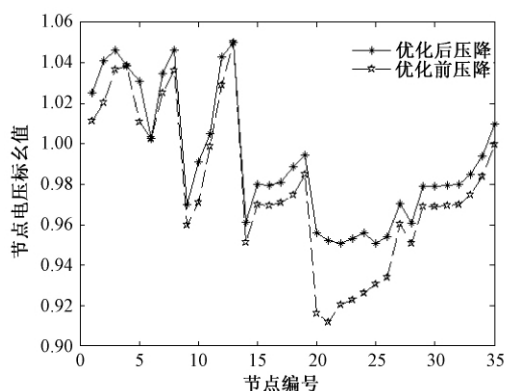


图9 优化前后 I 区节点电压降落情况对比

Fig.9 Compare the voltage drops of before and after optimization by districts one

5 结论

提出一种基于谱聚类算法,考虑多因素的城市充换电站的分布决策方法,得出以下结论:

(1) 提出了从交通流量、距电源点的距离、地块负荷和城市区块定位 4 个指标,多个角度对充换电站的分布决策进行全面评估。

(2) 提出结合地块负荷密度、道路和河流等自然屏障,将城市配电网进行合理划分,通过对配电网的分区,有利于对配电网的结构分析,理清各区块之间的联络关系,从而正确指导电网建设。

(3) 对比传统依据运行人员经验分配充换电站的方法更加全面合理,避免了人为主观因素,为规划人员配置城市充换电站提出有效建议。

(4) 同时考虑交通小区分区和功能块分区,使城市分区划分更加合理。

(5) 采用相关系数来表征区块内部的聚合程度,用电压降落来评价充换电站布点优化结果,验证了算法具有一定可行性。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 配电网建设改造行动计划(2015 - 2020) [EB/OL]. [2015 - 07 - 31]. <http://www.nea.gov.cn>.
- [2] 王辉,王贵斌,赵俊华,等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(13): 63 - 69.

- [3] 刘柏良,黄学良,李军,等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术,2015,39(2): 450 - 456.
- [4] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(9): 10 - 18.
- [5] 陈婷,卫志农,吴霜,等. 考虑电动汽车充电站选址定容的配电网规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(3): 1 - 7.
- [6] GE S, FENG L, LIU H. The planning of electric vehicle charging station based on grid partition method [C] //Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 2726 - 2730.
- [7] 高亚静,郭艳东,李天天. 城市电动汽车充电站两步优化选址方法[J]. 中国电力,2013,46(8): 143 - 147.
- [8] 赵书强,李志伟. 基于差分进化粒子群算法的城市电动汽车充电站最优规划[J]. 华北电力大学学报,2015,42(2): 1 - 7.
- [9] 熊虎,向铁元,祝勇刚,等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化,2013,36(23): 65 - 70.
- [10] 赵国生,牛贞贞,刘永光,等. 基于自适应模糊 C 均值聚类算法的电力负荷特性分类[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(6): 56 - 60.
- [11] 张明霞,田立亭,杨水丽,等. 考虑电动汽车充电负荷空间分布的系统特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(21): 86 - 92.
- [12] 蒋建东,杜耀恒,燕跃豪,等. 基于 PMU 的降价二次状态估算法研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(2): 50 - 54.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50293 - 2014 城市电力规划规范[S]. 北京: 标准出版社,2014.
- [14] 张洪财,胡泽春,宋永华,等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(1): 13 - 20.
- [15] 国务院发展研究中心产业经济研究部,中国汽车工程学会,大众汽车集团(中国). 中国汽车产业发展报告(2013) [R]. 北京: 社会科学文献出版社,2013.

The Application of Spectral Clustering Algorithm to Distributive Decision for Charging and Battery Swap Station

ZHANG Zhonghui, LIU Gushuai, XIONG Jianfeng, LIU Xiaowan, XU Gaochao

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The distribution of charging and battery swap station has always been one of the key problems for the development of electric vehicle. A site location of charging and battery swap station could be represented by a network with traffic flow, the distance from the power source, parcel load, and city block position respectively. Spectral clustering methodology was used to reveal the internal connectivity structure of such a network. First of all, it adopted the min-max standardized method in dimensionless to establish a sample space matrix S . Then, the normalized Laplacian was achieved according to the similarity between matrix W and matrix D . The former two and three feature vector of Laplace matrix were mapped to the 2d and 3d space to observe parcel partition. Finally methodology goes beyond the standard k-means algorithm by instead representing the complete network substructure as a dendrogram and verifies its correctness by analyzing the voltage sags. We include the results of our methodology for a real distribution network in Jiangxi province. Example shows that our methodology has certain rationality and it could be helpful for distribution network planning.

Key words: spectral clustering; charging and battery swap station; laplace matrix; parcel partition; voltage offset

(上接第 31 页)

Multi-sensor Information Fusion Technology in the Measurement of Weld Penetration

LIU Guangrui, ZHOU Wenbo, TIAN Xin, GUO Kefu

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

Abstract: BP neural network for effectively fusioning the information obtained by arc sensor and ultrasonic sensor and information of welding parameters such as welding current, welding speed, welding groove and so on was used to obtain the prediction model of weld penetration depth. Simulation results showed that: the prediction model of weld penetration depth could measure the weld penetration quickly, accurately and in real time. For the precise control of weld penetration, parameters self-tuning fuzzy PID controller was desing, which combined with the advantages of traditional PID controller and fuzzy controller. Smulation results showed that compared with traditional PID controller, parameters self-tuning fuzzy PID controller had a significant advantage in the performance of the system.

Key words: arc sensor; ultrasonic sensor; information fusion; BP neural network; parameters self tuning fuzzy PID controller

文章编号: 1671-6833(2017)05-0039-05

基于粒子群算法的烧结炉系统辨识及神经网络控制

曹 奔, 袁忠于, 刘 洪

(兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 烧结炉在加热过程中, 模型参数易发生变化, 而传统的 PID 控制很难达到理想的控制效果. 本文运用粒子群优化算法辨识烧结炉的数学模型, 针对烧结炉惯性大、时变、大滞后等特点, 采用基于 RBF 神经网络的监督控制, 将 PID 控制与神经网络控制相结合. 当温度或模型参数发生较大变化时, PID 控制起主要作用, 神经网络起调节作用, 补偿 PID 控制的不足. MATLAB 软件仿真结果说明, 该方法能够提高烧结炉的控制精度, 具有一定的实用性.

关键词: 粒子群算法; 系统辨识; 神经网络监督控制; PID 控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.02.022

0 引言

聚四氟乙烯 (PTFE) 被称为“塑料王”, 具有耐酸、耐碱、自润滑性、易加工成型等优异性能, 广泛用于制作机械密封圈等部件^[1]. 各种 PTFE 预成型品经烧结才能成为优良的制品, 烧结过程就是将预成型品加热至晶体熔点 327 °C 以上, 并在此温度下保持一段时间, 使聚合物分子由结晶形转变为无定形^[2]. 炉温调节是烧结过程中的重要环节, 制品的性能很大程度上取决于温度控制的精度.

研究系统的动态特性实质是要建立对象的数学模型, 用数学方法表示各参数之间的关系^[3]. 系统建模方法有机理建模和实验建模两种, 机理建模是根据基本的物理定律建立相应的数学模型. 实验建模分为阶跃响应法、频率法、相关分析法、最小二乘法等. 阶跃响应法试验方法简单, 应用较广, 但不是所有的系统都允许加入阶跃扰动, 而且对扰动幅值也有限制; 频率法计算复杂, 精度较低; 相关分析法需要求解卷积方程, 计算比较困难; 最小二乘法已广泛运用到系统辨识, 但是估计的模型结构是差分方程型式, 不利于系统分析和计算^[4]. 文献[5]采用粒子群算法和最小二乘法混合优化算法对模糊模型参数进行辨识; 文献

[6]采用粒子群算法实现对系统的结构和参数识别. 笔者采用粒子群优化算法辨识系统参数模型, 可以灵活地选择合适的模型结构, 然后利用算法估计出模型参数, 把系统辨识问题转化为参数优化问题^[4].

烧结炉在升温、保温和降温等阶段要求不同, 系统模型参数也随之发生变化. 纯滞后, 时间与温度之间存在非线性关系, 需要对烧结过程采用分段控制^[7-8]. 文献[9]采用模糊自适应 PID 控制烧结炉温度, 但是没有建立模糊规则; 文献[10]采用两个神经网络分别调节 PI 控制器参数, 与传统 PI 控制器相比, 缩短了加热炉响应时间. 笔者针对烧结炉惯性大、时变、大滞后等特点, 采用基于 RBF 神经网络与 PID 相结合的方法, 当对象参数发生变化或出现较大误差时, PID 控制起主导作用, 神经网络起监督调节作用, 使系统快速趋于稳定^[11]. 仿真结果显示, 笔者提出的方法能够提高烧结炉的控制性能.

1 烧结炉模型分析

烧结炉具有大惯性和大滞后性, 根据其特征, 可以总结出烧结炉的经验模型^[7]:

$$G(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)^n} e^{-\tau s} \quad (1)$$

烧结炉装置又是一个具有自平衡能力的对象, 根

收稿日期: 2016-09-30; 修订日期: 2016-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51565025)

通信作者: 袁忠于(1968—), 男, 甘肃兰州人, 兰州交通大学副教授, 主要从事复杂系统建模及智能控制研究.

据烧结炉系统的特征,也可以用等容多阶对象或多容惯性对象作为粒子群算法辨识的模型结构。

等容多阶对象^[4]:

$$G(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)^n}; \quad (2)$$

多容惯性对象^[4]:

$$G(s) = \frac{K_p}{(T_{p1}s + 1)(T_{p2}s + 1) \cdots (T_{pn}s + 1)}, \quad (3)$$

式中: K_p 为比例系数; T_p 为惯性时间常数; τ 为纯迟延时间常数; n 为惯性部分的阶次; s 为进化代数。

2 粒子群优化算法系统模型辨识

2.1 粒子群算法原理

粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年模拟鸟类捕食行为提出的群体智能算法。该算法采用全局搜索策略,计算速度快,适用于求解非线性、多参数复杂系统的全局优化问题^[5]。假设一个 D 维的空间由 n 个粒子组成,粒子在种群中的位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iD})^T$, 第 i 个粒子的速度为 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \cdots, V_{iD})^T$, 将 X_i 带入目标函数即可计算出每个粒子位置所对应的适应度值。其个体极值 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \cdots, P_{iD})^T$, 种群的群体极值 $P_g = (P_{g1}, P_{g2}, \cdots, P_{gD})^T$, 在每次迭代过程中,粒子根据式(4)更新自己的速度,根据式(5)更新自己的位置。

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k), \quad (4)$$

$$X_{id}(k+1) = X_{id}(k) + V_{id}(k+1), \quad (5)$$

式中: ω 为惯性权重; $d = 1, 2, \cdots, D$; $i = 1, 2, \cdots, n$; k 为当前迭代次数; V_{id} 为粒子的速度; c_1 和 c_2 为加速度因子; r_1 和 r_2 是分布于 $[0, 1]$ 区间的随机数。

2.2 粒子群算法系统辨识原理

系统辨识包括对函数结构和系统参数的辨识,其实质就是函数拟合的过程^[4]。笔者将粒子群优化算法用于烧结炉系统参数辨识,根据系统的实际输入输出数据 $x(t)$ 和 $y(t)$, 估计出系统模型 f 与真实模型在一定精度上相似,即

$$y(t) = f[X(t, \varepsilon)], \quad (6)$$

式中: $t = kT$, T 为采样周期, $k = 1, 2, 3, \cdots, N$; ε 为估计模型的参数。

在实际系统中,往往存在测量误差、外界干扰、系统自身误差等,估计模型不可能完全替代真

实模型,因此,需要在估计模型中加入残差 $e(t)$ 。实际系统估计模型为:

$$y(t) = f[X(t, \varepsilon)] + e(t). \quad (7)$$

假定模型结构为经验模型(1),则需要优化的未知参数为: K_p 、 T_p 、 τ 、 n , 粒子在种群中的位置向量 X_i 、速度向量 V_i 、个体极值向量 P_i 和种群极值向量 P_g 的结构为 $[K_p, T_p, \tau, n]$, 运用粒子群优化算法原理,将系统模型辨识转化为未知参数优化求解的问题。模型(1)的差分方程为^[4]:

$$x_1(k+1) = e^{-d/T_p} x_1(k) + K_p(1 - e^{-d/T_p}) u(k); \quad (8)$$

$$x_2(k+1) = e^{-d/T_p} x_2(k) + (1 - e^{-d/T_p}) x_1(k+1); \quad (9)$$

$$x_n(k+1) = e^{-d/T_p} x_n(k) + (1 - e^{-d/T_p}) x_{n-1}(k+1); \quad (10)$$

$$f(k+1) = x_n(k+1 - \tau/d), \quad (11)$$

式中: $f(k+1)$ 为估计模型输出; d 为仿真计算步

距,可以用 $d = \frac{nT_p}{(10 \sim 50)}$ 近似求得。

由式(7)可知,残差 $e(t)$ 绝对值越小,估计模型越逼近实际的系统模型。选择合适的误差指标函数更新粒子的位置和速度,求取残差绝对值最小时的估计模型参数。定义误差指标函数

$$J(\varepsilon) = \sum_{k=1}^N [y(t) - f(t, \varepsilon)]^2. \quad (12)$$

3 系统辨识与仿真

3.1 粒子群算法系统辨识步骤

根据模型参数辨识的原理,结合粒子群算法实现烧结炉系统辨识。

①采集烧结炉系统的输入、输出信号并画出图像,如果采集信号存在粗大值,采用低阶差分法加以剔除。

②选择恰当的估计模型结构,确定估计模型参数,文中加速因子 c_1 、 c_2 取 0.6, 粒子个数 $m = 50$, 进化代数 $s = 80$, 然后定义各参数区间。

③编辑目标函数子程序,计算估计模型输出 f 和误差指标函数值,运用粒子群算法进行调用并优化模型参数。

④参数优化按照粒子群优化算法的步骤进行,如图 1 所示。

3.2 实例仿真

选取文献[12]的烧结炉加热系统数学模型作为烧结炉的真实模型,即

$$G(s) = \frac{2.21}{210s + 1} e^{-60s}. \quad (13)$$

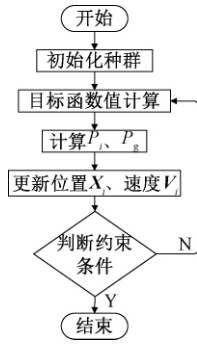


图1 粒子群算法流程图

Fig.1 Flow chart of particle swarm algorithm

在阶跃信号激励下生成辨识所用的历史数据,加入实际测量时的随机扰动,然后选择烧结炉经验模型结构, $K_p \in (0.1, 10)$, $T_p \in (1, 300)$, $\tau \in (1, 100)$, $n \in (1, 5)$. 将辨识结果的阶跃响应与真实模型比较,辨识结果如表1所示,仿真结果如图2所示.

表1 PSO 算法辨识结果和真实值阶跃响应

Tab.1 PSO algorithm identification result and true value step response

响应结果	K_p	T_p	τ	n
真实值	2.21	210	60	1
辨识结果	2.210 5	209.947 9	60.581	1

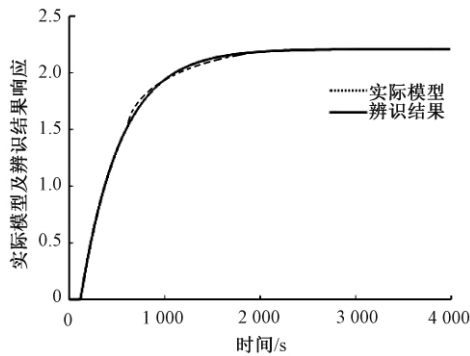


图2 经验模型辨识结果与实际模型响应输出

Fig.2 Empirical model identification results and the actual model response output

带有纯延迟的模型不利于系统分析,在选择估计模型结构时,可选用高阶惯性模型描述,即: $K_p \in (0.1, 10)$, $T_p \in (1, 300)$, $n \in (1, 5)$. 高阶惯性模型对采集的原始数据具有滤波作用,使得辨识结果更加准确. 将辨识结果的阶跃响应与真实模型比较,仿真结果如图3所示. 采用高阶对象辨识结果为:

$$G(s) = \frac{2.2}{(129.6s + 1)^2} \quad (14)$$

为了描述烧结炉具有自平衡的细节,选择多

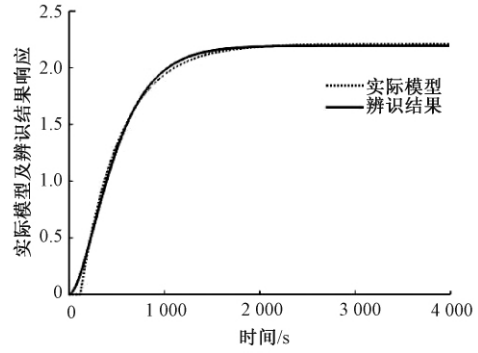


图3 高阶惯性模型辨识结果与实际模型响应输出

Fig.3 High order inertia model identification result and actual model response output

容惯性对象作为系统估计模型结构, $K_p \in (0.1, 10)$, $T_{p1-pn} \in (1, 500)$, $n \in (2, 5)$. 将辨识结果的阶跃响应与真实模型比较,仿真结果如图4所示. 采用多容惯性对象辨识结果为:

$$G(s) = \frac{2.2084}{(21s + 1)(42s + 1)(203s + 1)} \quad (15)$$

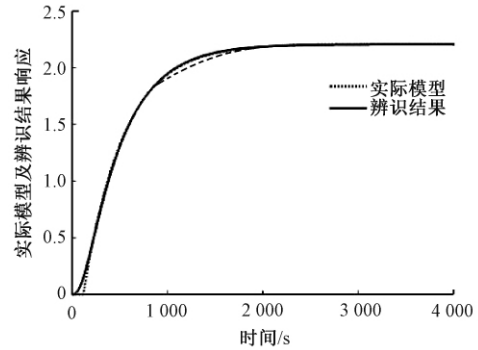


图4 多容惯性模型辨识结果与实际模型响应输出

Fig.4 Multi-capacity inertia model identification result and actual model response output

4 基于 RBF 神经网络的监督控制

神经网络控制具有自学习和自适应的能力,能够适应烧结炉时变的特点,提高控制器的鲁棒性. RBF 神经网络的监督控制就是初始阶段采用 PID 控制,然后再用神经网络控制. 如果在控制过程中,产生干扰或出现较大误差,在 PID 控制的同时,神经网络控制通过修正参数起到调节的作用^[11]. 其原理如图5所示.

在 RBF 神经网络结构中,设 $h = [h_1, \dots, h_m]^T$, h_i 为高斯函数,

$$h_i = \exp\left(-\frac{\|x(k) - c_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad (16)$$

总控制输入为:

$$u(k) = u_n(k) + u_p(k) \quad (17)$$

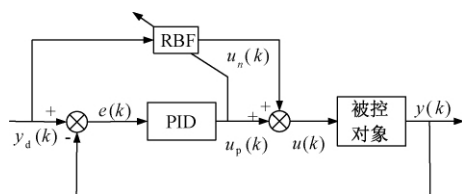


图5 基于RBF神经网络的监督控制系统

Fig. 5 Supervisory control system based on RBF neural network

定义误差指标为:

$$e(k) = \frac{1}{2} (u_n(k) - u(k))^2, \quad (18)$$

式中: $x(k)$ 为网络的输入向量; c_j 为网络第 j 个结点的中心矢量, c_j 值离输入越近, 高斯函数对输入越敏感; b_j 为结点 j 的宽度参数, 高斯基函数宽度是影响网络映射范围的重要因素; $u_p(k)$ 为 PID 控制器的输出; $u_n(k)$ 为 RBF 神经网络的输出。

权值 ω 采用梯度下降法更新, 加入学习速率 η 和动量因子 α ,

$$\Delta\omega_i(k) = \eta (u_n(k) - u(k)) h_j(k). \quad (19)$$

$$\omega(k) = \omega(k-1) + \Delta\omega(k) + \alpha(\omega(k-1) - \omega(k-2)). \quad (20)$$

为了检验 RBF 神经网络监督控制系统的响应速度和跟踪效果, 仿真对象选取带延迟的一阶对象, 其传递函数如下:

$$G(s) = \frac{21}{130s + 1} e^{-20s}. \quad (21)$$

PID 控制器中, $K_p = 8$, $K_i = 0.002$, $K_d = 0.4$. 参考轨迹选取方波信号 $y_d(k) = 0.5 \times \text{sign}(\sin(\pi \times k \times t))$. 根据经验, 高斯函数参数初值 $c = [-2, -1, 1, 2]$, $b = [1, 1, 1, 1]$, 权值 ω 取随机数, 学习速率 $\eta = 0.3$, 动量因子 $\alpha = 0.05$. 仿真结果如图 6 所示. 由图 6 可见, 基于 RBF 的神经网络监督控制系统跟踪效果良好。

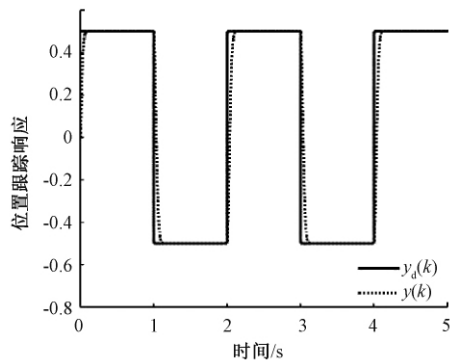


图6 RBF神经网络监督控制系统跟踪响应结果

Fig. 6 RBF neural network monitoring control system tracking response

烧结炉在实际加热过程中, 不同温区滞后时间不同; 而且每次添加烧结材料的种类和数量不同, 相当于模型参数发生变化^[13]. 为了模拟现场实际情况, 测试模型参数变化时系统的控制效果, 假定初始时刻, 仿真对象为文献[13]中利用切线法确定的低压真空烧结炉温度控制系统传递函数:

$$G(s) = \frac{47}{102s + 1} e^{-6s}. \quad (22)$$

在 350 min 时变换对象的模型, 即

$$G(s) = \frac{20}{200s + 1} e^{-20s}. \quad (23)$$

参考文献[14]聚四氟乙烯烧结成型的制备工艺, 升温速度: 200 °C 以下为 80 °C/h, 高于 200 °C 为 60 °C/h; 烧结温度为 380 °C; 保温 4 h 后制品随炉温冷却^[14]. PID 控制器中, $k_p = 1.4$, $k_i = 0.01$, $k_d = 0.05$. 根据经验, 高斯函数参数初值 $c = [-400, -400, 400, 400]$, 权值 ω 取随机数, $b = [7, 7, 7, 7]$, 学习速率 $\eta = 0.3$, $\alpha = 0.05$, 图 7 为炉温控制仿真. 如图 7 所示, 350 min 时模型参数发生变化, 控制系统过渡时间较短, 仿真结果说明了该方法的有效性。

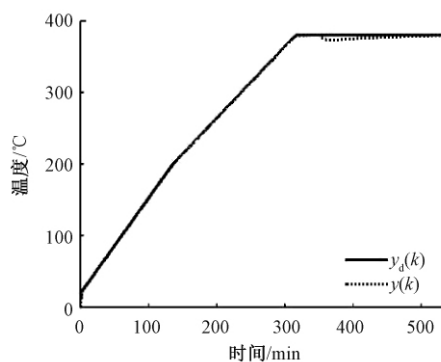


图7 烧结炉炉温控制仿真结果

Fig. 7 The simulation result of sintering furnace temperature control

5 结论

采用粒子群优化算法对烧结炉系统进行模型辨识, 选择不同的模型结构作为估计模型, 将辨识结果的阶跃响应与真实模型作比较, 说明粒子群辨识系统模型方法的有效性. 针对烧结炉的特点, 控制系统采用基于 RBF 神经网络监督控制方法. 仿真实验表明, 系统响应速度较快, 跟踪效果良好; 当烧结炉参数发生变化时, 系统能够通过参数调节, 快速达到设定温度。

参考文献:

- [1] 龚成龙. 聚四氟乙烯烧结炉计算机控制系统[J]. 电气自动化, 2007, 29(1): 51-53.
- [2] 王进华. 关于模压用聚四氟乙烯树脂烧结工艺条件的探讨[J]. 有机氟工业, 2000(3): 21-23.
- [3] 王骥程. 过程控制工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 1990.
- [4] 韩璞. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [5] 刘雪, 张端金. 基于 Delta 算子时滞网络控制系统的 Hoo 滤波[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(2): 10-14.
- [6] DENG X. System identification based on particle swarm optimization algorithm[C]// International conference on computational intelligence and security, IEEE, 2009: 259-263.
- [7] 凌云, 何丽平, 李毅梅. 硬质合金真空烧结炉温度插值自适应控制[J]. 硬质合金, 2007, 24(2): 112-114.
- [8] 凌云, 何丽平, 李毅梅. 基于 DRNN 在线辨识的真空炉温度控制[J]. 微计算机信息, 2007, 23(4): 110-111.
- [9] BABULU K, KUMAR D K. Fuzzyself-adaptiveself-adaptive PID controller design for electric heating furnace[J]. International journal of engineering inventions, 2012, 1(5): 10-21.
- [10] EREMENKO Y I, POLESHCHENKO D A, GLUSHCHENKO A I. On applying neural tuner to PI-controller parameters calculation for heating furnaces control[C]//Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on IEEE, 2015: 1-4.
- [11] 刘金琨. RBF 神经网络自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [12] 刘京朋. 基于仿人智能控制的烧结炉监控系统的实现[D]. 成都: 电子科技大学自动化工程学院, 2009.
- [13] 张施磊. 低压真空烧结炉自动控制系统研究与设计[D]. 重庆: 重庆大学自动化学院, 2006.
- [14] 陈旭, 回素彩. 聚四氟乙烯烧结成型的制备工艺[J]. 塑料工业, 2005, 33(10): 38-40.

Sintering Furnace System Identification Based on Particle Swarm Algorithm and Neural Network Control

CAO Ben, YUAN Zhongyu, LIU Hong

(School of Mechatronic Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: During heating process of sintering furnace, the model parameters were easy to change, and traditional PID control was difficult to achieve the desired control effect. This paper used particle swarm optimization algorithm to identify the mathematical model of sintering furnace, for sintering furnace with high inertia, time-variation and strong time delay etc, a method of supervision and control based on RBF neural network, which combined PID control with neural network control. When temperature or parameters changed greatly, PID control played a major role. neural network played a regulatory role and compensated the shortage of PID control. The simulation results of MATLAB software showed that this method could improve the control precision of sintering furnace, which had a certain practicality.

Key words: particle swarm optimization algorithm; system identification; neural network supervisory control; PID control

文章编号: 1671-6833(2017)05-0044-06

高速公路拓宽中桩类型优选与板桩适应性分析

李海滨^{1,2}, 柯胜旺¹, 申艳军¹

(1. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 普渡大学 工程学院, 印第安纳 西拉法叶 47906)

摘 要: 结合板桩结构在铁路中的广泛使用, 在高速公路改扩建工程中引入板桩结构, 通过模拟不同桩体类型和荷载不同位置时拓宽路堤的力学行为, 提出优选的桩体类型和最不利荷载位置. 然后连续观测并分析板桩结构与 CFG 桩处治段的沉降, 阐明板桩结构在改扩建工程中的适应性. 研究表明, PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩对拓宽工程沉降的影响效果逐渐减弱, 从控制沉降角度应优选 PTC 桩和 CFG 桩; 荷载的最不利位置是新路堤, 施工过程中必须着重控制加宽行车道内侧的质量; 板桩结构对降低差异沉降的效果在半刚性基层施工过程中逐渐显现, 在面层施工阶段优势明显, 板桩结构是传统软土地基处治方法的有效补充, 在改扩建工程中具有很好的适用性和推广前景.

关键词: 道路工程; 改扩建工程; 差异沉降; 水泥混凝土板桩; 桩体类型优选

中图分类号: U416.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.006

0 引言

现阶段软土地区高速公路的改扩建工程中, 旧路路基经过多年固结沉降已经基本稳定, 新路基于填筑时间短, 在交通荷载作用下易引起新老路基的差异沉降, 目前降低沉降的常用方法是 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩等, 其中, CFG 桩技术可有效提高软土地基承载力, 在高速公路软基处理中有良好应用前景^[1-2].

板桩结构目前主要应用在轨道交通中, 在道路领域的应用非常少. 板桩结构最初是由芬兰人于 20 世纪 90 年代初提出^[3], 在欧洲其他地区普遍采用, 如德国 Nuremberg-Ingolstadt 新建线的北段南部延长线^[4-5], 英法海底隧道连接线的 7 km 沼泽地区^[6], 美国路易斯安那州东南部公路的路桥过渡段^[7]. 本世纪初, 板桩结构逐渐在我国客运专线路基建设中得到推广, 如京沪高速铁路软土地段, 沈哈客运专线和沪杭客运专线地基加固^[8-9], 哈大线、西宝线、郑西线的路基工程^[10-11].

鉴于此, 笔者针对高速公路改扩建中桩体结构处治沉降的实际情况, 以石安高速改扩建工程为依托, 以差异沉降为控制目标, 对常见的

桩体类型和不同荷载作用位置时的路基拓宽段的力学响应进行模拟, 指出扩建路基受力与桩体类型和荷载位置的关系, 明确最不利荷载位置, 并对目前在改扩建中常用的桩复合地基进行优选. 通过板桩结构与 CFG 桩处治路段连续沉降观测对比, 分析板桩结构在高速公路改扩建工程中的适用性, 为其在高速公路扩建工程中的推广和应用打下基础.

1 不同桩体类型和不同位置荷载对拓宽路堤的力学行为影响

本节以采用双侧同时加宽两个车道的石安高速改扩建工程为依托, 通过 ANSYS 建模, 模拟加宽路堤在 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩及承受不同荷载时的受力, 实现现场工程试验段的室内虚拟化验证, 并在此基础上提出改扩建工程中软基处治时的桩体类型优选次序.

1.1 模型构建

1.1.1 基本假定

(1) 路基和地基各结构层界面处置较好, 接触状态为完全连续, 不考虑温度对路基路面应力分布的影响, 依托工程为双向对称各加宽两个车

收稿日期: 2017-03-22; 修订日期: 2017-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208047、1302228); 中国博士后科学基金资助项目(2013M532005、2013M532070、2014T70931); 河北省省级计划资助项目(Y-2011004、Y-2011005)

作者简介: 李海滨(1980—), 男, 西安科技大学副教授, 博士, 主要从事道路工程结构与材料的研究, E-mail: lihailin1212@126.com.

道,因此计算模型取加宽结构的一半;

(2) 桩体为线弹性体且符合广义虎克定律;土体为理想弹塑性体,均匀分布且各向同性;

(3) 旧路及其下方地基自身固结变形已完成,旧路与加宽新路结合处不发生相对脱离和滑移,只有新拓宽路基部分有重力;

(4) 桩体用八节点三维结构实体 SOLID-45 单元,土体用八节点三维结构实体 SOLID-185 单元,本构模型用扩展的线性 Drucker-Prager 模型.

1.1.2 模型尺寸

石安高速公路改扩建工程采用两侧同时拓宽2个车道的方式,分析时沿路面中心取结构一半进行计算,即原路面宽度 $B = 26\text{ m}$ 的一半,地基宽度取 50 m ,土基高度取 30 m ,其中上卧层土 10 m ,下卧层土 20 m ,两侧对称加宽,新路基与旧路基结合处采用台阶咬合方式进行搭接,台阶宽 1 m ,高 0.6 m ,几何模型如图1所示.

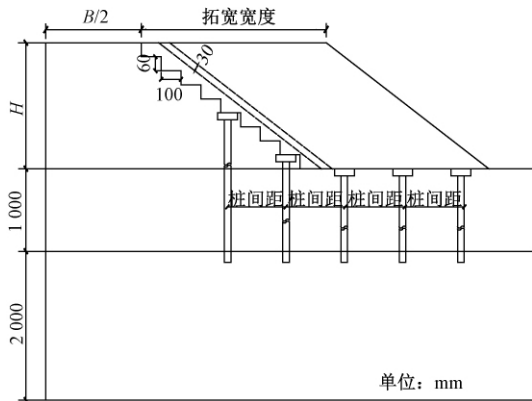


图1 构建的几何模型
Fig.1 Geometrical model

1.1.3 材料参数

根据现场取样试验,得到新旧路堤土及路基土参数及桩参数,如表1和表2所示.

表1 土层材料参数
Tab.1 Material parameters of soil

土层	弹性模量/MPa	泊松比	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
旧路堤	40	0.35	2 000
新路堤	30	0.38	2 000
地基	20	0.45	1 300

表2 桩体材料参数
Tab.2 Material parameters of pile

类别	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
PTC 桩/桩帽	25	40 000	0.20
CFG 桩	23	10 000	0.20
水泥搅拌桩	25	8 000	0.22

1.1.4 网格划分及边界条件

拓宽路基的几何模型,采用空间八节点实体 SOLID-45 单元.

拓宽路段考虑自重和外荷载共同作用. 外荷载采用标准轴载 BZZ-100,轮胎内压 0.7 MPa ,荷载圆半径为 10.65 cm ,双轮间距为 32 cm . 在满足计算精度前提下为方便单元划分,经试算选用单个轮压作用范围 $20 \times 20\text{ cm}$,双轮间距 30 cm ,布载方式如图2所示. 边界条件为模型底面完全约束,两侧水平方向约束,桩底完全约束.

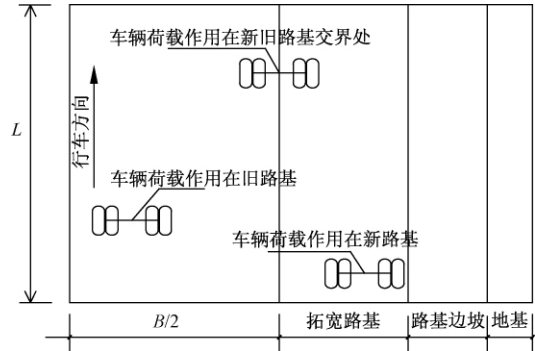


图2 行车荷载分布
Fig.2 Traffic load distribution

1.1.5 计算工况

工况一讨论桩体类型的影响. 无承台 PTC 桩: 桩间距 3 m ,桩长 12 m ,桩径 40 cm ,桩体模量 40 GPa ,拓宽宽度 8 m ,路堤填筑高度 8 m ;有承台 PTC 桩: 承台长宽均为 4 m ,高 0.5 m ,其他参数如无承台 PTC 桩. CFG 桩: 桩间距 2 m ,桩长 12 m ,桩径 40 cm ,桩体模量 10 GPa ,拓宽宽度 8 m ,路堤填筑高度 8 m . 水泥搅拌桩: 桩间距 2.5 m ,桩长为 12 m ,桩径 50 cm ,桩体模量 8 000 MPa ,拓宽宽度 8 m ,路堤填筑高度 8 m .

工况二讨论荷载位置的影响. 采用 PTC 桩,桩间距 3 m ,桩长 12 m ,桩径 40 cm ,桩体模量 40 GPa ,拓宽宽度 8 m ,填筑高度 8 m ,模拟行车荷载分别作用在新路堤、旧路堤、新旧结合处时拓宽路段的位移和应力特性.

1.2 不同桩体类型下拓宽段力学行为分析

本节主要对 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩的拓宽段受力进行分析,参数如表1、表2和工况一,经过有效性验证后,各指标的最大值计算结果如图3、图4所示.

不同桩体类型的复合地基对拓宽路基的影响不同,最大沉降值出现在拓宽道路新路肩附近,最大水平位移出现在新路基边坡坡脚和新旧路基搭接处,应力随之重新分布且最大应力出现在桩体下端.

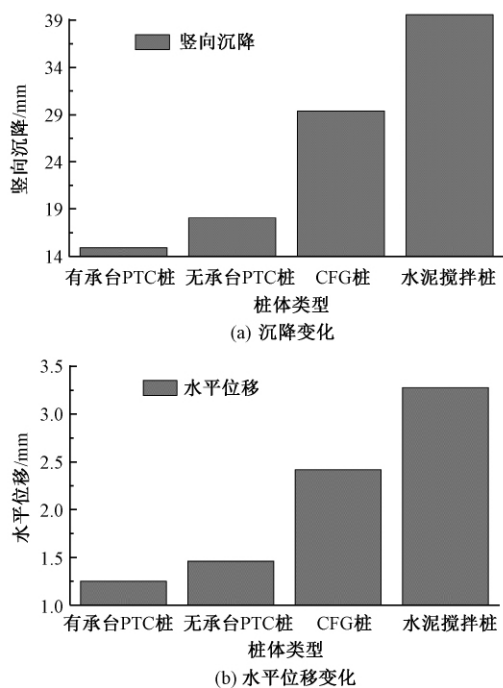


图3 不同桩体类型下拓宽段沉降和水平位移图

Fig.3 Settlement and horizontal displacement change trend in different pile kind

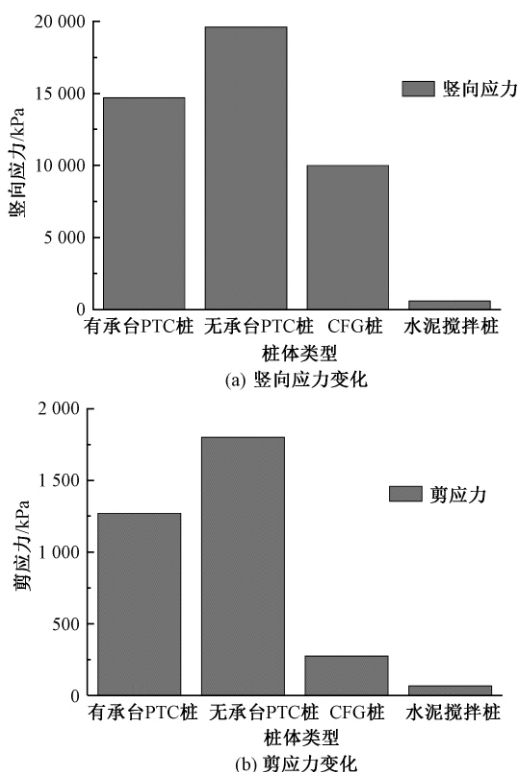


图4 不同桩体类型下拓宽段竖向应力和剪应力变化图

Fig.4 Vertical stress and shear stress change trend of different pile types

当桩类型从有承台 PTC 桩、无承台 PTC 桩、CFG 桩和水泥搅拌桩改变时,最大沉降分别相对增加 21.2%、96.9%、165.3%,最大水平位移分别相对增加 16.8%、93.6%、162.4%。采用 CFG

桩和水泥搅拌桩时的最大竖向应力分别减小 32.0% 和 95.9%,最大剪应力分别减小 78.3% 和 94.8%,说明不同桩体类型的路堤沉降和受力明显不同。因此,综合分析沉降和位移,从降低沉降的角度应优选 PTC 桩和 CFG 桩。

1.3 不同荷载位置时拓宽段力学行为分析

针对行车荷载在拓宽段、原路基和新旧路基结合处,对拓宽段受力进行分析,参数如工况二,经过有效性验证,各指标最大值如图 5、图 6 所示。

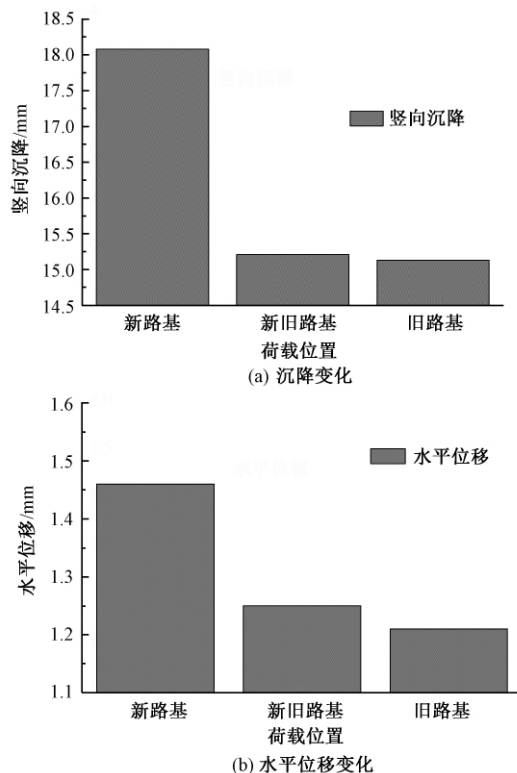


图5 不同荷载位置下沉和水平位移变化图

Fig.5 Settlement and horizontal displacement change trend of different load positions

行车荷载作用在新路堤时沉降和水平位移最大,最大沉降出现在拓宽段新路肩边缘,水平位移最大值出现在新路基坡脚和新旧路基搭接处。

荷载从新路堤过渡到旧路堤时,沉降和水平位移逐渐减小后趋于稳定,荷载作用在新路堤处最大沉降比旧路堤增加 19.5%,最大水平位移增加 17.4%。荷载作用在其他位置沉降变化不大,说明新路堤受行车荷载作用明显。

拓宽路基采取桩复合地基后,路基受桩体作用而再次密实,应力重新分布。荷载从新路堤过渡到旧路堤时,应力仅下降 1.03%,剪应力保持不变,说明行车荷载作用位置的变化对拓宽道路路基影响较小。

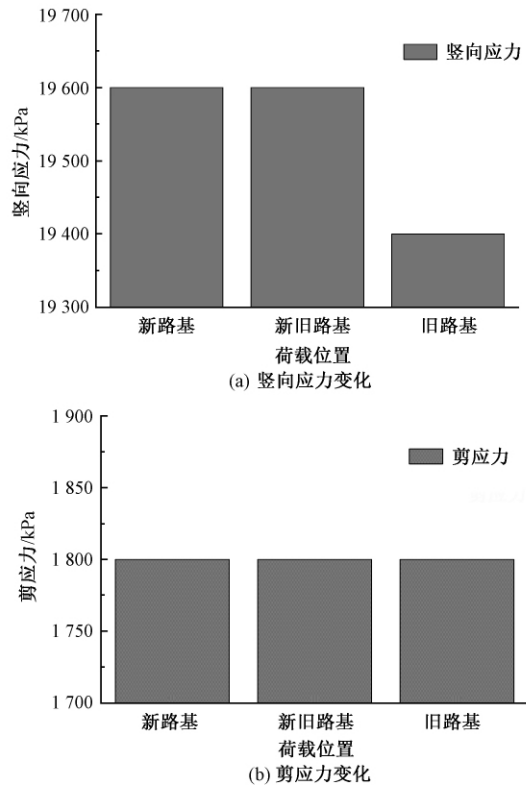


图6 不同荷载位置下竖向应力和剪应力变化图
Fig. 6 Vertical stress and shear stress change trend of different load positions

2 板桩结构在拓宽工程中的适应性

在依托工程中选取合适软土地基试验段,在原有 CFG 桩基础上埋设板桩,预埋沉降板和剖面管,通过沉降板实现连续沉降的点观测,剖面管实现沉降的断面观测,综合单点沉降和断面沉降,对比分析板桩结构在降低差异沉降方面的优势,为其在高速公路扩建工程中的广泛应用打下基础。

2.1 埋设位置

选取石安高速公路 K435 + 550 ~ K435 + 600 为试验路段,现场制作 50 m 的钢筋混凝土板,与下方 CFG 桩绑结为整体,分别在板桩段和 CFG 桩段埋设沉降板和水平剖面管,上面层铺筑完成后,采取埋设道钉方式继续测量沉降,布设点位如图 7 所示。

2.2 观测点沉降分析

扩建工程施工伊始,对图 7 所示的 6 个测点进行间隔为 7 d 的持续观测,根据施工的各个阶段记录沉降值,汇总后得到图 8 ~ 图 10 的扩建过程沉降走势图。

2.2.1 沉降观测

路基填筑期间沉降趋势基本一致,在路基填筑完成后沉降最大。板桩处的沉降增加明

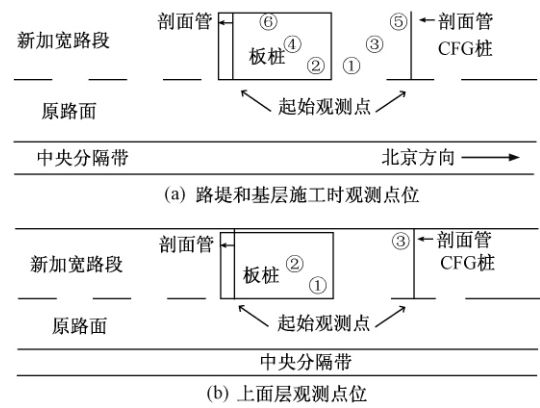


图7 路堤、基层施工时和上面层施工时的观测点位
Fig. 7 Monitoring points in process of embankment, base and upper pavement construction

显,主要是板桩自重加大了下方土体的固结速度。板桩和 CFG 桩的路段最大沉降量分别为 8.1 mm 和 7.1 mm,均位于路堤填筑施工末期的路肩位置,新旧路基搭接处沉降差距最小。

半刚性基层填筑期间,剔除由于施工和人为原因出现的反常数据,其余观测点处沉降随填土高度和时间增加而增大,但变化趋势和沉降增量较小。从该层施工开始,板桩处与 CFG 桩处的沉降差开始缩小,板桩结构的整体效应逐渐显现,CFG 桩处路段沉降仍继续增加。

在下、中面层施工中,沉降继续增加,板桩路段最大沉降量为 8 mm,CFG 桩路段最大沉降量 9.2 mm。路面结构施工完成后,CFG 桩路段的最大沉降量为 11 mm,板桩结构段的最大沉降量为 9.1 mm。在面层施工过程中,混凝土板对加强路堤稳定性和降低差异沉降的效果明显。

2.2.2 剖面沉降观测

K435 + 500 断面为 CFG 桩路段,K435 + 550 断面是板桩试验段,同一观测断面的沉降量随施工进度逐渐增大,越靠近新旧路基结合处的沉降增加越大。距离管口 0 ~ 2.5 m 部分,在填筑初始阶段沉降明显,距离管口 5.0 ~ 6.0 m 部分,填筑阶段沉降明显增大,沉降增速达到 2.12 mm/m 和 2.02 mm/m,最大沉降出现在加宽车道内侧处,即沉降突变明显区主要集中在加宽行车道的内侧。按照沉降阶段性变化,参考距管口距离,加宽过程中可大致分为 3 个主要沉降位置,即路肩部分、加宽车道外侧部分和加宽车道内侧部分,越靠近新旧路堤交接处,路段沉降越明显,说明后期运营中加宽车道内侧容易出现破损,在施工过程中必须着重控制加宽行车道,特别是行车道内侧的施工质量需要受到重视。

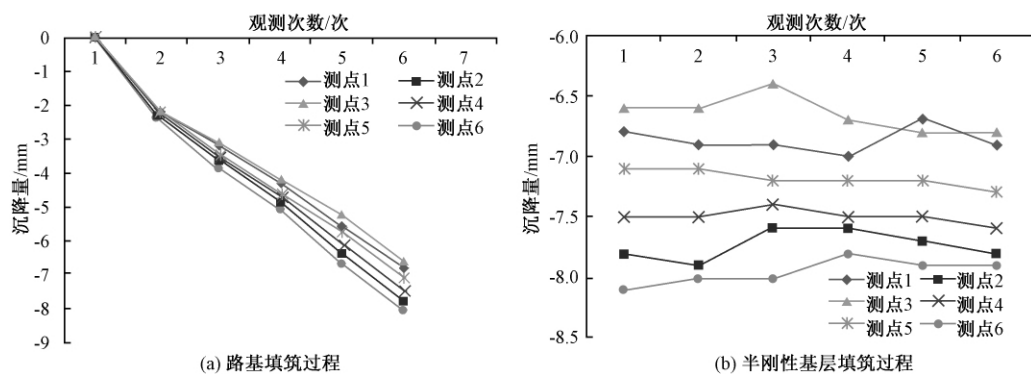


图8 路基和半刚性基层填筑过程路段沉降走势图

Fig.8 Settlement trend graph after embankment and semi-rigid base construction

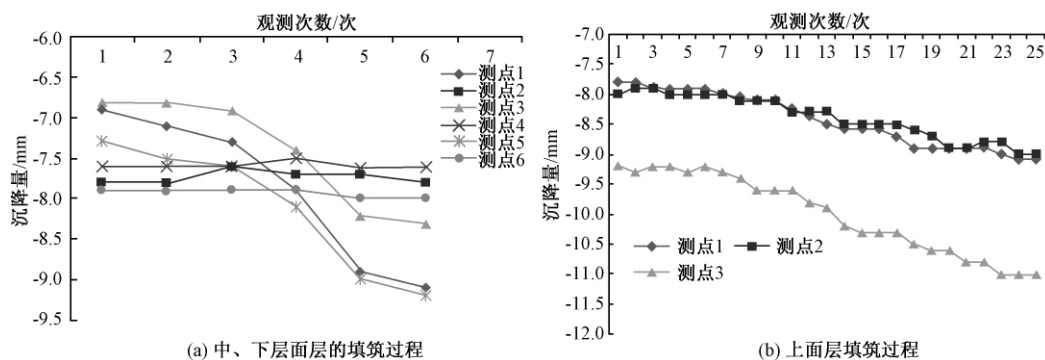


图9 中、下面层和上面层铺筑完后路段沉降观测图

Fig.9 Settlement trend graph after middle/base layer pavement and upper layer pavement construction

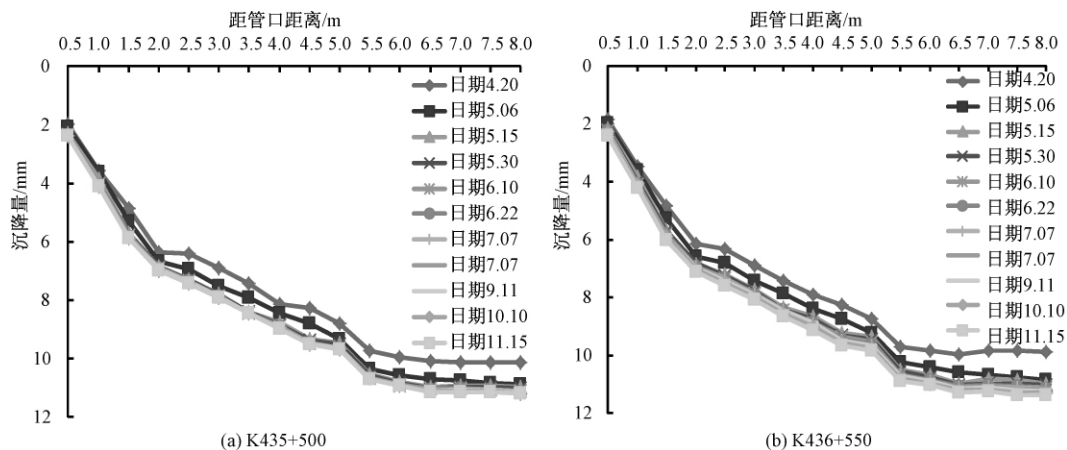


图10 K435+500和K436+550剖面管单点沉降曲线走势

Fig.10 Single-point settlement curve trend of profile tube in K435+500 and K436+550

3 结论

(1) 采用不同类型桩体处治路基, 行车荷载在不同位置时, 沉降最大值出现在拓宽段新路基, 水平位移最大值出现在新路基边坡坡脚和旧路基搭接处, 其中行车荷载最不利位置是新路基。

(2) 桩体类型改变会影响处治沉降的效果。采用有承台 PTC 桩、无承台 PTC 桩、CFG 桩和水

泥搅拌桩时, 沉降分别相对增加 21.2%、96.9% 和 165.3%, 水平位移分别相对增加 16.8%、93.6% 和 162.4%; 采用 CFG 桩和水泥搅拌桩时, 竖向应力分别减小 32.0% 和 95.9%, 剪应力分别减小 78.3% 和 94.8%, 从降低沉降的角度考虑, 在常用桩体中应优选 PTC 桩和 CFG 桩。

(3) 路肩、加宽车道外侧和加宽车道内侧是改扩建工程的 3 个主要沉降区, 越靠近新旧路堤交接处, 路段沉降越明显, 施工过程中须着重控制

加宽行车道内侧质量,防止后期运营车道内侧靠近新旧路堤结合处出现路面病害。

(4) 在路堤改扩建过程中,水泥混凝土板桩结构对加强路堤稳定性和降低差异沉降的效果在半刚性基层施工阶段逐渐显现,面层施工阶段优势明显,表明板桩结构在改扩建工程中具有良好的推广应用前景。

参考文献:

- [1] 栗培龙,饶文字,冯振刚,等. 沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2016,37(5):1-5.
- [2] 潘殿琦. 水泥搅拌咬合桩的施工与检测[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(3):518-521.
- [3] PEKKA T, ANTONI V, MIKKO H. Real time safety and structural stability monitoring of a reconstructed concrete slab railway embankment on a soft ground after its collapse[J]. Keep concrete attractive, 2005(5):1-6.
- [4] 王忠文,徐鹤寿. 德国纽伦堡-英格尔施塔特新建线的无碴轨道[J]. 中国铁路,2006(6):21-24.
- [5] WOLFGANG F, HERMANN S, MATHIAS S, et al. SSF engineering: earthwork construction for balastless track on HSLs [J]. RTR special,2006(9):69-76.
- [6] 顾湘生. 客运专线路基工程几个问题的讨论[J]. 铁道工程学报,2005(1):31-38.
- [7] REDA M B, MARK A S, ZHONG J Q, et al. Performance of pile-supported bridge approach slabs[J]. Journal of bridge engineering ASCE,2005(4):228-237.
- [8] 陈尚勇. 管桩桩筏基础在宿州站地基处理中的应用[J]. 铁道建筑,2009(7):108-111.
- [9] 白皓,苏谦,梁龙标,等. 新建铁路路基上跨超浅埋地铁的变形监控与安全评估[J]. 中国安全科学学报,2011,21(7):144-150.
- [10] 赵明志,罗强. 高速铁路深厚地层 CFG 桩复合地基变形计算经验系数分析[J]. 高速铁路技术,2015,37(1):69-73.
- [11] 杜传球. 客运专线路基处理中 CFG 桩的质量控制及路基沉降观测[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014,27(5):94-97.

Piles Kind Optimal and Sheet Pile Adaptability Analysis in Highway Extension Projects

LI Haibin^{1,2}, KE Shengwang¹, SHEN Yanjun¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Engineering Management College, Purdue University, West Lafayette, 47906, USA)

Abstract: With the increasing of highway extension projects and widely use of sheet piles in railway construction, the mechanical behavior of extension embankment was analyzed through simulating different kinds of pile and load of different positions. Then the optimal pile kind and the most unfavorable load position were proposed. Through continuous observing of settlement in sheet pile section and CFG pile section, the optimal adaptability of sheet pile was showed in extension projects. The analysis results showed that the effect on settlement of PTC pile, CFG pile and cement mixing pile was gradually decreased. The PTC pile and CFG pile should be firstly selected from the options of controlling settlement. The most unfavorable load position was in new embankment and its quality was the key control point in construction. The effect on decreasing differential settlement was appeared in process of semi-rigid base construction, and it would be even obvious in pavement construction. The sheet pile was an effective supplement to traditional soft soil treatment methods. It had better adaptability and foreground in highway extension projects.

Key words: road engineering; extension projects; differential settlement; cement concrete sheet pile; pile kinds optimal

文章编号: 1671-6833(2017)05-0050-05

钢纤维混凝土路面接缝传荷性能衰减规律的试验研究

王建宁^{1,2}, 窦远明^{1,2}, 孙吉书^{1,2}, 魏明³, 翟玉玺¹

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 南通大学 交通学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为研究不同因素对钢纤维混凝土(SFRC)路面接缝传荷性能衰减规律的影响,进行了20个不同传力杆长度、直径、混凝土板厚度及钢纤维掺量的路面板试件疲劳试验. 简单介绍了试验的方案设计,包括原料选择、因素水平选取、试件制作和加载方案确定等. 结果表明: 掺加钢纤维能够有效提高路面板接缝的传荷性能,降低传荷系数衰减速率;不同因素下的SFRC试件接缝传荷系数衰减曲线特征相似,分为快速衰减和平稳下降两个阶段,当钢纤维体积掺量 $\leq 0.6\%$ 时曲线表现为三阶段衰退;传力杆直径、长度及钢纤维掺量的增加均能提高接缝传荷性能,但提高幅度十分有限,其中钢纤维掺量影响最大;接缝传荷系数衰退速率随钢纤维掺量的增加而减小,与传力杆直径、长度及混凝土板厚度因素无关;试验条件下,荷载作用100万次后的SFRC试件传荷系数仍保持在90%以上,具有优良的传荷能力. 试验结果为SFRC路面结构设计提供了参考.

关键词: 道路工程; 钢纤维混凝土路面; 接缝; 传荷能力; 衰减曲线

中图分类号: U416.2; U418

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.004

0 引言

钢纤维混凝土(SFRC)是在混凝土中均匀掺加钢纤维得到的增强型复合材料,具有抗拉、抗折强度高、断裂韧性好、抗疲劳性能好等优点,目前主要应用于要求较高的公路路面、桥面铺装、机场跑道及铁路轨枕等部位. 与普通混凝土路面相比, SFRC可以减薄路面铺装厚度,实现无纵缝整幅施工,提高路面性能,扩大横缝间距,节约施工成本,延长路面使用寿命^[1-2].

SFRC材料虽表现出较素混凝土更优异的路面性能,但接缝始终是路面结构中的最薄弱部位,其传荷能力的高低直接影响路面结构设计和使用寿命^[3]. 我国新修订的规范^[4-5]明确指出:在极重、特重和重交通荷载的普通混凝土面层横缝中必须布设传力杆,而对于SFRC路面并未做强制性规定. 目前,国内外早期服役的SFRC路面大多没有设置传力杆,也没有考虑接缝传荷能力的衰减,关于路面接缝传荷能力的研究成果大多集中在素混凝土材

料^[6-11]. 然而,随着交通运输业的迅速发展,车辆轴载剧增,重载车辆比例升高,特重及重载条件下, SFRC路面接缝也出现了不同程度的道路病害^[12-13].

近年来,有关SFRC路面接缝传力特性及机理方面的研究取得了一些成果. 文献[14]通过计算接缝承载能力讨论了路面结构中纵向假缝取消拉杆的可能性,指出在特重及重载交通条件下SFRC路面横缝中设置传力杆的必要性,并对传力杆的布置形式进行了探讨;文献[15]建立了层布式钢纤维混凝土的有限元模型,研究了路面板长度、厚度和混凝土弹模在行车荷载、温度作用下的变化规律;文献[16]通过有限元分析,总结了不同横缝间距、板厚和不同交通等级对荷载应力、温度应力的影响;文献[17]基于SFRC路面板的工作性能,提出了一种新的复合式SFRC路面形式,并对此进行了双轮轴载试验研究和成本分析. 但是,大部分文献并未涉及传力杆、板厚、钢纤维掺量等因素对SFRC试件横缝传荷性能衰减规律的影响. 为了弥补这方

收稿日期: 2017-01-14; 修订日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61503201)

作者简介: 王建宁(1992—),男,河北邢台人,河北工业大学博士生,主要从事道路工程及施工技术等方面的研究,
E-mail: wangjianninghebut@163.com.

面研究的不足,笔者通过对 10 块普通砼路面板和 10 块 SFRC 路面板进行室内疲劳试验,以传力杆直径、长度、混凝土板厚和钢纤维掺量为因素,以弯沉值来评定接缝传荷能力,分析了两种材料在不同因素条件下的接缝传荷能力,探讨了各因素对 SFRC 路面接缝传荷性能衰减趋势的影响规律及特征。

1 试验方案

1.1 试件设计

钢纤维种类繁多,按不同方法可分数十种。路用拌合钢纤维对平整度、纤维分布均匀性及安全性要求较高,不宜采用钢丝切断形、长波浪形、大弯钩形及两端直角形等易抱团纤维。本次试验中的 SFRC 试件选用 600 MPa 级哑铃形钢纤维,该纤维不仅能够提高与混凝土材料间的粘结锚固作用,还可以保证纤维露出后不扎伤车胎,钢纤维性能参数如表 1 所示。

表 1 钢纤维参数
Tab.1 Parameters of steel fiber

项目	抗拉强度/ MPa	长度/ mm	直径/ mm	外观
参数	≥650	30~35	0.6~0.9	光滑、无油污杂质

钢纤维长度应与混凝土最大粒径相匹配,混凝土最大粒径宜为钢纤维长度的 $1/2 \sim 2/3$,保证钢纤维在骨料中的锚固长度。同时,为保证混凝土的增强补韧作用,避免体积掺量过高造成钢纤维成团,将钢纤维体积掺量控制在 0.6%~1.2% 范围内,选取 0.6%、0.8%、1.0%、1.2% 4 个水平。早期路面设计规范^[18]规定在特重或重交通下 SFRC 面层厚度设计值不得小于 160 mm,而现行路面设计规范^[5]建议 SFRC 面层厚度取普通砼路面的 0.65~0.75 倍,并将最小值提高至 180 mm,这说明早期设计的 SFRC 路面厚度偏小。本次试验将 SFRC 试件厚度统一设置为 200 mm,是普通砼试件厚度的 0.67~0.83 倍。

本次试验设计了 10 块普通砼试件(1[#]~10[#]) 和 10 块 SFRC 路面板试件(11[#]~20[#]),分别考虑传力杆长度、传力杆直径、混凝土板厚度和钢纤维掺量 4 种因素。所有试件平面尺寸均为 $l \times b = 1 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,传力杆采用 HPB300 钢筋,用支架法固定。试件编号及参数设定见表 2,试验试件如图 1 所示。

表 2 试件参数

Tab.2 Parameters of specimens

编号	混凝土板 厚度/mm	传力杆参数		钢纤维体积 掺量/%
		直径/mm	直径/mm	
1	260	25	25	—
2	260	28	28	—
3	260	30	30	—
4	260	32	32	—
5	260	30	30	—
6	260	30	30	—
7	260	30	30	—
8	240	30	30	—
9	280	30	30	—
10	300	30	30	—
11	200	25	25	0.8
12	200	28	28	0.8
13	200	30	30	0.8
14	200	32	32	0.8
15	200	30	30	0.8
16	200	30	30	0.8
17	200	30	30	0.8
18	200	30	30	0.6
19	200	30	30	1.0
20	200	30	30	1.2



图 1 试验试件

Fig.1 Specimens of test

1.2 加载方案

图 2 为试验装置。如图 2 所示,采用层状弹性体系模拟路面结构,以一定厚度的橡胶支座模拟路面基层、垫层及土基层。采用 MTS 电液伺服疲劳加载装置对试件进行单侧加载,在接缝两侧上方布置激光位移计,以试件弯沉值来评定接缝处的传荷能力。

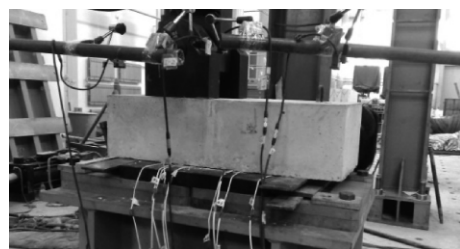


图 2 试验支座及加载装置

Fig.2 Loading system of test

试验开始后,以位移方式控制作动头缓慢降低至与试件接触并对试件施加 2 kN 的初始压力

(确保每次试验开始前初始压力相等,避免试验机加载产生的误差),加载开始后以 0.05 kN/s 的速率控制动头加载至 10 kN,之后控制疲劳试验机以 4 Hz 的频率按指定荷载幅值进行加载,当荷载循环次数分别达到 1 万、2 万、5 万、10 万、20 万、50 万、100 万时进行静载,100 万次时的静载完毕后试验结束。

2 试验结果分析

2.1 传力杆直径

普通砼试件 1[#]~4[#]及 SFRC 试件 11[#]~14[#]传力杆长度一致、直径不同,杆长均为 450 mm,直径范围 25~32 mm,图 3 为不同杆径试件的接缝传荷系数随加载次数变化的衰减曲线,图中实线为 SFRC 试件,虚线为普通砼试件。

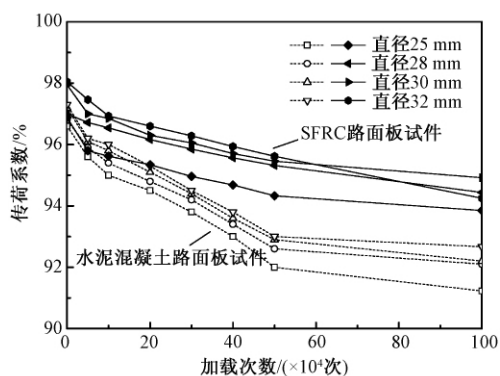


图3 不同传力杆直径试件的传荷系数衰减曲线

Fig.3 Attenuation curves of load transfer coefficient with different diameters of dowel bar specimens

由图3可知,同等直径 SFRC 试件的传荷性能明显优于普通砼试件,在混凝土中掺加钢纤维能够有效的提高基体整体性和接缝处传荷能力.两种试件传荷系数均随传力杆直径的增大而增大,但传荷能力衰减速率与直径无关.普通砼试件杆径每增大 2 mm,加载各阶段平均传荷系数约增大 0.21%~0.52%.直径 32 mm 的试件比直径 25 mm 的试件传荷系数大 0.63%~1.58%,SFRC 试件涨幅较小.加载各阶段平均传荷系数增长率为 0.14%~0.57%/(2 mm),直径 32 mm 的试件比直径 25 mm 的试件传荷系数大 0.43%~1.39%,说明在普通砼试件中增加杆径效果更好.这是由于杆径增大提高了普通砼试件的刚度和抗剪强度,而 SFRC 试件本身就具有很高的整体性。

试件传荷系数早期衰退明显,后期衰退缓慢,普通砼试件的传荷能力在最初加载的 7 万次中显著下降,当荷载循环次数超过 7 万次后,各试件传

荷系数降低速率开始变缓且曲线基本呈线性衰退.当疲劳加载次数超过 50 万次时,不同杆径试件的传荷能力下降速率进一步变小,加载 50 万次时的传荷系数较 7 万次时降低了 0.42%~0.97%.加载 100 万次时的传荷系数计算值较 50 万次时仅降低了 0.35%~0.84%,在此过程中杆径为 25 mm 的试件降低最大.说明普通砼试件在受荷早期杆件与混凝土的应力集中及包裹作用消退较快,二者间形成的孔隙使粘结力下降的同时也降低了接缝处的传荷能力,所以此时曲线斜率较大而试验后期曲线较为平缓.该衰退曲线可分为 3 个阶段:快速衰减阶段、平稳下降阶段、保持阶段。

对于 SFRC 试件,在整个加载过程中传荷能力下降均比较缓慢,初期加载的 10 万次有 1%左右的降幅,加载 10 万次后衰减速率基本保持不变.增大杆径可以有限提高试件传荷性能,在加载 50 万次时传荷系数的最大增幅仅为 1.36%,加载 100 万次时的最大增幅为 2.51%。

2.2 传力杆长度

普通砼试件 3[#]、5[#]~7[#]及 SFRC 试件 13[#]、15[#]~17[#]传力杆直径均为 30 mm,杆长范围 350~500 mm,图 4 为不同杆长试件接缝传荷系数随加载次数变化的衰减曲线,图中实线为 SFRC 试件,虚线为普通砼试件。

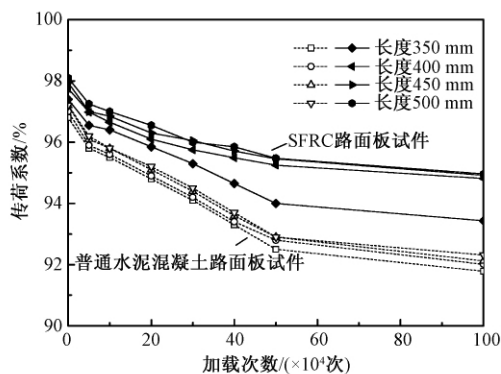


图4 不同传力杆长度试件的传荷系数衰减曲线

Fig.4 Attenuation curves of load transfer coefficient with different lengths of dowel bar specimens

由图4可知,同等杆长 SFRC 试件的传荷性能优于普通砼试件,两种试件传荷系数均随传力杆长度的增大而增大,但增幅十分有限,曲线衰减速率不受杆长因素影响.普通砼试件杆长每增大 50 mm,平均传荷系数约增大 0.16%~0.29%,杆长 500 mm 的试件比杆长 350 mm 的试件传荷系数约大 0.31%~0.58%.SFRC 试件涨幅较大,杆

长每增大 50 mm 平均传荷系数增幅 0.21% ~ 0.54%,说明在 SFRC 试件中增加杆长效果更好。

在疲劳加载初期,两种试件传荷系数衰退明显,当荷载循环次数超过 3 万次后,各试件传荷系数降低速率开始变缓,且 SFRC 试件曲线基本呈线性衰退.普通砼试件在 50 万次后衰退速率进一步减缓,整个曲线可分为快速衰减阶段和平稳下降阶段.单纯提高传力杆的长度对提高接缝传荷能力有限,尤其是对于普通砼路面结构。

2.3 混凝土路面板厚度

普通砼试件 3[#]、8[#] ~ 10[#] 及 SFRC 试件 13[#] 传力杆直径均为 30 mm,杆长均为 450 mm,普通砼板厚 240 ~ 300 mm, SFRC 试件板厚 200 mm,图 5 为上述编号试件的接缝传荷系数衰减曲线。

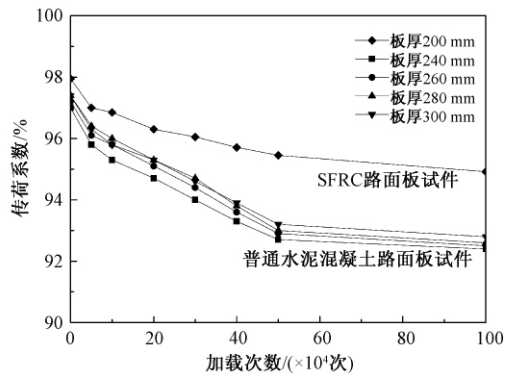


图5 不同混凝土板厚试件的传荷系数衰减曲线

Fig.5 Attenuation curves of load transfer coefficient with different thickness of concrete slab specimens

由图5可知,板厚 200 mm 的 SFRC 试件传荷性能仍优于普通砼试件,普通砼衰退速率较 SFRC 试件更大,掺加钢纤维要比增加板厚效果明显,两者差异随循环次数的增加而逐步增大.普通砼试件不同板厚试件的传荷能力差别微小,板厚 300 mm 与 240 mm 各阶段的最大差值 0.54% ~ 2.18%,而 SFRC 试件的传荷系数在加载 50 万次后仍比普通试件高 2.42% ~ 2.97%。因此,混凝土板厚对接缝传荷能力影响有限, SFRC 能有效减小路面板的铺筑厚度。

2.4 SFRC 试件钢纤维掺量

SFRC 试件 13[#]、18[#] ~ 20[#] 传力杆直径均为 30 mm,杆长均为 450 mm,钢纤维体积掺量 0.6% ~ 1.2%,图 6 为各试件接缝传荷系数随加载次数变化的曲线。

由图6可知,钢纤维掺量对试件传荷性能的影响十分明显,增加钢纤维掺量能够有效提高接缝处的传荷能力.各试件初始传递值为 97.4% ~

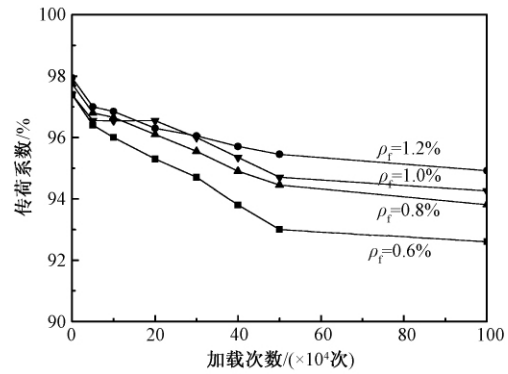


图6 不同钢纤维掺量 SFRC 试件的传荷系数衰减曲线

Fig.6 Attenuation curves of load transfer coefficient with different steel fibers of SFRC specimens

97.95%,加载 50 万次后保持在 93.02% ~ 95.46%,衰减幅度 2.49% ~ 4.38%,加载 100 万次后传荷系数仍保持在 92% 以上.试件钢纤维体积掺量每增加 0.2%,传荷系数增幅为 0.56% ~ 2.64%,掺量由 0.6% 提高到 0.8% 时效果最为明显,加载 50 万次时增幅 2.64%。

在疲劳荷载最初循环的 5 万次中, SFRC 试件的传荷系数降幅约为 0.88% ~ 1.04%,在循环加载的 5 ~ 50 万次之间,曲线降低速率变缓且呈线性衰退;当疲劳加载次数超过 50 万次后,曲线降幅进一步减缓,整个加载过程中以钢纤维体积掺量 0.6% 的试件曲线降幅最大.当钢纤维体积掺量较小时 ($\leq 0.6\%$),材料性能接近于普通混凝土,钢纤维的增强作用减弱,传荷系数的降低趋势接近于三阶段曲线;当钢纤维体积掺量较大时,传荷系数曲线则表现为 SFRC 材料的两阶段衰退模式。

3 结论

(1) 普通水泥混凝土路面板接缝传荷能力衰退曲线可分为快速衰退、平稳下降和保持 3 个阶段; SFRC 试件在整个加载过程中传荷能力下降较为缓慢,可分为快速衰退和平稳下降 2 个阶段。

(2) 接缝传荷系数的衰退速率随着钢纤维掺量的增加而减小,与传力杆直径、长度及混凝土板厚度等因素无关。

(3) 传力杆直径、长度及钢纤维掺量的增加,均能提高 SFRC 试件接缝的传荷性能,但提高幅度十分有限,其中以钢纤维掺量影响最大。

(4) 不同 SFRC 试件接缝传荷系数衰减曲线特征相似,分为快速衰减阶段和平稳下降 2 个阶段,但当钢纤维体积掺量 $\leq 0.6\%$ 时,曲线表现为三阶段衰退,传力杆直径及长度对曲线衰退形式无影响。

(5) 配有传力杆的 SFRC 路面板能有效提高接

缝传荷能力,降低其衰减速率;在加载 100 万次后,其传荷系数仍保持在 90% 以上,传荷性能优异。

参考文献:

- [1] 刘优平,黎剑华,雷雨,等.隧道钢纤维混凝土路面施工技术[J].施工技术,2007,36(7):44-45.
- [2] 徐智.钢纤维混凝土在道路工程中的应用研究[J].内蒙古农业大学学报,2012,33(4):179-183.
- [3] 周正峰.水泥混凝土路面接缝传荷能力的研究现状和发展趋势[J].公路,2011,56(7):49-53.
- [4] 交通运输部公路局研究院.JTG/T F30—2014 公路水泥混凝土路面施工技术细则[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [5] 交通运输部公路局研究院.JTG D40—2011 公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [6] 袁玉卿,刘凤利,王选仓.旧水泥路面沥青加铺层间防裂抗拉强度指标研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(2):28-32.
- [7] 李晶晶,张擎.水泥混凝土路面纵缝拉杆传荷试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2015,36(6):119-122.
- [8] 谭忆秋,李洛克,曹鹏,等.除冰盐环境下水泥混凝土路面传力杆的锈蚀机理与传荷失效过程分析[J].工程力学,2013,30(12):199-205.
- [9] 罗勇,袁捷.三维有限元法对水泥混凝土道面接缝传荷作用的模拟方法研究[J].公路交通科技,2013,30(3):32-38.
- [10] MANCIO M, CARLOS C, ZHANG J Y, et al. Evaluation of corrosion resistance of steel dowels used for concrete pavements [J]. Journal of materials in civil engineering, 2008, 20(10):650-658.
- [11] 周正峰,凌建明,袁捷.机场水泥混凝土道面接缝传荷能力分析[J].土木工程学报,2009,42(2):112-118.
- [12] 赵尚传,傅智,罗翥,等.超重轴载作用下混凝土路面应力分析[J].公路交通科技(应用技术版),2007,3(1):43-45.
- [13] 郝建国.钢纤维混凝土在高速公路隧道路面结构中的应用[J].公路,2006,51(6):158-162.
- [14] 赵尚传,傅智.钢纤维水泥混凝土路面接缝传荷能力分析[J].公路,2002,47(11):1-5.
- [15] 范小春,余煜,潘文杰,等.层布式钢纤维混凝土复合路面设计研究[J].混凝土,2015,37(8):146-152.
- [16] 王雪亮,李海波,卢哲安.层布式钢纤维混凝土路面的有限元分析[J].武汉理工大学学报,2006,28(4):87-90.
- [17] 贺东青,王一鸣,刘博.复合式钢纤维混凝土路面研究[J].河南大学学报(自然科学版),2014,44(2):240-243.
- [18] 中交公路规划设计院有限公司.JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S].北京:人民交通出版社,2002.

Test Study on Attenuation Law of Joint Load Transfer Efficiency of Steel Fiber Reinforced Concrete Pavement

WANG Jianning^{1,2}, DOU Yuanming^{1,2}, SUN Jishu^{1,2}, WEI Ming³, ZHAI Yuxi¹

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China; 3. School of Transportation, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to study the impact of various parameters on attenuation law of joint load transfer efficiency of steel fiber reinforced concrete (SFRC) pavement, 20 pavement specimens with different dowel bar diameter, length, thickness of concrete slab and content of steel fibers were tested in fatigue experiments. The paper briefly introduced the test arrangement including the raw materials of specimens, the parameters and production of specimens, as well as the loading system. It was shown that the steel fiber added in concrete pavement could effectively improve the load transfer efficiency and reduce the attenuation rate of load transfer coefficient. The attenuation curves of joint load transfer coefficient of SFRC specimens under different factors had similar characteristics, which could be divided into two stages: rapid attenuation and steady decline. However, the curve showed three-stage decay when the content of steel fiber was less than or equal to 0.6%. Although the increase of dowel bar diameter, length and content steel fiber could improve the joint loading performance, the increase range was extremely limited, and the impact of steel fiber content was the largest. The decline rate of load transfer coefficient, which had no relations with dowel bar diameter, length and concrete slab thickness, decreased with the increase of steel fiber content. After the load was applied 100 million times in the experiment conditions, the load transfer coefficient of SFRC specimens was remained above 90%, which showed a good load transfer capacity. The test results could provide a reference for SFRC structural design.

Key words: road engineering; steel fiber reinforced concrete pavement; joint; load transfer efficiency; attenuation curves

文章编号: 1671-6833(2017)05-0055-06

钢桥面铺装层粘接强度超声波无损检测技术研究

吕彭民, 吴玉文, 宋年波

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要: 根据超声波理论, 提出利用超声反射法对钢桥面铺装层粘接强度进行无损检测. 根据工程实际中常见的5种界面, 制作3种类型的相关试样, 利用ZBL-520非金属超声仪进行多次检测试验. 通过对各界面波形和声学参数的研究, 发现可将波幅值作为检测粘接强度评判的物理量. 最后选择在同一试样上进行有损、无损界面对比试验. 试验结果表明: 各界面波幅值存在差异, 其中粘接良好的界面波幅值最小, 因此可通过大量测点数据的波幅平均值对桥梁某一部分或总体粘结层质量进行评判.

关键词: 钢桥面; 铺装层; 粘接强度; 超声反射法; 无损检测

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.023

0 引言

桥面铺装层中的防水粘接层是确保其结构耐久性的重大措施之一, 也是保证铺装层与桥面板粘接成一个整体的关键^[1], 防水粘接层粘接力不足是造成大跨径桥梁桥面铺装层早期破坏的一个重要原因^[2]. 但是, 目前国内外还没有统一的桥面铺装层中防水粘接层粘接强度评价标准.

现有的大跨径桥梁桥面铺装层粘接强度检测主要通过有损检测方法, 即对桥面铺装层采用钻芯取样的方法, 利用拉拔仪或剪切仪进行测量^[3]. 但是, 有损检测会对铺装层结构的整体性造成一定的破坏, 影响使用性能. 被测点有限, 检测结果往往缺乏代表性, 且存在特殊条件下(如高温、工地上不便利等)不易操作等问题.

目前, 超声反射法已经成为检测粘结界面粘接强度的最有效的无损检测手段之一, 超声波检测已经用于金属-金属、金属-非金属粘接界面的无损检测. 国内外已经在此领域取得了一定的成果, 文献[4]将超声检测技术用于检测结构刚度影响较小但存在缺陷的粘接结构很有效. 文献[5]等采用高频超声波研究粘接界面的无损检测, 取得了比Lamb波法更好的效果. 周伟刚^[6]采用超声纵波和横波反射的方法来单

面检测钢-混凝土界面粘结质量.

由于钢桥桥面铺装层粘结性能无损检测属于金属-非均匀性非金属粘结界面无损检测技术, 检测难度较大, 目前桥面铺装层粘接强度无损检测技术仍属于盲区. 笔者提出利用超声反射法对钢桥面铺装层与桥面板间粘接强度进行无损检测. 通过试验研究判断可用于无损检测的相关声学参数, 并进行有损、无损对比检测试验, 探索桥梁桥面防水粘接层粘接强度检测用无损检测技术.

1 桥面铺装层粘接强度无损检测技术研究

1.1 声压反射率和透射率

超声波从一种介质垂直入射到另一种介质, 会发生反射和折射. 反射波声压 P' 和入射波声压 P 之比, 被称为声压反射率, 即 $r = P'/P$. 透射声压 P_2 和入射声压 P 之比, 被称为透射率, 即 $t = P_2/P$. 当第二种介质较厚时,

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (1)$$

$$t = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

式中: Z_1 、 Z_2 为两种介质的声阻抗. $Z = P/u = \rho c$, u 是质点的振动速度; ρ 是介质的密度; c 是波速.

收稿日期: 2017-03-10; 修订日期: 2017-05-17

基金项目: 交通运输部应用基础研究资助项目(013319812160)

作者简介: 吕彭民(1957—), 男, 陕西渭南人, 长安大学二级教授, 博导, 主要从事工程机械和大型结构强度分析、疲劳寿命预测和车-路耦合动力学方面的研究, E-mail: lpmin@chd.edu.cn.

当第二种介质为薄层时,

$$r = \sqrt{\frac{\frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}{1 + \frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}}; \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\zeta - \frac{1}{\zeta} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d_2}{\lambda_2}}}, \quad (4)$$

式中: ζ 为声阻抗之比, $\zeta = Z_1/Z_2$; λ_2 为第二种介质的波长; d_2 为第二种介质的厚度.

可以看出声压反射率与界面两侧介质的特性阻抗有关,不同界面反射声压不同,即在超声检测仪上显示的波高不同,可以据此初步判断粘结质量的好坏.

1.2 超声检测技术判断依据

目前,混凝土超声无损检测所需测量的物理量是声时、波幅、频率以及接收波波等,主要以声速、波幅和 PSD 判据进行评判. PSD 判据的物理意义为:声时一深度曲线相邻两点的斜率与相邻时差值的乘积,根据 PSD 值在某深度处的突变,结合波幅变化情况,进行异常点判定^[7].然而文献[8]研究表明,仅用声速、波幅和 PSD 判据进行评判存在不足,接收波的频率和实测波形等携带的大量信息通常被忽略,因此有必要利用实测波形和频率进行辅助评判,避免误判.笔者将通过检测数据分析,确定评判桥梁铺装层一钢界面粘结强度的物理量.

1.3 超声脉冲反射法检测试验模型

从桥面铺装层进行检测,即从沥青混凝土一侧进行测试的试验模型如图 1 所示.

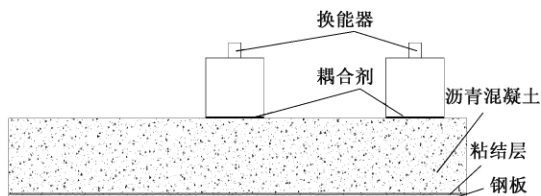


图 1 超声脉冲反射法检测试验模型

Fig. 1 Test model for the detection of the ultrasonic pulse echo method

超声波经过换能器-耦合剂界面时会产生能量衰减,为了减少能量的不必要损耗,要尽量使耦合剂紧贴沥青混凝土表面,在保证良好耦合效果的情况下,耦合剂涂层越薄越好^[3],因此在分析中超声波经过耦合剂层可以不予考虑.

2 超声检测试验方法研究

2.1 试验试样的制作

根据工程施工经验,导致桥梁桥面板与铺装层脱粘的工程原因主要有:防水粘接层喷洒不均匀引起的局部粘接强度不足、桥面板表面清理不干净使其无法粘接牢固、阴雨天在桥面板表面有水时施工等.针对这几种原因以及工程实际中铺装层和桥面板之间常出现的粘结缺陷,结合超声反射法检测粘结界面的理论,拟制定的试验须提供以下几种界面:铺装层与空气界面、铺装层与水界面、铺装层与沙土界面、铺装层与桥梁面板界面(无防水粘结层)、铺装层与桥梁面板界面(有防水粘结层).

为了获取以上 5 种试验界面,笔者借助轮碾成型机制作了 3 种类型试样,试样大小设置为 300 mm × 300 mm × 50 mm. 针对铺装层与空气界面以及铺装层与水缺陷界面,制作了试样 I,如图 2(a) 所示. 试样 I 采用 AC-20 沥青混合料碾压成型,为单独的沥青混凝土板,底部无钢板. 针对铺装层与沙土缺陷界面制作了试样 II,如图 2(b) 所示. 在钢板左侧 1/2 表面撒布一定量的细沙(细砂粒径为 0.3 mm) 模拟缺陷,在钢板右侧 1/2 表面洒布一定量的乳化沥青(防水粘结层),试样一半模拟有沙土界面,另一半模拟粘结良好界面. 针对缺少防水粘结层的铺装层与桥梁面板缺陷界面制作了试样 III,如图 2(c) 所示. 为了形成对比,在制

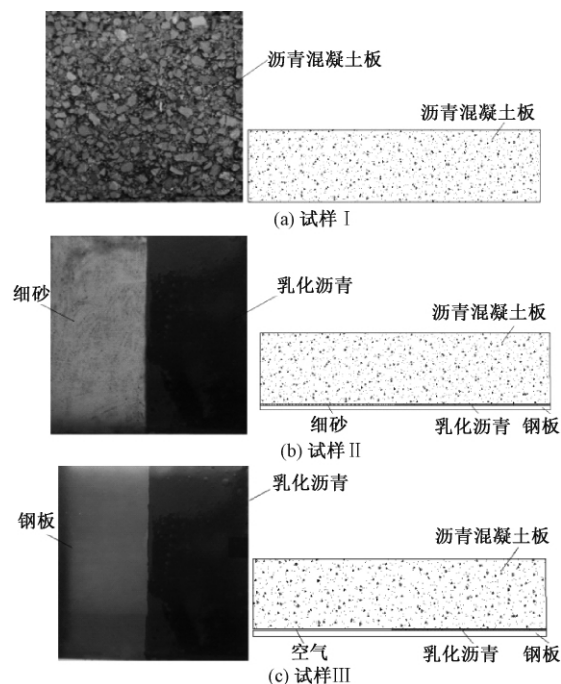


图 2 3 种试样

Fig. 2 Three kinds of samples

作试样Ⅲ时,钢板的右侧 1/2 表面洒布一定量的乳化沥青(防水粘结层),左侧不洒布乳化沥青。

2.2 试验仪器及换能器

笔者从沥青混凝土一侧进行试验检测,使用的仪器是 ZBL-U520 非金属超声检测仪。试验采用一发一收单面平测的方式,两换能器内边缘距离取为 50 ~ 100 mm,试样厚度 50 mm,相当于测距为 118 ~ 144 mm,车辙板的横截面积为 30 × 30 cm。根据工程经验及换能器频率表,本试验采用 50 kHz 的换能器。

2.3 测点布置及各测点测试次数

考虑到试样尺寸的大小,参考超声法检测混凝土缺陷技术规程,将两换能器的边缘距离取为 80 cm,每个试样布置 28 个测点,左右两部分各 14 个,试样测点布置如图 3 所示。

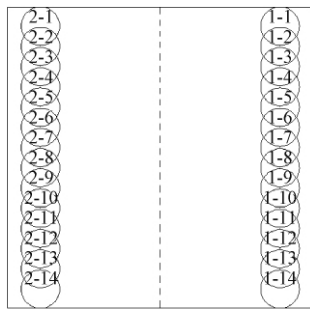


图 3 测点布置图

Fig. 3 Layout of measuring points

试样 I 测点 1-1 ~ 1-14 和测点 2-1 ~ 2-14 为沥青混凝土—空气或者沥青混凝土—水界面测点;试样 II 测点 1-1 ~ 1-14 为粘结良好的界面,即沥青混凝土—钢板(有防水粘结层)界面,测点 2-1 ~ 2-14 为有沙缺陷的粘结界面,即沥青混凝土—沙界面;试样 III 测点 1-1 ~ 1-14 为粘结良好的界面,测点 2-1 ~ 2-14 为缺少防水粘结层的沥青混凝土—钢板界面。

理论上,同一测点试验次数越多,测得该点的声学参数的统计值越接近实际值,但如果试验次数太多,检测时工作量非常大,检测效率低。为了确定理想的试验次数,笔者取试样 I 和试样 III 进行超声试验检测。每个试样选取了 6 个测点,试样 I 的 1-03 ~ 1-08 测点,即沥青混凝土—空气界面;试样 III 的 1-03 ~ 1-08 测点,即粘结良好的界面。

以实验次数为横坐标,以测得的各个测点的幅值均值为纵坐标,绘制幅值均值—试验次数折线图,如图 4、5 所示。声时值和频率的均值—试验次数折线图与图 4、5 类似,由于篇幅有限,不再列出。

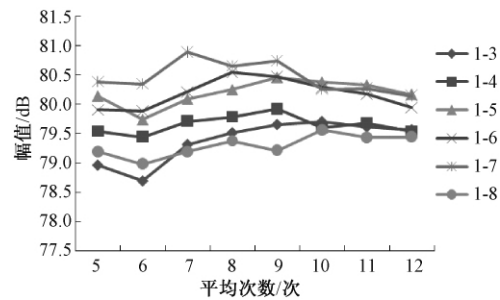


图 4 试样 I 6 个测点 n 次实验幅值均值折线图

Fig. 4 Line chart of average values of n times of amplitude of six measuring points of sample I

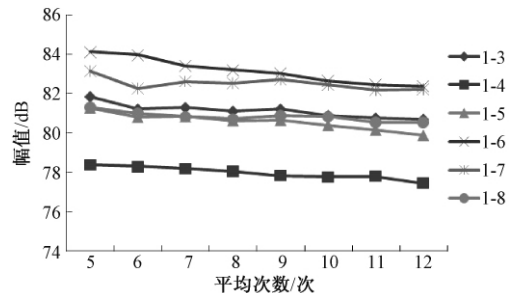


图 5 试样 III 6 个测点 n 次实验幅值均值折线图

Fig. 5 Line chart of average values of n times of amplitude of six measuring points of sample III

由图 4、5 可知,当试验次数达到 10 次以上后,幅值平均值基本趋于稳定,其它试样测试结果规律相同。故在后续试验检测时每个待测点测量 10 次,取其平均值。

2.4 确定试验检测参数

为了通过试验检测来判别不同的粘接情况,就要获取能够区分不同粘结界面的试验参数,以分析它们之间的差异。为研究各界面声学参数之间的差异,此处对上述 5 种界面进行大量的试验检测。

(1) 沥青混凝土—空气界面超声检测试验

对试样 I 进行检测,由于试样 I 左右两部分相同,试验时只对右侧部分(测点 1-1 ~ 1-14)进行检测,将试验结果中参数异常的点剔除掉,剩余测点试验结果特征值见表 1。其余各试样不同界面试验结果特征值见表 1。从表 1 中可以看出,空气界面各声学参数的离散性不是很大,说明相同界面各测点的回波特性相近。

(2) 沥青混凝土—水界面超声检测试验

将试样 I 底面置于湿润的毛巾上,模拟沥青混凝土—水缺陷界面,此时对试样 I(测点 1-1 ~ 1-14)进行检测,为了更直观地观察空气界面以及水界面相应各测点声时、幅值以及频率等试验结果,现以测点为横坐标,各测点声学参数均值为纵

表1 各试样不同界面试验结果特征值

Tab.1 The characteristic values of test results of different interfaces of each sample

试样	界面	项目	最小值	最大值	均值	标准差
试样 I	空气	声时	25.72	27.12	26.52	0.431
		波幅	78.83	79.88	79.41	0.272
		频率	46.76	47.73	47.25	0.317
	水	声时	25.20	26.75	26.01	0.550
		波幅	79.10	81.12	80.25	0.643
		频率	46.01	48.30	47.27	0.720
试样 II	粘结良好	声时	24.36	26.67	25.59	0.723
		幅值	77.88	81.93	79.71	1.379
		频率	42.32	47.92	45.02	1.726
	沙缺陷	声时	24.40	27.16	25.99	0.825
		幅值	76.37	81.37	78.09	1.375
		频率	43.56	48.22	45.50	1.479
试样 III	粘结良好	声时	23.72	26.13	25.24	0.774
		幅值	80.07	82.63	81.57	0.719
		频率	42.65	49.10	45.99	2.198
	无防水粘层	声时	23.84	26.08	25.17	0.753
		幅值	78.43	82.38	79.85	1.160
		频率	41.65	49.50	44.97	2.245

注:表中声时为 μs ;波幅单位为 dB ;频率单位为 Hz .
坐标,在同一坐标系中绘制空气界面以及水界面折线图,如图6所示。

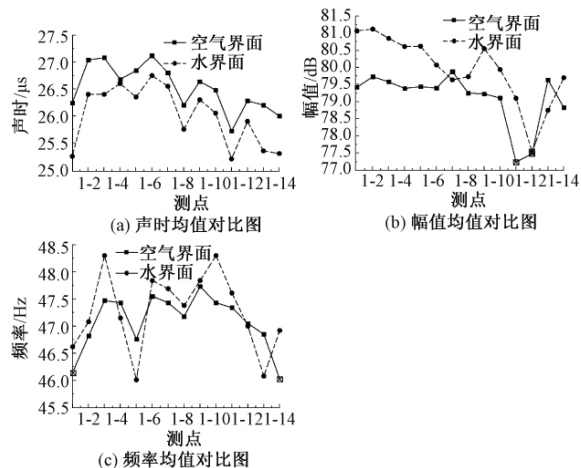


图6 试样 I 声学参数均值对比图

Fig.6 Comparison chart of average values of acoustic parameters between air and water interface of sample I

由表1以及图6可以看出:对于同一个测点,空气界面的声时明显比水界面的高,而对于波幅,水界面的要比空气界面的高,空气界面和水界面检测到的频率相差不明显。

(3) 沙土界面和粘接良好界面

对试样 II 进行检测,试样 II 左半部分(2-1 ~ 2-14 测点)为沙土缺陷界面,右半部分(1-1 ~ 1-14 测点)为粘接良好界面。试样 II 沙土缺陷和粘接

良好界面各测点声时、波幅、频率对比,如图7所示。

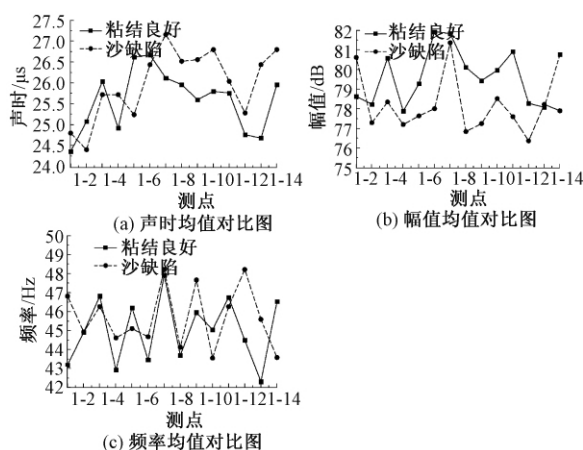


图7 试样 II 声学参数均值对比图

Fig.7 Comparison chart of average values of acoustic parameters between sand defective and good bonding interface of sample II

由图7可以看出,两种界面声时和频率相差明显,而对于波幅,有沙缺陷的界面明显低于粘接良好的界面,但也有个别测点波幅与粘接良好界面一样甚至偏高。

(4) 无防水粘层界面和粘接良好界面

以试样 III 进行检测,试样 III 左半部分(2-1 ~ 2-14 测点)为未洒布防水粘层的缺陷界面,右半部分(1-1 ~ 1-14 测点)为粘接良好界面。试样 III 粘接良好和无防水粘层界面各测点声时、波幅、频率对比如图8所示。

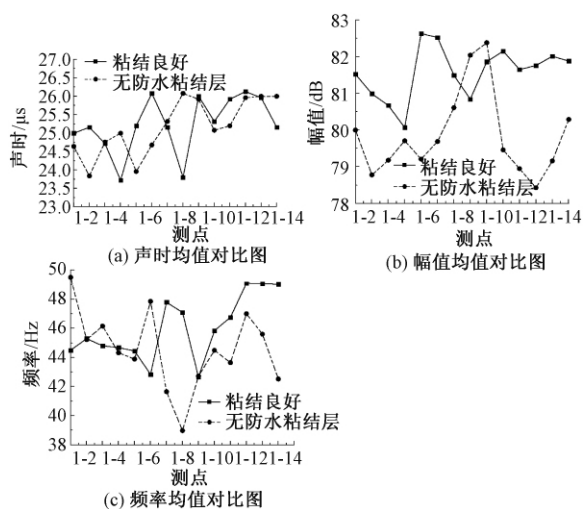


图8 试样 III 声学参数均值对比图

Fig.8 Comparison chart of average values of acoustic parameters between good bonding interface and interface without waterproof bonding layer of sample III

观察图8(a),不难发现两种界面声时比较接近,无规律可循;观察图8(c),可以看出粘接良好

的界面多数测点频率均值比无防水粘结层的数值大,但也没有明显的规律;观察图 8(b),可以明显看出粘结良好的界面除个别测点外,波幅均值要比无防水粘结层的高。

综上,在沥青混凝土相同的情况下,不同粘结界面对声时的影响也不明显,声时只与传播距离以及在沥青混凝土中的传播速度有关,不同界面虽然对频率衰减作用不一样,但也没有明显的规律可循,只有波幅变化比较显著,因此可以通过波幅之间的差异来识别不同的粘结界面。

2.5 有损和无损界面对比试验

为了提高不同界面情况下波幅大小之间的可比性,在同一试样中对工程中铺装层与桥面板常见的几种典型界面进行波幅检测分析。选择试样 II 进行粘接良好、空气、湿沙土、干沙土等几种界面情况进行检测,检测时选择 5 个测点(1-3、1-5、1-7、1-9、1-11)。将试样 II 底面的钢板揭掉,即形成沥青混凝土—空气界面;将去掉钢板的试样 II 的 5 个测点底面相应位置涂上湿沙土,涂匀并尽量控制沙土厚度一致,这样便形成了沥青混凝土—湿沙土界面。湿沙土中含有大量水分,而且水蒸发后最终会形成沥青混凝土—干沙土界面,水分对反射回波参数有一定影响,为了观察水对试验的影响,等湿沙土干了后对试样进行干沙土界面试验。4 种界面 5 个测点试验结果见表 2。

表 2 4 种界面试验结果特征值
Tab. 2 The characteristic values of test results of four kinds of interface

界面	最小值 /dB	最大值 /dB	均值 /dB	标准差 /dB	95% 可靠度的 置信区间
粘结良好	79.06	81.66	80.07	0.976	78.86 ~ 81.28
空气	81.46	84.22	82.32	1.160	80.88 ~ 83.76
湿沙土	79.82	83.14	80.92	1.300	79.31 ~ 82.53
干沙土	81.03	84.18	82.49	1.187	81.02 ~ 83.96

从表 2 中可以看出,干沙土界面的波幅最大,空气界面次之,湿沙土第三,粘结良好界面的波幅最小,各种界面测点波幅离散性都比较大。主要是因为沥青混凝土材料的高度不均匀,各测点处混凝土的密实度、孔隙以及强度等因素不同,另一方面无法保证每次耦合状况完全相同,试验结果基本符合超声波在两种不同介质界面的传播规律。为方便对这 4 种界面各测点试验结果的对比,图 9 为 4 种界面试验检测结果的波幅对比图。

由图 9 可以看出,空气界面和干沙土界面波幅最大,但相差不大,湿沙土界面次之,粘接良好

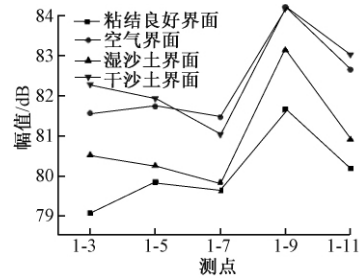


图 9 试样 II 4 种界面波幅对比图

Fig. 9 Comparison chart of amplitude of four kinds of interface of sample II

的界面波幅最低;由于各测点波幅值变化较大,很难从一个测点值判断粘结层质量,但由平均值可以看出有明显差异,也就是说通过大量测点数据平均值可以对桥梁某一部分或总体粘结层质量进行评判。

3 结论

(1) 由于沥青混凝土材料的高度不均匀性,每个测点数据离散性很大,当测量次数达到 10 次左右时,各测量参数的平均值才基本趋于稳定。因此,每个测点数据最好取 10 次测量数据的平均值。

(2) 由试验可知,对于沥青混凝土—钢粘结界面,若采用超声波进行检测,应以波幅值作为评判界面粘结强度的物理量。

(3) 同一测点,不同粘结质量时波幅值有一定差异,但由于各测点波幅值变化较大,很难从一个测点值判断粘结层质量,但各测点平均值差异明显,也就是说可通过大量测点数据平均值对桥梁某一部分或总体粘结层质量进行评判。

参考文献:

- [1] 周键伟. 水泥混凝土桥面防水粘结层的试验研究[D]. 南京: 南京林业大学土木工程学院, 2009.
- [2] 卢哲安, 易贤仁, 杨星云. 高速公路桥涵桥面铺装层力学性能的试验研究[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(4): 92-95.
- [3] 韩延波. 桥梁面板与铺装层间粘结强度无损检测试验研究[D]. 西安: 长安大学工程机械学院, 2014.
- [4] AKKER S, ARMAN J. Ultrasonic investigation on plane interfaces between polymers[J]. Ultrasonics, 1997, 35(4): 287-295.
- [5] QUAFTOUH M, XU W J, OURAK M, et al. Evaluation of adhesion by means of high-frequency ultrasound[J]. Journal de Physique, 1992(2): 835-838.
- [6] 周伟刚. 超声反射法单面检测钢—混凝土粘结界

- 面质量的研究 [D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2006.
- [7] 邢哲, 宛新林, 宛传虎, 等. 超声波透射法在基桩检测中 PSD 评定的应用研究 [J]. 工程与建设, 2011, 25 (4): 520 - 521.
- [8] 邓桂萍, 王强. 基桩超声波检测中的频率和波形分析初探 [J]. 公路交通科技, 2009 (9): 72 - 74.

Research on the Ultrasonic Non-destructive Test Technology of Bonding Strength for the Steel Bridge Deck Pavement Layer

LYU Pengmin, WU Yuwen, SONG Nianbo

(Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Based on the ultrasonic theory, the ultrasonic reflection method was suggested in the paper as non-destructive testing for steel bridge deck pavement layer bonding strength. According to five kinds of common interfaces in practical engineering, three types of related samples were made, and many detection tests were done by using the ZBL-520 non-metallic ultrasound instrument. By studying the waveform and acoustic parameters of each interface, it was found that the amplitude value could be used as the physical quantity to detect the bonding strength. Finally, the comparative experiments of loss and lossless interfaces were carried out on the same sample. The test results indicated that there were different degrees of differences in the amplitude of each interface, and the good bonding interface's relative amplitude value was the smallest. The quality of bond layer of a part or the total of a bridge could be judged by the average value of a large number of measured point data.

Key words: steel bridge deck; pavement layer; bonding strength; ultrasonic wave reflection; non destructive test

大型预应力混凝土矩形渡槽槽身结构型式研究

陈玉英

(河南省水利勘测设计研究有限公司 工程设计二院, 河南 郑州 450016)

摘要: 结合南水北调中线双洎河渡槽探讨大型预应力混凝土矩形槽槽身结构型式. 采用平面结构力学法和三维有限元法相结合的方式对槽身结构方案进行配筋和混凝土应力计算, 并对槽身混凝土应力、施工方案和投资进行比较, 得出大型预应力混凝土矩形渡槽宜采用边墙和底板均无肋的板式结构, 此种结构混凝土应力更均匀、利于抗裂, 亦便于机械化施工, 为今后大型预应力混凝土矩形渡槽的设计施工提供参考.

关键词: 大型预应力混凝土矩形槽; 板式矩形槽; 南水北调中线工程

中图分类号: T672.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.020

0 引言

随着解决区域性水资源短缺的大型调水工程增多(如引江济淮、引绰济辽等), 输水渡槽特别是梁式渡槽, 具有跨越能力强、水头损失小、运行检查直观、维护方便等优点, 在调水输水工程中被广泛采用. 目前有关渡槽的研究如大跨度渡槽的结构型式研究、渡槽的动力特性及减隔震研究^[1-2]、大型渡槽施工技术装备研究^[3]、渡槽运行风险识别和预警关键技术研究等仍在进行中, 这一系列的研究成果助推大型渡槽朝着大跨径、机械化施工、自动和精细化运行方向发展. 大型渡槽要实现大跨径比较经济的方式是选用合适的槽身结构型式、采用预应力混凝土结构. 笔者结合南水北调中线双洎河渡槽的实情选取合理的槽身结构型式(简支梁式双厢预应力混凝土矩形槽), 借鉴前期双洎河渡槽项目^[4]和沙河渡槽项目^[5]成果, 并结合设计和施工需要, 优化矩形槽槽身结构型式, 为今后大型预应力混凝土矩形渡槽的设计施工提供参考.

1 工程概况

南水北调中线双洎河渡槽位于河南省新郑市, 渡槽设计流量 $305 \text{ m}^3/\text{s}$, 加大流量 $365 \text{ m}^3/\text{s}$,

全长 810 m , 槽身长 600 m , 渠道设计水深 7 m , 槽内设计水深 6.67 m , 渡槽总设计水头 0.22 m .

渡槽所跨越的双洎河百年一遇洪峰流量为 $4770 \text{ m}^3/\text{s}$ 、三百年一遇洪峰流量为 $6850 \text{ m}^3/\text{s}$. 区内地质条件为上第三系软岩 N_{1L} 黏土岩、砂岩上覆第四系冲洪积层轻壤土、细砂、砾石^[6], VII度地震区.

双洎河渡槽因流量大、水头少, 槽身过流断面巨大, 槽身采用简支梁式渡槽, 可利用其巨大的过流断面兼作纵向承重结构. 槽身纵向采用简支梁式、跨径 30 m , 横向采用矩形断面, 四槽, 单槽净宽 7 m , 槽高 7.9 m , 两槽共用中隔墙成为整体的一联, 共两联; 每联槽身对应下部结构为一空心墩+承台+摩擦桩基础; 两联相互独立.

2 大型双厢预应力混凝土矩形槽槽身结构型式方案研究

2.1 前期结构型式及成果

沙河渡槽槽身结构研究^[5]时, 矩形槽方案槽身为双厢即2槽一联, 边墙及底板均带肋, 单槽净宽 7 m 、槽高 7.8 m , 跨径 30 m , 槽身材料为 C50 预应力混凝土. 槽身结构分析和数值模拟结果显示, 矩形槽混凝土应力在底肋、侧肋、底板、边墙结

收稿日期: 2017-03-17; 修订日期: 2017-05-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB04A05)

作者简介: 陈玉英(1971—), 女, 河南商城人, 高级工程师, 主要从事水利水电工程设计工作, E-mail: 1660273312@qq.com.

表1 一节槽身预应力钢束配筋量及挠度值

Tab.1 Quantity of prestressed steel strand and deflection value in a cross aqueduct

槽身结构型式	部位	纵向	横向	竖向	最大挠度 c/mm
矩形槽 (底板带肋)	边墙	$2 \times 14 \times 7 \times 7\phi 5$	—	$2 \times 122 \times 5 \times 7\phi 5$	1.18
	中墙	$27 \times 7 \times 7\phi 5$	—	$122 \times 5 \times 7\phi 5$	1.42
	底板	$2 \times 6 \times 5 \times 7\phi 5$	$61 \times 9 \times 7\phi 5$	—	—
	底肋	—	$13 \times 2 \times 9 \times 7\phi 5$	—	—
板式矩形槽	边墙	$2 \times 14 \times 7 \times 7\phi 5$	—	$2 \times 128 \times 5 \times 7\phi 5$	1.25
	中墙	$21 \times 7 \times 7\phi 5$	—	$128 \times 5 \times 7\phi 5$	1.51
	底板	$2 \times 7 \times 7 \times 7\phi 5$	$128 \times 7 \times 7\phi 5$	—	—

底支承单元上施加支座不可移动方向的约束. 对槽身由于温度变化产生的温度应力采用有限元计算^[10-11], 夏季月平均温差 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (内侧 $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, 外侧 $31.8\text{ }^{\circ}\text{C}$); 冬季月平均温差 $6.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (内侧 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 外侧 $-3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$). 进行温度应力计算时, 将混凝土实体单元 (SOLID45) 转换为热单元 (SOLID70) 计算结构在温度场作用下产生的应力. 对槽身结构最不利温变工况为满槽水夏季温升, 槽内壁受拉, 带底肋槽身内侧最大横向拉应力 2.19 MPa 、竖向拉应力 1.73 MPa 、纵向拉应力 1.93 MPa , 板式槽身内侧最大横向拉应力 1.94 MPa 、竖向拉应力 1.55 MPa 、纵向拉应力 1.68 MPa . 两种槽身结构的关键对比点 (如图1、图2) 跨中断面三向应力 (控制工况: 静力荷载 + 夏季温升 + 预应力) 见表2.

表2 槽身混凝土应力值

Tab.2 Concrete stress value of aqueduct

槽身结构型式	应力方向	点1	点2
矩形槽 (底板带肋)	纵向	+1.21	-2.43
	横向	+1.93	-3.97
	竖向	+1.62	-0.42
板式矩形槽	纵向	-0.89	-2.13
	横向	-0.73	-8.49
	竖向	-3.33	-0.07

注 “+”表示拉应力 “-”表示压应力.

从表2可见, 矩形槽带肋结构在肋与底板、槽壁结合处应力集中明显, 且施加预应力对腋角部位混凝土产生的预压应力有限, 槽身内侧过水面仍出现较大的拉应力, 同样南水北调中线沛河渡槽为三箱一联底板带肋矩形槽结构, 施加预应力后槽身内侧过水面仍有拉应力^[12], 所以不利于抗裂、防渗漏, 而无肋的板式矩形槽槽身内壁完全为受压状态, 从而在理论上保证槽身不渗漏, 结构耐久性更强.

2.4 施工方案及投资对比

大型渡槽槽身的施工方法有满堂支架法、预制架槽法和造槽机施工法. 双泊河常年有水,

且河道表层为松散土. 满堂支架法需要施工导流、汛期槽身不能施工、支架地基必须处理; 预制架槽法, 需要预制、存放场地和提槽机、运槽机及架槽机, 一次投入设备费约 $5\text{ }100$ 万元, 另外需租用和处理场地; 造槽机法在槽墩施工完成后造槽机在墩顶行走, 完成槽身施工, 常年可施工, 不需导流、不需增加施工场地. 3种施工方法相比较满堂支架法投资最少、预制架槽法投资最大, 考虑工期和施工质量, 采用造槽机施工. 两种槽身结构型式的主要工程量及投资见表3. 从表3中可以看出, 板式矩形槽相对于带底肋的矩形槽投资更省.

表3 槽身方案比选主要工程量及投资

Tab.3 Major quantities and investments of comparative aqueduct

槽身结构型式	矩形槽 (带底肋)	矩形槽 (无肋)
施工方案	造槽机	造槽机
槽身 C50 混凝土/ m^3	44 955	42 140
墩帽 C30 混凝土/ m^3	11 070	11 070
墩身 C30 混凝土/ m^3	27 073	27 073
承台 C30 混凝土/ m^3	20 215	20 215
桩长 (桩径 1.8 m) / m	21 950	21 659
普通钢筋/ t	13 492	13 052
预应力钢绞线/ t	2 093	2 130
施工设施投资/万元	4 100	4 000
建筑工程投资/万元	20 322	19 923
总投资/万元	24 422	23 923

3 结论

(1) 从结构应力分布上看, 板式矩形槽比带肋结构矩形槽应力分布更均匀, 也可以使槽身内壁过水面完全处于受压状态, 而带肋结构在肋与梁、板结合部位应力集中明显, 即使施加预应力槽内壁仍有拉应力.

(2) 从施工方面考虑, 板式矩形槽比带肋矩形槽结构外形更平顺, 模板制作、钢筋绑扎、混凝

土振捣更方便,也更适于机械化施工,施工质量和工期易于控制。

(3) 从投资方面比较,板式结构比带肋结构更省。

所以,大型预应力混凝土矩形渡槽宜采用板式槽身结构,施工时可采用一次成型的造槽机或架槽机方案(两者根据经济比较选取)。

参考文献:

- [1] 陈厚群. 南水北调工程抗震安全性问题[J]. 中国水力水电科学研究所学报, 2003, 1(1): 17-22.
- [2] 季日臣, 唐艳, 夏修身, 等. 大型梁式渡槽采用摩擦摆支座的减隔震研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(3): 213-217.
- [3] 董必钦. 南水北调中线大型渡槽重大技术装备研发应用及前景分析[J]. 中国水利, 2013(20): 66-68.
- [4] 华北水利水电学院, 河南省水利勘测设计院. 南水北调中线工程预应力混凝土渡槽结构设计试验研究[R]. 郑州: 华北水利水电学院, 河南省水利勘测设计院, 2002.
- [5] 华北水利水电学院, 河南省水利勘测设计研究有限公司. 沙河渡槽方案优选及结构分析研究报告[R]. 郑州: 华北水利水电学院, 河南省水利勘测设计研究有限公司, 2009.
- [6] 河南省水利勘测有限公司. 南水北调中线一期工程总干渠双洎河渡槽工程初步设计地质勘察报告[R]. 郑州: 河南省水利勘测有限公司, 2009.
- [7] 沈凤生. 特大型输水工程跨河梁式渡槽若干关键技术问题探讨[J]. 水利规划与设计, 2014(1): 1-4.
- [8] 南水北调中线建设管理局. 南水北调中线一期工程总干渠初步设计梁式渡槽土建工程设计技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [9] 水利部长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. SL191—2008 水工混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [10] 冯晓波. 特大型渡槽的温度应力分析[D]. 武汉水力电力大学土木建筑工程学院, 1999.
- [11] 冯晓波, 夏富洲, 王长德, 等. 南水北调中线大型渡槽运行期温度场的计算[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(2): 25-28.
- [12] 王刚, 任德记, 周亮, 等. 南水北调中线大型预应力渡槽有限元分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 90-93.
- [13] 河南省水利勘测设计研究有限公司. 南水北调中线全线充水试验双洎河渡槽结构安全分析报告[R]. 郑州: 河南省水利勘测设计研究有限公司, 2014.

Research of Large-scale Prestressed Concrete Rectangular Aqueduct Body Structure Type

CHEN Yuying

(Henan Water & Power Engineering Consulting Co. Ltd, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Based on Shuangji River aqueduct in the middle route of South-to-North Water Transfer Project, the structural type of large prestressed concrete rectangular aqueduct was examined. Plane structural mechanics method and 3d finite element method was used for calculation of reinforcement and concrete stress. By comparing the concrete stress, the groove construction method and the investment of different modes, it was concluded that slab structure of unribbed side wall and bottom plate was the appropriate structure for large-scale prestressed concrete aqueduct, and the structure of which had more balanced concrete stress, concrete cracking resistance, and was more convenient for mechanized construction. This paper provided a reference for the design and construction of large prestressed concrete rectangular aqueduct.

Key words: large prestressed concrete rectangular aqueduct; plate type rectangular aqueduct; middle route of south to north water transfer project

文章编号: 1671-6833(2017)05-0065-06

基于响应面法的车内噪声分析与优化

陆森林, 任栎翔

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 利用 Hypermesh 建立某车声固耦合模型, 在发动机激励下对车内噪声进行预测分析. 利用板件贡献度分析得出峰值频率下贡献度大的板件, 将其厚度作为设计变量. 通过拉丁超立方试验设计, 构造出质量和峰值频率下声压响应的响应面模型; 通过 Hammersley 抽样对构造出的响应面进行误差分析, 选出最优响应面模型. 根据最优响应面模型以质量最小为目标, 峰值声压、车身弯曲刚度和扭转刚度为约束条件进行遗传算法优化, 并通过有限元模型验证了优化结果以及响应面法对提高车身优化效率的有效性, 车内噪声得到控制.

关键词: 车内噪声; 响应面; 误差分析; 遗传算法

中图分类号: U46

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.002

0 引言

车内噪声大小是衡量汽车舒适性的一个重要指标, 国内企业和学者越来越重视汽车的 NVH 性能, 在汽车设计阶段如果能很好地预测车内噪声并采取优化手段, 就能减少开发成本, 提高汽车的市场竞争力. 随着计算机技术的迅速发展, 有限元技术成为改进传统设计流程的重要手段. 但是, 仅通过对有限元模型进行运算优化会占用大量时间和计算机资源. 而通过响应面构造, 结合试验设计和优化算法能够快速有效地进行优化设计^[1].

国内不少学者已经将响应面法运用到车内噪声的优化, 文献[2]通过声压灵敏度并结合响应面, 以车身刚度及模态为约束, 将板件厚度作为设计变量进行车内噪声的优化, 取得不错的效果. 文献[3]建立了车内声压更新迭代的响应面模型, 通过优化板件厚度, 分别降低了左右悬架激励下驾驶员右耳处的声压级. 文献[4]基于响应面建立了一套车内噪声设计优化流程, 通过修改板件厚度达到降低车内噪声的目的.

然而, 利用响应面进行车内噪声优化还存在一些不足之处, 因为大多学者是以复相关系数去判断拟合函数的误差, 但是复相关系数是以当前

样本为基础进行评价的, 需要结合不同抽样方法在另一组样本下进行响应面精度分析, 选择最佳的拟合方案.

通过建立有限元的响应面模型进行车内噪声优化能够灵活运用成熟的优化算法进行结构修改, 在较短的计算时间内求解出优化结果, 但建立高精度的车内声压响应面模型需要花费大量时间和精力.

建立某车的声固耦合有限元模型, 预测车内噪声并进行贡献度分析, 将贡献度高的板件作为设计变量, 分别进行拉丁超立方和 Hammersley 试验设计, 利用拉丁超立方试验设计结果构造出峰值频率、质量以及车身刚度的响应面模型, 以 Hammersley 试验设计结果进行响应面误差分析和响应面评价筛选, 利用遗传算法进行优化运算得出最优解, 最终通过在有限元模型中验证, 有效地降低了车内噪声.

1 车内噪声预测模型建立与分析

1.1 声固耦合模型建立

利用 Hypermesh 建立某车白车身, 闭合件, 副车架等总成有限元模型, 如图 1 所示. 车门和行李箱盖通过铰链和锁扣与车身连接, 用 RBE2 单元模

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-06-01

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2009212)

作者简介: 陆森林(1957—), 男, 江苏镇江人, 江苏大学教授, 博士, 主要从事车辆振动与噪声控制研究, E-mail: lusl@ujs.edu.cn.

拟. 车窗与车身的粘胶用 Adhesive 单元模拟, 车身焊点通过 CWELD 单元模拟. 车身纵梁、B 柱等板件拼焊用单元共节点的方式模拟. 座椅用集中质量进行简化, 通过柔性单元 (RBE3) 与车身座椅安装点连接.

建立声腔网格需要封闭的车厢模型, 因此需要在车身基础上生成 Patch 单元 (Patch 单元不参与计算, 只起到封闭车身的作用), 生成声腔四面体网格. 设置 ACMOL 卡片, 采用节点对节点方式使声腔与车身结构耦合. 最终有限元模型单元数为 822 620, 节点数为 770 153, 如图 1 所示.

工况设置: 分析频率为 20 ~ 200 Hz, 约束车身后 4 个弹簧支座 6 个自由度方向, 考虑发动机激励, 在发动机的 3 个悬置处分别施加 z 方

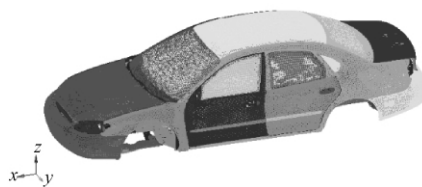


图 1 声固耦合有限元模型

Fig. 1 Acoustic-structure coupling finite model

向的余弦激励, 响应点根据 GB/T 18697—2002, 《汽车车内噪声测量方法》规定选取驾驶员右耳.

将数据提交至 Optistruct 求解器进行求解, 输出驾驶员右耳 A 计权声压, 对车内噪声进行预测, 如图 2 所示. 从图 2 中可以看出, 车内噪声在 67、146、172 Hz 处产生较大峰值, 后文将以这 3 个峰值频率作为研究对象进行优化.

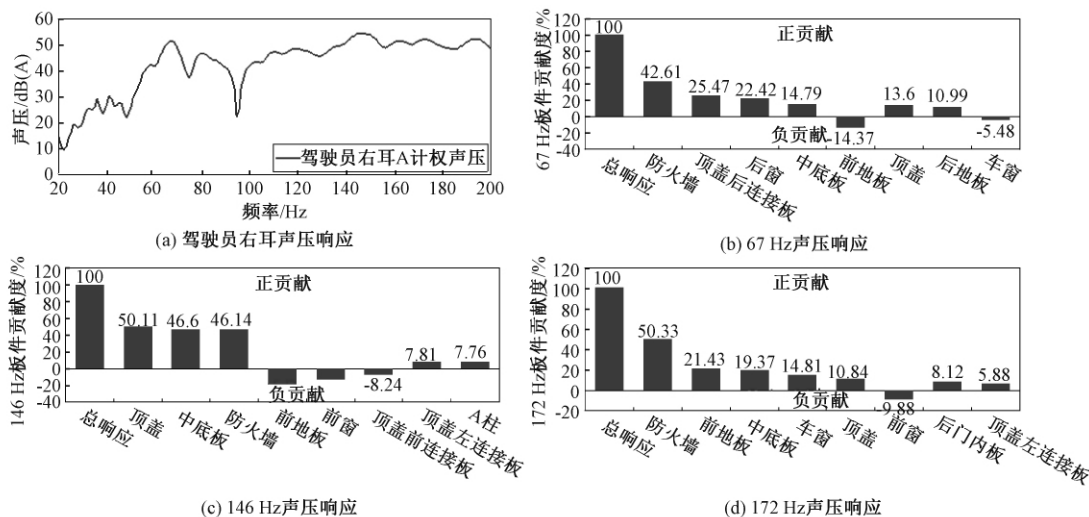


图 2 驾驶员右耳响应和峰值声压板件贡献图

Fig. 2 Response of driver's right ear and panel contribution at peak frequencies

1.2 车内噪声声学贡献分析

车内噪声由车身板件的振动产生, 每个频率下不同板件对车内噪声的贡献程度是不一样的, 如果将每个板件都作为响应面的设计变量将会使计算工作量大大增加, 利用板件贡献度分析可以找出对噪声影响大的板件, 为构造响应面筛选出设计变量. 将声腔耦合的车身结构划分成顶盖、防火墙、前地板、中底板、前后挡风玻璃、侧围等 28 个主要板件.

通过 Hypergraph 输出 3 个峰值频率下的板件贡献度, 柱状图中列出了贡献度较大的 8 个板件, 从图 2 中可以看出, 67 Hz 下前后窗和顶棚后连接板贡献比较大; 146 Hz 下顶棚、防火墙和中底板对车内声压起主导作用; 172 Hz 下防火墙贡献度对车内声压贡献最大, 其次是前地板和中底板. 通过板件贡献度分析, 不考虑对前后窗进行改进,

将顶盖、防火墙、顶盖后连接板、前地板和中底板的厚度作为设计变量进行板件厚度优化.

1.3 车身弯曲刚度和扭转刚度分析

轿车车身刚度是汽车设计的一个重要指标, 刚度不足直接影响着汽车的安全性能, 因此在进行车内噪声优化的同时要保证车身刚度不降低.

1.3.1 弯曲刚度

弯曲刚度工况设置为约束前悬架支座 3 个平动自由度和后悬架支座 3 个平动自由度. 加载力考虑车行驶中满载时的情况, 乘客区的载荷需要乘以修正系数 1.8. 前排每个乘客加座椅约 100 kg, 由于 $F = 1.8 \times 100 \times 9.8 = 1\ 764\ \text{N}$, 所以在 4 个座椅安装点共施加力 8 820 N (共 5 位乘客) [5].

弯曲刚度计算公式为:

$$k_w = \frac{F_w}{d_{\max}}, \quad (1)$$

式中: k_w 为弯曲刚度; F_w 为施加的载荷; d_{\max} 为门槛处最大位移. 解得门槛处最大位移为 0.531 mm, 弯曲刚度为 16 610.2 N/mm.

1.3.2 扭转刚度

扭转刚度工况设置为约束后悬架支座 3 个平动自由度, 保险杠中心 z 向平动自由度, 在前悬架支座处加载大小相等方向相反的竖向力.

车身加载的总扭矩 $M = 0.5 \times \text{前轴最大负荷} \times \text{轮距} = 0.5 \times 1\,000 \times 9.8 \times 1.508 = 7\,389.2 \text{ N}\cdot\text{m}$. 左右悬架支座中心距离为 1 124 mm, 可以求得前悬架支座加载力为 $F1 = F2 = 7\,389.2 / 1.124 = 6\,574 \text{ N}$.

扭转刚度计算公式为:

$$k_n = \frac{M}{\arctan [(Z_1 + Z_2) / L]}, \quad (2)$$

式中: k_n 为扭转刚度; M 为施加的扭矩; L 为左右悬架支座中心距离; Z_1 、 Z_2 为左右支座中心位移的绝对值. 求解出左支座中心位移为 3.94 mm, 右支座中心位移为 3.92 mm, 求得扭转刚度为 $18\,444.3 \text{ (N}\cdot\text{m) / (}^\circ\text{)}$.

2 响应面模型建立

2.1 试验设计

试验设计是构造响应面的基础, 它要求在设计变量空间进行合理的抽样, 尽可能地表现设计

空间的特性, 从而获得设计变量与响应的数学关系, 如果样本点选取不当就会影响响应面优化效果^[6]. 工程上较为常用的试验设计方法有拉丁超立方试验设计、Hammersley 试验设计、中心组合试验设计.

拉丁超立方抽样是一种约束随机地生成均匀样本点的试验设计方法, 具有记忆功能, 可有效避免重复抽样. 它通过将设计空间划分成不重复的 m 个部分, 对每个部分进行取样并互相组合使得每个变量因素只被选择一次, 这样能在较少样本的情况下获得较高精度的响应面^[7].

Hammersley 本质上属于蒙特卡洛抽样方法, 采用伪随机数值发生器在空间内随机均匀地采样, 相比拉丁超立方它能够在多维空间取得更好的均匀采样点, 文献^[8]分析了该采样方法具有极高的均布特性, 适用于非线性有限元分析.

分别用拉丁超立方和 Hammersley 法抽取 21 个样本点, 如图 3 所示. 利用拉丁超立方抽样的样本建立响应面, Hammersley 抽取点作为检验样本分析各拟合函数的精确度. 以防火墙和顶盖厚度的抽样结果为例, 从图 3 中可以看出两种抽样方法取点均匀不重复且差异性比较大, 由此说明用 Hammersley 样本用作检验响应面的精度具有可靠性, 能更全面地评价响应面的拟合程度.

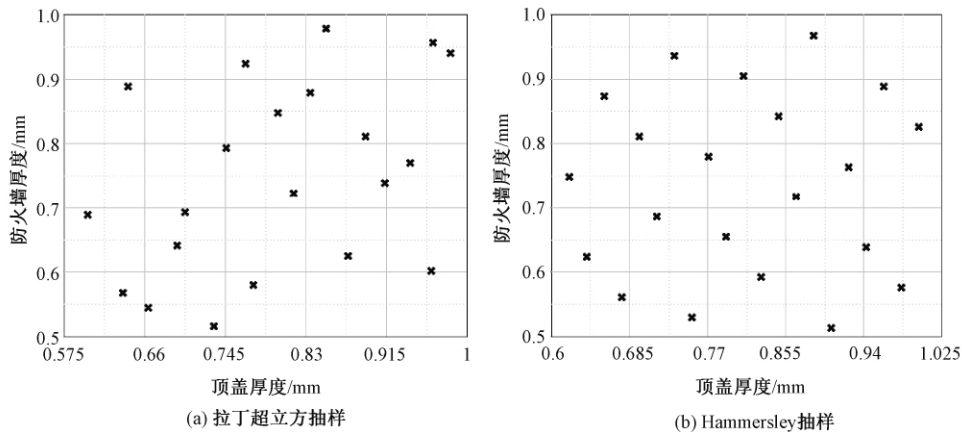


图3 拉丁超立方和 Hammersley 抽样图

Fig. 3 Latin Hypercube and Hammersley sampling

2.2 构造响应面

目前工程上常用的响应面拟合方法有最小二乘法、移动最小二乘法、克里金近似函数模型以及径向基函数法.

为了选择最优的响应面, 分别用这 4 种拟合方法构造出质量、3 个峰值频率声压级和车身刚

度的响应面, 如表 1 所示. 为了兼顾拟合精度和优化计算时间, 要选择合适的拟合方案. 因为最小二乘法拟合非线性问题比较差, 所以选择 3 阶多项式拟合模型; 移动最小二乘法对于非线性问题要优于最小二乘法, 所以选择 2 阶多项式模拟; 由于拟合样本点只有 21 个, 克里金回归模型中的线性

函数对样本点依赖较小,而且预测精度相对较好,故选择线性函数;根据不同维度、样本以及非线性程度下复相关系数统计结果,径向基函数法中的多二次函数拟合能力最强,选择多二次函数为基函数^[9]。

表 1 各响应复相关系数表

Tab.1 Complex correlation coefficient of each response

拟合方法	最小二乘法	移动最小二乘法	克里金	径向基函数
质量	0.998	0.999	0.999	0.999
67 Hz 声压响应	0.987	0.997	0.999	0.999
146 Hz 声压响应	0.997	0.993	0.996	0.999
172 Hz 声压响应	0.965	0.987	0.989	0.990
弯曲刚度	0.972	0.996	0.999	0.999
扭转刚度	0.978	0.997	0.998	0.996

评价响应面是否达到足够的精度,用于代替真实的模型,需要进行响应面的误差分析,如表 2 所示。笔者采用复相关系数和均方根误差两个指标对拟合函数进行评价,数学表达式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^M (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_p - \hat{y}_p)^2}, \quad (4)$$

式中: R^2 为复相关系数; $RMSE$ 为均方根误差; y_i 为样本点实际的响应值; \hat{y}_i 为样本点利用响应面预测的值; \bar{y} 是实际响应的均值; M 则代表拉丁超立方样本抽样数量; N 为 Hammersley 抽样样本数; y_p 为 Hammersley 抽样下样本点实际值; \hat{y}_p 为样本点用拉丁超立方拟合响应面的预测值。

表 2 各响应面均方根误差比较

Tab.2 Comparison of root mean square error of each response

拟合方法	最小二乘法	移动最小二乘法	克里金	径向基函数
质量	0.000 164	0.000 106	0.000 173	0.000 376
67Hz 声压响应	0.953	0.913	1.803	0.906
146Hz 声压响应	1.242	0.575	1.698	0.546
172Hz 声压响应	4.734	1.676	7.023	1.975
弯曲刚度	0.006 7	0.002 3	0.001 3	0.001 5
扭转刚度	0.015	0.002 0	0.001 0	0.001 7

通过 Hyperstudy 提取响应并进行响应面误差分析,从复相关系数和均方根误差评价表中可以看出每个方案都取得了不错的拟合效果。移动最

小二乘法是质量最优的拟合方案; 67 Hz 处的声压响应克里金和径向基函数复相关系数都趋于 1,但是径向基函数的均方根误差远小于克里金模型,故选择径向基函数来拟合。146 Hz 声压响应的拟合方案中,径向基函数的复相关系数和均方根误差都为最优,选择其作为 146 Hz 响应拟合函数。从均方根误差看 172 Hz 处声压响应的拟合程度相比其他响应较差,移动最小二乘法在新样本检验下误差最小且复相关系数接近 1,与克里金和径向基函数复相关系数值相差很小,故选择移动最小二乘法作为拟合函数。克里金模型拟合的车身弯曲刚度和扭转刚度误差均最小,因此刚度模拟选择克里金函数模型。

3 车内噪声优化与验证

3.1 优化数学模型

考虑车辆的轻量化,以质量最小为优化目标,以 3 个峰值频率的声压级降低 2 dB 为约束条件,并保证车身弯曲和扭转刚度不降低。数学表达式如下:

$$\begin{cases} \min f(x_i); \\ g_k(x_i) \leq t_k(1 \pm p); \\ x_L \leq x_i \leq x_U; \end{cases}$$

式中: x_i 为设计板件厚度值; x_L 、 x_U 分别为设计变量的上下限,厚度设计空间设置为初始厚度上下 2 mm; $f(x_i)$ 为质量函数; $g_k(x_i)$ 为 3 个峰值声压响应面函数和车身刚度响应面函数; t_k 为约束目标值; p 为设置的约束违反容差百分比。

同时为了验证响应面法对提升优化效率的有效性,均采用 16 核单节点服务器,在相同的目标和约束条件下分别基于有限元模型和响应面模型进行优化。

3.2 遗传算法优化与结果验证

遗传算法是一种模拟生物遗传繁殖机制的优化算法,通过编码对设计空间进行遗传操作,使得适者生存,鲁棒性强,收敛速度快,广泛地应用在工程优化的各个领域^[10]。采用 Hyperstudy 13.0 内置 GA 工具箱将筛选出的各板件厚度设置为设计变量。搜索范围是每个设计变量的上下限,种群数为 100,遗传终止 25 代,变异概率 0.01。将峰值声压和车身刚度设置为约束,质量最小为目标,约束违反容差设定为 1%。通过 10 次计算机运行未发现各响应不收敛情况,并且均在终止遗传代数前达到收敛,10 次计算的各响应收敛值误差均在百分之一以内,稳定性较好。

文献[7]建立质量、一阶模态和车内声压3个响应面进行板件优化,通过60个个体,40代遗传运算车内噪声、模态和质量响应趋于收敛.笔者采用遗传算法在100个个体情况下,6个响应均通过25代遗传趋于收敛,收敛效率更高.

基于有限元优化和响应面最优迭代结果设计变量通过圆整后的厚度值如表3所示.可以看出除了顶盖连接板厚度相差0.1 mm,其余厚度一致.

遗传算法迭代过程如图4所示.车身质量通过12代的进化在570 kg处收敛,约束响应在遗

传优化计算后也趋于收敛值,且均在约束条件容差范围内,3个峰值响应都降低了2 dB左右.

表3 设计变量及优化厚度结果

Tab.3 Design variables and optimization results of thickness

名称	初始厚度/ mm	响应面优化/ mm	有限元优化/ mm
顶盖	0.80	0.95	0.95
防火墙	0.75	0.90	0.90
顶盖后连接板	1.00	0.80	0.90
前地板	0.80	0.75	0.75
中底板	1.20	1.10	1.10

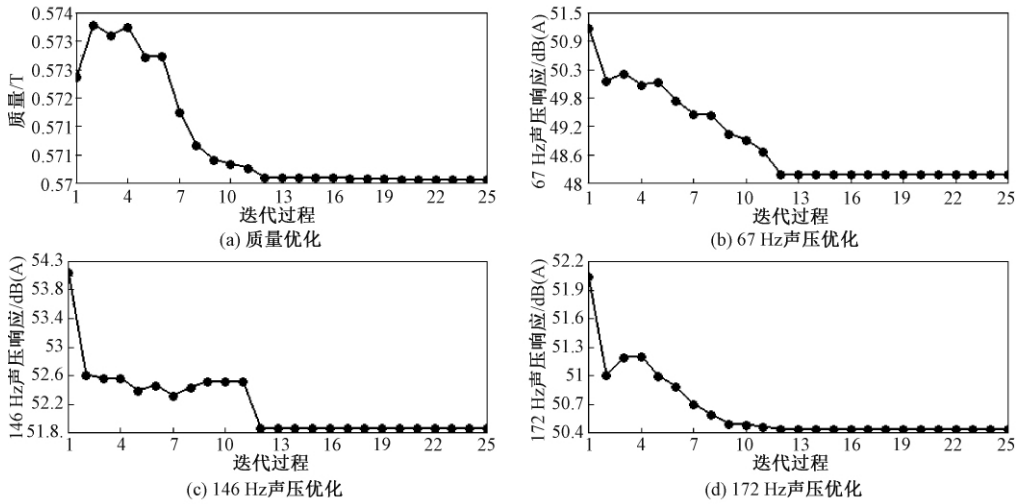


图4 遗传算法优化迭代曲线

Fig.4 Iterative curves of genetic algorithm optimization

为验证优化结果的有效性,将优化的厚度结果重新赋给有限元模型相应的板件,原始模型质量为572.6 kg,优化后模型总质量570.5 kg,减轻1.9 kg.计算驾驶员右耳声压响应,如图5所示.3个峰值频率下的声压响应均降低了约2 dB,130 Hz和185 Hz左右声压级虽有增加但是幅度较小,总的来看驾驶员右耳的声压响应得到降低,车内噪声的整体水平得到改善.

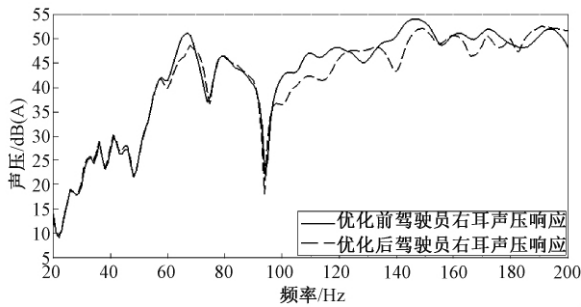


图5 优化前后驾驶员右耳声压响应对比

Fig.5 Comparison of optimized and pre-optimized acoustic response of driver's right ear

表4为不同模型优化对比.通过表4可以看出,两种方法优化的效果基本一致,但是使用响应面进行优化计算时间仅用了0.5 h,说明响应面法有效提高了车内噪声优化的效率.

表4 响应面和有限元模型优化对比

Tab.4 Comparison of RSM and FEM optimization

响应	响应面优化	有限元优化
质量/kg	570.6	570.8
67 Hz 声压/dB	48.1	47.9
146 Hz 声压/dB	51.8	51.8
172 Hz 声压/dB	50.4	50.4
弯曲刚度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	16 641.5	16 672.9
扭转刚度/[($\text{N}\cdot\text{m}$) $\cdot(^{\circ})^{-1}$]	18 466.2	18 466.2
计算总时间/h	0.5	20.6

4 结论

在车内噪声预测方面,以板件厚度为设计变量,二阶移动最小二乘法和径向基函数法拟合的响应面经过检验具有很高精度,为车内噪声响应

面构造提供参考.

结合拉丁超立方和 Hammersley 两种抽样方法,通过复相关系数和均方根误差评价响应面拟合程度,能够全面地分析响应面精度,准确选择出拟合较好的响应面模型.

建立声固耦合模型进行噪声预测,构造高精度的响应面,考虑车身轻量化和刚度性能通过遗传算法进行板件厚度优化,得出的优化方案在保证车身刚度不降低的同时,减轻车身质量,改善了车内噪声,有效提高优化效率,可以为车身优化提供思路.

参考文献:

- [1] 朱红军,胡泽豪,刘志文,等. 基于 HyperStudy 的车门结构多目标优化方法研究[J]. 制造业自动化, 2015,37(12): 77-81.
- [2] 唐重才,郑玲,房占鹏,等. 基于响应面法的车内噪声优化研究[C]. 2014 中国汽车工程学会年会论文集, 2014: 1390-1394.
- [3] 张博文,吴光强,黄焕军. 基于迭代更新近似模型的车内噪声优化[J]. 计算力学学报, 2016,33(1): 33-38.
- [4] 王超. 基于响应面法的商用车驾驶室结构噪声分析与优化[D]. 湖南: 湖南大学机械与运载工程学院, 2014.
- [5] 李莉,张赛,何强,等. 响应面法在试验设计与优化中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2015,34(8): 41-45.
- [6] 刘焕广,陈朝阳. 轿车白车身结构有限元及其试验分析[D]. 合肥: 合肥工业大学车辆工程学院, 2007.
- [7] 周萍. 基于响应面法的车内结构噪声控制研究[D]. 湖南: 湖南大学机械与运载工程学院, 2011.
- [8] 周会峰,王光耀,李碧浩,等. 多目标优化设计方法在车身轻量化设计中的应用[J]. 机械设计与研究, 2014,30(4): 151-155.
- [9] 潘峰. 组合近似模型方法研究及其在轿车车身轻量化设计的应用[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2011.
- [10] 谢金法,段冉. 基于 Isight 和 Fluent 软件的轿车空调优化研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014,35(2): 124-128.

Analysis and Optimization of Vehicle Inner Noise Based on Response Surface Method

LU Senlin, REN Zhixiang

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: A coupled structure-acoustic model of the car was built by hypermesh. Considering the excitation of the engine, prediction and analysis of the car inner noise were conducted. Using analysis of panel contribution, the key panels were found at peak frequencies and set these panel thickness as design variables. The response surfaces of mass and acoustic responses at peak frequencies were built by Latin Hypercube Sampling and error analysis was done based on Hammersley Sampling in order to select optimal response surfaces. Using selected response surfaces, mass as objectives, acoustic responses and vehicle stiffness as constraints, the optimization based on genetic algorithm was carried out. The effectiveness of the optimization result and improvement of optimization efficiency by response surface method were validated by the finite element model and the vehicle inner noise was improved.

Key words: vehicle inner noise; response surface method; error analysis; genetic algorithm

文章编号: 1671-6833(2017)05-0071-05

功能离子液体催化 CO_2 与环氧化合物的加成反应

吴晶敏¹, 李伟杰^{2,3}

(1. 鹤壁市质量技术监督检验测试中心, 河南 鹤壁 458030; 2. 郑州大学 材料科学与工程学院, 河南 郑州 450001; 3. 国家镁及镁合金产品质量监督检验中心, 河南 鹤壁 458030)

摘 要: 设计了系列羟基、羧基功能化离子液体作为催化剂催化环氧化合物与 CO_2 的环加成反应, 研究了催化剂结构与其催化性能的关系. 以环氧丙烷与 CO_2 的环加成反应为模型反应, 考察了环氧丙烷与催化剂的配比、反应压强、反应温度、反应时间对合成环状碳酸酯的影响, 探讨了功能化离子液体在催化过程中的可重复性.

关键词: 离子液体; 功能化; 羟基; 羧基; 环加成反应; CO_2 ; 环氧化合物

中图分类号: O652.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.019

0 引言

CO_2 是最主要的温室气体^[1], 又是安全、廉价、易得的 C_1 资源^[2], 对 CO_2 进行行之有效的化学固定和资源化利用, 对于改善地球环境和解决日益紧迫的能源危机都具有重要意义, 因而受到研究者的广泛关注. 利用 CO_2 与环氧化合物的环加成反应合成环状碳酸酯是目前最有应用前景的 CO_2 化学固定方法^[3], 反应方程式如图 1 所示. 环状碳酸酯(PC) 是一种极性非质子溶剂, 广泛应用于纺织、印染、电化学以及高分子材料合成等方面, 在精细化工与药物中间体中也有着广泛的应用^[4]. 同时, 随着利用环状碳酸酯制备碳酸二甲酯和邻二醇工艺的不断改进与完善, 环状碳酸酯的需求不断增大. 反应方程式如图 1 所示.

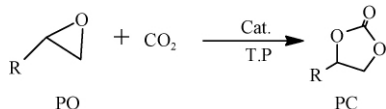


图 1 CO_2 和环氧化合物合成环状碳酸酯

Fig. 1 Synthesis of cyclic carbonate from epoxide and CO_2

近年来, 不同种类的催化剂相继被开发出来并应用于催化 CO_2 与环氧化合物的环加成反应, 包括金属氧化物^[5]、改性分子筛^[6]、有机金

属配合物^[7]以及离子液体^[8]等. 其中, 离子液体由于其良好的理化性能, 如: 热稳定性和化学稳定性高、蒸汽压低、结构可设计而受到广泛的关注. 作为催化 CO_2 与环氧化合物环加成反应的催化剂, 离子液体显示出了优良而独特的催化性能, 是目前化学固定 CO_2 的研究热点. 随着离子液体催化 CO_2 与环氧化合物的环加成反应研究的深入, 人们发现功能化离子液体在催化 CO_2 环加成反应方面性能更好, 催化活性更强, 因此成为离子液体催化剂研究方面最重要的课题之一^[9].

基于此, 作者设计了一系列分别含有羟基和羧基官能团的咪唑类离子液体作为催化剂, 催化环氧化合物与 CO_2 的环加成反应, 该催化反应不需要另加任何溶剂与助催化剂, 具有操作简单、后处理容易的特点. 以环氧丙烷与 CO_2 的环加成反应为模型反应, 考察了环氧丙烷与催化剂的配比、反应压强、反应温度、反应时间对合成环状碳酸酯的反应性能的影响以及功能化离子液体在催化过程中的可重复性.

1 试验部分

1.1 仪器与试剂

AVANCE400 型脉冲傅立叶变换核磁共振仪,

收稿日期: 2017-03-01; 修订日期: 2017-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21676071); 河南省科技攻关计划资助项目(142102210614)

作者简介: 吴晶敏(1964—), 女, 河南鹤壁人, 鹤壁市质量技术监督检验测试中心工程师, 主要从事工业催化及产品技术监督工作, E-mail: wujm5615@126.com.

德国布鲁克公司; Bruker AmaZon SL(ESI) 质谱仪, 德国布鲁克公司. 1-甲基咪唑、环氧丙烷、氧化苯乙烯、环氧氯丙烷、环氧环己烷、环氧乙烷、2-溴乙醇、3-溴-1-丙醇、4-氯-1-丁醇、溴乙酸乙酯、3-溴丙酸乙酯、4-溴丁酸乙酯及常用试剂均为市售试剂, 二氧化碳(99.99%) 购自开封日新气体有限公司.

1.2 羟基和羧基功能化咪唑类离子液体的合成与表征

使用的羟基与羧基功能化离子液体催化剂的结构如图 2 所示. 6 种功能化离子液体均参考文献方法合成^[10], 并通过¹H NMR、MS 和元素分析对所合成的离子液体催化剂进行了结构表征.

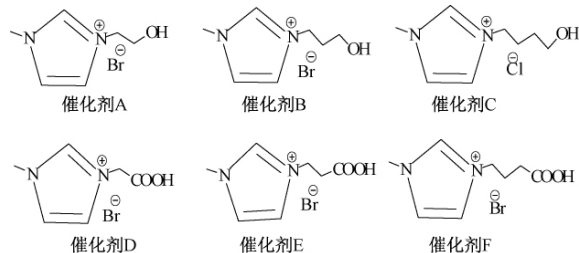


图 2 功能化离子液体催化剂的结构

Fig. 2 The structures of the TSIL catalysts

1.3 催化合成环状碳酸酯反应的试验步骤

环加成反应均是在 100 mL 的高压反应釜中进行. 操作过程如下: 将离子液体催化剂按计算量加入到装有磁子的反应釜中, 通入 CO₂ 扫气从而排出反应釜里存在的空气, 加入 0.143 mol 环氧化合物, 密闭高压反应釜, 通入 CO₂ 至所需压强, 加热到设定温度, 按照设定的时间完成反应后, 将反应釜自然冷却至室温, 缓慢释放剩余的 CO₂, 通过减压蒸馏(液体产物)或柱色谱(固体产物)分离纯化, 得到目标产物, 计算环状碳酸酯的收率, 使用气相色谱分析反应的选择性.

2 结果与讨论

2.1 不同碳链长度羟基和羧基功能化咪唑类离子液体的催化性能

6 种功能化离子液体作催化剂用于催化 CO₂ 与环氧丙烷的环加成反应, 催化实验结果见表 1. 试验结果表明在相同反应条件(催化剂用量 0.20mol%, CO₂ 初始压强 4.0 MPa, 反应温度 130 °C, 反应时间 4 h)下, 6 种不同结构的离子液体催化剂均能够催化 CO₂ 与环氧丙烷的环加成反应, 并表现出较好的催化效果. 其中 C、F 的催化性能最好, PC 收率分别为 93.68%、94.64% (表 1); 无论是羟基功能化离子液体还是羧基功

能化离子液体, 催化剂的催化活性均随着官能团所连接碳链的增长而增强. 当连接官能团的碳链上碳原子数相同时, 羧基功能化离子液体的催化性能好于羟基功能化离子液体. 这是因为随着官能团所在碳链的增长, 阳离子体积增大, 阴、阳离子间的距离变大, 导致离子液体中阴、阳离子间的静电作用力减小, 阴离子离去能力增大, 有利环氧化合物的开环反应^[11]; 另一方面, 随着官能团碳链的增长, 离子液体催化剂在环氧化合物中的溶解性增强, 有利于底物与离子液体催化剂之间氢键的形成和 CO₂ 的活化. 羧基比羟基酸性更强, 是一种比羟基活性更强的氢键供体, 更有利于与环氧化合物形成氢键, 故催化性能也更好.

表 1 不同催化剂合成碳酸丙烯酯

Tab. 1 Synthesis of PC catalyzed by different catalysts

编号	催化剂	转化数	转化频率/ (h ⁻¹)	收率/ %	选择性/ %
1	A	413.42	103.35	82.69	99.37
2	B	431.09	107.77	86.23	99.42
3	C	468.35	117.08	93.68	99.45
4	D	422.73	105.68	84.55	99.43
5	E	441.95	110.48	88.40	99.31
6	F	473.15	118.28	94.64	99.42

2.2 反应条件的优化

6 种不同羟基和羧基功能化咪唑类离子液体均显示出很好的催化活性, 我们从中选择了催化活性最好的 F([CPMIM]Br) 催化 CO₂ 和环氧丙烷合成碳酸丙烯酯作为模板反应, 进一步优化反应条件.

2.2.1 催化剂用量对反应的影响

在相同反应条件(环氧丙烷 143 mmol, 反应温度 130 °C, 反应时间 4 h, CO₂ 初始压强 4.0 MPa)下, 催化剂用量对产物收率的影响如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 催化剂在非常低的用量水平(0.14mol%)下就表现出较高的催化活性(73.08%), 随着催化剂用量从 0.14mol% 增加到 0.20mol%, PC 的收率从 73.08% 增加到 94.64%, 继续增大催化剂的用量, 产物收率变化不大. 另一方面, 当催化剂用量从 0.14 mol% 增加到 0.5mol% 时, 反应的选择性一直大于 99%, 说明该催化反应的副反应很少. 其原因可能是催化剂使用量较少时, 能被催化剂活化的反应物分子有限, 因而催化效果较差, 致使 PC 收率不高; 伴随着催化剂使用量的增加, 反应体系中的反应速率会增大, 目标产物的收率也随之增加.

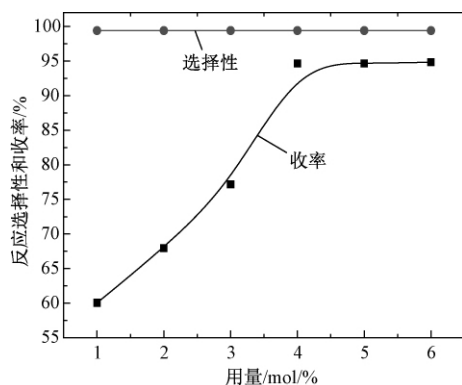


图3 [CPMIM]Br 用量对反应选择性和收率的影响

Fig.3 Effect of [CPMIM]Br dosage on PC yield and selectivity

由图3可知,催化剂最优用量为 0.20 mol% (相对于 PO)。

2.2.2 温度对反应的影响

在相同反应条件(环氧丙烷 143 mmol, F 0.20 mol%, 反应时间 4 h, CO_2 初始压强 4.0 MPa)下,反应温度对 PC 收率和选择性的影响如图4所示。从图4可以看出,反应温度是影响 PC 收率和选择性的因素,当温度从 100 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 130 $^{\circ}\text{C}$ 时,PC 收率从 27.02% 迅速上升到 94.64%, 温度进一步升高,PC 收率略有下降。因此,在 F([CPMIM]Br) 存在下,最佳反应温度为 130 $^{\circ}\text{C}$ 。这表明在一定温度范围内产物收率会随温度的升高而大幅度增加。目标产物的选择性在这个温度范围内不发生改变。主要原因可能是在一定温度范围内温度升高促使反应物与催化剂的有效碰撞增多,从而有利于反应向正方向移动。可以看出,温度高于 130 $^{\circ}\text{C}$, 随着 PC 产量的降低选择性也略有下降。我们认为主要原因是副反应的增加,如: 环氧丙烷异构化成酮或醛,碳酸丙烯酯进行聚合反应形成聚碳酸酯,PO 与残留的少量水反应生成丙二醇。当使用其他类型的催化剂时,也发现有类似的副反应发生。

2.2.3 CO_2 初始压强对反应的影响

在选定的最佳配比和温度条件下探讨了 CO_2 的初始压强对反应收率的影响。发现 CO_2 的初始压强对该催化反应有很大的影响,如图5所示。随着低压区(1~4 MPa) CO_2 压强的增加,PC 产量迅速增加,但高压区(4~6 MPa) PC 收率有所下降^[12]。在其他催化体系中已经观察到这种 CO_2 压强对催化活性的影响。最可能的原因是 PO 和 CO_2 结合成 PO- CO_2 相从而引起在体系中存在顶部气态富 CO_2 相和底部液态富 PO 相。当在低压

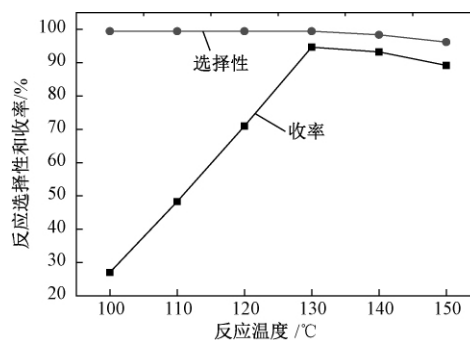


图4 反应温度对反应选择性和收率的影响

Fig.4 Effect of reaction temperature on the selectivity and yield

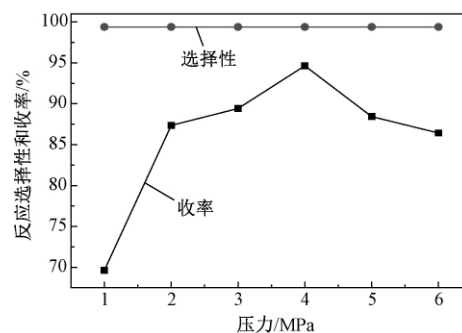


图5 初始压强对反应选择性和收率的影响

Fig.5 Effect of initial CO_2 pressure on PC yield and selectivity

区反应时,底部的 CO_2 浓度随着压强的增加而增加,这有利于反应,PC 收率增加。过高的压强会降低底部的 PO 浓度,这不利于反应,PC 收率降低。因此,最佳 CO_2 压强为 4 MPa。同时,在不同的 CO_2 压强下,PC 的选择性一直保持在 99% 以上。

2.2.4 时间对反应的影响

反应时间对 PC 收率和选择性的影响如图6所示。图6可以看出,PC 收率随着反应时间的增加而增加,反应 4 h, PC 收率达到 94.64%。继续增加反应时间,PC 收率没有明显的增加。同时,

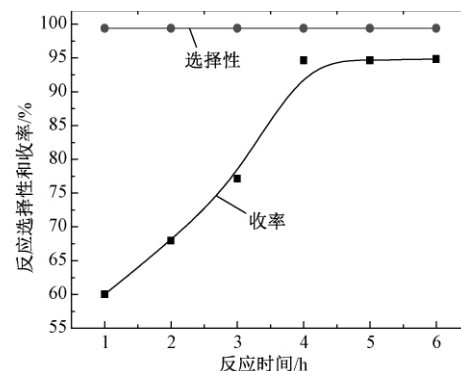


图6 反应时间对反应选择性和收率的影响

Fig.6 Effect of reaction time on PC yield and selectivity

PC 的选择性保持在 99% 以上.

结果表明,该催化反应的最优反应条件是: 环氧丙烷 143 mmol, 催化剂用量为 0.20 mol% (相对于 PO), 反应温度 130 °C, 反应时间 4 h, CO₂ 初始压强 4.0 MPa. 在优化的最佳条件下, 碳酸丙烯酯的收率高达 94.64%.


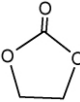
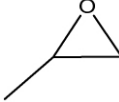
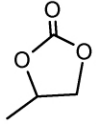
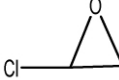
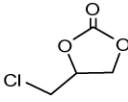
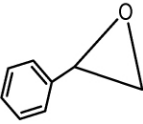
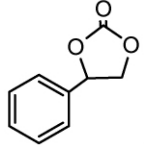

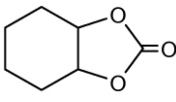
2.3 底物适用性研究

以 [CPMIM]Br 为催化剂, 在优化的反应条

件下, 通过改变还原化合物的结构, 探讨了该类功能化离子液体催化 CO₂ 环加成反应的适用性. 试验结果如表 2 所示. 催化剂对所有的单取代的末端环氧化物显示出很高的催化活性. 而 1,2-环氧环己烷的产物收率仅为 45.31%, 主要是由于底物高空间位阻和强供电能力, PC 选择性非常高 (> 99%), 表明环加成反应中副产物可忽略不计.

表 2 CO₂ 与不同环氧化合物的环加成反应

Tab. 2 The cycloaddition reactions between carbon dioxide and various epoxides

编号	反应物	产物	转化数	转化频率/(h ⁻¹)	收率/%	选择性/%
1			491.24	122.81	98.25	>99
2			473.15	118.28	94.64	>99
3			457.78	114.45	91.56	>99
4			407.1	101.78	81.42	>99
5			226.55	56.64	45.31	>99

2.4 催化剂的稳定性和重复使用情况

以环氧丙烷(PO)与 CO₂ 的环加成反应为模型反应, [CPMIM]Br 为催化剂, 研究了催化剂的重复使用性能. 通过减压蒸馏将产物与剩余的底物分离出来后, 剩下的物质为离子液体催化剂, 在没有经过进一步纯化操作的前提下, 将催化剂用于催化 CO₂ 的环加成反应, 实验结果如图 7 所示. 图 7 表明, 催化剂重复使用 5 次, PC 收率和选择性没有明显变化. 可见所合成的功能化离子液体催化剂经过简单处理以后重复使用, 且性能稳定.

3 结论

设计一系列羟基与羧基功能化离子液体, 将其作为催化剂催化 CO₂ 与环氧化合物的环加成反应, 在不另加溶剂与任何助催化剂的情况下, 表现出了良好的催化活性. 最优反应条件是: 环氧丙

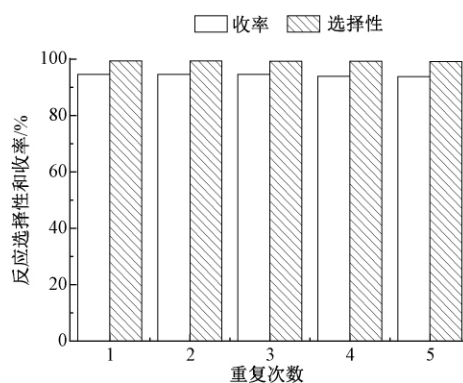


图 7 [CPMIM]Br 重复使用情况

Fig. 7 Reusability of the [CPMIM]Br catalyst

烷 143 mmol, 催化剂用量为 0.20 mol% (相对于 PO), 反应温度 130 °C, 反应时间 4 h, CO₂ 初始压强 4.0 MPa. 在最优反应条件下, 碳酸丙烯酯的收率高达 94.64%. 催化剂具有高的热稳定性与化学稳定性, 重复使用 5 次, 催化活性没有明显的降低.

参考文献:

- [1] HENDRIK B, LARS L, JOHANNES S, et al. Recent developments in the synthesis of cyclic carbonates from epoxide and CO₂ [J]. Topics in Current Chemistry, 2017, 375(3): 50–56.
- [2] OMAE I. Recent developments in carbon dioxide utilization for the production of organic chemicals, Coordination [J]. Chemistry Reviews, 2012, 256(13/14): 1384–1405.
- [3] FIORANI G, GUO W, KLEIJ A. W. Sustainable conversion of carbon dioxide: the advent of organocatalysis. Green Chemistry, 2015, 17(3): 1375–1389.
- [4] 石晓华, 颜少鸽, 张炜婕. 用于 uv 树脂改性的可溶性聚酰亚胺的制备工艺 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(5): 17–22.
- [5] DAI W L, YIN S F, GUO R, et al. Synthesis of propylene carbonate from carbon dioxide and propylene oxide using Zn-Mg-Al composite oxide as high-efficiency catalyst [J]. Catalysis Letter, 2010, 136(1): 35–44.
- [6] WEI N, ZUO R X, ZHANG Y Y, et al. Robust high-connected rare-earth MOFs as efficient heterogeneous catalysts for CO₂ conversion [J]. Chemical Communications, 2017(53): 3224–3227.
- [7] MONTOYA C A, GOMEZ C F, PANINHO A B, et al. Cyclic carbonate synthesis from CO₂ and epoxides using zinc(II) complexes of arylhydrazones of β-diketones [J]. Journal of Catalysis, 2016(335): 135–140.
- [8] YUE S, HAO X J, WANG P P, et al. Amino acid-based ionic liquids for CO₂ conversion to form cyclic-carbonate under solvent-free conditions [J]. Molecular Catalysis, 2017(433): 420–429.
- [9] SUN J, CHENG W, WEI F, et al. Reusable and efficient polymer-supported task-specific ionic liquid catalyst for cycloaddition of epoxide with CO₂ [J]. Catalysis today, 2009, 148(3/4): 361–367.
- [10] XIAO L F, LV D W, SU D, et al. Influence of acidic strength on the catalytic activity of Brønsted acidic ionic liquids on synthesizing cyclic carbonate from carbon dioxide and epoxide [J]. Journal of cleaner production, 2014, 67(67): 285–290.
- [11] HAN L, LI H, CHOI S J, et al. Ionic liquids grafted on carbon nanotubes as highly efficient heterogeneous catalysts for the synthesis of cyclic carbonates [J]. Applied catalysis a general, 2012(429/430): 67–72.
- [12] DU Y, CAI F, KONG D L, et al. Organic Solvent-free Process for the Synthesis of Propylene Carbonate from Supercritical Carbon Dioxide and Propylene Oxide Catalyzed by Insoluble Ion Exchange Resins [J]. Green chemistry, 2005, 7(7): 518–523.

The Cycloaddition Reaction of CO₂ and Epoxy Compound Catalyzed by Hydroxyl and Carboxyl Functional Ionic Liquid

WU Jingmin¹, LI Weijie^{2,3}

(1. Hebi Quality and Technical Supervision and Testing Center, Hebi 458030, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. National Center for Quality Supervision and Inspection of Magnesium and Magnesium Alloy Products, Hebi 458030, China)

Abstract: A series of hydroxyl and carboxyl functionalized ionic liquids had been designed and used as catalyst for the cycloaddition reaction of CO₂ with epoxy compound. Meanwhile, the relationship between catalyst structure and catalytic performance was studied. The influence of the ratio of epoxy propane and catalyst, reaction pressure, reaction temperature, reaction time on the properties of catalyst had been inspected using cycloaddition of propylene oxide and CO₂ as model reaction. The repeatability of catalyst was discussed.

Key words: ionic liquids; functional; hydroxyl; carboxyl; cycloaddition; CO₂; epoxy compound

文章编号: 1671-6833(2017)05-0076-05

地温空调井群运行对地下水影响的实验与模型研究

窦明¹, 曹亚新¹, 米庆彬², 朱志刚³, 付博³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 产业技术研究院有限公司, 河南 郑州 450001; 3. 安阳市水利局, 河南 安阳 455000)

摘要: 为了探析地温空调开发利用对地下水系统的影响, 以安阳市第五人民医院地温空调项目为研究对象, 设计了2抽4回和2抽2回两种模式进行实验, 构建了地下水动力学模型和水热耦合数学模型, 然后对两种抽回灌模式下地温空调项目运行对地下水流场和温度场的影响进行了模拟; 分析了不同抽回灌模式对地下水水位、水温的影响, 并探索其变化过程和影响机理. 研究结果表明: 在不同抽回灌模式下, 地温空调项目对地下含水层流场和温度场的影响存在差异, 且单井回灌量越大, 影响范围和幅度越大; 另外在不同的运行时段, 地下水传热的主导方式也有所不同.

关键词: 地温空调; 抽回灌实验; 数值模拟; 影响评价; 机理分析

中图分类号: P641.8 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.005

0 引言

自地温空调技术推广应用以来, 其节能环保、高效的特点得到了广大用户的青睐, 已经成功应用于许多领域, 前景广阔. 然而作为一项新技术, 人们对其还缺乏全面科学的认识, 项目设计不合理和不合理运行也引发了一些问题^[1-2]. 国内外学者针对出现的问题作了大量研究, 目前主要是通过建立地下水系统模型, 分析地温空调对地下水流场的影响^[3-4], 对不同布井模式下地下水温度场的变化趋势和热贯通发生特征进行模拟分析了地温空调井抽回灌对地下水流场和温度场的影响^[5-9]. 此外, 一些学者也定量研究了地温空调系统在不同运行条件下对地下水环境的影响程度^[10-13]. 已有研究虽然对地温空调项目的运行影响进行了相关研究, 但一些数学模型考虑的因素不全面, 难以充分描述抽回灌地下水系统的变化, 另外关于地温空调运行对地下水系统的影响机理研究也较少. 基于此, 笔者以安阳市第五人民医院地温空调项目为研究对象开展抽回灌实验, 模拟系统在不同抽回灌模式下地下水流场和温度场的变化情况, 探析不同抽回灌模式对地下水水位、水

温的影响, 以期地为地温空调项目的设计和管理提供理论依据.

1 实验设计及数据采集分析

1.1 实验项目概况

安阳市第五人民医院地温空调项目处于洹河冲积扇极强富水区, 地下水为第四系孔隙水. 区域含水层为卵砾石层, 顶板埋深30~50 m, 厚度30 m左右, 给水度为0.23~0.29. 项目有2眼抽水井, 4眼回灌井, 3眼观测孔. 井群布局呈近线状, 井间距25 m左右, 井深100 m, 日常采用2抽4回无压自流回灌的运行方式.

1.2 实验方案设计及实验过程

结合实验项目抽回灌井和监测井的实际运行情况, 设计2抽4回和2抽2回两种运行模式进行对比, 共设置了6个监测点, 包括5个水位监测点(1#、2#井和1#、2#、3#观测孔)、3个水量监测点(1#、2#、3#井)、5个水温监测点(2#、3#井和1#、2#、3#观测孔). 实验区域的抽回灌井、观测孔位置分布如图1所示.

依据实验设计, 首先以2抽4回为实验模式, 此时系统已运行一段时间, 为稳定流实验, 每隔

收稿日期: 2017-02-21; 修订日期: 2017-05-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679218; U1304509); 郑州大学优秀青年教师发展基金(1521323001); 安阳市水利局项目

作者简介: 窦明(1975—), 男, 山东桓台人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事水资源与水环境研究, E-mail: dou_ming@163.com.

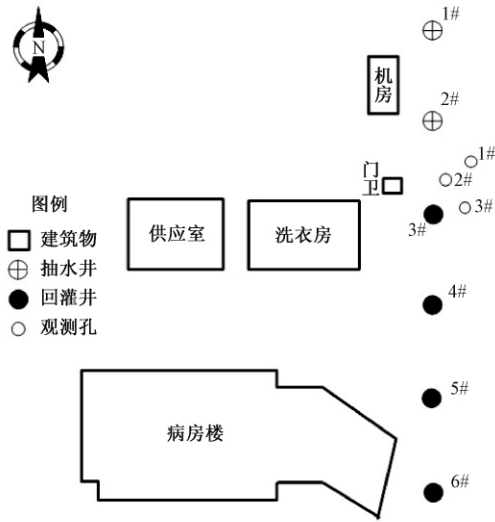


图1 实验区域井位布置平面图

Fig.1 Experimental area location map of wells

1 h 分别监测水量、水温和水位埋深,获取 4 组监测数据后关闭 4#、6#回灌井,将运行模式变为 2 抽 2 回.接着于第二天相同时间开展实验,此次为非稳定流实验,监测方法和监测点与之前相同.

2 地下水系统数学模型建立

笔者利用地下水数值模拟软件 GMS 构建地下水系统数学模型,模拟预测不同抽回灌模式的地下水系统变化过程.

2.1 数学模型介绍

2.1.1 水动力学模型

水动力学方程需要考虑渗流定律、连续方程、Darcy 定律等.模型模拟计算时,地下水流动系统可概化为含水层为水平结构、非均质、各向异性、三维稳定流系统.地下水运动的基本微分方程^[8]为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \omega = \\ \mu_e \frac{\partial h}{\partial t}; \\ H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in V; \\ H(x, y, z, t) = H_0(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in S; \\ q_n = q \cdot n = q_b(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in S, \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数; h 为水头; ω 为源汇项; μ_e 为储水系数; $H_0(x, y, z, t)$ 为某一已知函数; V 为渗流区域; S 为三维区域的边界曲面; q 为边界面上沿法线方向的单位面积流入量; n 为边界外法线的单位矢量.

2.1.2 水热耦合模型

地温空调系统水源经过利用后与原含水层水体形成温度差,使得地下含水层中发生了水热耦合过程.含水层中的传热方式主要包括热对流、热传导和热弥散.模型中假设地下水与含水层骨架的热动平衡是瞬时完成的,且忽略自然对流的影响,则水热耦合数学模型可用如下方程^[8]进行描述:

$$\left\{ \begin{array}{l} n\rho_0\beta_p c_f \theta \frac{\partial P}{\partial t} + n\rho_0\beta_r \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho a_b c_f \theta \frac{\partial P}{\partial t} + n\rho c_f \frac{\partial \theta}{\partial t} - \\ \rho_s c_s T a_b \frac{\partial P}{\partial t} + (1-n)\rho_s c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \Delta \cdot (nK_f + \\ (1-n)K_s) \times I \cdot \nabla \cdot \theta + \nabla \cdot nD_H \nabla \cdot \theta - \\ \nabla \cdot n\rho\rho_f \nu \theta + qp^* c_f \theta^*, \quad (x, y, z) \in V \\ \theta(x, y, z, t) \big|_{t=0} = \theta_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in V \\ \theta(x, y, z, t) \big|_{\Gamma_1} = \theta_1(x, y, z), \quad (x, y, z) \in \Gamma_1, \\ t \geq 0 \\ q'_n \big|_{\Gamma_2} = (q'_x, q'_y, q'_z), \quad (x, y, z) \in \Gamma_2, \\ t \geq 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: n 为孔隙度; ρ 为研究区孔隙介质密度; ρ_0 为渗流区初始孔隙介质密度; ρ_s 为孔隙介质密度; I 为 3 阶单位矩阵; D_H 为热动力弥散系数张量; c_s 为孔隙固体介质比热容; c_w 为水的比热容; P 为流体压力; β_p 为热膨胀系数; β_r 为渗流边界热膨胀系数; K_w 为水的热导率; K_s 为孔隙介质热导率; θ 为研究区温度; θ_0 为渗流区初始温度分布; θ_1 为已知温度边界的温度分布; Γ_1 、 Γ_2 为边界条件; q'_n 为热流边界流量.

2.1.3 模型计算条件输入

模拟区域设为 40 000 m²,模型边界设为定水头,含水层由上到下概化为 3 层,分别为潜水含水层(30 m)、承压含水层(30 m)、弱透水层(40 m).井群线状分布,井间距为 25 m,边界条件如表 1 所示.

表 1 边界条件输入值

Tab.1 Input value of boundary conditions

井深/ m	抽水井 流量 (m ³ ·d ⁻¹)	回灌井流量(m ³ ·d ⁻¹)		背景 温度/ ℃	回水 温度/ ℃
		2 抽 2 回	2 抽 4 回		
100	635.0	635.0	317.5	15.5	12.6

2.2 模型参数率定与结果验证

利用构建的数值模型计算抽回灌过程地下水

水位、水温值,与实测结果对比拟合,率定模型参数. 由于1#、2#观测孔受到的干扰程度小,监测误差也较小. 笔者以2抽2回模式下1#、2#观测孔的监测水位和水温数值进行水动力学和水热耦合模型的参数率定. 经率定,水平渗透系数为112 m/d,垂直渗透系数为20 m/d,孔隙率为0.23,纵向热弥散度为0.2,横向热弥散度为0.8.

以2抽4回模式下1#、2#观测孔的监测水位和水温数据对模型进行验证,结果如图2(a)、(b)所示. 采用最大相对误差(λ_{\max})和平均相对误差(λ_{ave})对验证结果进行分析,水位的 λ_{\max} 为2.6%, λ_{ave} 为1.1%;水温的 λ_{\max} 为4.1%, λ_{ave} 为2.1%,可见模型计算结果的误差不大. 由此说明,地下水水流场和温度场模型建立合理,且模型模拟精度较高.

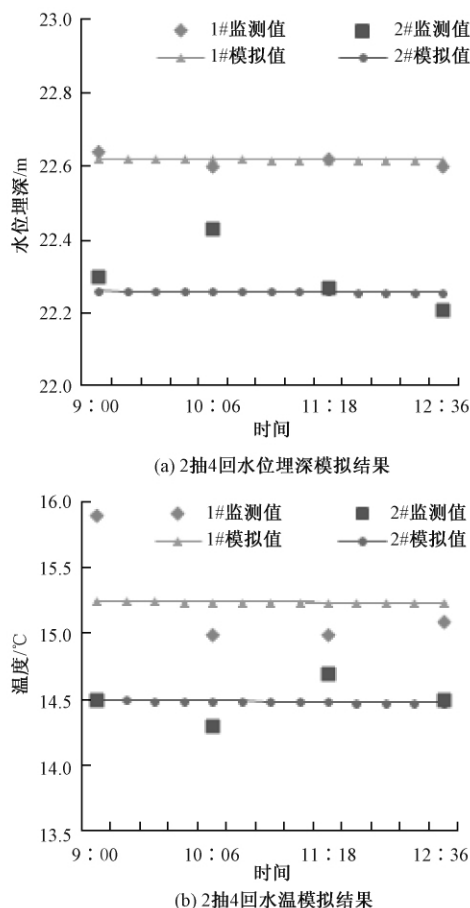


图2 模型验证结果

Fig. 2 The results of model verification

2.3 机理分析

2.3.1 水位变化的机理分析

在总抽回灌水量相同的条件下,对两种运行模式的系统运行一个周期(即120 d)后的地下水流场进行模拟,结果如图3所示.

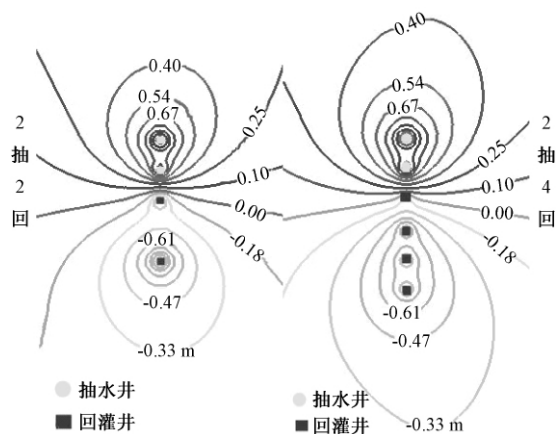


图3 不同抽回灌模式下水位降深图

Fig. 3 The figure of groundwater drawdown in different patterns

由图3可见,两种模式对抽水井周围水位影响区别较小,而对回灌井周围水位影响区别较大. 如2抽2回模式下抽水井水位的最大降幅为1.42 m,2抽4回模式下为1.47 m,两者相差仅为0.05 m;而回灌井水位升幅分别为1.26 m和0.95 m,两者相差0.31 m. 两种模式下抽回灌井水位差分别为2.68 m和2.42 m,相差0.26 m,即2抽2回模式下地下水流场的变化幅度较2抽4回明显. 究其成因: 由于回灌水在含水层中以渗流作用向周围运动,2抽2回模式下单井回灌量比2抽4回大,而地下水含水层的渗透系数一定,使得回水在回灌井中长时间滞留而不能快速扩散到周围含水层,导致回灌井中水位不断上升,从而造成2抽2回模式下回灌井中的反向漏斗降深大于2抽4回,即回灌井越少,单井回水量越大,对地下水流场的影响幅度越大.

就影响范围而言,在抽水井周围,两者形成的降落漏斗范围基本相同,而在回灌井周围,2抽4回模式下的影响范围略大于2抽2回. 如2抽2回和2抽4回模式下回灌井水位上升0.33 m的影响半径分别约为65 m和70 m. 究其成因: 由于回水在含水层的渗流速率较小,导致运移距离有限,因此单个回灌井对周围水位的影响范围也较小. 而2抽4回模式比2抽2回模式多了两个回灌井,且这些回灌井距离较近,不同回灌井的影响范围相互叠加,使得其影响面积较大. 在其他条件相同的情况下,井群数量越多、分布范围越大,对区域水位的影响范围也越大.

综上所述,在其他条件相同时,地温空调系统抽回灌主要通过渗流作用影响地下水流场的水位分布. 不同抽回灌模式下,单井回灌量越

大,回灌井周围水位变化就越明显;由于回灌井水位上升引起的反降落漏斗会相互叠加,所以回灌井分布范围越大,叠加面积越大,影响范围也越大。

2.3.2 水温变化的机理分析

在地下水流场模拟的基础上,对两种运行模式下一个制热周期的地下水温度场变化过程进行模拟,分别获取运行至30、60、90、120 d的水温分布情况,结果如图4所示。

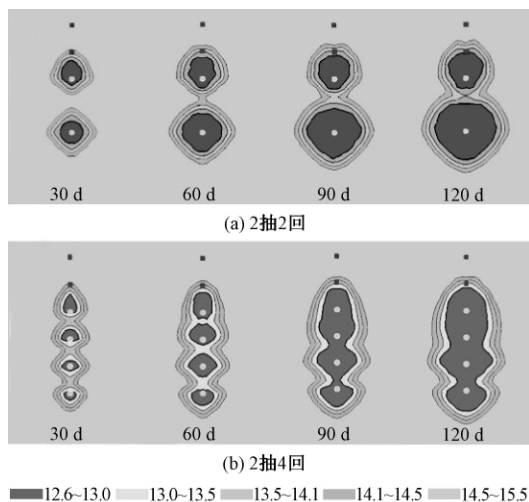


图4 不同抽回灌模式下温度场变化图

Fig. 4 The figure of groundwater temperature field in different patterns

由图4可见,不同抽回灌模式的地温空调系统在运行一个周期后对地下水温度场的影响范围相差较大.总体上灌入含水层中的冷水团以回灌井为中心向四周扩散,水温从回灌井中心向外逐渐升高.这主要是由于回灌水与原地下水存在一定的温度差异,含水层内部发生了复杂的传热过程.图4中还可以看出,在抽回灌形成的局部地下水强对流作用下,回灌井周围的温度场并不是以井为中心均匀向外扩散的,而是被地下水流场拉伸,呈近椭圆状向抽水井一侧靠拢。

对于同一抽回灌模式,随着运行时间的增加,回灌冷水通过传热作用与原含水层热水发生热交互影响,冷水团不断向外扩散,范围逐渐扩大,最终冷水锋面影响到了抽水井,部分抽水井周围的水温下降大于 2°C ,形成热贯通^[14].如在2抽2回模式下,刚开始运行时,含水层孔隙未被充满,地下水流场和温度场处于稳定状态,波动不大.随着回灌井源源不断地注入冷水,回水开始沿各孔隙通道流动,此时地下水温度场主要受热弥散的作用,温度变化快;当运行到30 d时,回灌井周围

含水层孔隙通道已基本流通,但由于人工抽回灌引起的水头差形成了局部强烈的对流场,且水温分布不均匀,地下水主要以相邻水体之间的对流换热作用为主,水温变化很快;当运行到60 d时,抽水井周围水温已经受到回灌水水温的影响,在含水层渗流作用下,冷热水接触频繁,此时热传导作用逐渐占据主导地位,对流换热作用越来越不显著,水温变化较快;当运行到90 d时,随着回灌水位升高,回灌压力增大,横向渗流速率减弱,此时主要为热传导作用,其他传热作用已十分微弱,所以温度变化比较缓慢,地下水温度场趋于稳定状态.2抽4回模式的传热过程基本相同,但该模式下由于单井回灌量较小,30 d到90 d以对流换热为主,即对流换热作用时间较2抽2回模式长;当运行90 d时,热传导作用才逐渐占据主导地位,对流换热作用不再显著.由此可见,同一抽回灌模式下,系统运行过程中回灌水不断进入含水层与高温度的原地下水混合,使区域地下水水温降低,距离回灌井最近的抽水井达到热贯通,且随着运行时间的增加,影响范围增大的幅度逐渐减小,说明不同时间段的传热效果有所不同。

在2抽2回和2抽4回不同抽回灌模式下冷水团的影响半径分别约为:15 m、10 m(30 d);25 m、20 m(60 d);30 m、25 m(90 d);35 m、30 m(120 d),即2抽2回模式下60 d已经形成了热贯通现象,而2抽4回模式下90 d才形成热贯通现象.可见在同一运行时段,当回灌井越少时,单井回灌量越大,由此产生的对流换热作用越强,越容易形成热贯通.因此,2抽2回模式的系统对地下水温度场的影响范围大于2抽4回模式的,即回灌井数量越多,对地下水温度场产生的影响范围越小,这也说明地下水温度场的变化受单井回灌量影响显著。

综上所述,随着运行时间的增加,地温空调系统对地下水温度场的影响范围以回灌井为中心不断向外扩大,且前期影响范围变化较快,后期变化缓慢.即热弥散作用对温度场的影响最为显著,对流换热作用次之,热传导作用最弱.此外,单井回灌量越大,对地下水温度场的影响也越大。

3 结论

(1) 单井回灌量越大,回灌井周围水位变化越明显;回灌井越多,影响范围越大,即增加井的数量可以缓解抽回灌对地下水流场的影响程度,但会增大影响范围。

(2) 热弥散作用对温度场的影响最为显著, 对流换热作用次之, 热传导作用最弱. 此外, 地下水温度场变化的大小受回灌量影响明显, 单井回灌量越大, 越容易形成热贯通.

参考文献:

- [1] 杨武成, 李国正, 陈赫. 沈阳市地下水源热泵应用中存在的问题与对策[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 88-91.
- [2] 范思源. 水源热泵空调应用对地下水系统影响及对策[J]. 河南水利与南水北调, 2013, 36(5): 1231-1238.
- [3] 韦婷, 车晓慧, 韩玉杰. 水源热泵井群布置方案对地下水场影响分析[J]. 地下水, 2014, 36(3): 31-33.
- [4] 方静涛, 周炳强, 黄贤龙, 等. 群井抽灌系统空间布置对水源热泵系统影响研究[J]. 中国水运, 2012, 12(10): 263-264.
- [5] 于水, 公辉, 冯国会. 地下水源热泵对地下水温度场影响模拟与分析[J]. 建筑节能, 2016, 44(10): 1-4.
- [6] 张淑秘, 高青. 地下水源热泵不同布井模式下地下水温度场变化模拟分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 149-151.
- [7] 王慧玲, 王文峰, 王峰, 等. 地下水地源热泵系统应用对地温场的影响[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 134-138.
- [8] 窦明, 张彦, 米庆彬, 等. 地温空调井布局方式对地下水场和温度场的影响分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(5): 124-128.
- [9] 王琰, 骆祖江, 李伟, 等. 浅层地温能开发与地下水环境影响模拟预测[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1231-1238.
- [10] KIM J S, NAM Y J. A numerical study on system performance of groundwater heat pumps[J]. Energies, 2016, 9(1): 1-14.
- [11] 张淑秘. 地域和抽灌水温差对地下水源热泵系统的影响[J]. 制冷与空调, 2013, 13(9): 38-40.
- [12] 米庆彬, 付博, 韩涛, 等. 地温空调成井工艺参数对地下水系统的影响[J]. 人民黄河, 2014, 36(9): 44-47.
- [13] PARK B H, BAE G O, LEE K K. Importance of thermal dispersivity in designing groundwater heat pump (GWHP) system: field and numerical study[J]. Renewable energy, 2015, 83: 270-279.
- [14] 朱天奎. 地下水含水层蓄能特性模拟实验研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2013.

Experimental and Modeling Study on Influence of Ground Temperature Air-conditioning Well Group Operation to Groundwater Flow

DOU Ming¹, CAO Yaxin¹, MI Qingbin², ZHU Zhigang³, FU Bo³

(1. School of Water Conservancy & Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Zhengzhou University Research Institute of Industrial Technology Co., Ltd, Zhengzhou 450000, China;

3. Water Conservancy Bureau of Anyang, Anyang 455000, China)

Abstract: This paper used the Anyang Fifth People's Hospital as the case of study. The experiments were implemented with the patterns of "2 pumping wells and 2 recharging wells" and "2 pumping wells and 4 recharging wells". The change of groundwater flow field and temperature field in the two patterns designed in ground temperature air-conditioning project operation were simulated by using a groundwater hydrodynamic model and a hydrothermal coupling mathematical model. Results indicated that the influence of ground temperature air-conditioning project on groundwater flow field and temperature field were very different in different pumping-recharging patterns. The increase of single-well recharge quantity enhanced the influence scope and range, making it easier to form heat transfixion. The way of groundwater transferring heat via groundwater also varied during different running periods.

Key words: ground temperature air-conditioning; pumping-recharging experiment; numerical simulation; impact assessment; mechanism analysis

文章编号: 1671-6833(2017)05-0081-05

快递与第三方智能快递柜合作机制的演化博弈分析

李玉民, 杨露, 王新露

(郑州大学 管理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 智能快递柜在一定程度上解决了快递的末端配送问题. 首先, 基于演化博弈理论构建了快递企业与第三方智能快递柜企业间的演化博弈模型; 然后, 研究了系统的动态演化过程, 分析了二者合作的影响因素; 最后, 用 Matlab 进行算例分析. 研究结果表明: 当总超额收益大于合作总成本时, 二者才有开展合作的可能; 合作概率与超额收益正相关, 与合作成本负相关; 存在一个最佳的超额收益分配比例, 使得合作概率最大; 合理的收益分配机制与成本分担机制有利于二者建立合作关系, 实现互利共赢.

关键词: 末端物流; 合作机制; 演化博弈; 智能快递柜; 快递企业

中图分类号: TP23; F272.3

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.009

0 引言

国家邮政局最新数据显示, 2016 年全年快递服务企业业务量为 312.8 亿件, 同比增长 51.3%^[1]. 快递量的爆炸式增长给传统的快递配送模式带来了巨大的挑战, 尤其是在“最后一百米”送达环节, 车辆停靠、通行难, 快递进校园、进社区难等突出问题在一定程度上影响并制约着快递企业的服务质量. 基于此背景, 智能快递柜应运而生. 目前国内智能快递柜主要有三种运营模式: 快递企业自建自用、电商企业自建自用及第三方平台共用型, 其中应用最广泛的是第三种, 即由第三方负责快递柜的运营, 为若干快递企业和客户群体提供服务. 因此, 为了充分发挥智能快递柜的优势, 有效解决“最后一百米”送达难题, 快递企业与第三方智能快递柜企业应建立良好的合作伙伴关系.

由于我国快递行业起步晚、发展时间短, 国内的研究主要集中在快递企业的服务质量、客户满意度、市场竞争力以及网点选址^[2-4]等方面. 智能快递柜在国内出现的历史很短, 学者对此的研究较少, 多是从分析智能快递柜的发展现状入手, 简单论述现阶段存在的问题^[5-6]. 鲜有学者对快递企业与第三方智能快递柜企业间的合作进行研究. 鉴于此, 笔者将运用演化博弈理论, 对有限理性的快递企业与第三方智能快递柜企业的博弈行

为进行研究, 分析二者合作的影响因素, 探讨有利于合作的收益分配机制及合作成本分担机制, 为二者建立合作关系提供理论参考.

1 演化博弈模型的构建

演化博弈理论以生物进化论、种群动力学以及遗传基因理论为思想基础, 从有限理性角度出发, 对群体间的竞合关系进行研究^[7].

1.1 基本假设

(1) 快递企业与第三方智能快递柜企业对市场信息的识别判断、分析推理能力不同, 对决策结果无法完全预测, 很难确定何种决策能使自身利益最大化. 所以, 双方均可能采取合作、不合作两种策略, 需要进行多次博弈, 不断调整并改进策略, 才能达到纳什均衡. 因此本研究建立假设 H_1 : 快递企业采取合作策略的概率是 x , 不合作策略的概率是 $(1-x)$; 第三方智能快递柜企业采取合作策略的概率是 y , 不合作策略的概率是 $(1-y)$; $0 \leq x, y \leq 1$.

(2) 快递企业独立经营时, 采用传统方式收发快递实现盈利. 第三方智能快递柜企业也可独立经营实现盈利, 比如, 可通过智能终端设备提供自助业务、通过智能柜提供学校及社区周边生活消费品自取服务、通过 APP 推送服务信息向商家收取广告费等. 因此本研究建立假设 H_2 : 快递企业与第三

收稿日期: 2017-03-11; 修订日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71501173); 河南省科技攻关计划项目(122102310399、132102310310)

作者简介: 李玉民(1969—), 男, 河南南阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事物流与供应链管理研究, E-mail: li.yu.min@163.com.

方智能快递柜企业采取不合作策略,即二者独立经营时的正常收益分别为 π_1 和 π_2 ; $\pi_1, \pi_2 > 0$.

(3) 快递企业与第三方智能快递柜企业进行合作,各快递企业由独立分散经营走向整合集约化管理,会产生一定超额收益. 因此本研究建立假设 H_3 : 若快递企业和第三方智能快递柜企业合作,将会给整个系统带来超额收益 $\Delta\pi$, 快递企业的超额收益分配比例为 a , 第三方智能快递柜企业的分配比例为 $(1-a)$; $\Delta\pi > 0, 0 < a < 1$.

(4) 快递企业与第三方智能快递柜企业合作的成本不仅包括场地租金、装修费及快递柜的采购费等,还包括为达成合作,前期谈判产生的交通费、通讯费等;总合作成本由快递企业与第三方智能快递柜企业按照一定比例共同承担. 当一方倾向合作时,无论另一方合作与否,倾向合作一方均会为促成合作而努力,势必产生一定的前期投入,比如积极主动地谈判、租赁装修场地等. 故无论合作是否达成,快递企业与第三方智能快递柜企业仍需付出一定的成本. 因此本研究建立假设 H_4 : 快递企业与第三方智能快递柜企业的合作成本为 C , 快递企业的分担比例为 b , 第三方智能快递柜企业的分担比例为 $(1-b)$; $C > 0, 0 < b < 1$.

1.2 模型构建

根据演化博弈论的思想建立快递企业与第三方智能快递柜企业演化博弈的支付矩阵^[8], 见表 1.

根据博弈双方的支付矩阵,可得快递企业选择合作策略的期望收益为:

$$E_{1c} = y(\pi_1 + a\Delta\pi - bC) + (1-y)(\pi_1 - bC). \quad (1)$$

则

$$J = \begin{bmatrix} (1-2x)(a\Delta\pi y - bC) & ax(1-x)\Delta\pi \\ y(1-y)(1-a)\Delta\pi & (1-2y)[(1-a)\Delta\pi x - (1-b)C] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\text{Det}(J) = \begin{vmatrix} (1-2x)(a\Delta\pi y - bC) & ax(1-x)\Delta\pi \\ y(1-y)(1-a)\Delta\pi & (1-2y)[(1-a)\Delta\pi x - (1-b)C] \end{vmatrix}. \quad (7)$$

矩阵 J 的迹为:

$$\text{Tr}(J) = (1-2x)(a\Delta\pi y - bC) + (1-2y)[(1-a)\Delta\pi x - (1-b)C]. \quad (8)$$

根据雅可比矩阵可以判断均衡点的局部稳定性^[8], 分析结果如下:

当 $a\Delta\pi < bC, (1-a)\Delta\pi < (1-b)C$ 或者 $a\Delta\pi < bC, (1-a)\Delta\pi > (1-b)C$ 或者 $a\Delta\pi >$

表 1 博弈双方的支付矩阵

Tab. 1 The payoff matrix of the two sides of the game

		第三方智能快递柜企业	
		合作	不合作
快递企业	合作	$\pi_1 + a\Delta\pi - bC,$ $\pi_2 + (1-a)\Delta\pi - (1-b)C$	$\pi_1 - bC,$ π_2
	不合作	$\pi_1, \pi_2 - (1-b)C$	π_1, π_2

快递企业选择不合作策略的期望收益为:

$$E_{1u} = y\pi_1 + (1-y)\pi_1. \quad (2)$$

所以,快递企业的平均期望收益为:

$$E_1 = xE_{1c} + (1-x)E_{1u} = x(ay\Delta\pi - bC) + \pi_1. \quad (3)$$

根据演化博弈理论,可得快递企业采取合作策略的复制动态方程为^[9]:

$$F_{(x)} = \frac{dx}{dt} = x(E_{1c} - E_1) = x(1-x)(ay\Delta\pi - bC). \quad (4)$$

同理,第三方智能快递柜企业采取合作策略的复制动态方程为:

$$F_{(y)} = \frac{dy}{dt} = y(1-y)[(1-a)x\Delta\pi - (1-b)C]. \quad (5)$$

2 演化稳定策略分析

令 $F_{(x)} = 0, F_{(y)} = 0$, 可知博弈系统在平面 $S = \{(x, y); 0 \leq x, y \leq 1\}$ 内有 5 个局部均衡点, 分别为: $O(0, 0)$ 、 $A(0, 1)$ 、 $B(1, 0)$ 、 $C(1, 1)$ 、 $D(m, n)$, 其中 $m = (1-b)C / [(1-a)\Delta\pi]$, $n = bC / a\Delta\pi$.

根据二者的复制动态,可得复制动态方程的雅克比矩阵为:

$bC, (1-a)\Delta\pi < (1-b)C$, 即快递企业和第三方智能快递柜企业中至少有一方的超额收益小于其付出的合作成本时,有 4 个局部均衡点,对它们的局部稳定性进行分析,结果见表 2.

由表 2 可知,当 $a\Delta\pi < bC, (1-a)\Delta\pi < (1-b)C$ 或 $a\Delta\pi < bC, (1-a)\Delta\pi > (1-b)C$ 或 $a\Delta\pi > bC, (1-a)\Delta\pi < (1-b)C$ 时,只有点 $O(0, 0)$ 是稳定的. 3 种情况的演化博弈动态相位

表2 3种情况下均衡点的局部稳定性分析结果

Tab.2 The result of local stability analysis of equilibrium points in three cases

均衡点	$a\Delta\pi < bC, (1-a)\Delta\pi < (1-b)C$			$a\Delta\pi < bC, (1-a)\Delta\pi > (1-b)C$			$a\Delta\pi > bC, (1-a)\Delta\pi < (1-b)C$		
	$Det(J)$ 符号	$Tr(J)$ 符号	稳定性	$Det(J)$ 符号	$Tr(J)$ 符号	稳定性	$Det(J)$ 符号	$Tr(J)$ 符号	稳定性
$O(0,0)$	+	-	ESS	+	-	ESS	+	-	ESS
$A(0,1)$	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点	+	+	不稳定
$B(1,0)$	-	不确定	鞍点	+	+	不稳定	-	不确定	鞍点
$C(1,1)$	+	+	不稳定	-	不确定	鞍点	-	不确定	鞍点

图分别如图1所示,从中可以看出,无论初始状态位于平面 S 的任何位置,系统最终都收敛于点 O ,即快递企业和第三方智能快递柜企业中只要有一方的超额收益小于其合作成本,演化稳定策略就一定是双方互不合作。

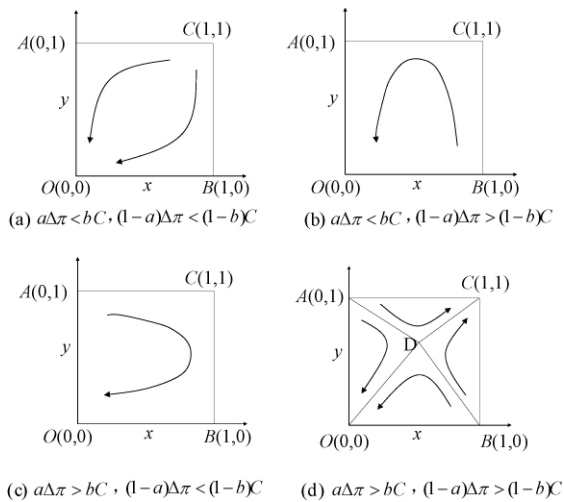


图1 演化博弈动态相位图

Fig.1 The dynamic phase diagram of the evolutionary game

当 $a\Delta\pi > bC, (1-a)\Delta\pi > (1-b)C$, 即快递企业和第三方智能快递柜企业采取合作策略各自获得的超额收益均大于其付出的合作成本时,有5个均衡点,它们的局部稳定性分析结果见表3。

表3 $a\Delta\pi > bC, (1-a)\Delta\pi > (1-b)C$ 时均衡点的局部稳定性分析结果

Tab.3 The result of local stability analysis of equilibrium points when $a\Delta\pi > bC$ and $(1-a)\Delta\pi > (1-b)C$

均衡点	$Det(J)$ 符号	$Tr(J)$ 符号	稳定性
$O(0,0)$	+	-	ESS
$A(0,1)$	+	+	不稳定
$B(1,0)$	+	+	不稳定
$C(1,1)$	+	-	ESS
$D(m,n)$	不确定	0	鞍点

由表3可知,点 O 和 C 是稳定的,是演化稳定策略,点 A 和 B 是不稳定的,点 D 是鞍点。其中,稳

定点 O 对应于快递企业与第三方智能快递柜企业二者都采取不合作策略,稳定点 C 对应于二者合作。

由于国内智能快递柜的发展处于初级阶段,快递企业与第三方智能快递柜企业的演化博弈还需一段时间,所以该阶段的博弈过程中,系统会保持合作与不合作两种策略并存的状态,最终将演化到哪个均衡点取决于初始状态的位置。当 $a\Delta\pi > bC, (1-a)\Delta\pi > (1-b)C$ 时演化博弈动态相位图如图1(d)所示,由不稳定点 A 、 B 和鞍点 D 连接而成的折线将平面 S 分为两个区域。当初始状态位于区域 $OADB$ 时,系统将收敛于点 O ,即快递企业与第三方智能快递柜企业都选择不合作;当初始状态位于区域 $ADBC$ 时,系统将收敛于点 C ,即二者选择合作。

综上,只有快递企业和第三方智能快递柜企业各自的超额收益均大于其合作成本时,系统才可能演化为相互合作的状态;任何一方的超额收益小于其合作成本时,系统将收敛于点 $O(0,0)$,即双方互不合作。

3 二者合作的影响因素分析

由上述分析可知,快递企业和第三方智能快递柜企业获得的超额收益均大于其合作成本时,演化稳定策略有两种:(合作,合作)与(不合作,不合作)。由表1可知,双方合作可使各自收益最大化,所以从长远角度看,双方都希望通过相互合作谋求自身利益的最大化。而系统的演化路径及最终的演化结果与博弈双方的初始状态、支付矩阵的相关参数有关。

由图1(d)可知,系统向(合作,合作)与(不合作,不合作)两种稳定策略演化的概率分别取决于四边形 $OADB$ 与 $ADBC$ 的面积,所以可通过分析四边形面积的影响因素,来分析各参数对系统演化路径及演化结果的影响^[10]。根据图1(d)可得

$$S_{ADBC} = S_{ADC} + S_{BCD}$$

$$= 1 - \frac{(1-b)C}{2(1-a)\Delta\pi} - \frac{bC}{2a\Delta\pi}. \quad (9)$$

结论 1: 快递企业和第三方智能快递柜企业选择合作策略支出的成本 C 越小, 二者合作的概率越大。

证明 1: 对 S_{ADBC} 求关于 C 的一阶偏导:

$$\frac{\partial S_{ADBC}}{\partial C} = -\frac{1-b}{2(1-a)\Delta\pi} - \frac{b}{2a\Delta\pi} < 0. \quad (10)$$

所以, S_{ADBC} 是 C 的单调减函数, 双方选择合作策略付出的成本 C 越小, 折线上方区域 $ADBC$ 的面积越大, 系统收敛于稳定点 C 的概率也就越大, 即双方采取合作策略的概率越大。

结论 2: 快递企业和第三方智能快递柜企业合作的超额收益 $\Delta\pi$ 越大, 二者采取合作策略的概率越大。

证明 2: 对 S_{ADBC} 求关于 $\Delta\pi$ 的一阶偏导:

$$\frac{\partial S_{ADBC}}{\partial \Delta\pi} = \left[\frac{(1-b)C}{2(1-a)} + \frac{bC}{2a} \right] \times \frac{1}{\Delta\pi^2} > 0. \quad (11)$$

因此, S_{ADBC} 是 $\Delta\pi$ 的单调增函数, $\Delta\pi$ 越大, 折线上方区域 $ADBC$ 的面积越大, 系统收敛于稳定点 C 的概率就越大, 即双方采取合作策略的概率越大。

结论 3: 存在一个最佳的超额收益分配比例 a , 使得双方采取合作策略的概率最大。

证明 3: 对 S_{ADBC} 求关于 a 的一阶偏导:

$$\frac{\partial S_{ADBC}}{\partial a} = \frac{C}{2\Delta\pi} \times \left[\frac{b}{a^2} - \frac{1-b}{(1-a)^2} \right]. \quad (12)$$

再对 S_{ADBC} 求关于 a 的二阶偏导:

$$\frac{\partial^2 S_{ADBC}}{\partial a^2} = \frac{C}{2\Delta\pi} \left[-\frac{2b}{a^3} - \frac{2(1-b)}{(1-a)^3} \right] < 0. \quad (13)$$

由此可知, 在区间 $(0, 1)$ 存在一个 a 使 S_{ADBC} 取得极大值, 即存在一个 a 使系统收敛于稳定点 C 的概率最大。

结论 4: 快递企业与第三方智能快递柜企业对超额收益的分配比例与对合作成本的承担比例正相关时, 双方采取合作策略的概率增大。

证明 4: 对 S_{ADBC} 求关于 b 的一阶偏导:

$$\frac{\partial S_{ADBC}}{\partial b} = \frac{C}{2\Delta\pi} \left(\frac{1}{1-a} - \frac{1}{a} \right). \quad (14)$$

当 $a < 1-a$ 时, $\frac{\partial S_{ADBC}}{\partial b} < 0$, 即 S_{ADBC} 与 b 负相关。所以, 当 b 增大时, S_{ADBC} 减小, 系统收敛于点 C 的概率减小, 说明当快递企业获得的超额收益份额少于第三方智能快递柜企业时, 若快递企业承

担的合作成本增加, 快递企业会放弃合作, 合作无法达成; 而当 b 减小时, S_{ADBC} 增大, 说明当快递企业获得的超额收益份额少于第三方智能快递柜企业时, 若快递企业承担的合作成本减少, 则二者合作的概率增大。

当 $a > 1-a$ 时, S_{ADBC} 与 b 正相关, 当 b 增大时, S_{ADBC} 增大, 系统收敛于点 C 的概率增大, 说明当快递企业获得的超额收益份额多于第三方智能快递柜企业时, 此时即使快递企业承担的合作成本增加, 快递企业依然会坚持合作, 双方仍会达成合作。

综上, 当快递企业与第三方智能快递柜企业对超额收益的分配比例与合作成本的承担比例正相关时, 双方才觉得公平, 系统才能最终演化为相互合作状态。

4 算例分析

根据国内某高校智能快递柜的实际运营状况, 结合模型的假设条件, 设快递企业与第三方智能快递柜企业的合作成本 $C \in [1\,500, 3\,000]$ 万元, 成本分担系数 $b \in [0.1, 0.9]$, 合作的超额收益 $\Delta\pi \in [5\,000, 10\,000]$ 万元, 超额收益的分配系数 $a \in [0.1, 0.9]$ 。

当参数值给定时相关参数的取值如下: $C = 2\,000$ 万元, $b = 0.3$, $\Delta\pi = 8\,000$ 万元, $a = 0.4$ 。根据上述参数的取值, 运用 Matlab 软件进行算例分析, 验证结论有效且可行^[11]。

4.1 合作成本及超额收益对合作的影响

设合作成本 $C \in [1\,500, 3\,000]$ 万元, 超额收益 $\Delta\pi \in [5\,000, 10\,000]$ 万元, 其他参数取值如上文所述, 研究此时 S_{ADBC} 的变化趋势, 如图 2 所示。

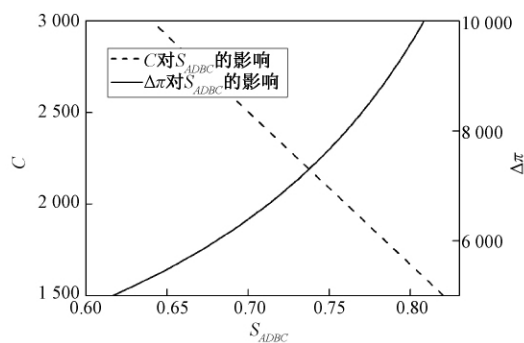


图 2 C 和 $\Delta\pi$ 对合作概率的影响

Fig. 2 The effect of C and $\Delta\pi$ on cooperation probability

由图 2 可知, S_{ADBC} 随着合作成本 C 的增大而减小。由此表明: 快递企业与第三方智能快递柜企

业的合作成本越大,资金风险越大,一定程度上挫伤了合作积极性,使得合作的概率减小; S_{ADBC} 随着超额收益 $\Delta\pi$ 的增大而增大,即合作的超额收益越大,双方合作的概率越大,该数值分析结果与结论1和2一致。

4.2 超额收益分配比例及成本分担比例对合作的影响

设 $a \in [0.1, 0.9]$, b 分别取0.2、0.4、0.6、0.8,其他参数取值如上文所述,研究此时 S_{ADBC} 的变化趋势,如图3所示。

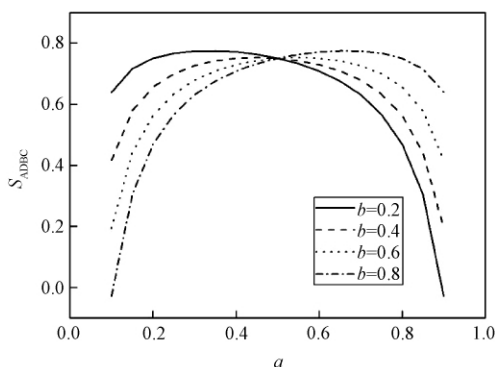


图3 a 和 b 对合作概率的影响

Fig.3 The effect of a and b on cooperation probability

由图3可知,在成本分担系数 b 的4种不同取值下, S_{ADBC} 关于 a 的函数图像均呈现“倒U型”,即其他参数取值一定时,随着 a 值不断增大, S_{ADBC} 总是先增大至一个极大值后又逐渐减小。由此表明:当其他参数一定时,存在一个 a 值,使得 S_{ADBC} 取得极大值,即存在一个最优的超额收益分配比例,使二者合作的概率最大。该数值分析结果与结论3一致。

由图3可知,当 $a < 0.5$ 时, S_{ADBC} 随着 b 的增大而减小,说明当快递企业的超额收益较少,承担的合作成本也相应越少时,双方合作的概率越大;当 $a > 0.5$ 时, S_{ADBC} 随着 b 的增大而增大,说明当快递企业的超额收益较多,承担的合作成本也相应越多时,则双方合作的概率越大。总之,当快递企业与第三方智能快递柜企业对超额收益的分配比例与对合作成本的承担比例正相关时,双方合作的概率增大,该数值分析结果与结论4一致。

5 结论

基于演化博弈理论对快递企业与第三方智能快递柜企业间的合作机制进行研究,得到如下结论:当超额收益大于合作成本时,二者才有开展合作的可能,且合作成本越小、超额收益越大,则越有利于二者合作;存在一个最佳的超额收益分配比例,使得二者合作的概率最大;超额收益的分配比例与合作成本的承担比例正相关时,合作概率增大。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2016年国民经济和社会发展统计公报[N]. 经济日报, 2017-03-01(005).
- [2] 杨永芳,王道平. 民营快递企业的发展对策研究[J]. 预测, 2011, 30(2): 71-76.
- [3] 刘明,杨路明. 快递物流企业提升客户满意度研究[J]. 技术经济与管理研究, 2015(9): 72-75.
- [4] 杨静,张燕,陈涛. 大数据时代快递企业竞争力研究—基于粗糙集理论[J]. 统计与决策, 2015(13): 179-181.
- [5] 刘立华. 智能快递柜自助服务的应用及其发展方向[J]. 物流工程与管理, 2015, 37(8): 54-55.
- [6] 杜荣雪,阮国祥. 智能自提柜在城市社区应用的可行性分析[J]. 物流科技, 2015(1): 133-134.
- [7] 杜白. 基于用户需求和进化博弈的认知无线网络选择[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(4): 92-95.
- [8] 谢识予. 经济博弈论(第三版)[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 19-37.
- [9] SEIFERT R W, ZEQUEIRA R I, LIAO S. A three-echelon supply chain with price-only contracts and sub-supply chain coordination[J]. International journal of production economics, 2012, 138(2): 345-353.
- [10] 张国兴,方帅,汪应洛. 基于演化博弈的供应链协调机制分析[J]. 统计与决策, 2015(15): 45-49.
- [11] 黄敏镁. 基于演化博弈的供应链协同产品开发合作机制研究[J]. 中国管理科学, 2010, 18(6): 155-162.

(下转第96页)

带批处理机的多阶段柔性流水车间调度优化

王君妍, 王薛苑, 轩 华

(郑州大学 管理工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 从钢铁行业的炼钢—连铸—热轧过程提炼出中间阶段有多台批处理机, 其它阶段为离散机的多阶段柔性流水车间调度问题. 首先, 结合工件动态到达、各阶段间的运输时间以及机器的调整时间等生产特征, 对问题进行描述, 建立以最小化总加权完成时间为目标的数学模型. 然后, 针对该问题提出了改进的自适应遗传算法, 使遗传参数随其迭代及适应函数值调节. 对 150 个工件的大量随机数据进行测试, 结果表明, 与常规遗传算法相比, 所提出的自适应遗传算法能在较短的计算时间内得到更好的解; 与拉格朗日松弛算法相比, 求解大规模问题时, 所提算法在解的质量方面优势较为明显.

关键词: 柔性流水车间调度; 批处理机; 总加权完成时间; 自适应遗传算法; 自适应调节

中图分类号: TB49

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.012

0 引言

在钢铁行业, 炼钢、连铸、热轧作为炼钢的主要工序, 在整个流程中起着重要作用. 在炼钢—连铸—热轧过程中, 转炉生产出来的钢水经过精炼炉精炼后, 要铸造成不同类型、不同规格的板坯; 将装有钢水的钢包运至回转台, 回转台转动到浇铸位置后, 钢水被注入中间包, 钢水分配到各个结晶器中结晶成各种铸件, 之后铸件经过切割机的连续切割成为板坯^[1]. 使用同一中间包的多个炉次(称为一个浇次)要按一定顺序连续生产. 进而, 板坯由保温车运送到加热炉进行加热, 直至达到热轧加工的温度要求, 然后, 先由高压水枪祛除板坯表面的氧化鳞片, 再经定宽压力机对板坯进行侧压以调整其宽度, 并依次通过粗轧机进行多道次可逆轧制^[2-3].

上述生产过程中, 各阶段由多台同构并行机组成, 并且在连铸阶段一个浇次内的所有炉次都要在同一台连铸机上进行无间断的加工, 因此该结构可看作是中间阶段具有串行批处理机的柔性流水车间. 考虑到钢铁生产中各个加工阶段的运输时间、机器的调整时间以及工件的释放时间, 提出笔者所研究的多阶段柔性流水车间问题(flexi-

ble flowshop scheduling problem, FFSP).

对于两机流水车间批调度, 文献[4]提出了一种分解启发式算法用来求解工件的总加权拖期费用; 文献[5]提出以最小化加工时间跨度为目标的蚁群优化算法; 文献[6]以最小化完工期 makespan 为目标, 考虑工件动态到达, 构建了一种最优化算法以求解各批次加工时间为定值的流水车间批调度问题; 文献[7]针对差异工件批处理机调度, 设计了一种基于 LPT 规则和批调度近似规则的算法用以最小化制造跨度和总完工时间.

就 FFSP 的串行批问题, 文献[8]研究了任意一个阶段有串行批处理机且其它阶段为离散机的多阶段 FFSP, 提出了改进的拉格朗日松弛(Lagrangian relaxation, LR)算法, 目标为总加权完成时间最小. 就 FFSP 的并行批问题, 文献[9]提出了一个新的遗传算法(genetic algorithm, GA)最小化 makespan; 文献[10]利用启发式搜索 GA 求解一个阶段含并行批处理机的情况, 目标分别为最小化 makespan 及最小化总加权拖期费用.

从上述研究现状可知, 对于两机流水车间问题, 多采用一些启发式算法或最优化算法来求解最大完工时间最小化问题; 针对含串行批的 FFSP, 多采用 LR 算法最小化总加权完成时间; 针对含并行

收稿日期: 2017-01-16; 修订日期: 2017-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1604150); 教育部人文社会科学研究基金项目(15YJC630148); 郑州大学优秀青年教师发展基金项目(1421326092)

通讯作者: 王薛苑(1985—), 男, 河南郑州人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事生产调度等方面的研究, E-mail: wangxueyuan@zzu.edu.cn.

批的 FFSP,则多采用启发式、GA 等最小化 makespan. 针对具有串行批处理机的 FFSP,GA 求解总加权完成时间问题的研究较少.

在 GA 中, p_c 和 p_m 等遗传参数常固定不变,因此,Srinivas 等^[11]首先提出了用 AGA 来求解多目标函数优化问题. 后来也有一些学者^[12-15]对 AGA 在车间调度中的应用进行了研究,文献[12]对流水车间问题进行建模,采用 AGA 仿真求解出最优调度方案;文献[13]为了解决置换流水车间调度问题,提出了基于模拟退火算法的多种群和自适应遗传算法;文献[14-15]均利用 AGA 求解了 FFSP,目标为最小化 makespan.

综上所述,针对参数自适应的研究多集中在流水车间和 FFSP 上,目标多为最小化 makespan. 由于笔者所研究的多阶段 FFSP 考虑了批生产方式和批生产阶段机器的调整时间、工件动态到达以及阶段间运输时间,是一个较为复杂的 NP-hard 问题,因此,需要合理地设计 GA 以提高其求解能力. 故而,笔者提出遗传参数自适应调节策略改进遗传算法(improved adaptive genetic algorithm, IAGA),旨在扩展 GA 对该类问题的求解能力.

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

中间阶段为批处理机的多阶段 FFSP 可描述为: n 个工件依次经过 s 个加工阶段进行加工,当经过某阶段 $k(1 < k < s)$ 时,同一批内的工件按照已知的优先级顺序在一台机器上进行不间断的加工. 至少一个阶段有两台或两台以上的同构并行机. 第 l 批内包含的工件数 B_l 已知,工件只有结束前一阶段的加工才能进入下一阶段. 假设工件动态到达第一阶段,阶段间的运输时间和批生产阶段机器的调整时间不可忽略,目标是使整个流程的总加权完成时间最小化.

1.2 符号

定义一些基本符号及决策变量,如表1所示. 定义参数如表2所示.

1.3 数学模型

根据以上描述及符号定义,将所研究的多阶段 FFSP 建立为整数线性规划模型. 由于实际生产中需要节省整个流程的时间,提高加工效率,所以将目标设为:

$$\min Z = \underset{\{X_{ki}\}}{\text{Minimize}} \sum_{i=1}^n w_i X_{si}. \quad (1)$$

满足以下约束:

表1 基本符号及决策变量

Tab.1 The basic notation and decision variables

i	工件, $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$
k	阶段, $k \in K = \{1, 2, \dots, s\}$
j	时间单位, $j \in J = \{1, 2, \dots, T\}$, T 为完成时间的上界
b	批, $b \in l = \{1, 2, \dots, B\}$, B 为总批数
f	批内工件, $f \in I_b$ (第 b 批内的工件集)
X_{ki}	工件 i 在阶段 k 的完成时间
U_{kij}	0~1 变量,表示在时刻 j 工件 i 是否在阶段 k 上进行加工

表2 参数

Tab.2 The parameters

w_i	工件 i 的权重
P_{ki}	工件 i 在阶段 k 的加工时间
r_i	工件 i 的释放时间
L_b	第 b 批工件的数量
N_{bf}	第 b 批的第 f 个工件
M_k	阶段 k 可用于加工的机器数
$T_{k,k+1}$	工件由阶段 k 到 $k+1$ 的运输时间
x	有批生产要求的阶段, $1 < x < s$
ST_{ki}	工件 i 在阶段 k 上的调整时间,当 $k=x$ 且 $i=N_{b_1}$ 时, $ST_{ki} > 0$,否则为0

$$X_{ki} + T_{k,k+1} + P_{k+1,i} \leq X_{k+1,i}, \quad \forall i, k; \quad (2)$$

$$X_{1i-P_{1i}} + 1 \geq r_i, \quad \forall i; \quad (3)$$

$$X_{x,N_{bf}} + P_{x,N_{b,f+1}} = X_{x,N_{b,f+1}}, \quad \forall b, f; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} U_{kij} \leq M_k, \quad \forall k, j; \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} U_{kij} = P_{ki} + ST_{ki}, \quad \forall i, k. \quad (6)$$

约束(2)表示工件只有在完成前一阶段的加工且被运送到下一阶段,才能开始它的加工;约束(3)定义了工件动态到达第一阶段;约束(4)表示在批生产阶段同一批内的工件在一台机器上连续地进行加工;约束(5)确保在同一时刻进行加工的工件数不能超过该时刻可用的机器数;约束(6)表示工件占用机器的时间区间.

2 IAGA 求解算法设计

步骤1 种群初始化. 对种群进行初始化,设置种群规模 $Popsiz = 100$,遗传代数 $G = 200$. 采用实数编码方式,用随机产生的正整数对工件依次进行编号,初始阶段每个工件都有一个释放时间,先到达先加工,同时到达按照编号顺序

加工。

步骤2 选择. 采用轮盘赌选择方式, 首先对种群内个体的适应度函数值进行评价, 令适应值函数 $f(i)$ 为总加权完成时间的倒数, $f(i)$ 越大, 说明经函数优化后的个体对应的解越好, 从而保留此个体。

步骤3 交叉. 采用两点交叉方式. 因种群的更新效率是由交叉算子 p_c 决定的, 若 p_c 过大, 则优秀个体被破坏的可能性会增加; 反之, 则会使算法搜索能力变差. 所以动态设置 p_c , 即可以持续优化种群, 又能保留优秀个体. 在 Srinivas 等^[11]的研究基础上, 令

$$p_{cmax} = \begin{cases} 0.99, & g \leq G/2; \\ 0.6, & g > G/2, \end{cases} \quad (7)$$

式中: g 为当前迭代数; G 为总迭代数. 设置 p_c 如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{cmax} - (p_{cmax} - p_{cmin}) \left(\frac{g}{G} + \frac{f_i}{f_{max} - f} \right), & f_i \geq \bar{f}; \\ p_{cmax}, & f_i < \bar{f}. \end{cases} \quad (8)$$

式中: p_{cmin} 、 p_{cmax} 分别为进行交叉操作的最小和最大概率, 令 $p_{cmin} = 0.5$; f_{max} 为当前种群内所有个体最大的适应值; f_i 为个体的适应值; \bar{f} 为当前种群内所有个体的平均适应值。

步骤4 变异. 采用单点变异方式. 虽然 GA 具有全局搜索能力, 但也可能陷入局部收敛. 有效设计遗传算子 p_m , 可以增加算法搜索的广度和深度. 将个体进行变异操作的实际概率 p_m 设置如下^[11]:

$$p_{mmin} = \begin{cases} 0.03, & g \leq G/2, \\ 0.01, & g > G/2, \end{cases} \quad (9)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{mmin} + (p_{mmax} - p_{mmin}) \left(\frac{g}{G} + \frac{f_i}{f_{max} - f} \right), & f_i \geq \bar{f}, \\ p_{mmin}, & f_i < \bar{f}, \end{cases} \quad (10)$$

式中: p_{mmin} 和 p_{mmax} 分别为进行变异操作的最小和最大概率, 令 $p_{mmax} = 0.05$ 。

3 试验测试

3.1 试验参数设置

本节分别对 GA 和 IAGA 进行相应设计, 并与 LR 算法进行对比, 在 Matlab 上测试其性能, 这 3 种算法均在 Celeron (R) Dual-Core CPU 2.10

GHz 微机上运行. 公平起见, 将 IAGA 进行 200 次迭代所需时间作为停止条件, 设置最大运行时间为 1 000 s. 当工件规模 $n = \{30, 60, 90\}$ 时, 对 3 种算法的目标值 ($\min Z$) 和迭代次数 (ItN) 进行比较; 而当 $n = \{120, 150\}$ 时, 由于 LR 运行一次迭代所需的计算时间较长致使在较短的计算时间内运行的迭代次数较少, 解的质量也较差, 随着问题规模增大这种情况也更明显, 因此未再测试 LR 求解这 2 种工件规模的情况, 仅对 IAGA 和 GA 的结果进行了比较。

令 GA 的交叉概率为 0.8, 变异概率为 0.05. 针对每种工件规模的 $\{n, s, M_k\}$ 组合随机产生 10 个实例, 因此本次试验共测试了 300 组实例, 测试数据随机产生。

(1) 工件数 $n \in \{30, 60, 90, 120, 150\}$; 阶段数 $s \in \{3, 4, 5\}$; 机器数 $M_k \in \{3, 4\}$;

(2) $x = 2, L_b = 5$;

(3) 工件的权重以及加工时间是满足 $[1, 10]$ 之间均匀分布的随机数;

(4) 工件动态到达第一阶段的时间、各阶段间的运输时间以及批生产阶段所需要的调整时间都是 $[3, 5]$ 之间均匀分布的随机数。

3.2 结果分析

表 3、表 4 为测试结果。

(1) 当工件规模和阶段数不变时, 随着可用机器数的增加, 3 种算法的目标函数值都会相应降低, 求解时间也会有所减少。

(2) 当 $n = 30$ 时, LR 得到的解的质量最好, 目标值比 IAGA 和 GA 分别改进了 10.7% 和 13.8%。当 $n = 60$ 时, IAGA 的优势逐渐显现, 目标值相对 LR 改进了 8.3%。当 $n = 90$ 时, IAGA 求得的目标值比 LR 改进了 24.0%。由此可得, LR 求解小规模问题的效果最好, 而 IAGA 更适合求解贴近实际生产的中大规模问题。

(3) 当 $n = \{30, 60, 90, 120, 150\}$ 时, IAGA 所求的目标值相比 GA 分别改进了 2.8%、3.3%、10.4%、12.5%、13.1%。即对于不同规模问题, IAGA 求解该问题的能力一致强于 GA, 且在大规模问题时这种优势更加明显。

(4) 在相同的时间内, IAGA 的迭代次数多于 GA。当 $n = \{30, 60, 90, 120, 150\}$ 时, IAGA 的迭代次数比 GA 分别多了 5、6、8、10、15。因此, 随着问题规模增大, 两者迭代数的差额也越大, IAGA 的效率更高。

表 3 规模 $n=\{30,60,90\}$ 的测试结果对比Tab.3 Testing results of $n=\{30,60,90\}$

n	M_i	s	min Z			ItN			CPU/s
			IAGA	GA	LR	IAGA	GA	LR	
30	3	3	9 886	10 244	8 351	200	196	10 895	210
		4	11 262	11 487	10 020	200	194	9 983	230
		5	12 283	12 471	11 529	200	194	9 985	264
	4	3	8 833	9 296	7 291	200	196	10 765	207
		4	9 859	10 373	8 918	200	193	9 768	224
		5	10 343	10 350	10 303	200	194	9 832	260
	平均		10 411	10 703	9 402	200	195	10 204	232
60	3	3	23 536	24 438	27 771	200	196	90	390
		4	27 255	27 814	33 624	200	192	77	458
		5	30 937	31 803	33 980	200	193	74	543
	4	3	23 056	23 964	22 828	200	195	89	385
		4	26 496	27 401	27 196	200	193	78	455
		5	29 753	30 907	28 992	200	193	73	534
	平均		26 838	27 721	29 065	200	194	80	460
90	3	3	54 108	63 072	73 964	200	192	4	590
		4	68 920	75 371	80 734	200	193	3	712
		5	75 781	79 915	86 177	200	192	3	841
	4	3	41 128	50 774	59 075	200	193	4	589
		4	53 443	58 495	61 023	200	191	3	707
		5	58 364	60 814	75 234	200	193	3	839
	平均		58 624	64 740	72 701	200	192	3	713

表 4 规模 $n=\{120,150\}$ 的测试结果对比Tab.4 Testing results of $n=\{120,150\}$

n	M_i	s	min Z		ItN		CPU/s
			IAGA	GA	IAGA	GA	
120	3	3	69 862	79 045	200	189	806
		4	80 014	89 136	200	188	985
		5	89 543	101 897	185	175	1 000
	4	3	66 108	75 714	200	190	785
		4	78 214	83 357	200	188	979
		5	82 176	95 065	186	177	1 000
	平均		77 652	87 369	195	185	925
150	3	3	109 798	116 102	196	182	1 000
		4	126 411	140 462	160	141	1 000
		5	145 357	160 047	135	120	1 000
	4	3	99 726	110 596	197	182	1 000
		4	114 261	136 408	164	150	1 000
		5	130 271	157 061	139	122	1 000
	平均		120 970	136 779	165	150	1 000

4 结论

针对钢铁行业的炼钢—连铸—热轧工艺流程,考虑工件的释放时间、运输时间以及机器的调整时间,建立了中间阶段有批处理特征的整

数线性规划模型,目标为所有工件的总加权完成时间最小.针对该多阶段 FFSP,设计了遗传参数随迭代次数和适应值的改变而进行调节的自适应遗传算法.对各种规模的问题进行仿真试验结果显示,相同时间内,无论何种工件规模,

IAGA 解的质量均明显优于 GA, 且 IAGA 的迭代次数多于 GA; 与 LR 算法相比, 在求解较大规模工件时, IAGA 的性能更好, 更符合实际生产对时间的要求。

参考文献:

- [1] 汪恭书, 唐立新. 连铸—轧制生产中带有批决策的排序问题的建模与优化方法 [J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1713–1720.
- [2] 洪悦, 唐立新, 张颜颜. 基于数据子空间 PLS 建模技术的热轧轧制力优化设定 [J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1199–1204.
- [3] YU Y S, JIE J C, ZHANG S. Three-layer Al/Al-B₄C composite material prepared by casting and hot rolling [J]. Powder metallurgy and metal ceramics, 2015, 54(7/8): 390–396.
- [4] TAN Y, MONCH L, FOWLER J W. Proceedings of winter simulation conference [C]. 2015.
- [5] 陈成栋, 陈华平, 朱顾, 等. 两阶段流水车间批调度问题的蚁群优化算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38(19): 137–141.
- [6] 黄锦铤, 刘建军, 陈庆新, 等. 两机 flow-shop 类型模具热处理车间批调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(7): 1665–1674.
- [7] 程八一, 胡笑旋. 差异作业批调度的流水车间问题及近似算法 [J]. 系统工程学报, 2011, 26(3): 393–399.
- [8] XUAN H, LI B. Scheduling dynamic hybrid flowshop with serial batching machines [J]. Journal of the operational research society, 2013(64): 825–832.
- [9] COSTA A, CAPPADONNA F A, FICHERA S. A novel genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with parallel batching and eligibility constraints [J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 75(5/8): 833–847.
- [10] LI D, MENG X, LIANG Q. A heuristic-search genetic algorithm for multi-stage hybrid flowshop scheduling with single processing machines and batch processing machines [J]. Journal of intelligent manufacturing, 2015(26): 873–890.
- [11] SRINIVAS M, PATNAIL K L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE transactions on system, man and cybernetics, 1994, 24(4): 656–667.
- [12] XU Y C, TAN W N. The modeling and simulation of flow shop scheduling problem based on adaptive genetic algorithm [J]. RISTI-Revista iberica de sistemas e tecnologias de informacao, 2016(17): 25–40.
- [13] SUN H M, YU J W, WANG H L. Proceedings of Chinese intelligent automation conference-intelligent technology and systems [C], 2015.
- [14] ZHU H M, ZHAO J F, WANG M L. Adaptive genetic algorithm for Hybrid Flow-Shop scheduling [C]. 3rd international conference on advanced engineering materials and technology, 2013.
- [15] ZHAO J F, ZHU X C, WANG B S. Hybrid flow-shop scheduling method and simulation based on adaptive genetic algorithm [C]. Applied mechanics and materials, 2014.

Multi-stage Flexible Flowshop Scheduling with Batching Machines

WANG Junyan, WANG Xueyuan, XUAN Hua

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

Abstract: Based on steel making-continuous casting-hot rolling production process in iron and steel industry, the problem of scheduling n jobs in a multi-stage flexible flowshop with batching machines at some middle stage was studied. The batching production stage consisted of multiple serial batching machines in parallel, and the other stages contained discrete machines. Firstly, a mathematical model was formulated to minimize the total weighted completion time with the consideration of job dynamic arrival, transportation time between the adjacent stages and machine setup time. Then, an improved adaptive genetic algorithm was developed for this NP-hard problem where the genetic parameters were associated with the iteration number and the fitness function values. Computational experiments tested a large number of random data for up to 150 jobs. The results show that the proposed algorithm could find the better solutions within a shorter period of time, as compared with the general genetic algorithm. The comparison with Lagrangian relaxation showed that the improved genetic algorithm performed better on solution quality for medium and large sized problems.

Key words: flexible flowshop scheduling; batch machines; total weighted completion time; self-adaptive genetic algorithm; self-adaptive adjustment

文章编号: 1671-6833(2017)05-0091-06

飞碟游乐设备驱动轴疲劳失效分析

刘治华, 刘博见, 许伟超, 张银霞, 陶德岗

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对目前游乐设备运行过程中, 由于高周疲劳引起驱动轴疲劳失效而造成设备事故等问题, 本文采用有限元分析理论并结合 NCODE 疲劳分析软件, 对飞碟游乐设备驱动轴进行了疲劳仿真研究. 首先结合设备工况对该游乐设备进行了简化和建模, 然后采用 ADAMS 有限元分析软件进行了动力学分析, 提出了多体系统拓扑构型, 得到了驱动轴的载荷时间历程. 利用 NCODE 疲劳分析软件对驱动轴进行了疲劳可靠性分析, 得出该驱动轴的疲劳结果云图和各节点的疲劳寿命, 并从云图中确定出驱动轴容易破坏的位置和寿命.

关键词: 驱动轴; NCODE; ADAMS; 动力学分析; 疲劳失效

中图分类号: TH69 **文献标志码:** A **doi:** 10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.007

0 引言

随着社会经济的不断发展, 人们在追求物质生活水平提高的同时, 也在不断追求精神生活水平, 这促使游乐设施行业蓬勃发展. 然而众多设施在不断丰富人们精神文化生活的同时, 也直接给广大人民群众的生命安全造成了巨大的影响. 目前国内游乐主题公园众多, 其中游乐飞碟是最聚人气的娱乐项目之一. 驱动轴是游乐飞碟运行中传递扭矩的重要零部件, 由于游乐飞碟长期处于满载运行, 从最高点经轨道常以超过 30 km/h 速度俯冲至最低点, 驱动轴不仅承受飞碟自身重量, 在运行中还要承受庞大离心力. 如果在运行中断裂, 后果将不堪设想. 因此, 对游乐飞碟驱动轴的疲劳可靠性分析是现代游乐设备设计制造的必要环节之一.

近年来, 国内外研究工作人员对游乐设备的疲劳分析做了大量的研究, 通过采用疲劳分析软件 NCODE 并结合不同的疲劳理论对游乐设备进行了疲劳分析. 辛虎君通过分析离心力对动态仿真过程的影响, 修正轨道模型, 根据名义应力疲劳理论对游乐设备关键零部件进行校核^[1]. 倪昀采用 Hypermesh 建立车体稳定杆的 FEM 模型, 结合 NCODE 对稳定杆做 E-N 疲劳分析^[2]. INCE A 等针对包含缺口的车体重要零部件, 结合数值解析

理论提出了一种多轴疲劳计算方法, 并计算其强度^[3]. 戴俊平等根据车体半轴实际工况, 结合有限元理论应用 NCODE 对该结构进行疲劳可靠性分析^[4]. 韩朝霞等利用有限元仿真得到载荷-应力的转化系数, 用实测载荷谱做寿命分析^[5].

笔者将对游乐飞碟的实际运行工况进行分析, 并确定驱动轴的疲劳类型. 通过对游乐飞碟进行动力学分析, 运用 IMPACT 碰撞算法解决实体间的相互切入问题. 使用 ADAMS 软件采集驱动轴的载荷时间历程, 应用 NCODE 疲劳分析软件对其进行疲劳可靠性分析, 确定驱动轴易发生疲劳破坏的位置和各节点的寿命, 从而为游乐飞碟的设计制造及后期维护提供理论依据, 为游乐设备疲劳分析提供新的方法.

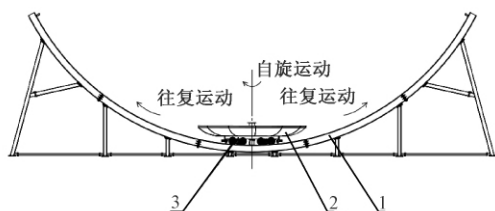
1 设备工作原理

图 1 为游乐飞碟三维模型. 如图 1 所示, 游乐飞碟主体结构由两部分组成: 车体、轨道. 满载时车体总重为 6.5 t, 轨道圆弧半径 13.8 m, 占地面积 27.4 m × 3.9 m, 最高点距地面 8.05 m. 运行时, 车体将沿圆弧形轨道做往复运动, 摆动幅度由小至大, 经数周期到达最高点. 车体在运行的同时, 安装在上方的旋体架沿回转支承轴线做自转运动.

收稿日期: 2017-03-27; 修订日期: 2017-05-05

基金项目: 河南省重点科技公关资助项目(152102210045)

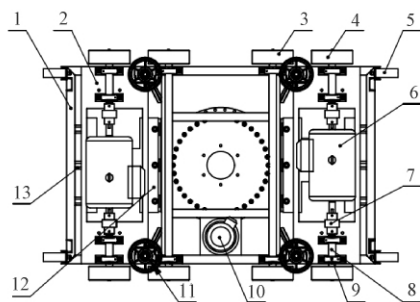
作者简介: 刘治华(1971—), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要研究方向为机械制造及其自动化研究.



1. 轨道; 2. 旋体架; 3. 车架

图 1 游乐飞碟三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of amusement equipment



1. 车体框架; 2. 减震架; 3. 缓冲轮; 4. 主动轮; 5. 弹性防撞体; 6. 双输出轴电机; 7. 弹性联轴器; 8. 驱动轴; 9. 轴承座; 10. 旋体架电机; 11. 防侧翻轮; 12. 弹性减震装置; 13. 铰接结构

图 2 游乐飞碟车架部分模型

Fig. 2 The model of the frame of amusement equipment

2 车体有限元模型的建立

要对车体进行动力学仿真,需要将三维模型中与主运动无关的零部件及相关配合进行简化.结构中的防侧翻轮、回转支承以及装饰体与所分析的运动仿真并无直接联系,故可以将其简化,把重量均布至主体的结构焊架上.电机与车架之间是减振架,减振架与车体一侧采用铰接,另一侧采用弹性元件连接.根据各个结构的相对关系,建立 ADAMS 简化后的运动模型,图 3 为简化后各部件之间的多体拓扑结构图^[6].图 4 为 ADAMS 动力与模型.

2.1 定义 IMPACT 型接触力

IMPACT 型接触力计算公式如下.

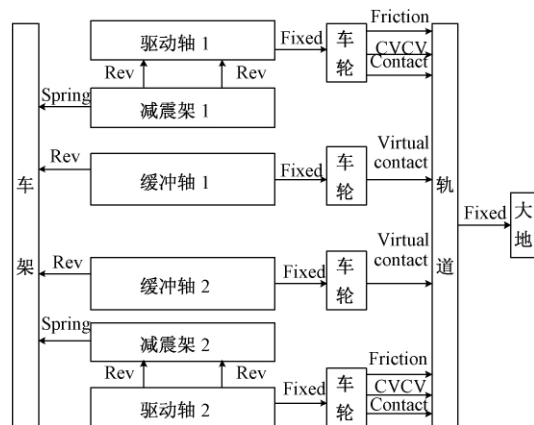
$$F_n = K\delta^n + C_v,$$

式中: K 为接触刚度; δ 为陷入深度; n 为刚度指数; C 为接触阻尼; v 为相对运动速度.

基于 Hertz 模型^[7] (两圆柱体平行接触问题)可知 K 与两接触构件的弹性模量 E 、泊松比 μ 相关:

$$K = \frac{\pi}{4} EL, \quad (1)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2}. \quad (2)$$



图中: Fix 固定连接关系; Rev 旋转副; Spring 弹性元件; Friction 摩擦力; CVCV 线线约束; Contact 接触定义; Virtual contact 虚接触

图 3 ADAMS 结构拓扑图

Fig. 3 Structure topology of ADAMS

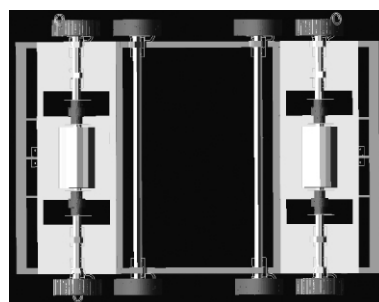


图 4 ADAMS 动力学模型

Fig. 4 ADAMS dynamics model

车轮材料为尼龙,弹性模量 $E_1 = 8.3E9 \text{ N/m}^2$; 泊松比 $\mu_1 = 0.28$; 尼龙轮厚度 $L = 0.135 \text{ m}$; 轨道的材料为 Q235B 弹性模量 $E_2 = 2.01E11 \text{ N/m}^2$, 泊松比 $\mu_2 = 0.30$; 计算得接触弹性模量 $E = 8.65E9 \text{ N/m}^2$, 接触刚度 $K = 9.2E8 \text{ N/m}$. 在 ADAMS 中, 阻尼常数取刚度值的 $0.1\% \sim 1\%$ ^[8]; n 用来计算瞬时法向力中材料对刚度贡献值的指数, 通常取 1.5 或者更大. 对于尼龙轮来说, 可取范围为 2~3, 本文中取值为 2.2. 考虑 ADAMS/Solver 三次 STEP 函数求解两点间阻尼系数, 要求 Penetration Depth ≥ 0 , 尼龙与钢材之间取值 0.1.

2.2 载荷时间谱

仿真的测量点选定在这两个相配合的旋转副上和轮子与轨道接触处, 分别测 3 个位置的受力和轴的扭矩, 测量时间为 60 s, 步数 1 000, 得到的相对应的载荷时间谱如图 5~8 所示. 节点 1 位于驱动轴与靠近联轴器一侧的轴承配合位置, 节点 2 位于驱动轴与靠近轮子一侧的轴承配合位置, 节点 3 位于驱动轴与轮子配合位置.

由图可知, 车体由最高点运行至最低点时, 由于重力和离心力的作用, 使得各节点位置的受力

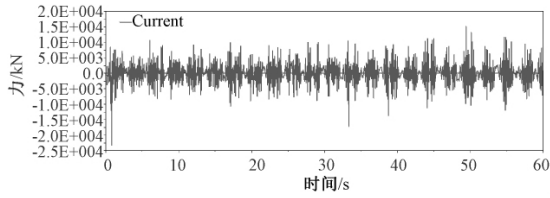


图5 节点1载荷时间谱

Fig. 5 Load-time spectrum of point 1

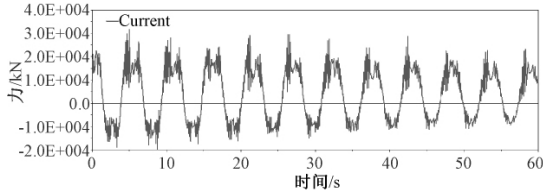


图6 节点2载荷时间谱

Fig. 6 Load-time spectrum of point 2

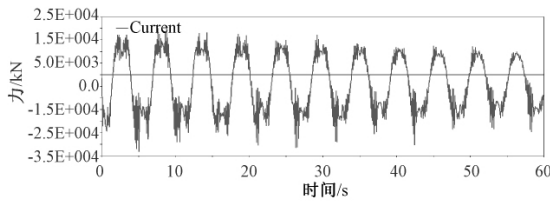


图7 节点3载荷时间谱

Fig. 7 Load-time spectrum of point 3

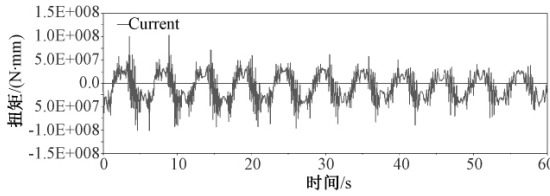


图8 驱动轴扭矩时间谱

Fig. 8 Torque-time spectrum of driving shaft

达到最大值. 经过几个周期的运动, 车体与轨道直接的摩擦使得摆动幅度变小, 离心力的值逐渐变小, 各节点位置的受力也呈减小的趋势, 与实际的受力趋势相符. 为检验数据有效性, 选择节点3, 即车轮与驱动轴连接位置进行理论计算.

能量与速度计算:

$$E = mgh, \quad (3)$$

$$h = R \times (1 - \cos \alpha) - h', \quad (4)$$

$$v = \sqrt{2E/m}. \quad (5)$$

车轮节点计算:

$$Q = mv^2/R, \quad (6)$$

$$F_N = G + Q, \quad (7)$$

$$f = F_N/4, \quad (8)$$

式中: E 为车体在最高位置势能; h 为车体重心距地面高度; h' 为车体重心距轨道高度; α 为轨道中

垂线与车体重心连线夹角; v 为最大速度; Q 为最大离心力; F_N 为车体受轨道支反力; f 为车轮受力.

根据前面所给数据代入 $m = 6\,500\text{ kg}$, $R = 13.8\text{ m}$ 计算; 根据 Solidworks 质量分析模块计算得到 $h' = 0.855\text{ m}$; 根据结构尺寸, 利用三角函数计算得 $\alpha = 57.8^\circ$; 车轮最大受力为 $28\,857.93\text{ N}$. 与载荷谱最低位置处受力吻合, 数据是有效的.

在定义载荷参数时, 选择载荷类型为 Time Series, 并要将 Load Case 中的 Divider 进行设定, 这是因为在静强度计算中有载荷的数值, 疲劳计算中加载的为实测的载荷值, 因此对静强度结果进行名义化. 在 NCODE/Time Series 的载荷定义中, 有如下映射表达式

$$\sigma_{ij}(t) = \sum_k \frac{(P_k(t) \cdot S_k + O_k) \cdot \sigma_{ij,k}}{D_k}, \quad (9)$$

式中: $\sigma_{ij}(t)$ 是以时间为变量的应力张量(应力时间历程); $P_k(t)$ 为输入的载荷谱(载荷时间历程); S_k 为缩放因子(视材料缺陷而定); O_k 为载荷偏移量(控制零漂); $\sigma_{ij,k}$ 为静强度计算结果中的应力; D_k 为名义化因子(D_k 与 $\sigma_{ij,k}$ 的比值描述 $P_k(t)$ 与 $\sigma_{ij}(t)$ 的映射关系), k 代表不同的载荷步(多个载荷共同作用时 $k > 1$ 然后基于累积损伤理论, 线性叠加). 在 SN Analysis 中不需要将载荷谱进行简化, 因为在实际运行过程中, 设施会受到一定程度的冲击, 在载荷谱上表现为毛刺现象, 只要数据不发生阶跃不存在奇异点, 可以使结果更加精确. 需要注意的是, 在对载荷谱进行处理时, 需要利用 ADAMS 后置处理模块 Review/Post-Processing 将图 5~8 中的数据导出为数组数据(通过 File/Export/Table 选项导出, 打开可用 txt/excel 等工具), 并将 4 个文件中的数组, 在 excel 中编辑成 4 列即可. 然后施加在同一个通道上, 如果分别对其设置通道, 极易造成无法对损伤进行累积的情况, 这样将不能得到有效的结果.

2.3 赋予材料

分析的车体驱动轴材料为 40Cr, $b_2 = b_1(2 + b_1) = 980\text{ MPa}$, $\sigma_s = 785\text{ MPa}$, 弹性模量 $2.06\text{E} + 11$, 泊松比 0.28. 在 Design life 中并无相应材料的相关特性及 S-N 曲线. 对于母材, 需知道相应的强度极限 UTS, 具体的计算方法如下图^[9].

疲劳循环应力值计算:

$$S_1 = 0.9 \times UTS, \quad (10)$$

$$S_2 = 0.357 \times UTS, \quad (11)$$

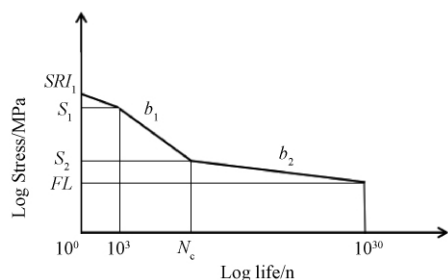


图9 S-N 曲线图

Fig. 9 S-N curve chart

$$SRI_1 = 2 \times S_2 / (N_{c1})^{b_1}. \quad (12)$$

曲线斜率:

$$b_1 = (\log(S_2) - \log(S_1)) / (\log(N_{c1}) - 3), \quad (13)$$

$$b_2 = b_1 / (2 + b_1), \quad (14)$$

式中: UTS 为材料的强度极限; S_1 为 1 000 次循环下的应力值; S_2 为 N_{c1} 循环次数下的应力值 (N_{c1} 值一般取为 $1E+6$); SRI_1 为应力截止范围, 在循环为 1 时不能大于 UTS; b_1 、 b_2 分别为 S-N 曲线的斜率; FL 为永久寿命, 循环超过 $1E+30$ 将视为不再产生破坏。

车轮轴的处理工艺参数根据实际技术要求设定为 Machined, 粗糙度 $Ra = 1.6 \mu\text{m}$. 不缩放、材料不偏置、表面处理系数为 1.

3 疲劳分析

如果破坏前试件能够吸收的能量极限值为 W , 试件破坏前的总循环数为 N ; 而在某一循环数时, 试件吸收的能量为 W_1 , 则由于试件吸收的能量与其循环数 n_1 存在正比关系, 有

$$\frac{W_1}{W} = \frac{n_1}{N}. \quad (15)$$

因此在疲劳分析中, 可将有限元后处理模块 (.rst) 的文件拆分为 4 个加载步, 每个加载步只激活一个受力位置, 其他受力位置将调整为 un-suppress.

应用分析的“疲劳五框图”流程得到本文采用的有限元疲劳寿命分析流程图, 如图 10 所示.

将 ANSYS Workbench 的后处理结果文件 (.rst) 与时间载荷历程文件 (.S3T) 关联至 SN CAE Fatigue, 之后输入 40Cr 材料参数, 然后选用 Goodman 分析, 得到疲劳损伤云图和疲劳寿命云图 11 ~ 12.

由分析的云图可以得知, 轴在阶梯部位由于应力集中而最易产生疲劳破坏现象. 表 1 给出驱动轴 5 个最易发生疲劳失效节点的破坏及寿命

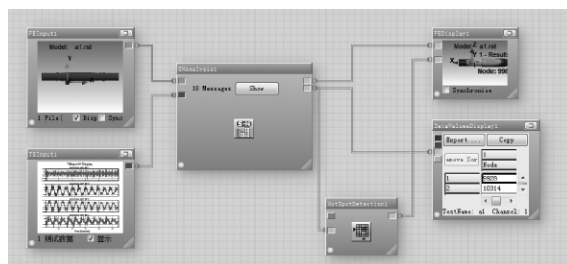


图10 疲劳可靠性分析界面

Fig. 10 Fatigue reliability analysis interface

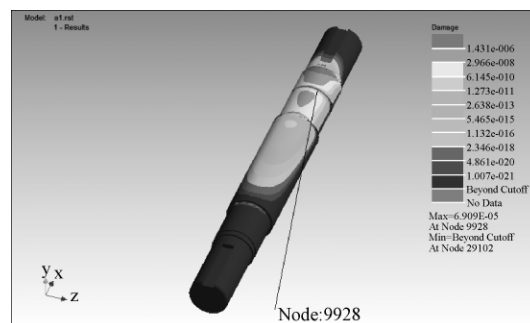


图11 车轮轴疲劳损伤云图

Fig. 11 Fatigue damage of the driving shaft

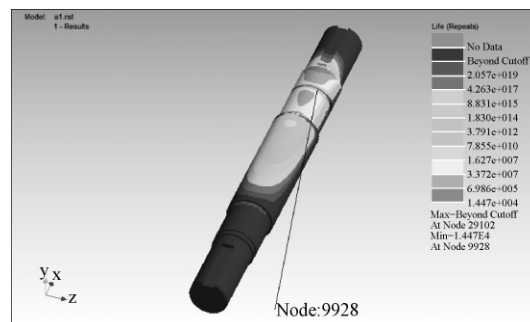


图12 车轮轴疲劳寿命云图

Fig. 12 Fatigue life of the driving shaft

列表.

表1 车轮轴部分节点疲劳寿命

Tab. 1 Fatigue life of part node of the driving shaft

节点	疲劳损伤	循环次数/ 次	位置	年限	工况
9 928	6.91e-05	1.45e+04	1-a	6.65	检
10 314	6.87e-05	1.46e+04	3-c	6.74	-
9 741	6.53e-05	1.53e+04	4-b	7.43	-
12 025	6.28e-05	1.59e+04	2	8.02	-
9 960	6.22e-05	1.61e+04	3	8.21	-

通过对图表观察可知, 在 9 928 节点位置最易发生疲劳失效, 每一次工作历程受损量为 $6.91E-5$, 在这种工作状态下可循环次数为 $1.45E+04$. 结合公式 (13) 与迈因纳线性累积损伤理论, 将 NCODE 计算结果导入 $t(s) = \text{Life}/\text{Damage}$ 换算成时间, 结果上表给出. 由受损区域可知, 如果

与驱动轴阶梯处应力应变聚集过大,则极易造成驱动轴运行过程中突然断裂,使得游乐飞碟在运行过程中由于失去一个轮子而产生脱轨现象,所以需要在驱动轴产生高周疲劳失效之前,检查驱动轴与车轮连接处阶梯位置的磨损情况,并及时更换,建议5年一检.这样可有效防止游乐飞碟由于应力应变循环在驱动轴阶梯处的损伤而造成的游乐设备事故.

4 结论

通过应用 Solidworks 建立模型,ADAMS 动力学分析采集得到载荷谱,结合 Workbench 与 NCODE 对飞碟游乐设施驱动轴进行疲劳可靠性分析、计算和研究,得到了驱动轴的应力分布和疲劳寿命云图.最容易发生疲劳的位置在驱动轴与车轮连接处阶梯位置,这是因为在阶梯处由于机加工产生尖锐部分,使得应力集中在这个部位,从而使驱动轴在运行的过程中受力不平衡,导致应变高于其他位置,是最容易产生高周疲劳的区域.笔者分析结果为游乐设备的设计和维修提供了重要依据.为了提高驱动轴的疲劳强度,在阶梯处可设计成过渡圆角以减少应力集中;工艺上,可通过表面淬火、渗氮等方法提高表面硬度,通过抛光等方法提高驱动轴表面质量、降低表面粗糙度,从而提高其寿命.

参考文献:

- [1] 辛虎君. 三环过山车运动学与动力学仿真及结构疲劳分析[D]. 山西: 太原科技大学, 2012.
- [2] 倪昀,陈伟. 基于 Ncode 的前横向稳定杆应变疲劳分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(2): 52-58.
- [3] INCE A, GLINKA G. Innovative computational modeling of multiaxial fatigue analysis for notched components[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 82(2): 134-145.
- [4] 戴俊平,栗宜猛,尤迪,等. 基于 Ncode 的新型汽车半轴的疲劳分析[J]. 机械工程师, 2015(4): 66-68.
- [5] 韩朝霞,孙守光,赵方伟. 基于实测载荷谱的侧架寿命分析[J]. 铁道机车车辆, 2015, 35(1): 15-18.
- [6] 石明全. 基于 ADAMS 的多接触问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2004(29): 220-222.
- [7] VALENTIN L, POPOV. Contact mechanics and friction physical principles and applications [M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [8] 谢最伟,吴新跃. 基于 ADAMS 的碰撞仿真分析[C]. 第三届中国 CAE 工程分析技术年会论文集, 辽宁: 大连理工大学, 2007: 339-342.
- [9] HBM United Kingdom. Designlife Theory Guide [EB/OL]. 软件帮助文件, 2014.
- [10] 李成林,宋莎莎,韩振南. 基于 Ncode design-life 的某车架疲劳可靠性分析[J]. 图学学报, 2014, 35(1): 42-45.
- [11] 王立峰. 发动机曲轴连杆机构动力学仿真及疲劳分析[D]. 西安: 长安大学汽车学院, 2014.
- [12] 陈福玉,朱如鹏,王宇波,等. 基于 Workbench 的铆接连接件疲劳寿命的仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(4): 112-115.
- [13] 孙泽敏. 基于 ADAMS 的某车悬架系统运动学仿真及优化[D]. 吉林: 长春工业大学机电工程学院, 2014.
- [14] 刘银虎,缪炳祺. 多体动力学仿真软件 ADAMS 理论基础及其功能分析[J]. 电子与封装, 2005, 5(4): 25-34.
- [15] 李昆. 冲击载荷下机械零部件疲劳分析方法及其应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 2013.
- [16] 战楠,郑福荣,高鹏飞,等. 基于实测载荷谱的轿车后扭梁疲劳仿真研究[J]. 机械强度, 2015, 37(5): 959-963.
- [17] 刘永臣,王国林,孙丽. 基于实测载荷谱的副车架疲劳寿命估算方法[J]. 汽车技术, 2014(4): 58-62.
- [18] 任国清,陶其铭,余武弦. 基于实测载荷谱的整车疲劳开发与试验对比研究[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(4): 300-304.
- [19] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 周美施,张铁柱,尹怀仙,等. 基于 Ncode design-life 的电动客车车架疲劳寿命分析[J]. 青岛大学学报, 2015, 30(4): 96-100.
- [21] 黄志新,刘成柱. ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [22] 王彦伟,罗继伟,叶军,等. 基于有限元的疲劳分析方法及实践[J]. 机械设计与制造, 2008(1): 22-24.

Fatigue Failure Analysis of the Driving Shaft of Amusement Equipment

LIU Zhihua, LIU Bojian, XU Weichao, ZHANG Yinxia, TAO Degang

(College of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the running process of amusement equipment, equipment accidents and other problems have been arising—caused by high cycle fatigue of drive shaft. In this paper, the research on the fatigue simulation of the drive shaft inside the flying saucer amusement equipment is done using the finite element analysis theory and NCODE fatigue analysis software. Firstly, the amusement equipment is simplified and modeled according to the equipment working condition. Then, the ADAMS finite element analysis software is used to analyze the dynamics. As a result, the topological configuration of the multi-body system is presented and the load time history of the drive shaft is obtained. Next, by using NCODE fatigue analysis software, fatigue reliability analysis of the drive shaft is made, the nephograms of the fatigue results of the drive shaft and the fatigue life of each node are obtained, from which the location and fatigue life of the drive shaft easily destroyed are also confirmed.

Key words: drive shaft; NCODE; ADAMS; kinetic analysis; fatigue failure

(上接第 85 页)

Evolutionary Game Analysis on Cooperation Mechanism of Express Enterprises and Third-party Smart Express Cabinet Enterprises

LI Yumin, YANG Lu, WANG Xinlu

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

Abstract: The smart express cabinets could solve terminal distribution problems to some extent. Based on the view of evolutionary game theory, an evolutionary game model of express enterprises and third-party smart express cabinet enterprises was established in this paper. Meanwhile, the dynamic evolutionary process and factors influencing the establishment of cooperative relationship were analyzed by this model. Finally, numerical cases were conducted with Matlab simulation software. The results showed that: (a) Only the excess income was more than the cost, probably the cooperation could be achieved. (b) Probability of this cooperation had a positive correlation with the excess income, while inversely with the cost. (c) There existed an optimal proportion of excess income correlation, which could maximize the probability of cooperation. (d) Reasonable income distribution mechanism and cost sharing mechanism were conducive to the establishment of the cooperative relationship.

Key words: terminal logistics; cooperation mechanism; evolutionary game; smart express cabinets; express enterprises

本刊被下列数据库及文摘收录:

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

郑州大学学报(工学版)
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)
双月刊 (1980年创刊)
第38卷 第5期 总第155期 2017年9月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)
Bimonthly (Started in 1980)
Vol.38 No.5 Sum No.155 Sep.10, 2017

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

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

中国标准刊号: ISSN 1671-6833
CN 41-1339/T

定价: 10.00元

邮发代号: 36-232