

- 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

2016.1

第37卷 第1期
Vo1.37 No.1
2016年1月出版

ISSN 1671-6833



目 次

电气工程

- 基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法 毛晓波, 郝向东, 梁 静(1)
- 基于行为策略的铝电解建模控制研究 陈铁军, 黄 超, 张 瑾(6)
- 一种基于 HHT 的短期电价组合预测方法 廖晓辉, 周 冰, 杨冬强, 武 杰(10)
- 三电平有源电力滤波器的非奇异终端滑模电流跟踪控制 王 杰, 何向东, 彭金柱(15)
- 基于发育网络的复杂背景下人脸识别 王东署, 郑光璞(19)
- 电网规划的多层面协调性的综合评估方法研究 徐 敏, 沈靖蕾, 闫震山(24)
- 基于 LMD 法的电力系统暂态扰动检测技术研究 韩剑鹏, 鲁改凤, 曹文思(29)

交通工程

- 多指标约束下齿轮传动机构模糊可靠性优化设计 胡启国, 谢国宾, 罗天洪, 庾 奎(34)
- 纯电动赛车复合电源动力系统控制研究 贺伊琳, 许世维, 刘 瑞, 谢学飞(40)
- 最小二乘复指数法在排气管试验模态分析中的应用 曾发林, 许 凯(45)
- 基于离散-连续耦合方法的土工格室加筋碎石承载能力数值模拟
..... 汪海年, 张 然, 周 俊, 刘 玉, 尤占平(49)
- 基于有限元法的某 SUV 后部碰撞分析研究 胡雪芳(54)

土木和机械工程

- 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响 宋丹青, 王 丰, 梅明星, 刘鹏飞(60)
- 建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究 魏雁冰, 范明桥, 林生法, 徐 锴, 吴志强(65)
- 具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析 马 强, 朱 健, 邢文文, 胡 兴(70)
- TBM 盘形滚刀破岩过程的数值研究 张银霞, 江志强, 段留洋, 王 栋, 刘治华(75)
- QT280 拖挂式牵引机牵引轮结构分析与优化 刘竹丽, 周 浩, 侯东红(79)

化工和信息工程

- 石墨填充聚四氟乙烯复合材料的拉伸试验研究 靳遵龙, 郭月明, 李 赵, 王定标, 王永庆(84)
- 基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计 陈恩庆, 肖素珍(87)
- LIDAR 点云数据全自动滤波算法研究 李 健, 方宏远, 崔雅博, 范 涛(92)

CONTENTS

【Electrical Engineering】

- Target Tracking Algorithm Based on Mean Shift with ELM MAO Xiaobo, HAO Xiangdong, LIANG Jing (1)
- Research on Modeling and Control of Aluminum Electrolysis Based on Behavioral Approach
..... CHEN Tiejun, HUANG Chao, ZHANG Jin (6)
- A Method for Short-term Electricity Price Forecasting Based on HHT
..... LIAO Xiaohui, ZHOU Bing, YANG Dongqiang, WU Jie (10)
- Current Tracking Control of Three-level Active Power Filter Using Non-singular Terminal Sliding Mode Control Method
..... WANG Jie, HE Xiangdong, PENG Jinzhu (15)
- Face Recognition with Complex Background Based on Developmental Network
..... WANG Dongshu, ZHENG Guangpu (19)
- The Analysis of Comprehensive Assessment Method on Multi-section Coordination of Power Network Planning
..... XU Min, SHEN Jinglei, YAN Zhenshan (24)
- Research of the Transient Disturbance Detection Technology of Power System Using Local Mean Decomposition Algorithm
..... HAN Jianpeng, Lu Gaifeng, Cao Wensi (29)

【Construction Engineering】

- Fuzzy Reliability Optimization Design of Gear Transmission Mechanism under Multi-specification Restriction
..... HU Qiguo, XIE Guobin, LUO Tianhong, TUO Kui (34)
- Research of Powertrain Control Based on Synergic Power Supply for Electric Racing Vehicle
..... HE Yilin, XU Shiwei, LIU Rui, XIE Xuefei (40)
- Application of the LSCE Method in the Exhaust Pipe Mode Analysis ZENG Falin, XU Kai (45)
- Numerical Simulation of the Bearing Capacity for Geocell Reinforced Gravel Based on Discrete-Continuous Coupling Calculation
..... WANG Hainian, ZHANG Ran, ZHOU Jun, LIU Yu, YOU Zhanping (49)
- Research and Analysis of a SUV Rear Collision Based on FEM HU Xuefang (54)

【Civil Engineering and Mechanical Engineering】

- Study on Influence of Water Impounding on Reservoir Landslide
..... SONG Danqing, WANG Feng, MEI Mingxing, LIU Pengfei (60)
- Experimental Study on Construction Waste Slurry Treatment by Vacuum Preloading
..... WEI Yanbing, FAN Mingqiao, LIN Shengfa, XU Kai, WU Zhiqiang (65)
- Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Culvert Foundation with Crust layer
..... MA Qiang, ZHU Jian, XING Wenwen, HU Xing (70)
- Numerical Research on Rock Fragmentation Process of TBM Disc Cutter
..... ZHANG Yinxia, JIANG Zhiqiang, DUAN Liuyang, WANG Dong, LIU Zhihua (75)
- Finite Element Analysis and Optimization of QT280 Trailer-Tractor Entry Capstan
..... LIU Zhuli, ZHOU Hao, HOU Donghong (79)

【Chemical Engineering and Infomation Engineering】

- Tensile Test on PTFE Composites Filled with Graphite
..... JIN Zunlong, GUO Yueming, LI Zhao, WANG Dingbiao, WANG Yongqing (84)
- MIMO-OFDM Time-varying Channel Estimation Based on the Factor Graph CHEN Enqing, XIAO Suzhen (87)
- An Automatic Point Clouds Filtering Algorithm Based on Grid Partition and Simplified Moving Least Squares
..... LI Jian, FANG Hongyuan, CUI Yabo, FAN Tao (92)

基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法

毛晓波, 郝向东, 梁 静

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 针对目标跟踪过程中发生遮挡时跟踪出现偏差的情况, 在传统 Mean Shift 跟踪算法的基础上引入极限学习机(extreme learning machine, ELM), 提出了基于 ELM 与 Mean Shift 的目标跟踪算法。该算法根据过去 3 个时刻的目标位置信息, 利用 ELM 预测出目标当前可能位置, 代替目标前一时刻位置作为 Mean Shift 迭代起始点, 并在邻域范围内进行迭代, 得到目标的真实位置。实验结果表明, 与现有的改进算法相比, 新算法减少了迭代次数和运算时间, 同时在遮挡情况下能够准确定位目标位置并进行跟踪, 提高了跟踪系统的实时性和鲁棒性。

关键词: 目标跟踪; 遮挡; Mean Shift; ELM

中图分类号: U461.6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201503043

0 引言

目标跟踪技术是机器视觉的热门课题, 广泛应用于工业生产、国防军事和生活安防等众多领域。遮挡问题是目前目标跟踪的难题之一, 遮挡尤其是严重遮挡会直接影响跟踪的准确性和持续性, 可能导致目标跟踪发生偏差甚至丢失目标。因此, 研究抗遮挡的目标跟踪算法具有重要的理论和实际意义。

Mean Shift 算法^[1]、光流算法^[2]、卡尔曼滤波算法^[3]、粒子滤波算法^[4]等都能在一定条件下有效地跟踪目标。其中, Mean Shift 算法以其无需参数、快速模式匹配的特性被广泛地应用^[5]。但是, 当目标运动速度过快或遮挡较为严重时, 传统 Mean Shift 算法往往会发生目标的定位偏差甚至跟丢。为解决上述问题, 研究人员提出了一些有效方法, 如在算法中引入模板分块匹配^[6]或将 Mean Shift 算法与滤波算法相结合^[7-10]等。这些方法能够提高跟踪算法的抗遮挡能力, 但由于需要进行分块跟踪或进行复杂的滤波运算, 增加了算法的复杂度, 跟踪实时性受到影响。针对以上问题, 笔者提出一种基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法, 利用 ELM 的快速学习和预测能力预

测目标的运动趋势, 以预测出的目标中心作为 Mean Shift 迭代起始点, 通过迭代得到目标当前真实位置。笔者将新算法与基于模板分块匹配的 Mean Shift 算法和基于卡尔曼滤波的 Mean Shift 算法作了比较。实验证明, 新算法能够在目标高速运动或遮挡情况下快速精确稳定地跟踪目标, 具有很好的实时性和鲁棒性。

1 Mean Shift 算法

Mean Shift 算法是一种基于核密度估计的非参数模式匹配算法, 通过建立加权直方图来描述目标的颜色分布^[11]。该方法利用像素概率密度函数梯度最优化方法, 首先选定跟踪目标的区域, 计算核函数加权下的目标区域的直方图分布, 然后用同样的方法对当前帧的数据密度直方图进行漂移, 且通过 Mean Shift 迭代寻找与目标区域相似性最大的区域, 最终实现快速目标定位。

1.1 目标模型

Mean Shift 跟踪算法利用目标区域的直方图分布来描述目标, 根据目标模型和候选模型的相似度进行中心的均值漂移。在第一帧中手动确定包含跟踪目标的区域, 设中心坐标为 d_0 ; 区域中包含 n 个像素, 位置记为 $\{d_i\}_{i=1,2,\dots,n}$; 特征值 $u =$

收稿日期: 2015-03-10; 修订日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473266); 河南省教育厅科学技术研究重点项目资助计划(14A410001)

作者简介: 毛晓波(1965—), 男, 河南开封人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事仿生机器视觉研究, E-mail: mail-mxb@zzu.edu.cn.

引用本文: 毛晓波, 郝向东, 梁静. 基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 1-5.

1, 2, ..., m 是直方图的颜色索引. 则目标模型的特征估计概率密度可表示为

$$q_u = C_h \sum_{i=1}^n s\left(\left\|\frac{\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_0}{h}\right\|^2\right) \delta[b(\mathbf{d}_i) - u]. \quad (1)$$

式中: h 为核函数的窗宽, 即目标区域的大小; $s(\cdot)$ 为核函数的轮廓函数, 对靠近中心的区域像素赋予一个大的权值, 对远离中心的区域像素赋予越来越小的权值; $\delta[\cdot]$ 是克罗内科函数, $\delta[\cdot]$ 用于判断目标区域中像素 \mathbf{d}_i 的颜色值是否属于第 u 个单元的颜色索引值, 若为 1, 则是, 为 0, 则不是; C_h 为归一化常数, 其取值满足

$$C_h = 1 / \sum_{i=1}^m q_u = 1. \quad (2)$$

1.2 候选模型

目标运动过程中, 每一帧图像中目标可能存在的区域称为候选区域, 其核函数窗宽中的特征模型称为目标候选模型. 假设第 k 帧时得到的目标中心为 \mathbf{y}_k , 则在第 $k+1$ 帧中候选模型的特征值为:

$$p_u(\mathbf{y}) = C_h \sum_{i=1}^n s\left(\left\|\frac{\mathbf{d}_i - \mathbf{y}_k}{h}\right\|^2\right) \delta[b(\mathbf{d}_i) - u]. \quad (3)$$

1.3 相似度判定函数

在跟踪过程中, Mean Shift 算法将候选模型与目标模型进行相似性判别, 寻找式 (3) 中最优的 \mathbf{y}_k , 使得 p_u 和 q_u 相似度达到最大. q_u 和 p_u 的相似度可由如下函数判定:

$$\rho(\mathbf{y}) \equiv \rho(p(\mathbf{y}), q) = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(\mathbf{y}) q_u}. \quad (4)$$

式中: $\rho(\mathbf{y})$ 是 Bhattacharyya 系数, 其值在 0 ~ 1 之间, $\rho(\mathbf{y})$ 值越大, 表示两个模型相似度越高. 目标发生遮挡时, $\rho(\mathbf{y})$ 变小, 给定遮挡阈值 T , 当 $\rho(\mathbf{y}) < T$ 时, 认为目标发生遮挡.

1.4 Mean Shift 算法

将上述式 (4) 在模型初始位置 \mathbf{y}_k 处泰勒展开得:

$$\rho[p(\mathbf{y}), q] = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sqrt{p(\mathbf{y}_k) q_u} + \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m p_u(\mathbf{y}) \sqrt{\frac{q_u}{p_u(\mathbf{y}_k)}}. \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5) 整理得:

$$\rho[p(\mathbf{y}), q] \approx \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sqrt{p(\mathbf{y}_k) q_u} + \frac{C_h}{2} \sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i s\left(\left\|\frac{\mathbf{y} - \mathbf{d}_i}{h}\right\|^2\right).$$

$$\text{式中: } \mathbf{w}_i = \sum_{u=1}^m \delta[b(\mathbf{d}_i) - u] \sqrt{\frac{q_u}{p_u(\mathbf{y}_k)}}. \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 相似度函数只随等式右侧第二项中 \mathbf{y} 的变化而变化, 与第一项无关. 通过 Mean Shift 算法在邻域内不断迭代, 对相似度函数求最大值, 即可得到跟踪目标新的位置:

$$\mathbf{y}_{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{d}_i \mathbf{w}_i s\left(\left\|\frac{\mathbf{y}_k - \mathbf{d}_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n \mathbf{w}_i s\left(\left\|\frac{\mathbf{y}_k - \mathbf{d}_i}{h}\right\|^2\right)}. \quad (7)$$

迭代结束后, 得到的 \mathbf{y}_{k+1} , 即为第 $k+1$ 帧的目标中心.

1.5 Mean Shift 算法的缺点

在实际应用中, 由于 Mean Shift 算法没有专门有效的抗遮挡机制, 当跟踪目标经过遮挡物时, 往往会发生目标的跟偏甚至跟丢. 另外, 当目标高速运动时, Mean Shift 算法跟踪效果变差. 为此, 笔者在 Mean Shift 算法的基础上引入了 ELM 算法^[12-13], 利用 ELM 的预测能力较好地解决了上述问题.

2 ELM 与 Mean Shift 相结合的算法

2.1 ELM 的基本原理

若一个标准的单隐层前馈神经网络含有 N 个训练样本, 记为 $\{\mathbf{x}_i, \mathbf{o}_i\}_{i=1,2,\dots,N}$, 其中 $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in \mathbf{R}^n$, $\mathbf{o}_i = (o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{im})^T \in \mathbf{R}^m$, 含有 N 个隐层节点, 设其激励函数为 $g(x)$, 则该神经网络的输出可以表示为

$$f(\mathbf{x}_j) = \sum_{i=1}^{N'} \beta_i g(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x}_j + b_i), j = 1, 2, \dots, N. \quad (8)$$

式中: $\mathbf{w}_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in})^T$ 为输入神经元与第 i 个隐层节点的输入权值; $\beta_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{im})^T$ 为第 i 个隐层节点与输出神经元的输出权值; b_i 为第 i 个隐层节点的偏置.

神经网络的理想目标是实际输出与给定样本相等, 因此存在 β_i 、 \mathbf{w}_i 和 b_i 使得

$$\sum_{i=1}^{N'} \beta_i g(\mathbf{w}_i \cdot \mathbf{x}_j + b_i) = \mathbf{o}_j, j = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

式 (9) 即为 ELM 的模型, 其中, \mathbf{o}_j 为第 j 个输入样本的对应的输出样本, 该模型可用矩阵表示为

$$\mathbf{H}\beta = \mathbf{O}. \quad (10)$$

式中:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g(\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x}_1 + b_1) & \cdots & g(\mathbf{w}_{N'} \cdot \mathbf{x}_1 + b_{N'}) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ g(\mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{x}_N + b_1) & \cdots & g(\mathbf{w}_{N'} \cdot \mathbf{x}_N + b_{N'}) \end{bmatrix}_{N \times N'};$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_{N'}^T \end{bmatrix}_{N' \times m}; \quad O = \begin{bmatrix} o_1^T \\ \vdots \\ o_N^T \end{bmatrix}_{N \times m}.$$

H 为神经网络的隐层输出矩阵. 在 ELM 中, 输入权重 w_i 和隐层偏置 b_i 由系统随机确定, 则 H 被唯一确定. 由 Moore-Penrose 广义逆定理可求出 H^+ , 则

$$\beta = H^+ O. \quad (11)$$

2.2 基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法

在目标运动过程中, 第 t 时刻目标的位置与其上一时刻的位置、速度和加速度有关, 即可以通过这 3 个参数确定目标当前时刻的位置. 而这 3 个参数包含在第 $t-1$ 、 $t-2$ 、 $t-3$ 时刻的目标位置信息中, 因此, 由前 3 时刻目标的位置可以预测出第 4 时刻目标的位置.

首先, 通过对无遮挡目标的精确跟踪得到一组目标运动轨迹, 为了提高样本精确度, 采用手工逐帧确定. 取连续 200 组中的前 160 组位置坐标作为 ELM 的训练样本, 将连续 3 组坐标作为输入, 第 4 组作为输出训练 ELM 神经网络. 利用后 40 组作为测试样本, 通过不断调节隐层节点数使预测达到最优. 同理, 对遮挡目标进行训练, 训练样本和测试样本依然分别取 160 组和 40 组. 调节隐层节点数, 使两个训练集合的预测结果最佳. 通过试验, 当隐层节点设为 30 时, 预测值达到最优.

用 ELM 进行目标位置预测时, 首先假设初始时刻目标的速度和加速度均为零, 同时假设前 3 时刻目标位置均为初始时刻选定的目标位置, 即 ELM 的 3 组输入均为初始时刻目标位置. 目标跟踪过程中, 由前 3 时刻的目标位置 d_1 、 d_2 、 d_3 通过训练好的 ELM 网络模型预测出当前时刻的目标位置, 记为 y' , 用 y' 代替式 (3) 中的 y_k 作为 Mean Shift 迭代的起始点, 在邻域范围内进行迭代, 从而得到目标当前的真实位置 y_{k+1} . 式 (3) 变为

$$p_u(y) = C_h \sum_{i=1}^n s\left(\left\|\frac{d_i - y'}{h}\right\|^2\right) \delta[b(d_i) - u]. \quad (12)$$

于是, 式 (7) 变为

$$y_{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i w_i g\left(\left\|\frac{y' - d_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^n w_i g\left(\left\|\frac{y' - d_i}{h}\right\|^2\right)}. \quad (13)$$

同时计算 $\rho(y)$ 并与遮挡阈值 T 进行比较, 若

$\rho(y) \geq T$, 则继续执行; 若 $\rho(y) < T$, 说明发生遮挡, 则以 y' 代替 y_{k+1} 作为当前帧目标的实际位置, 然后进行下一帧的预测, 直到再次 $\rho(y) \geq T$, 说明遮挡结束, 跟踪正常, 如此就完成了对目标的跟踪.

3 仿真结果分析

在 2.10 GHz 主频 4 GB 内存的 Windows8 操作系统电脑上使用 Matlab2010, 对笔者提出的算法进行了测试实验, 并在相同条件下与基于模板分块匹配的 Mean Shift 算法和基于卡尔曼滤波的 Mean Shift 算法跟踪效果进行了对比.

为验证跟踪结果的实时性, 我们对公路上高速行驶的汽车进行了 20 次跟踪, 统计 3 种算法对第 11 帧到 110 帧共计 100 帧目标进行 20 次跟踪的平均迭代次数, 并对跟踪效果进行了对比. 表 1 显示了 3 种不同算法的平均迭代次数对比结果. 通过对比可以发现, 由于新算法采用了位置预测, 迭代起始位置与目标实际位置的距离大大减少, 因此比基于模板分块匹配的 Mean Shift 算法迭代次数平均减少 1.20 次; 同时, 新算法的位置预测方法较卡尔曼滤波更为简便, 一定程度上简化了融合算法且计算效率有所提高, 比基于卡尔曼滤波的 Mean Shift 算法平均减少 0.76 次.

表 1 3 种算法迭代次数

Tab. 1 Iteration number of different algorithms

算法	迭代次数
分块算法	3.34
滤波算法	2.90
新算法	2.14

表 2 为 3 种算法分别对 100 帧视频进行 20 次跟踪的平均时间. 由表 2 可知, 新算法平均跟踪时间是 4 918 ms, 比两种已有改进算法分别减少 17.9% 和 7.2%.

表 2 3 种算法跟踪时间

Tab. 2 Tracking time of different algorithms

项目	时间/ms
正常播放	4 203
分块算法	5 993
滤波算法	5 302
新算法	4 918

图 1 为 3 种算法跟踪效果, 分别取第 20、40、60、80 帧图片. 表 3 为 3 种算法的跟踪误差, 表示跟踪位置和实际位置中心的距离, 实际位置采用手工逐帧确定. 由表 3 可知, 新算法与基于模板分

块匹配的 Mean Shift 算法跟踪误差近似,明显小于基于卡尔曼滤波的 Mean Shift 算法。

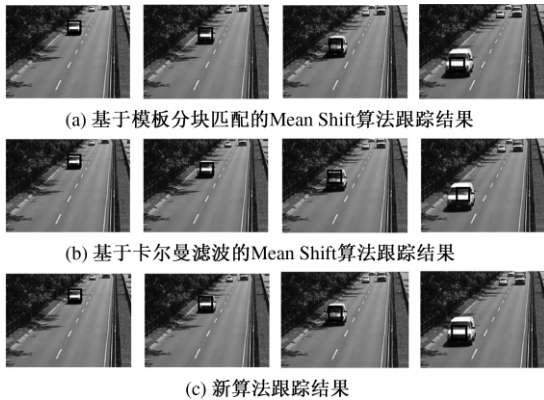


图1 高速运动车辆跟踪结果对比

Fig.1 Tracking results comparison of high speed car

表3 3种算法跟踪误差

Tab.3 Tracking errors of different algorithms

算法	Frame20	Frame40	Frame60	Frame80
分块算法	5.385	18.601	40.792	52.631
滤波算法	6.708	24.839	61.221	107.415
新算法	6.000	17.804	44.689	54.918

图2为3种算法对公路上被遮挡车辆进行跟踪的结果,分别取第5、17、29、43帧图片。表4为3种算法的跟踪误差。由表4可以看出,当目标发生遮挡时,3种算法跟踪误差变化较为剧烈,此时新算法的跟踪误差为66.129,明显小于另外两种改进算法。遮挡结束后恢复到正常跟踪,3种算法跟踪误差均变小。

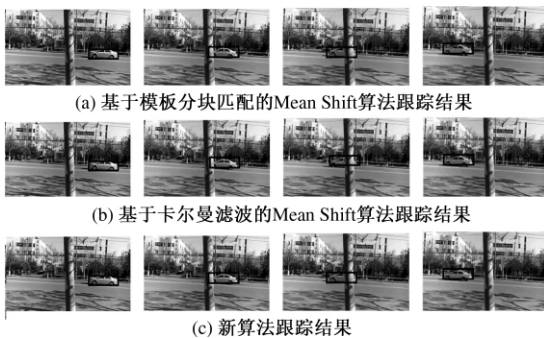


图2 遮挡车辆跟踪结果对比

Fig.2 Tracking results comparison of occluded car

表4 3种算法跟踪误差

Tab.4 Tracking errors of different algorithms

算法	Frame5	Frame17	Frame29	Frame43
分块算法	3.000	31.321	81.025	49.980
滤波算法	4.123	37.121	110.023	77.621
新算法	2.828	32.249	66.129	41.976

表5为3种算法跟踪60帧车辆遮挡视频所

用时间,新算法跟踪时间比另外两种改进算法分别减少18.5%和7.5%。

表5 3种算法跟踪时间

Tab.5 Tracking time of different algorithms

项目	时间/ms
正常播放	2 187
分块算法	4 151
滤波算法	3 659
新算法	3 384

图3为3种算法对被遮挡的行人进行跟踪的结果,取第20、40、50、70帧进行比较。由图3可以看出,由于跟踪过程中行人被完全遮挡,基于模板分块匹配的 Mean Shift 算法无法进行子块匹配,造成了错误的跟踪,丢失了目标;而基于卡尔曼滤波的 Mean Shift 算法和新算法在目标被遮挡时自动以预测的目标位置为起点继续跟踪,遮挡结束后恢复正常跟踪,因此能够较好地跟踪目标。

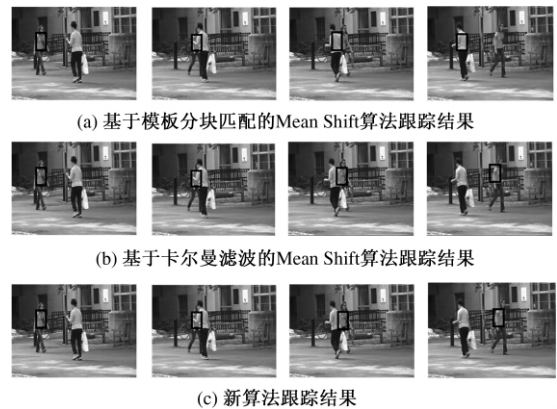


图3 行人遮挡跟踪结果对比

Fig.3 Tracking results comparison of occluded people

以上实验表明,当目标高速运动或发生遮挡时,新算法具有更好的实时性和鲁棒性。

4 结论

笔者提出一种基于 ELM 与 Mean Shift 的抗遮挡目标跟踪算法,解决了 Mean Shift 算法在目标发生遮挡时跟踪性能变差的问题。该算法利用目标的历史位置信息,通过神经网络预测出当前位置信息,所需信息少,计算量小,有效地减少了迭代次数,在目标发生遮挡时以预测位置信息继续跟踪,能够准确跟踪目标。实验证明,新算法能够在目标发生严重遮挡时准确跟踪目标,具有很好的实时性和鲁棒性,并且与现有的改进算法相比,具有一定的优势。

神经网络具有强大的自学能力、联想能力和

计算能力,将神经网络应用到目标跟踪技术中,突破传统算法的限制,使跟踪系统更加智能化,为解决目标跟踪问题提供了新方法,对于处理目标跟踪过程中的遮挡问题,提高复杂场景下目标跟踪的稳定性具有重要意义.笔者并没有考虑多目标跟踪的问题,因此下一步将考虑对多个目标进行跟踪时如何利用神经网络实现有效跟踪.

参考文献:

- [1] 何志勇,蔡乐才,许继家.基于Mean Shift算法跟踪视频中运动目标[J].郑州大学学报(理学版),2010,42(1):38-40,48.
- [2] 李剑峰,黄增喜,刘怡光.基于光流场估计的自适应Mean-Shift目标跟踪算法[J].光电子·激光,2012,23(10):1996-2002.
- [3] WENG S K, KUO C M, TU S K. Video object tracking using adaptive Kalman filter[J]. Journal of visual communication and image representation, 2006, 17(6):1190-1208.
- [4] 屈鉴铭,刘志镜,贺文骅.结合有向场景运动模式的粒子滤波行人跟踪方法[J].西安交通大学学报,2014,48(12):74-79.
- [5] 袁霄,王丽萍.基于MeanShift算法的运动人体跟踪[J].计算机工程与科学,2008,30(4):46-49.
- [6] 颜佳,吴敏渊,陈淑珍,等.应用Mean Shift和分块的抗遮挡跟踪[J].光学精密工程,2010,18(6):1413-1418.
- [7] 章学静,陈禾,杨静.结合卡尔曼滤波和Mean Shift的抗遮挡跟踪算法[J].北京理工大学学报,2013,33(10):1056-1061.
- [8] 张伟丽,江春华,郝宗波.基于改进的均值漂移和卡尔曼滤波的目标跟踪算法[J].计算机应用与软件,2014,31(5):240-243.
- [9] HE J W, YANG Y Y. Signal Processing, communications and computing: ICSPCC2014 [C] // Multi-interactive tracking method using meanshift based on kalman filter. Guilin, 2014: 22-27.
- [10] 权义萍,金鑫,张蕾,等.基于Mean-Shift的卡尔曼粒子滤波车辆跟踪算法研究[J].计算机应用与软件,2014,31(9):236-252.
- [11] 杨杰,张翔.视频目标检测和跟踪及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,2012.
- [12] 王杰,毕浩洋.一种基于粒子群优化的极限学习机[J].郑州大学学报(理学版),2013,45(1):100-104.
- [13] 胡义涵,张小刚,陈华,等.一种基于鲁棒估计的极限学习机方法[J].计算机应用研究,2012,29(8):2926-2930.

Target Tracking Algorithm Based on Mean Shift with ELM

MAO Xiaobo, HAO Xiangdong, LIANG Jing

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

Abstract: In view of the problem of object deviation when occlusions occur during the target tracking, a new algorithm using Mean Shift with ELM is proposed. According to the formal information of the object's location, current possible location was predicted by ELM, the iteration was started from the possible location instead of formal location, and the object's real center is calculated by mean shift algorithm. The simulation results show that proposed algorithm can track precisely target occluded, operation time and number of iteration are reduced so that efficiency and robustness are improved.

Key words: target tracking; occlusion; Mean Shift; ELM

文章编号: 1671-6833(2016)01-0006-04

基于行为策略的铝电解建模控制研究

陈铁军¹, 黄超¹, 张瑾²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南师范大学新联学院 经济与管理系, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对存在非线性、大滞后和多变量互关联等特性的铝电解过程, 分析了影响预焙铝电解槽物料平衡和能量平衡主要因素的相互关联关系. 基于行为策略思想, 建立了铝电解过程的多级分布式关联模型, 该系统模型由氧化铝质量分数和电解温度2个二级关联系统和6个三级关联子系统构成. 提出了铝电解过程中关于氧化铝质量分数和电解温度的多级分布式控制方案, 给出了该系统的多级分布式预估算法和控制算法, 确定了各级子系统间的协调机制. 各个子系统分工合作、协同运行, 获得全局控制功能. 仿真结果表明, 应用该控制方法后, 铝电解动态过程具有较强的鲁棒性和抗干扰能力.

关键词: 行为策略; 铝电解; 建模; 控制; 氧化铝质量分数

中图分类号: TP273

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504024

0 引言

铝电解系统是一个非线性、多变量、大滞后、强耦合的复杂受控对象, 用传统控制方法很难取得比较理想的控制效果. 不少学者开展了对铝电解过程建模仿真和控制研究^[1-4]. 很多学者尝试将模糊控制、支持向量机、神经网络、专家系统和粒子群算法等方法运用到铝电解生产过程中, 进而控制氧化铝质量分数、电解温度等关键参量, 获得了不错的效果^[5-8]. 闫纲等^[2]基于最小二乘支持向量机提出了融合LS-SVM和混沌优化的控制氧化铝质量分数的新策略; 任必军等^[6]采用自适应模糊控制算法对电解温度和初晶温度进行控制, 提高了电流效率. 这些控制策略大多只对一项指标进行控制, 没有涉及到多项关键指标之间的耦合性. 袁艳等^[7]基于神经网络、支持向量机、模糊控制等多种智能算法, 对铝电解过程中的多项关键指标进行全局优化控制, 但建模控制机理过于复杂, 在实际生产当中不易操作和推广.

Willems^[9]提出了一种针对开放、互关联系统的行为策略, 该控制理念通过拆裂、聚焦以及链接对复杂对象进行建模, 解决复杂控制问题. 笔者将行为策略思想应用到铝电解生产当中, 有望对其中的多项关键指标取得较好的协同控制, 获得铝

电解系统的整体优化. 通过对铝电解过程中大滞后、强耦合等现象的深入分析, 理清影响氧化铝质量分数和电解温度的相关因素及耦合关系, 提取主要关联关系, 建立涉及这2个关键参量的多级分布式关联控制系统. 该系统由2个二级关联系统构成, 第一个是物料平衡关联系统, 第二个是能量平衡关联系统, 每个二级关联系统分别由与其相对应的三级关联子系统聚焦而成. 同时, 2个二级关联系统之间存在重要的耦合关联, 进而构成一个全局的多级动态分布式预估控制模型.

1 铝电解系统的关联分析与建模

1.1 铝电解系统的关联分析

在铝电解生产过程中, 电解槽的物料平衡和能量平衡相互作用, 是两个始终需要引起高度重视的角色. 物料平衡的外在表现形式体现在氧化铝质量分数上, 能量平衡的外在表现形式体现在电解温度上.

1) 氧化铝质量分数的关联分析. 由于每次的投料量是固定不变的, 下料间隔时间的长短决定了总投料量. 投料次数越频繁, 电解槽中氧化铝质量分数就越大, 反之就越小. 槽电压的升高或降低, 氧化铝质量分数会随之发生一定的变化. 出铝量、系列电流、电解质水平、铝液水平、氧化铝的溶解速度

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174127)

作者简介: 陈铁军(1954—), 男, 河南信阳人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事复杂工业过程控制技术及控制系统方面的研究, E-mail: tchen@zzu.edu.cn.

引用本文: 陈铁军, 黄超, 张瑾. 基于行为策略的铝电解建模控制研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 6-9.

等对氧化铝质量分数也有一定的关联影响。

2) 电解温度的关联分析. 通过升高槽电压可以改变输入能量的大小, 进而影响电解温度. 投料量的瞬间增大, 会造成电解槽内电解温度下降, 反之, 电解温度上升. 出铝量、系列电流、电解质水平、铝液水平等对电解温度也有一定的关联影响。

1.2 铝电解系统建模

通过对铝电解生产过程的深入分析, 将铝电解系统拆裂成众多三级子系统, 三级子系统通过聚焦组合出二级关联系统, 二级关联系统进而链接出铝电解大系统. 二级关联控制系统共有 2 个, 第一个是物料平衡关联控制系统(即氧化铝质量分数关联控制系统) L_1 ; 第二个是能量平衡关联控制系统(即电解温度关联控制系统) L_2 .

假设下料间隔控制信号为 Z_{10} , 下料间隔时间为 Z_{11} , 总投料量为 Z_{12} , 氧化铝质量分数为 Z_{13} , 把系列电流、铝液水平、电解质水平、氧化铝溶解速度等对氧化铝质量分数的关联影响视为干扰 V_{10} , 并且 $K_1 = 3$, 即该关联控制系统包含 3 个三级子系统, 则物料平衡关联控制系统 L_1 为

$$L_1 = \{ \langle Z_{10}, Z_{11} \rangle, \langle Z_{11}, Z_{12} \rangle, \langle Z_{12}, Z_{13} \rangle \}. \quad (1)$$

假设极距调整控制信号为 Z_{20} , 极距调整量为 Z_{21} , 槽电压为 Z_{22} , 电解槽电解温度为 Z_{23} , 把出铝量、系列电流等参量对电解温度的关联影响视为干扰 V_{20} , 并且 $K_2 = 3$, 即该关联控制系统包含 3 个三级子系统, 则该关联分系统 L_2 为

$$L_2 = \{ \langle Z_{20}, Z_{21} \rangle, \langle Z_{21}, Z_{22} \rangle, \langle Z_{22}, Z_{23} \rangle \}. \quad (2)$$

2 个二级关联控制系统之间的关联链接: 分系统 L_1 的总投料量 Z_{12} 关联影响分系统 L_2 的电解温度 Z_{23} ; 氧化铝质量分数 Z_{13} 关联影响分系统 L_2 的槽电压 Z_{22} ; 分系统 L_2 的槽电压 Z_{22} 关联影响分系统 L_1 的氧化铝质量分数 Z_{13} .

铝电解生产过程的分级分布式预估控制系统模型框图如图 1 所示, 其由 2 个二级关联分系统、6 个三级关联子系统以及 3 个链接关系构成。

假设铝电解系统中各个三级子系统 Σ_{ij} 的动态模型^[10] 为

$$Z_{ij}(t+1) = F_{ij}(X_{ij}(t)) Z_{i(j-1)}(t - d_{i(j-1)}^{ij}) + V_{ij}. \quad (3)$$

式中: $X_{ij}(t)$ 是和输出有关的变量串集合, 由两部分组成, 一部分是与 Σ_{ij} 有联作用的其它三级子系统的测量输出, 另一部分是对 Σ_{ij} 有直接作用的控制输入; $Z_{ij}, Z_{i(j-1)} \in Z$, 表示该测试变量在时刻 t 的值; F_{ij} 是待辨识的参数集合, $F_{ij}(X_{ij}(t)): Z \rightarrow Z$ 是以 $X_{ij}(t)$ 为参量的因果映射; $d_{i(j-1)}^{ij}$ 是 $Z_{i(j-1)}$ 相对于 Z_{ij} 的滞后步数; V_{ij} 是综合干扰因素. 故可以得到各个三级子系统的相关数学模型。

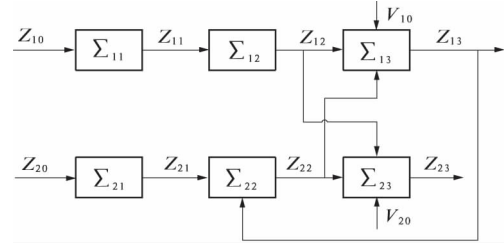


图 1 铝电解过程的模型框图

Fig. 1 Model diagram of aluminum electrolysis process

关于物料平衡关联控制系统 L_1 :

$$Z_{11}(t+1) = a_1 Z_{11}(t) + a_2 Z_{10}(t - d_{10}^{11}). \quad (4)$$

$$Z_{12}(t+1) = b_1 Z_{12}(t) + b_2 Z_{11}(t - d_{11}^{12}). \quad (5)$$

$$Z_{13}(t+1) = c_1 Z_{13}(t) + c_2 Z_{12}(t - d_{12}^{13}) + c_3 Z_{22}(t - d_{22}^{13}) + V_{10}. \quad (6)$$

关于能量平衡关联控制系统 L_2 :

$$Z_{21}(t+1) = d_1 Z_{21}(t) + d_2 Z_{20}(t - d_{20}^{21}). \quad (7)$$

$$Z_{22}(t+1) = e_1 Z_{22}(t) + e_2 Z_{21}(t - d_{21}^{22}) + e_3 Z_{13}(t - d_{13}^{22}). \quad (8)$$

$$Z_{23}(t+1) = f_1 Z_{23}(t) + f_2 Z_{22}(t - d_{22}^{23}) + f_3 Z_{12}(t - d_{12}^{23}) + V_{20}. \quad (9)$$

其中, $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3$ 分别可以通过最小二乘法辨识得到。

2 多级分布式模型的预估和控制

2.1 预估算法

鉴于铝电解系统存在大滞后等现象, 而“预估”是一种克服“时滞”并提高控制品质的有效方法. 在单采样链系统^[11]中, 相对于变量 Z_{ij} , 因变量 $Z_{i(j-1)}$ 的滞后步数为 $d_{i(j-1)}^{ij} + 1$; 相对于控制输出 Z_{ij} , 控制输入 Z_{i0} 的滞后为:

$$\begin{cases} D_{ij} = \sum_{k=1}^j (d_{i(k-1)}^{ik} + 1); \\ D_{i0} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

由此, 可以得到物料平衡关联控制系统 L_1 的预估算法:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{11}(t + D_{11} | t) &= a_1 \hat{Z}_{11}(t + D_{11} - 1 | t) + \\ & a_2 \hat{Z}_{10}(t). \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{12}(t + D_{12} | t) &= b_1 \hat{Z}_{12}(t + D_{12} - 1 | t) + \\ & b_2 \hat{Z}_{11}(t + D_{11} | t). \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{13}(t + D_{13} | t) &= c_1 \hat{Z}_{13}(t + D_{13} - 1 | t) + \\ & c_2 \hat{Z}_{12}(t + D_{12} | t) + c_3 \hat{Z}_{22}(t + D_{13} - d_{22}^{13} - 1) + V_{10}. \end{aligned} \quad (13)$$

类似地, 可以写出能量平衡关联控制系统 L_2 的预估算法为

$$\hat{Z}_{21}(t+D_{21}|t) = d_1 \hat{Z}_{21}(t+D_{21}-1|t) + d_2 \hat{Z}_{20}(t) \quad (14)$$

$$\hat{Z}_{22}(t+D_{22}|t) = e_1 \hat{Z}_{22}(t+D_{22}-1|t) + e_2 \hat{Z}_{21}(t+D_{21}|t) + e_3 \hat{Z}_{13}(t+D_{22}-d_{13}^{22}-1) \quad (15)$$

$$\hat{Z}_{23}(t+D_{23}|t) = f_1 \hat{Z}_{23}(t+D_{23}-1|t) + f_2 \hat{Z}_{22}(t+D_{22}|t) + f_3 \hat{Z}_{12}(t+D_{23}-d_{12}^{23}-1) + V_{20} \quad (16)$$

上述各式中: $\hat{Z}_{11}(t+D_{11}|t)$, $\hat{Z}_{12}(t+D_{12}|t)$, $\hat{Z}_{13}(t+D_{13}|t)$, $\hat{Z}_{21}(t+D_{21}|t)$, $\hat{Z}_{22}(t+D_{22}|t)$, $\hat{Z}_{23}(t+D_{23}|t)$ 分别是 $Z_{11}(t)$, $Z_{12}(t)$, $Z_{13}(t)$, $Z_{21}(t)$, $Z_{22}(t)$, $Z_{23}(t)$ 在时刻 t 的预估值。

2.2 控制算法

假设 $Z_{ij}(t)$ 的期望值是 $Z_{ij}^*(t+D_{ij})$, 同时令期望值和预估值之间存在某种关系^[11]

$$M\hat{Z}_{ij}(t+D_{ij}|t) = NZ_{ij}^*(t+D_{ij}) \quad (17)$$

式中: $M = 1 - pz^{-1}$ 为可调的待定系数, z^{-1} 为一步延迟算子; $N = 1 - p$, $-1 < p < 1$. 由式(17)可以得到:

$$\hat{Z}_{11}(t+D_{11}|t) = p_1 \hat{Z}_{11}(t+D_{11}-1|t) + (1-p_1) Z_{11}^*(t+D_{11}) \quad (18)$$

$$\hat{Z}_{12}(t+D_{12}|t) = p_2 \hat{Z}_{12}(t+D_{12}-1|t) + (1-p_2) Z_{12}^*(t+D_{12}) \quad (19)$$

$$\hat{Z}_{13}(t+D_{13}|t) = p_3 \hat{Z}_{13}(t+D_{13}-1|t) + (1-p_3) Z_{13}^*(t+D_{13}) \quad (20)$$

由式(11)、(12)、(13)、(18)、(19)、(20)可以得到物料平衡关联控制系统 L_1 的控制算法:

$$Z_{10}^{**}(t) = [(p_1 - a_1) \hat{Z}_{11}(t+D_{11}-1|t) + (1-p_1) Z_{11}^*(t+D_{11})] / a_2 \quad (21)$$

$$Z_{11}^{**}(t+D_{11}) = [(p_2 - b_1) \hat{Z}_{12}(t+D_{12}-1|t) + (1-p_2) Z_{12}^*(t+D_{12})] / b_2 \quad (22)$$

$$Z_{12}^{**}(t+D_{12}) = [(p_3 - c_1) \hat{Z}_{13}(t+D_{13}-1|t) + (1-p_3) Z_{13}^*(t+D_{13}) - c_3 \hat{Z}_{22}(t+D_{13}-d_{22}^{13}-1) - V_{10}] / c_2 \quad (23)$$

同理,可以得到能量平衡关联控制系统 L_2 的控制算法为

$$Z_{20}^{**}(t) = [(p_4 - d_1) \hat{Z}_{21}(t+D_{21}-1|t) + (1-p_4) Z_{21}^*(t+D_{21})] / d_2 \quad (24)$$

$$Z_{21}^{**}(t+D_{21}) = [(p_5 - e_1) \hat{Z}_{22}(t+D_{22}-1|t) +$$

$$(1-p_5) Z_{22}^*(t+D_{22}) - e_3 \hat{Z}_{13}(t+D_{22}-d_{13}^{22}-1)] / e_2 \quad (25)$$

$$Z_{22}^{**}(t+D_{22}) = [(p_6 - f_1) \hat{Z}_{23}(t+D_{23}-1|t) + (1-p_6) Z_{23}^*(t+D_{23}) - f_3 \hat{Z}_{12}(t+D_{23}-d_{12}^{23}-1) - V_{20}] / f_2 \quad (26)$$

上述各式中: $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3$ 分别为辨识参数; $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$ 分别为设计参数。

3 系统仿真

以某铝电解生产车间某台槽框较好的240 kA预焙铝电解槽为仿真对象,控制目标是在有外界干扰的情况下,将氧化铝质量分数、电解温度分别控制在1.5%~3.5%,940~960℃的合理范围内。下料间隔控制信号调节范围是0~10,极距调整控制信号调节范围是0~10。由生产车间提供的80组样本数据,运用最小二乘法对所建模型进行系统参数辨识,运用MATLAB软件进行仿真,仿真结果如图2和图3所示。

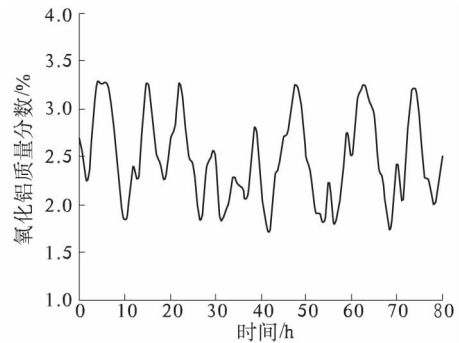


图2 氧化铝质量分数仿真曲线

Fig.2 Simulation curve of alumina concentration

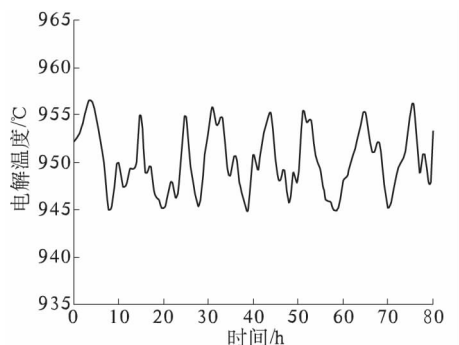


图3 电解温度仿真曲线

Fig.3 Simulation curve of electrolytic temperature

仿真结果表明,基于行为策略的多级分布式预估控制算法使氧化铝质量分数、电解温度几乎不受外界干扰 V_{10} 和 V_{20} 的影响,二者的波动幅度

被控制在合理范围内。

4 结论

笔者基于行为策略的拆裂、聚焦及链接等控制思想,提出了多级分布式预估控制方法,建立了铝电解生产过程的动态数学模型,设计了由氧化铝质量分数、电解温度2个二级关联系统构成的分布式控制模型。2个二级关联系统分别由与其相对应的三级关联子系统构成,并对模型进行了有效的预估和控制。仿真结果表明,所建的多级分布式预估控制模型能够有效控制铝电解过程中的氧化铝质量分数与电解温度。另外,系统几乎不受外界干扰的影响,能够快速恢复到正常水平,具有较强的鲁棒性。因此,采用多级分布式预估控制,为调控铝电解生产过程提供了一种新途径。

参考文献:

- [1] 阎纲,梁昔明. 一种新的氧化铝质量分数建模与控制策略[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(10):3917-3923.
- [2] 阎纲. 基于最小二乘支持向量机的铝电解过程建模与控制研究[D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院,2012:77-84.
- [3] 王世海. 300KA 铝电解槽工艺技术条件优化与新控制技术开发[D]. 长沙:中南大学冶金科学与工程学院,2008:40-54.
- [4] 陈广其. 铝电解氧化铝加料控制技术应用研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学信息与控制工程学院,2011:32-57.
- [5] 郭俊,桂卫华. 基于网格聚类LS-SVM的铝电解生产过程极距软测量[J]. 控制与决策,2012,27(8):1261-1264.
- [6] 任必军,李晋宏,张延安. 300KA 预焙铝电解槽温度和初晶温度的自适应模糊控制[J]. 中国有色金属学报,2007,17(8):1373-1378.
- [7] 袁艳,张泰山. 先进控制技术在预焙铝电解过程控制中的应用[J]. 计算机测量与控制,2008,16(5):637-656.
- [8] 宋祥君. 400KA 铝电解槽能耗优化控制系统及实现[D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院,2010:30-40.
- [9] WILLEMS J C. The behavioral approach to open and interconnected systems[J]. IEEE control systems magazine,2007,27(6):46-99.
- [10] 陈铁军,赵洁. 水泥回转窑系统的结构分布式控制[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(5):27-30.
- [11] 陈铁军. 结构分散化方法控制理论[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2004.

Research on Modeling and Control of Aluminum Electrolysis Based on Behavioral Approach

CHEN Tiejun¹, HUANG Chao¹, ZHANG Jin²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of economics and management, Xinlian College, Henan Normal University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The mutual correlation of main factors is analyzed which influences the material balance and energy balance of pre-roasting aluminum electrolytic tank in allusion to such characteristics as nonlinearity, large time-delay and correlation of multivariable in aluminum electrolysis process. Then a multistage-distributed correlation model about aluminum electrolysis process is established based on behavioral approach. The system model consists of two secondary-correlated systems and six related third-level subsystems, which are related to the concentration and electrolytic temperature of alumina. Furthermore, the multistage-distributed control scheme about the concentration and electrolytic temperature of alumina in aluminum electrolysis process is proposed, multistage-distributed predictive algorithms and control algorithms are used to coordinate the operation of different subsystems. The global control performance is achieved through division and cooperation of the subsystems. The simulation results show that the multistage-distributed system built and its control algorithm have remarkable robustness and anti-interference ability in the dynamic aluminum electrolysis process.

Key words: behavioral approach; aluminum electrolysis; modeling; control; alumina concentration

文章编号: 1671-6833(2016)01-0010-05

一种基于 HHT 的短期电价组合预测方法

廖晓辉¹, 周冰¹, 杨冬强¹, 武杰²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州市供电公司, 河南 郑州 450051)

摘 要: 短期电价预测保障了电力市场中各参与方的最大效益, 针对非平稳非线性的电价序列, 提出了一种基于 Hilbert-Huang 变换的组合预测模型. 首先将电价序列进行经验模态分解, 得到若干固有模态函数分量及余项, 其次根据各分量变化规律分别进行预测, 最后将各分量的预测结果相加即为电价预测值. 并以美国 PJM (Pennsylvania-New Jersey-Maryland) 电力市场的实际数据进行仿真, 将各算法的预测结果进行比较, 得出此方法预测精度均高于单一预测模型, 其最大绝对误差为 1.53 \$/MWh, 平均绝对误差为 1.61%, 由此表明, 该模型具有较高的预测精度.

关键词: 电力市场; 电价预测; HHT; 组合预测

中图分类号: TM715

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201503041

0 引言

电能作为一种商品, 在电力市场中的流向和配给是以电价作为向导, 故准确的短期电价预测有着重要的意义, 有助于市场参与者制订合理的竞争策略, 实现风险最小, 收益最大的目标, 是参与者共同关注的一项重要工作, 是电力市场短期电价交易中亟待解决的问题之一^[1].

短期电价预测常用的方法主要有时间序列法、人工神经网络、粒子群算法、模糊理论、小波变换等. 文献[2]比较了各种电力市场电价模式, 发现不同市场中电价有着很大的差异; 文献[3-4]利用粒子群优化算法建立短期电价预测模型; 文献[5]建立了模糊最小二乘支持向量机模型, 预测精度提高且复杂程度基本不变; 文献[6-7]本质上都是使用人工神经网络对电价序列进行短期的预测建模; 文献[8-9]是利用小波分解对各电价分量分别预测而得到预测日电价. 组合预测可将不同预测方法所得到的结果进行优化组合, 综合利用各个模型所提供的信息, 从而有效地避免了单一模型的不足.

市场电价序列的随机波动性成为电价预测的难点之一. 而 Hilbert-Huang 变换(HHT) 基于自身优点对处理这种突变信号有着先天优势, 与现有

方法中将历史数据整体进行训练预测不同, HHT 自适应地将原始数据分解出具有局部时变特征的固有模态函数, 相对小波分解又不必先设定基函数, 具有良好的时频聚集性^[10]. 文献[11]将 HHT 应用于电力系统负荷预测, 利用传统的线性组合预测方法, 赋予各模型预测结果恒定权值. 文献[12-13]将 HHT 应用于电价预测中, 只是对分解所得的固有模态函数采用同一模型分别预测, 并且未考虑各函数分量的不同特点.

笔者提出了一种基于 HHT 的短期电价预测方法, 运用经验模态分解将原始电价数据进行平稳化处理, 分解出几个具有局部特征的固有模态函数分量和余项, 并由各分量的频率区分出高频和低频分量, 其中对低频分量选择一种预测模型即可, 而高频分量采用组合预测效果更佳, 各分量的预测结果之和就是最终预测日电价. 采用美国 PJM 电力市场日前加权平均电价实际数据作为样本^[14], 并与各个单一预测模型进行了比较.

1 Hilbert-Huang 变换原理

Hilbert-Huang 变换由 Huang 等人提出^[15], 主要包含经验模态分解(EMD) 和 Hilbert 谱分析两部分. EMD 分解是将原信号分解为一系列固有模态函数(IMF) 和余项, IMF 必须满足两个条件:

收稿日期: 2015-03-10; 修订日期: 2015-06-19

基金项目: 河南省科技厅国际合作项目(144300510009)

作者简介: 廖晓辉(1972—), 女, 湖北孝感人, 郑州大学副教授, 硕士, 主要从事电力系统信号分析与处理研究, E-mail: liaoxiaohui0001@zzu.edu.cn.

引用本文: 廖晓辉, 周冰, 杨冬强, 等. 一种基于 HHT 的短期电价组合预测方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 10-14.

①所有数据的极值点数与过零点数相等或差一个;②极大值点和极小值点分别形成的上、下包络线的平均值为零. EMD 分解时间序列 $x(t)$ 的过程如下:

1) 找出 $x(t)$ 中的所有极大、小值点,用三次样条曲线分别连接所有极大值和极小值点就形成了原波形的上、下包络线.

2) 由式(1)求出上、下包络线之间的平均值,记为 $m_1(t)$, E_1 、 E_2 分别为上、下包络线的值.

$$m_1(t) = \frac{E_1 + E_2}{2}. \quad (1)$$

3) 求出原始序列与上下包络线之间平均值的差值,即

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t). \quad (2)$$

4) 若 $h_1(t)$ 满足 IMF 的条件,则

$$c_1(t) = h_1(t). \quad (3)$$

式中: $c_1(t)$ 为第一个 IMF 分量.

5) 如果 $h_1(t)$ 不满足,将其作为新的输入信号,转至第 1) 步,计算出 $h_{11}(t)$,重复以上方法,直到 $h_{1k}(t)$ 满足 IMF 的条件为止,此时:

$$c_1(t) = h_{1k}(t). \quad (4)$$

6) 将 $c_1(t)$ 从原始序列 $x(t)$ 中分离出来,则得到:

$$r_1(t) = x(t) - c_1(t). \quad (5)$$

7) 若 $r_1(t)$ 满足终止条件,那么 EMD 分解结束,如果不满足,那么将 $r_1(t)$ 作为新的输入信号,转至第 1) 步. 重复以上步骤,共得到 m 个 IMF 和一个余项 $r_m(t)$:

$$r_m(t) = r_{m-1}(t) - c_m(t). \quad (6)$$

EMD 的终止条件有两种,分别为:①预先设定一个终止值,当残余量 r 小于该预定值时,分解结束;②如果残余量 r 为一个单调函数,也就是意味着不能再分解出 IMF 分量时,分解结束.

原始信号 $x(t)$ 可以表示为 m 个 IMF 分量和残余分量之和,即

$$x(t) = \sum_{i=1}^m c_i(t) + r(t). \quad (7)$$

对每个 IMF 分量 $c_i(t)$ 作希尔伯特变换可得到数列 $\hat{c}_i(t)$:

$$\hat{c}_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (8)$$

由 $c_i(t)$ 和 $\hat{c}_i(t)$ 构成一个复序列 $z_i(t)$:

$$z_i(t) = c_i(t) + j\hat{c}_i(t) = a_i(t) e^{j\Phi_i(t)}. \quad (9)$$

其相位函数和幅值函数为:

$$\Phi_i(t) = \arctan(c_i(t) / \hat{c}_i(t)). \quad (10)$$

$$a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + \hat{c}_i^2(t)}. \quad (11)$$

瞬时频率为

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \omega_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_i(t)}{dt}. \quad (12)$$

对各 IMF 分量进行 Hilbert 变换 (HT), 得出各分量的瞬时频率变化情况, 突出了信号的局部特征, 对处理突变信号非常适用.

2 基于 HHT 的短期电价预测

2.1 预测模型

电价预测方法有很多, 各种预测方法均有其不同的特点和适用范围. 单一预测模型在一定场合下根据自身优点能够获得较好的预测结果, 但都有其局限性, 而组合预测模型更全面, 其预测精度要高于每个单一模型. 下面介绍本文中用到的 3 种单一预测模型以及组合预测模型.

1) RBF 神经网络模型. Powell 于 1985 年提出径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络^[16], 它是根据人的大脑皮层受到刺激时所作出的反应原理构建的, 是一种多层前向型的神经网络, 具有全局逼近性质, 能避免局部最小问题, 且有较强的泛化能力.

2) 最小二乘支持向量机模型. 支持向量机 (SVM)^[17] 是一种基于结构风险最小化的学习训练方法, 具有很强的泛化能力. 在此基础上最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 将 SVM 的不等式约束变成了等式约束, 降低了 SVM 的计算复杂度, 同时解决了大样本计算速度慢的问题, 用于电价预测具有一定的优势.

3) 粒子群优化算法模型. 粒子群优化 (PSO) 算法^[18] 是基于群智能的优化算法, 利用群体智能理论来模拟鸟群觅食过程, 在个体的合作与竞争中产生群集智能. 每个粒子在解空间中运动, 并由速度决定他的运动方向和距离, 粒子通过对自身的个体最好位置与群体的全局最好位置来动态地调整自己的位置信息, 向最优点靠拢. 对于 PSO 中惯性权重的选择至关重要.

4) 组合预测模型. 传统组合预测将实际值与各模型的预测值之间看成是线性关系, 利用数学方法求出各自的权重. 笔者采用非线性组合预测, 利用 BP 神经网络的非线性拟合能力, BP 网络输入的是各模型的预测值, 而实际电价值作为输出来训练网络^[19]. 设各预测模型的第 i 次预测值分别为 P_{1i} 、 P_{2i} 、 P_{3i} , 电价的第 i 次实际值记为 P_i , 它们之间的非线性关系如下:

$$\sum_{i=1}^m |P_i - f(P_{1i}, P_{2i}, P_{3i})|^2. \quad (13)$$

式中: m 为样本个数, 本文由 3 层 BP 神经网络来

逼近上述非线性映射 $f(\cdot)$, 使得式(13) 取得最小值, 因此将各网络预测值输入 BP 神经网络训练, 实际值即为输出的电价预测值。

2.2 预测方法

本研究步骤如下:

1) 对电价数据进行归一化处理, 减少噪声对 EMD 分解的干扰, 降低分解层数;

2) 对电价序列进行 EMD 分解, 得到若干不同频率的 IMF 分量和余项;

3) 分别对各 IMF 分量进行 Hilbert 变换, 掌握各分量频谱变化规律, 再得出各分量的平均瞬时频率;

4) 对有明显周期性的低频 IMF 分量和余项分别选择一种合适的预测模型;

5) 对频率值较高、变化波动较大的高频分量, 采用单一的预测方法往往效果不佳, 笔者采用组合预测模型;

6) 将各个 IMF 分量预测值相加得到最终预测结果, 与实际电价对比, 计算误差指标。

2.3 评价指标

对预测结果进行评价是考察预测模型精确度的有效手段。预测误差是衡量预测方法效果的主要指标, 笔者采用绝对误差、平均绝对误差和平均相对百分误差。设 R_i 为实际值, Y_i 为预测值, 计算公式如下。

绝对误差:

$$E_i = R_i - Y_i. \quad (14)$$

平均绝对误差:

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i| = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_i - Y_i|. \quad (15)$$

平均绝对百分误差:

$$E_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{R_i - Y_i}{R_i} \right| \times 100\%. \quad (16)$$

3 仿真算例分析

选取美国 PJM 电力市场 2014 年 10 月 2 日至 10 月 30 日的实际数据作为样本, 来预测 10 月 31 日 24 h 的电价数据。PJM 日前市场采用本地边际电价定价方式, 按小时出清。PJM 市场还公布了一个日前加权平均电价, 笔者是以此电价为样本, 对原始电价数据经过 EMD 分解为 7 个 IMF 分量和一个余项 res, 如图 1 所示。对各分量进行 Hilbert 变换得到各 IMF 分量的频谱, 如图 2 所示。

由图 2 求得各分量的平均瞬时频率如表 1 所示。从表 1 可以看出, 各 IMF 分量几乎成 1/2 的衰减关系。根据各分量的不同特点, 分别采用不同的预测模型。IMF1 分量, 其频率最高, 主要为电价的

随机成分, 波动性很明显, 因此对 IMF1 分量分别采用 RBF 神经网络、LS-SVM 和粒子群算法进行预测, 将多次预测的结果作为 BP3-8-1 结构神经网络的输入, 实际值作为输出训练网络, 设置最大迭代次数为 10 000 次, 学习率为 0.05, 精度为 10^{-4} , 训练次数达到 8 255 次输出结果。IMF2 和 IMF3 分量, 其平均瞬时频率较高, 波动性较大, 采用 LS-SVM 模型预测; IMF4~7 和余项 res, 其频率较低, 周期性明显, 采用 RBF 神经网络模型。

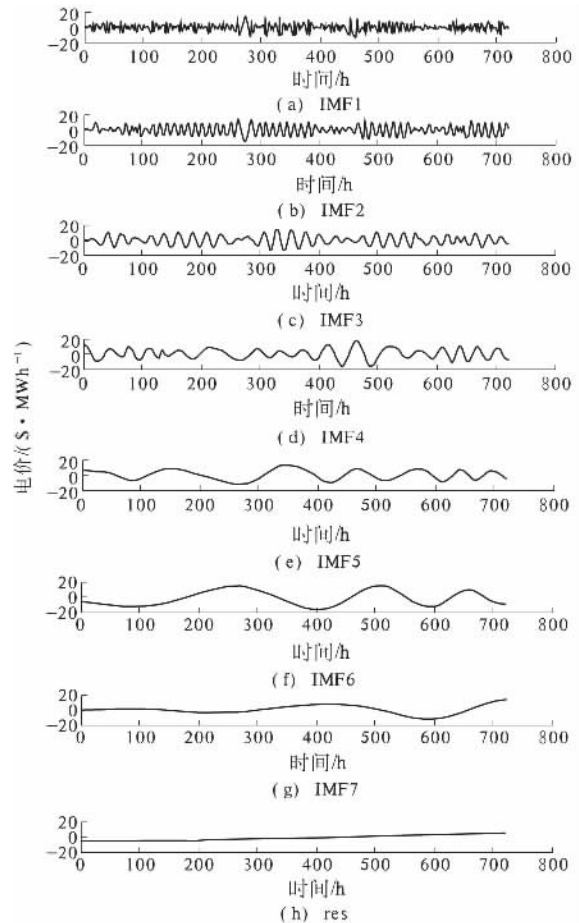


图1 EMD 分解

Fig.1 The EMD results of price time series

将 IMF1 的组合预测模型、3 个单一模型预测结果与实际电价 IMF1 分量进行对比分析, 如图 3 所示, 各模型预测结果的误差对比分析, 如表 2 所示。

通过各个模型的误差对比分析, 可知组合预测模型的精度均高于任一单一预测模型。然后对 IMF2 ~ IMF3, IMF4 ~ IMF7 分别采用 LS-SVM、RBF 神经网络模型进行预测。将各 IMF 分量的预测结果进行叠加得到最终 10 月 31 日 24 h 的电价预测结果。为了验证基于 HHT 组合预测方法的准确性, 同时分别采用 RBF 神经网络、LS-SVM、粒子群算法单独预测并进行对比, 对于粒子群算法设置最大迭代次数为 1 000 次, 惯性权重选为

0.6, 加速因子 $c_1 = c_2 = 2$, 精度为 10^{-4} , 最终迭代次数为 860 次, 各模型结果对比如图 4 所示。

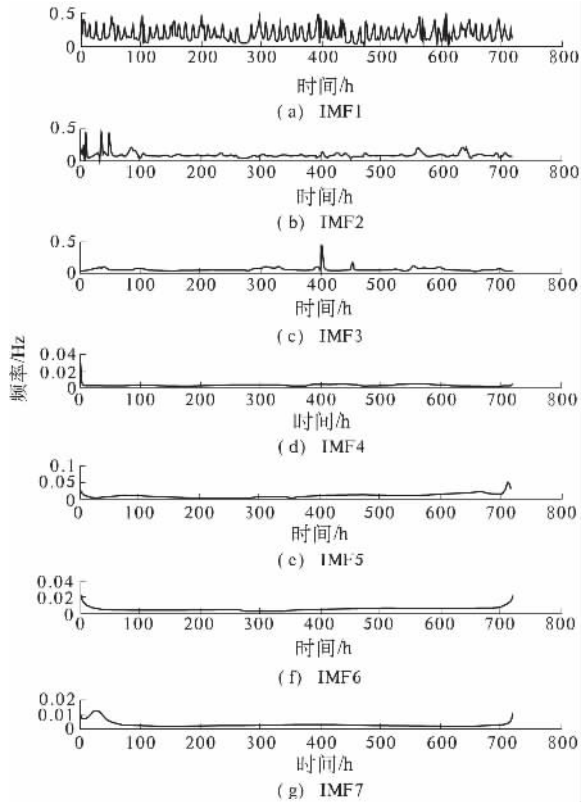


图 2 IMF 分量频谱
Fig.2 Spectrum of each IMF

表 1 各分量平均瞬时频率
Tab.1 Average instantaneous frequency of each component

分量	平均瞬时频率	分量	平均瞬时频率
IMF1	0.182	IMF5	0.009
IMF2	0.088	IMF6	0.004
IMF3	0.041	IMF7	0.003
IMF4	0.021		

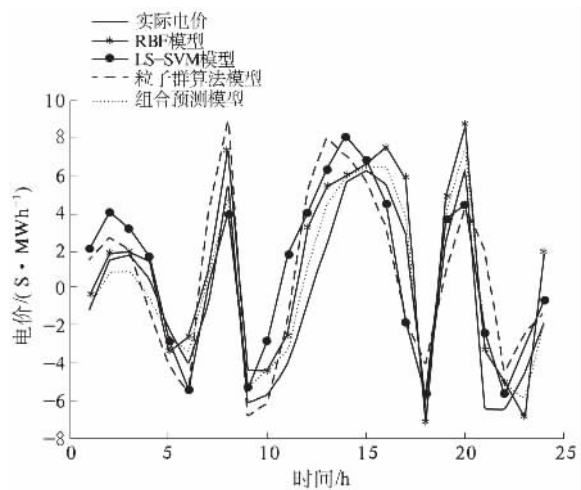


图 3 IMF1 各模型预测曲线
Fig.3 The forecasting curve of each model for IMF1

表 2 IMF1 各模型绝对误差比较
Tab.2 The contrast of absolute error with each model forecasting for IMF1

预测方法	最大绝差/(\$ \cdot MWh^{-1})	平均绝差 / %
RBF 模型	2.084 8	0.636 5
LS-SVM	3.567 2	0.794 0
粒子群算法	4.370 8	1.007 9
组合模型	1.918 7	0.380 0

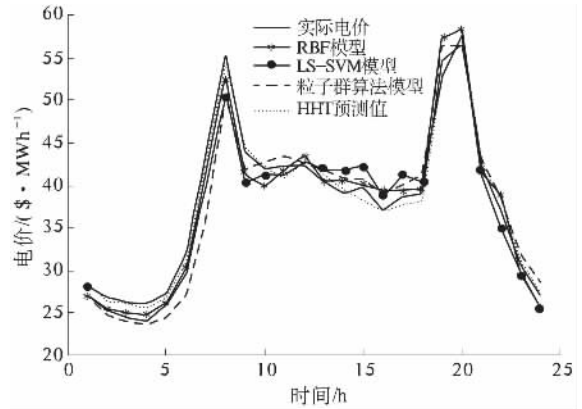


图 4 预测结果对比图
Fig.4 Comparison of forecasting results

采用平均绝对百分误差和最大绝对误差作为评价指标,表 3 给出了各模型的评价结果. 从表 3 可以看出: 基于 HHT 的组合预测最大绝对误差为 1.53 \$/MWh, 平均绝对百分误差为 1.61%, 此方法在短期电价预测中精度均高于单一预测模型。

表 3 评价指标结果
Tab.3 The evaluation index of each model

预测方法	平均绝对误差 / %	最大绝对误差 / (\$ \cdot MWh^{-1})
RBF 神经网络	3.76	2.38
LS-SVM	4.79	3.57
粒子群算法	5.52	4.37
HHT 组合模型	1.61	1.53

4 结论

笔者提出基于 HHT 的短期电价预测模型, 将电价时间序列通过 EMD 分解为若干个 IMF 分量, 针对各分量独有的频率变化情况分别采用不同的预测模型, 对于高频分量采用组合预测模型, 从而改善了高频分量的预测效果; 对低频分量选择恰当的预测模型, 将各分量的预测结果相加即为电价预测值. 经过美国 PJM 电力市场日前实时电价数据进行验证, 结果表明本研究预测模型具有较高的预测精度。

参考文献:

- [1] 张显,王锡凡. 短期电价预测综述[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):3-10.
- [2] BENINI M,MARRACCI M,PELACCHI P,et al. Day-ahead market price volatility analysis in deregulated electricity markets [C] //Proceeding of IEEE PES summer meeting, Illinois: Chicago,2002,45(3):1354-1359.
- [3] 王瑞庆,李渝曾. 含误差校正的粒子群优化 GM(1,2) 短期电价预测方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(13):54-59.
- [4] 师彪,李郁侠,于新花,等. 自适应变系数粒子群和径向基神经网络在短期电价预测中的应用[J]. 电网技术:2010,34(1):34-39.
- [5] 黎特,皮薇. 支持向量机模型改进及在短期边际电价预测中的应用[J]. 国网技术学院学报:2013,16(5):35-40.
- [6] 杨婵,舒崇军. 基于神经网络的电力市场电价预测[J]. 电气开关,2010,35(6):35-41.
- [7] ZHANG L,LUH P B,KASIVISWANATHAN K. Energy clearing price prediction and confidence interval estimation with cascaded neural networks [J]. IEEE Trans on power system,2003,18(1):99-105.
- [8] 谭忠富,张金良. 利用多因素小波变换和多变量时间序列模型的日前电价预测[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):41-46.
- [9] 牛丽肖,王正方. 一种基于小波变换和 ARIMA 的短期电价混合预测模型[J]. 计算机应用研究,2014,31(3):16-22.
- [10] 毛玉龙,范虹. 经验模式分解回顾与展望[J]. 计算机工程与科学,2014,36(1):156-161.
- [11] 丁倩. 基于 HHT 的短期电力负荷预测研究[D]. 郑州:郑州大学电气工程学院,2014.
- [12] 陈莺,徐晨,张维强. 基于 Huang 变换和 BP 神经网络的时间序列预测方法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(30):242-244.
- [13] 王耀霞. 基于 Hilbert-Huang 变换和最小二乘支持向量机的电力市场出清电价预测[J]. 电子测量技术,2010,33(9):39-41.
- [14] Monthly Real-Time & day-ahead LMPs [B/OL]. (2013-06-10) [2014-09-01]. <http://www.pjm.com/>.
- [15] HUANG N E,SHEN Z,LONG S R,et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. the Royal society of London series A,1998,454:903-995.
- [16] POWELL M J D. The theory of radial basis function approximation in 1990, advances in numerical analysis II [M]. Oxford: Clarendon Press,1992:105-210.
- [17] VAPNIK V N. An overview of statistical learning theory [J]. IEEE transactions on neural networks,1999,10(3):988-999.
- [18] KENNEDY J,EBERHART R. Particle swarm optimization [C] //Proceedings of IEEE international conference on neural networks IV. WA: Perth,1995:1942-1948.
- [19] 白玮莉,刘志刚,彭权威,等. 基于 HHT 和神经网络组合的负荷预测模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(19):31-35.

A Method for Short-term Electricity Price Forecasting Based on HHT

LIAO Xiaohui¹, ZHOU Bing¹, YANG Dongqiang¹, WU Jie²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450051, China)

Abstract: Short-term electricity price forecasting guarantees the maximum benefit of the parties involved in the power market. In view of the fact that the market clearing price has strong randomness and volatility, the paper proposes a combination forecasting model based on Hilbert-Huang transform. The price sequence is decomposed into a number of intrinsic mode function components and the remainder by using the empirical mode decomposition theory. Different models were built for each intrinsic mode function according to the size of each component's average instantaneous frequency. Then the prediction results of each component are added up to obtain the final prediction value. And the model uses the actual data of PJM power market in the United States to test. Compared to the prediction results of any one sole model, this method accuracy were higher than single forecasting model, the maximum absolute error is 1.53 \$/MWh and the mean absolute percentage error is 1.61.

Key words: power market; electricity price forecasting; Hilbert-Huang transform; combined forecasting

文章编号: 1671-6833(2016)01-0015-04

三电平有源电力滤波器的非奇异终端滑模电流跟踪控制

王 杰, 何向东, 彭金柱

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 为了提高电流跟踪的快速收敛性和准确性, 提出采用非奇异终端滑模对三电平有源电力滤波器(active power filter, APF)的指令电流进行跟踪控制. 对指令电流的 d 、 q 轴分量分别设计非奇异终端滑模面与控制律, 使得补偿电流能在有限时间内收敛到指令电流, 并从理论上证明了其稳定性. 仿真实验验证了该控制方法能有效地抑制电网中的谐波电流, 与传统的三角波比较控制和常规滑模变结构控制方法相比, 所提出的控制策略具有更好的谐波抑制性能.

关键词: 三电平有源电力滤波器; 非奇异终端滑模; 电流跟踪; 指令电流; 补偿电流

中图分类号: TN713.8

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504025

0 引言

随着非线性负载的广泛使用, 电网中的两大公害(谐波和无功)问题日益突出, 而有源电力滤波器(active power filter, APF)作为一种动态抑制谐波和补偿无功的电力电子装置^[1], 得到了越来越多的使用和研究. 在高压、大容量以及对补偿精度有较高要求的场合, 基于二极管钳位式变流器的三电平 APF 备受青睐^[2].

在三电平 APF 中, 电流的跟踪控制是决定其补偿性能好坏的关键因素之一, 目前已有许多学者对其进行研究, 提出了许多控制方法^[3]. 而在这些方法中, 滑模变结构控制是一种非线性方法, 非常适合电力变流器这种拓扑结构时变的设备^[4], 但是该方法控制的系统状态是在无限时间条件下达到平衡点, 并具有滑模抖振, 严重影响其控制性能, 而普通终端滑模可以使系统状态在有限时间内达到平衡点, 其动态响应速度更快, 但是其存在奇异现象, 非奇异终端滑模能够避免奇异现象同时又具有使系统状态在有限时间收敛到平衡点和稳态精度高的特点^[5]. 为了削弱滑模抖振, 文献[6]提出了将非奇异终端滑模结合高阶滑模, 并用于永磁同步电机的转速控制, 取得了比较好的效果. 由于该方法具有快速和能够有效削弱滑模抖振的特性, 其在三电平 APF 的电流跟踪

控制中应该可以取得比较好的效果. 因此, 笔者针对二极管钳位式三电平 APF 的数学模型, 提出基于非奇异终端滑模的指令电流跟踪控制, 并对其输出电压采用三电平空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM), 从而在交流侧输出补偿电流. 最终通过仿真实验验证了该控制策略的可行性和有效性.

1 三电平 APF 的数学模型

笔者研究的三电平 APF 的电路拓扑结构如图 1 所示. 主电路采用二极管钳位式变流器, 能够输出 3 种电平的电压: 正母线电压、负母线电压以及零电压^[7], 其相比于传统的两电平 APF, 它的输出电压失真小, 补偿精度更高. 在图 1 中, u_{sa} 、 u_{sb} 和 u_{sc} 为理想的三相电网电压; i_{sa} 、 i_{sb} 和 i_{sc} 为三相电网电流; i_{La} 、 i_{Lb} 和 i_{Lc} 为三相负载电流; i_{Fa} 、 i_{Fb} 、

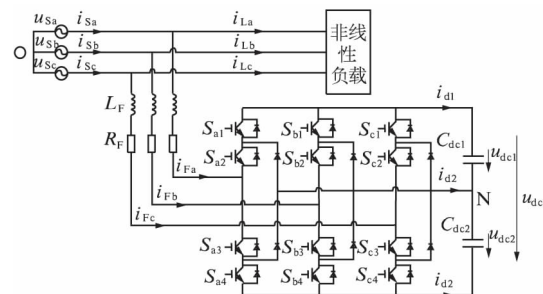


图 1 三电平 APF 的拓扑结构

Fig. 1 The topology of three-level APF

收稿日期: 2015-04-30; 修订日期: 2015-06-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473265); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20124101120001)

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

引用本文: 王杰, 何向东, 彭金柱. 三电平有源电力滤波器的非奇异终端滑模电流跟踪控制[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 15-18, 28.

i_{Fc} 为三电平 APF 的输出补偿电流; C_{dc1} 、 C_{dc2} 为变流器直流侧电容, 且 $C_{dc1} = C_{dc2} = C_d$; u_{dc1} 、 u_{dc2} 分别为其两端的电压, u_{dc} 为直流侧总的电压(即 $u_{dc} = u_{dc1} + u_{dc2}$); L_F 、 R_F 分别为三电平 APF 的输出等效电感和电阻。

由于三电平 APF 的每一相能够输出 3 种电平, 所以将其每一相看成一个单刀三掷开关^[8], 并将三相系统变换到两相旋转 dq 坐标系下进行分析, 可得到三电平 APF 在 dq 坐标系下的数学模型^[2] 为

$$\begin{cases} L_F \frac{di_{Fd}}{dt} = -R_F i_{Fd} + \omega L_F i_{Fq} - u_d + u_{Sd}; \\ L_F \frac{di_{Fq}}{dt} = -\omega L_F i_{Fd} - R_F i_{Fq} - u_q + u_{Sq}; \\ C_d \frac{du_{dc1}}{dt} = S_{d1} i_{Fd} + S_{q1} i_{Fq}; \\ C_d \frac{du_{dc2}}{dt} = -S_{d2} i_{Fd} - S_{q2} i_{Fq}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{Fd} 、 i_{Fq} 为 dq 坐标系下三电平 APF 的输出补偿电流; u_{Sd} 、 u_{Sq} 为 dq 坐标系下的电网电压; u_d 、 u_q 为 dq 坐标系下的三电平 APF 的输出电压; S_{d1} 、 S_{q1} 为 dq 坐标系下第一个桥臂的开关函数; S_{d2} 、 S_{q2} 为 dq 坐标系下第二个桥臂的开关函数; ω 为电网电压角频率。

由式(1)可以看出, 三电平 APF 是一个时变非线性系统, i_{Fd} 、 i_{Fq} 、 u_{dc1} 、 u_{dc2} 为状态变量, u_d 和 u_q 为输入变量。而二极管钳位式变流器的直流侧总电压 u_{dc} 可通过外部电压环来稳定在期望值附近, 两个电容电压 u_{dc1} 和 u_{dc2} 通过三电平 SVPWM 的调节作用, 也可以维持在给定值附近, 且其变化远小于 APF 补偿电流的变化。为简便起见, 在补偿电流控制研究中可以将直流侧电压 u_{dc} 、 u_{dc1} 、 u_{dc2} 看做定值^[9]。

2 非奇异终端滑模电流控制器设计

三电平 APF 的基本工作原理就是控制注入给电网的补偿电流 i_{Fd} 和 i_{Fq} , 使其准确快速跟踪由谐波检测电路得到的指令电流 i_{Fd}^* 和 i_{Fq}^* , 从而消除由非线性负载产生的谐波电流对电网电流的污染。因此, 三电平 APF 系统是典型的随动控制系统^[9]。并且为提高电流跟踪的快速收敛性和准确性, 笔者提出采用非奇异终端滑模对三电平 APF 的指令电流进行跟踪控制。其中基于逆系统解耦后利用常规滑模进行复合控制的思路^[10], 而非奇异终端滑模具有解耦性能, 因此可以对指令电流 d 、 q 轴控制器分别进行设计。

2.1 d 轴电流控制器设计

d 轴电流控制器是控制补偿电流 i_{Fd} 快速准确跟踪指令电流 i_{Fd}^* , 定义 d 轴电流误差状态为 $e_d = i_{Fd}^* - i_{Fd}$, 并设计非奇异终端滑模面为

$$S_d = e_d + \alpha \dot{e}_d^{\frac{p_1}{q_1}}. \quad (2)$$

式中: $\alpha > 0$; p_1 、 q_1 均为奇数, 并且 $1 < p_1/q_1 < 2$ 。根据三电平 APF 的状态方程(1), 可以得到其 d 轴电流误差方程为:

$$\dot{e}_d = \dot{i}_{Fd}^* + \frac{R_F}{L_F} i_{Fd} - \omega i_{Fq} + \frac{u_d}{L_F} - \frac{u_{Sd}}{L_F}. \quad (3)$$

定理 1: 对于式(3)所示的三电平 APF 的 d 轴电流误差系统, 滑模面设计成式(2)所示的非奇异终端滑模面时, 并且系统的滑模控制律设计成式(4)、(5)和(6)的形式, 则三电平 APF 的 d 轴电流将在有限时间内收敛。

$$u_d = u_{deq} + u_{dsw}. \quad (4)$$

$$u_{deq} = -L_F \dot{i}_{Fd}^* - R_F i_{Fd} + \omega L_F i_{Fq} + u_{Sd}. \quad (5)$$

$$u_{dsw} = -L_F \int_0^t \left[\frac{q_1}{p_1 \alpha} \dot{e}_d^{2-\frac{p_1}{q_1}} + k_{10} \operatorname{sgn} s_d + k_{11} s_d \right] d\tau. \quad (6)$$

式中: $k_{10} > 0$, $k_{11} > 0$ 。

证明 本文选取李雅普诺夫函数为:

$$V_d = \frac{1}{2} S_d^2. \quad (7)$$

非奇异终端滑模面对时间的导数为:

$$\begin{aligned} \dot{S}_d &= \dot{e}_d + \alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_d^{\frac{p_1}{q_1}-1} \dot{e}_d = \alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_d^{\frac{p_1}{q_1}} \left[\dot{e}_d + \frac{q_1}{\alpha p_1} \dot{e}_d^{2-\frac{p_1}{q_1}} \right] = \\ &\alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_d^{\frac{p_1}{q_1}} \left[-k_{10} \operatorname{sgn} S_d - k_{11} S_d \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

将李雅普诺夫函数对时间求导得到:

$$\dot{V}_d = S_d \dot{S}_d = \alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_d^{\frac{p_1}{q_1}} \left[-k_{10} |S_d| - k_{11} S_d^2 \right]. \quad (9)$$

由于 $k_{10} > 0$, $k_{11} > 0$, 当 $S_d \neq 0$ 时, $\dot{V}_d \leq 0$, 并且仅当 $\dot{e}_d = 0$ 的时候, $\dot{V}_d = 0$ 。而 $\dot{e}_d = 0$, $e_d \neq 0$ 时可证明这并不是一个稳定的状态, 即 $\dot{V}_d = 0$ 不可能一直保持^[6]。根据李雅普诺夫稳定定理, 该三电平 APF 系统将在有限时间内达到非奇异终端滑模状态, 即 $S_d = 0$ 。当到达非奇异终端滑模的时候, e_d 和 \dot{e}_d 也将在有限时间内收敛到零。

该非奇异终端滑模控制的趋近律为

$$\dot{S}_d = -k_{10} \operatorname{sgn} S_d - k_{11} S_d. \quad (10)$$

它呈现指数趋近律, 并采用积分来柔化滑模抖振, 这样可以大大消弱由切换项带来的滑模抖振。

2.2 q 轴电流控制器的设计

q 轴电流控制器是控制补偿电流 i_{Fq} 快速准确跟踪指令电流 i_{Fq}^* , 定义 q 轴电流误差状态 $e_q = i_{Fq}^* - i_{Fq}$, 并设计非奇异终端滑模面为

$$S_q = e_q + \beta \dot{e}_q^{\frac{p_2}{q_2}} \quad (11)$$

式中: $\beta > 0$; p_2 和 q_2 均为奇数, 并且 $1 < p_2/q_2 < 2$. 根据三电平 APF 的状态方程(1), 可以得到其 q 轴电流误差方程为:

$$\dot{e}_q = \dot{i}_{Fq}^* + \omega i_{Fd} + \frac{R_F}{L_F} i_{Fq} + \frac{u_q}{L_F} - \frac{u_{Sq}}{L_F} \quad (12)$$

定理 2 对于式(12)所示的三电平 APF 的 q 轴电流误差系统, 滑模面设计成式(11)所示的非奇异终端滑模面时, 并且系统的滑模控制律设计成式(13)、(14)和(15)的形式, 则三电平 APF 的 q 轴电流将在有限时间内收敛:

$$u_q = u_{qe} + u_{qsw}; \quad (13)$$

$$u_{qe} = -L_F \dot{i}_{Fq}^* - \omega L_F i_{Fd} - R_F i_{Fq} + u_{Sq}; \quad (14)$$

$$u_{qsw} = -L_F \int_0^t \left[\frac{q_2}{p_2} \dot{e}_q^{2-\frac{p_2}{q_2}} + k_{20} \text{sgn } S_q + k_{21} S_q \right] d\tau. \quad (15)$$

式中: $k_{20} > 0, k_{21} > 0$.

其证明过程和定理 1 的证明过程类似, 这里不再赘述.

根据上述定理及控制思想, 可得到基于非奇异终端滑模的三电平 APF 的电流控制框图, 如图 2 所示. 由非奇异终端滑模控制器求出变流器交流侧的指令电压 u_d 和 u_q , 然后利用三电平 SVPWM 方法进行调制, 用基本电压矢量的不同组合对指令电压进行逼近, 产生三电平 PWM 脉冲用来控制二极管钳位式变流器的开关管的通断, 从而获得三电平 APF 的输出电压, 输出电压与电网电压的差值作用在其输出电感 L_F 和输出电阻 R_F 上, 就会产生补偿电流, 该补偿电流能够实时准确地跟踪谐波指令电流的变化.

3 仿真实验分析

为了验证笔者所提控制方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 环境下对如图 1 所示的三电平 APF 系统进行了仿真实验研究, 并与传统的控制方法(三角波比较控制和常规滑模变结构控制方法)进行了对比. 系统仿真参数为: 三相对称电网相电压 $U = 220$ V, 基波频率 $f = 50$ Hz; 非线性负载为三相桥式整流电路, 直流侧带阻感性负载, 其中电感 $L_i = 5$ mH, 电阻 $R_i = 20$ Ω , 交流侧等效电

感 $L_F = 5$ mH, 等效电阻 $R_F = 2$ Ω , 二极管钳位式变流器的直流侧电容 $C_{dc1} = C_{dc2} = C_d = 4\ 700$ μ F, 直流侧电容电压的参考值 $U_{dc} = 1\ 000$ V, $U_{dc1} = U_{dc2} = 500$ V; 系统的采样周期 $T_s = 0.000\ 001$ s. 谐波电流检测算法采用基于瞬时无功功率理论的 d - q 检测方法^[11], 直流侧电容总电压的控制采用的是传统的 PI 控制, 直流侧两电容中点的电位平衡由三电平 SVPWM 进行调节, 图 2 为三电平 APF 的电流控制框图.

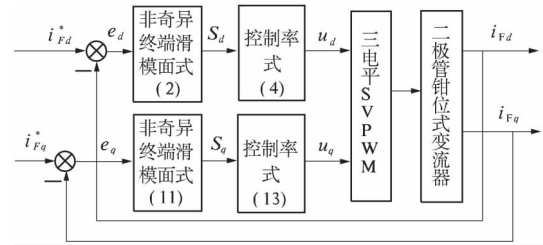


图 2 三电平 APF 的电流控制框图

Fig. 2 Current control block diagram of three-level APF

图 3 为 A 相负载电流波形及其频谱, 负载电流畸变比较严重, 其谐波畸变率(total harmonic distortion, THD) 为 25.43%, 含量比较高的谐波为 5 次和 7 次, 其幅值分别为基波幅值的 21% 和 11%.

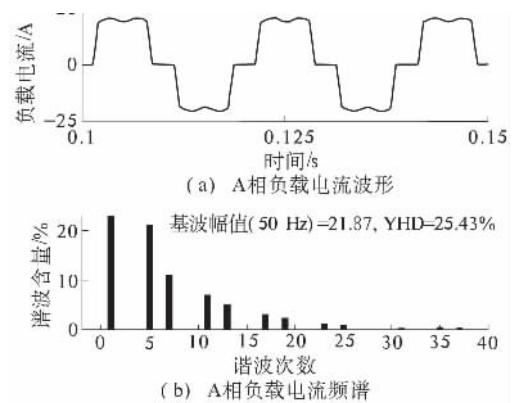


图 3 A 相负载电流波形及其频谱

Fig. 3 Load current waveform and its spectrum of phase A

为了验证笔者所提控制策略的有效性, 下面分别采用三角波比较控制、常规滑模变结构控制和笔者所提控制策略来补偿谐波电流, 补偿后的电网电流的波形及频谱分别如图 4、5 和 6 所示.

由仿真结果可以看出, 3 种控制策略都能大大降低电网电流的谐波含量, 满足电网电流 $\text{THD} < 5\%$ 的国标要求. 通过对比分析 3 种方法可知, 由于采用三角波比较控制的电流跟踪速度慢, 尤其对指令电流快速变化的部分跟踪精度欠佳^[12]; 常规滑模变结构控制存在严重的抖振且其跟踪速度也不足, 所以补偿后的波形仍存在比较大的畸变,

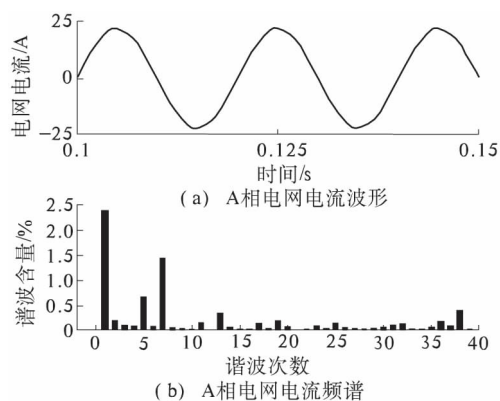


图4 采用三角波比较控制 A 相电网电流波形及其频谱

Fig. 4 Source current and its spectrum of phase A with

triangular wave comparison control

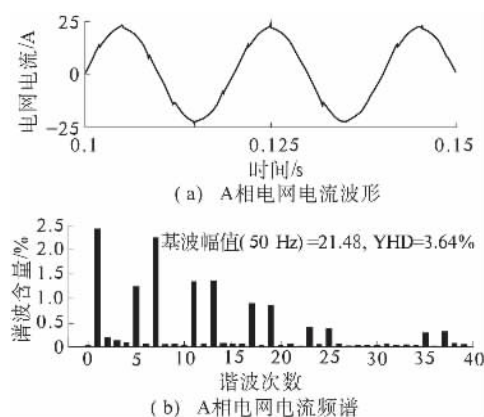
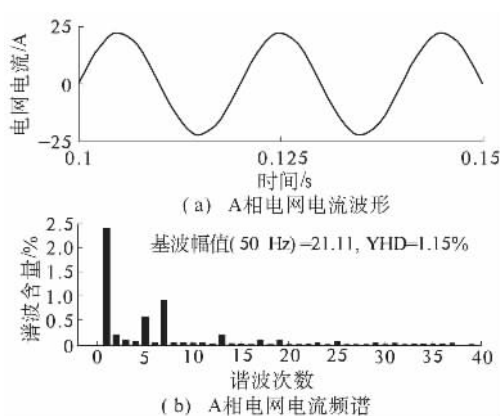
图5 采用常规滑模变结构控制 A 相电网
电流波形及其频谱Fig. 5 Source current and its spectrum of phase
A with common SMC control

图6 采用本文控制策略的 A 相电网电流波形及其频谱

Fig. 6 Source current and its spectrum of phase
A with proposed control strategy

其谐波畸变率 THD 为 3.64%, 仍然比较大; 笔者采用的非奇异终端滑模控制, 是在常规滑模面上加入非线性项, 改善了系统的收敛特性, 同时避免了普通终端滑模的奇异问题, 并且在控制中加入积分环节来削弱滑模抖振, 因此该方法的跟踪速

度和补偿精度明显比以上两种传统的方法更好, 其谐波畸变率 THD 达到 1.15%, 补偿后的电网电流最接近正弦波。

4 结论

针对三电平有源电力滤波器的电流跟踪控制问题, 笔者提出采用非奇异终端滑模控制策略对电流进行控制, 设计控制律并从理论上证明了其稳定性, 其输出电压采用三电平 SVPWM 进行调制, 并且对其进行了仿真实验分析, 仿真结果表明, 采用笔者所提出的控制策略的三电平 APF 可以将电网电流的谐波畸变率从 25.43% 降至 1.15%, 并且与两种传统的两种控制方法相比, 该方法补偿精度最好。因此, 该方法在三电平 APF 中具有比较强的理论和使用价值。

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 何英杰, 刘进军, 王兆安. 三电平有源电力滤波器谐波电流跟踪无差控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 90-94.
- [3] 幕昆, 幕小斌, 王杰. 有源电力滤波器非线性控制策略研究与实现 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(4): 59-63.
- [4] DAVID Y K, VADIMI U, UMIT O. A control engineering's to sliding mode control [J]. Control systems technology, 1999, 7(3): 328-342.
- [5] 张袅娜. 终端滑模控制理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [6] 郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(6): 697-700.
- [7] BOUZIDI M, BENAÏSSA A, BARKAT S. Hybrid direct power/current control using feedback linearization of three-level voltage source shunt active power filter [J]. Electrical power and energy system, 2014, 61(9): 629-646.
- [8] 高龙涛. 三电平有源电力滤波器的设计及仿真参数研究 [D]. 郑州: 郑州大学电气工程学院, 2014.
- [9] 鲁伟, 李春文, 徐长波. 并联混合有源滤波器逆系统解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(9): 1145-1151.
- [10] LU W, LI C W, XU C B. Sliding mode control of a shunt hybrid active power filter based on the inverse system method [J]. Electrical power and energy systems, 2014, 57(5): 39-48.

(下转第 28 页)

文章编号: 1671-6833(2016)01-0019-05

基于发育网络的复杂背景下人脸识别

王东署, 郑光璞

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对人脸识别中光线、背景及面部表情的变化, 利用密歇根州立大学人脸库构建复杂背景人脸图像库, 并将发育网络应用于二维人脸识别. 引入突触维护机制来处理复杂背景, 可以自动决定突触的完全去除、保留和部分去除, 弱化背景并强化人脸, 从而降低复杂背景对人脸识别的不利影响. 通过和传统方法测试结果对比, 采用带突触维护机制的发育网络对复杂背景下人脸的识别可以取得更好的效果, 其识别率可达96%以上.

关键词: 发育网络; 人脸识别; 复杂背景; 突触维护; 识别率

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504040

0 引言

人脸识别作为计算机视觉及模式识别研究的一个重要子领域, 具有重要的理论研究和实际应用价值. 复杂背景下的人脸识别是一个非常复杂和极具挑战性的课题, 它与指纹、视网膜、基因、声音等其他人体生物特征识别相比, 具有友好、简单、易于被接受等特点, 近年已被广泛用于国家安全、银行密码系统、公安刑侦破案等领域^[1].

在复杂背景人脸识别的研究中, 国内较有代表性的研究有: 王波等^[2]提出了具有形状约束的snake模型的人脸检测方法; 于威威等^[3]利用灰度边缘图像并结合人脸的几何特征, 检验双眼及人脸的真实性; 田春娜等^[4]则采用基于聚类有效性分析及多姿态检测算法检测人脸. 此外, 仲澄等^[5]提出一种新的自适应肤色分割的算法定位人脸, 采用局部奇异值分解法(singular value decomposition, SVD)提取图像特征值, 用主成分分析法(principal components analysis, PCA)加以识别; 何露等^[6]则利用肤色分割减小搜索区域, 在匹配时只需对肤色分析后的区域作匹配, 改变了传统模板匹配方法中逐点扫描的方式, 所需匹配的区域大大减少, 检测速度得到了提高.

国外研究中, Huang^[7]提出了在噪声干扰或复杂背景下, 基于 α -散度的非负矩阵分解(nonnega-

tive matrix factorization, NMF)方法的人脸识别. 该方法用 α -散度来测量距离, 通过NMF表达式中不同的参数值得到一系列迭代的因子分解式, 以便NMF得到总体最优值, 改善人脸识别的精度; Chen等^[8]提出了基于复杂背景视频下移动机器人的实时人脸识别与检测, 通过嵌入式马尔科夫模型去识别人脸; Vaidehi等^[9]提出了基于哈尔小波和独立成分分析算法的人脸识别, 如果特定人脸信息在该系统中已经被训练过, 那么该算法就可以实时检测照片背景中的该人脸, 并且确定其身份.

为了模拟人类大脑的识别, 笔者提出了基于发育网络(developmental network, DN)的复杂背景下的人脸识别算法, 并引入突触维护机制^[10-11], 自动决定突触的全部去除、保留和部分去除, 弱化复杂背景, 强化人脸. 实验结果表明, 在复杂背景下的二维人脸识别领域是很有效的.

1 理论基础

1.1 发育网络

发育网络^[12]是美国密歇根州立大学翁巨杨教授模拟人类大脑的发育规律而提出的一种智能网络. 发育网络的 X 、 Y 和 Z 3个区域类似于传统网络的输入层、隐含层和输出层. X 作为传感器与外界环境接触, Y 层作为发育网络的大脑, 不能直接与外界环境接触, 作为执行器层, Z 层即可以输

收稿日期: 2015-04-20; 修订日期: 2015-06-19

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.

引用本文: 王东署, 郑光璞. 基于发育网络的复杂背景下人脸识别[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 19-23.

入也可以输出,当 Z 处于外界监督状态时,作为网络的输入,否则, Z 输出一个向量来驱动执行器(肌肉或腺体)作用于真实世界. X, Y, Z 3 个区域顺序是由低到高,如 $X \rightarrow Y, Y \leftrightarrow Z$. 图 1 即为发育网络的工作原理,描述如下:

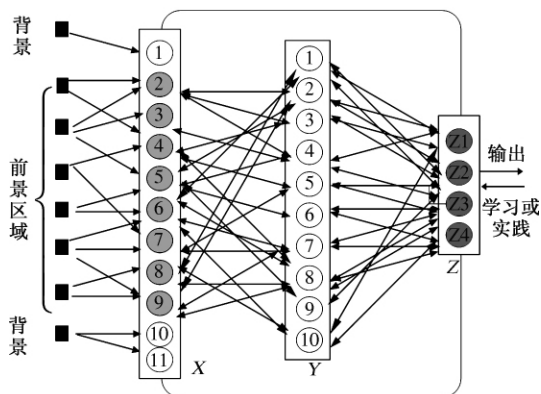


图1 DN网络示意图

Fig.1 The schematic of DN

1) 在 $t = 0$ 时刻,对 $A = \{X, Y, Z\}$ 中的任一区域,初始化 N 和反应向量 r ,其中 $N = (V, G)$, V 是突触权值, G 是神经元的年龄, r 是权值与输入相乘后的值。

2) 在 $t = 1, 2, \dots, n$ 时刻,对 A 中的任一区域,重复下面的两个步骤:

①利用区域函数 f 进行计算,运算关系如下:

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

其中, b (bottom-up) 和 t (top-down) 分别是自下而上和自上而下的输入;

②更新: $N \leftarrow N', r \leftarrow r'$.

区域 Y 中神经元能量值的计算如下:

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

其中, v_b 和 v_t 分别对应自下而上和自上而下的权值. 激活神经元位置由下式得到:

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

其中, j 代表响应值最大的神经元,激活后,其与 X 和 Z 之间的连接权值更新如下:

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

其中, \dot{p} 是归一化之后的输入向量; y_j 是 Y 激活后的响应向量; $\omega_1(n_j) + \omega_2(n_j) = 1$, $\omega_2(n_j)$ 是学习率, $\omega_1(n_j)$ 是保持率. 下式给出了输入 \dot{p} 采样均值的递归计算方法:

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

其中, t_i 是神经元的激活时间,激活神经元的年龄

加 1,即 $n_j \leftarrow n_j + 1$.

1.2 突触维护

乙酰胆碱和去甲肾上腺素对突触的神经调节作用定义为突触维护^[13]. 乙酰胆碱在基底前脑和脑干中生成,甲肾上腺素既是一种激素又是一种神经递质^[14]. Yu 等^[15] 提出了乙酰胆碱与预测的不确定性有关,去甲肾上腺素与无法预测的不确定性有关.

1.2.1 乙酰胆碱系统

输入 p_i 和权值 v_i 的方差表达式如下:

$$\sigma_i = E[|v_i - p_i| \text{ 响应神经元}]. \quad (6)$$

方差更新如下:

$$\sigma_i(n) = \begin{cases} \sigma/\sqrt{12}, & n \leq n_0; \\ \omega_1(n) \sigma_i(n-1) + \omega_2(n) |v_i - p_i|, & n > n_0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_2'(n) = \frac{1 + \mu(n)}{n};$$

$$\omega_1(n) = 1 - \omega_2(n). \quad (8)$$

其中, $\mu(n)$ 是遗忘因子,只有年龄更新到一定次数才起作用 ($n_0 \leq 20$ 时等于 0, 否则等于 1.5). 所有突触中预期的突触标准方差定义为

$$\bar{\sigma}(n) = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \sigma_i(n). \quad (9)$$

其中, d 代表神经元的突触点(像素点)个数.

1.2.2 去甲肾上腺素

每一个突触相对方差定义如下:

$$r_i(n) = \frac{\sigma_i(n)}{\bar{\sigma}(n)}. \quad (10)$$

采用如下突触因子来决定突触的去留^[10]:

$$f(r_i(n)) = \begin{cases} 1, & r_i(n) < \beta_s; \\ (\beta_b - r_i(n)) / (\beta_b - \beta_s), & \beta_s \leq r_i(n) \leq \beta_b; \\ 0, & \beta_b < r_i(n). \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\beta_b = 1.5$; $\beta_s = 1$; $r_i(n)$ 是相对方差. 当 $r_i(n) < \beta_s$, 突触连接将增强; 当 $\beta_s \leq r_i(n) \leq \beta_b$, 连接将减弱; 当 $\beta_b < r_i(n)$, 连接将全部切断.

1.2.3 突触修剪

对输入 v_i 和权值 p_i 修剪如下^[10-14]:

$$v_i \leftarrow f(r_i(n)) \cdot v_i. \quad (12)$$

$$p_i \leftarrow f(r_i(n)) \cdot p_i. \quad (13)$$

计算神经元激活之前的能量:

$$r(P, V) = \alpha \left(\frac{v_b}{\|v_b\|} \cdot \frac{b}{\|b\|} \right) + \beta \left(\frac{v_t}{\|v_t\|} \cdot \frac{t}{\|t\|} \right). \quad (14)$$

其中, α, β 表示输入比重系数, 其和是 1.

2 实验部分

2.1 网络设计

- 1) 创建 DN 网络: 将训练图片输入到 X 层.
- 2) Y 层和 Z 层神经元个数是 36 个和 27 个.
- 3) 网络初始化: 权值连接全部初始化为 0, Y 层突触方差 σ 初始值定为 0.001 1, 即 $1/256$, 设置相似度门限值为 0.7.

- 4) 图库: 由密歇根州立大学人脸库与不同复杂背景合成, 共 324 副 (114×114). 训练集共 270 副头像, 27 个人每人 10 副; 测试集共 54 副, 每人 2 副.



图2 图库的合成

Fig.2 Synthesis of image database

2.2 实验过程

训练过程如图 3 所示.

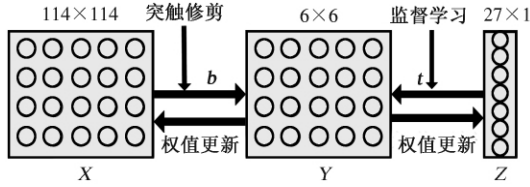


图3 训练过程示意图

Fig.3 The schematic of training

X 层向 Y 层输入为 b (114×114 , 自下而上输入), Z 层向 Y 的指定输入为 t (27×1 , 自上而下输入), 由式 (6)、(7)、(9)、(10)、(11) 得到突触因子 f , 然后根据式 (12)、(13) 对突触权值和输入向量进行突触修剪, 由公式 (14), 分别用 b 和 t 乘以 Y 中所有神经元的对应连接权值并相加, 得到 r (6×6), r 中响应值最大的对应神经元 j 激活, $r_j = 1$, 其余神经元值为 0. 更新神经元 j 对应的权值, 激活的神经元年龄值加 1.

测试过程如图 4 所示. 测试阶段网络被“冻结”, 只有 X 层向 Y 层的输入, 将响应向量 r 输入到 Z 层, 得到输出 r' (27×1), 激活神经元位置对应网络预测的结果, 与目标输出进行对比, 确定识别结果的对与否.

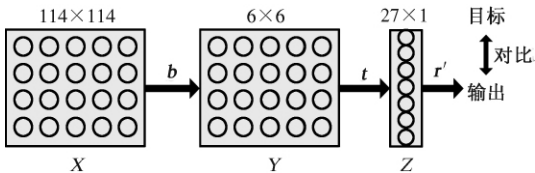


图4 测试示意图

Fig.4 The schematic of test

3 结果分析

3.1 实验结果

图 5 为突触因子 f 图, 从图 5 可以看出, 只有前 27 个神经元权值进行了修剪, 其中白色表示权值保留, 黑色为权值修剪, 其余 9 副白色图像表示相应神经元者激活年龄值未达到 n_0 或未激活.

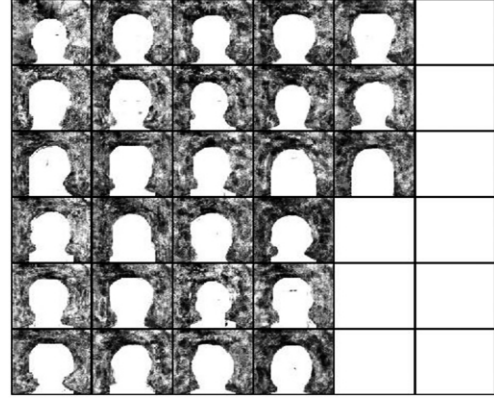


图5 突触因子 f

Fig.5 The synaptic factor f

图 6 是经过突触修剪后的 X 到 Y 的权值, 头像中复杂背景有了明显的弱化, 人脸部分则实现了保留.

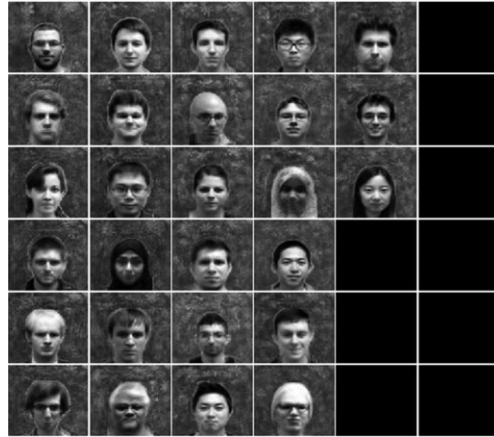


图6 突触修剪后 X 层到 Y 层的权值

Fig.6 Weights from X to Y after synapse trimming

表 1 和表 2 分别是不带与带突触维护时识别率对比. 由表 1 和表 2 可知, 加上突触维护的发育网络有更好的识别效果. 突触维护机制削弱了图像中不稳定信息, 即变化较大的背景部分, 而人脸得以保持, 这就减少了由于头像背景的变化造成的识别误差, 从而提高了识别率.

3.2 多种算法对比

利用和本文相同的训练集测试集 (每个人有 12 副不同的图片), 采用改进型反向传播 (back

propagation, BP) 神经网络和基于 PCA 的三阶近邻法以及基于鲁棒稀疏表示算法^[16]进行验证对比. 识别率情况如表 3~5 所示. 表 3 和表 5 中的 PCA 维数和特征维数是特征提取后特征向量的维数. 表 6 为不同方法识别率的比较.

表 1 不带突触维护 DN 识别率
Tab. 1 Recognition rate of DN without synapse maintenance

相似度 门限值	$\alpha = 0.5$ $\beta = 0.5$	$\alpha = 0.3$ $\beta = 0.7$	$\alpha = 0.7$ $\beta = 0.3$
0.7	0.870 4	0.870 4	0.770 4
0.8	0.759 3	0.870 4	0.703 7
0.9	0.703 7	0.740 7	0.703 7

表 2 带突触维护 DN 的识别率
Tab. 2 Recognition rate of DN with synapse maintenance

训练次数	识别率
1	0.870 4
2	0.888 9
3	0.902 4
4	0.925 9
5	0.944 4
6	0.963 0
7	0.963 0
8	0.963 0

表 3 PCA 维数与识别率的关系
Tab. 3 Relation ship between PCA dimension and recognition rate

PCA 维数	识别率
50	0.582 1
90	0.675 0
140	0.774 1
160	0.750 8
170	0.697 7

基于本文图库,人脸位于复杂背景中间,相比领域中热门的美国 Yale 人脸图库、英国 ORL(olivetti research laboratory)人脸图库更为复杂,以上 3 种传统流行方法提取的特征都含有较多的干扰背景,而稀疏表示算法因测试样本是训练样本的稀疏组合,所以训练样本中同一人不同背景造成的干扰导致识别率下降. 本研究中,基于突触维护的 DN 算法通过突触修剪削弱不断变化的背景,专注于人脸部分的检测,鲁棒性强,最高识别率能达到 96% 以上,其识别效果明显优于其他 4 种算法.

表 4 BP 网络训练迭代次数与识别率的关系
Tab. 4 Relation ship between BP training epoch and recognition rate

训练迭代次数	识别率
500	0.642 0
1 000	0.737 7
2 000	0.798 5
3 000	0.807 9
4 000	0.851 9

表 5 稀疏表示算法特征维数与识别率的关系
Tab. 5 Relation ship between feature dimension of sparse representation and recognition rate

特征维数	识别率
75	0.685 7
100	0.780 9
125	0.825 7
150	0.854 7
175	0.836 6

表 6 5 种方法识别率的比较
Tab. 6 Comparison of recognition rate for five methods

识别方法	识别率		
	平均值	最小值	最大值
PCA 三阶近邻法	0.695 9	0.582 1	0.774 1
BP 神经网络	0.759 9	0.642 0	0.851 9
鲁棒稀疏表示法	0.782 3	0.685 7	0.854 7
不带突触维护 DN	0.814 8	0.707 3	0.870 4
带突触维护 DN	0.925 9	0.870 4	0.963 0

4 结论

笔者模拟人类乙酰胆碱系统和去甲肾上腺素系统,提出带突触维护的 DN 算法,可以弱化复杂背景,专注于人脸部分识别. 对比结果表明, DN 网络中引入突触维护机制要比不加突触维护效果好,并且都优于 BP 网络算法、三阶近邻法以及鲁棒稀疏表示算法的识别. 本研究仍然存在图库的创建没有实现尺度无关性及头像与背景位置相对固定的问题,笔者将在未来的工作中继续研究.

参考文献:

- [1] 朱长仁. 复杂背景下的多姿态人脸识别技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学信息与通信工程, 2001.
- [2] 王波, 刘丰年, 陈迎娜. 复杂背景下人脸检测技术的研究[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2010, 18(3): 39-41.
- [3] 于威威, 滕晓龙, 刘重庆. 复杂背景下人眼定位及人

- 脸检测[J]. 计算机仿真, 2004(12): 185–187.
- [4] 田春娜. 复杂背景下多视角人脸检测与识别[D]. 西安: 西安电子科技大学智能信息处理, 2008.
- [5] 仲澄, 冯涛. 复杂背景下的人脸定位识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(1): 205–207.
- [6] 何露, 王贤明. 复杂背景下基于视频流的人脸检测技术研究[J]. 中国水运, 2010, 10(6): 80–82.
- [7] HUANG A M NMF face recognition method based on alpha divergence[C]//Proceedings of the international conference on information engineering and applications (IEA). London: Springer-Verlag, 2013: 26–28.
- [8] CHEN S, ZHANG T. A real-time face detection and recognition system for a mobile robot in a complex background[J]. Artificial life and robotics, 2010, 15(4): 439–443.
- [9] VAIDEHI V, FATHIMA A, TREESA T M. An efficient face detection and recognition system[J]. Lecture notes in engineering and computer science, 2011, 21(1): 499–503.
- [10] 王悦凯, 吴晓峰. 仿大脑视觉皮层的自主发育网络模型研究[D]. 上海: 复旦大学信息与科学工程学院, 2013.
- [11] WANG D S, ZHENG G P, LIU L. Developmental network and its application to face recognition [C]//Control & decision conference. Qingdao: IEEE Press, 2015: 3360–3365.
- [12] WENG J Y. Natural and Artificial intelligence, introduction to computation brain-mind [M]. Michigan: BMI Press, 2012.
- [13] BEAR M F, CONNORS B W, PARADISO M A. Neuroscience: Exploring the Brain [M]. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2007.
- [14] MCCANN C M, NGUYEN Q T, NETO H S, et al. Rapid synapse elimination after postsynaptic protein synthesis inhibition in vivo [J]. The journal of neuroscience, 2007, 27(22): 6064–6067.
- [15] YU A J, DAYAN P. Uncertainty neuronal-modulation and attention [J]. Neuron, 2005, 46(4): 681–692.
- [16] DU H S, ZHANG X D, HU Q P, et al. Sparse representation-based robust face recognition by graph regularized low-rank sparse representation recovery [J]. Neurocomputing, 2015, 164: 220–229.

Face Recognition with Complex Background Based on Developmental Network

WANG Dongshu, ZHENG Guangpu

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

Abstract: Aiming at the change of light, background and facial expressions in face recognition, this paper constructs a face database with complex background based on the face database of Michigan State University and applies the developmental network (DN) to the two-dimensional face recognition. The synapse maintenance mechanism is introduced to deal with the complex background, which can automatically determine the synapses' complete removal, partial removal or retention. Moreover, it can weaken the background, strengthen the face and consequently decrease the negative effects of the complex background. Compared with the test results of the traditional methods, DN with the synapse maintenance mechanism can recognize faces with complex background effectively and the recognition rate can reach above 96%.

Key words: developmental network; face recognition; complex background; synapse maintenance; recognition rate

电网规划的多层面协调性的综合评估方法研究

徐 敏¹, 沈靖蕾¹, 闫震山²

(1. 南昌大学 自动化系, 江西 南昌 330031; 2. 国网河南清丰县电业局, 河南 清丰 457300)

摘 要: 运用熵权法和 TOPSIS 法对电力系统规划中发电侧、输电侧、配电侧多层面的协调性评价问题进行了研究和分析, 建立了相应的评价模型, 对算例的规划方案协调性进行评价, 验证该评价模型的可行性和可靠性. 通过对算例的评价结果分析可知, 该规划方案如果在电网结构和新能源投资和合理利用方面, 以及在规划拓扑结构上进行改善, 协调性将会得到一定的改善.

关键词: 规划; 协调性; 熵权法; TOPSIS; 电力系统

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201410032

0 引言

自 2002 年以来, 电力行业为了破除电力体制下的政企不分、厂网不分, 在党中央、国务院的领导下进行了一系列的电力体制改革. 实行深化改革, 既能完善厂网分开, 又能保证厂、网、用户三方的协调. 因此, 笔者就协调性的评价做出了一些研究.

在对协调性进行综合评价之前, 首先要构建合适的评价指标体系; 之后需解决各指标的赋权问题; 最后选择合适的评价算法做出评价. 而关于评价指标权重的计算方法有很多种, 主要可分为: 主观赋权法, 包括层次分析法、专家咨询法等; 客观赋权法, 包括主成分分析法. 现有的综合评价算法包括层次分析法^[1]、模糊评价法^[2], 这两种方法现已大量的应用于电网规划方案当中, 例如, 文献[3]在电网规划的近期建设工程项目决策中应用了模糊多目标综合评判决策理论; 文献[4]在层次分析法与线性规划(linear programming, LP)的基础上提出了工程项目规划评价分析方法; 文献[5]结合层次分析法和区间线性递增效用函数提出了多属性分析评价方法; 文献[6]根据层次分析法确定多目标规划方案决策中各目标函数的权重, 在电网的无功规划中使用了此方法.

笔者通过对大量文献的阅读和研究, 发现现

有评价体系和方法的主要问题在于: ①没有体现全面贯彻落实科学发展观的中国科学技术发展的评价体系; ②在指标的赋权过程中受人为因素影响较大, 缺乏客观的赋权方法; ③评价算法不够简单明了.

为了解决上述问题, 笔者提出了基于熵权法和 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)法相结合的评价方法. 用此方法对电力系统规划中发电侧、输电侧、配电侧多层面协调性进行综合评估. 用熵权法客观赋权以及把经济学常用的 TOPSIS 综合评价法运用在电力系统评价中, 评价更加简单方便.

1 评价原理

1.1 评价指标的选取

影响电网发展协调性的因素分为两类: 一类是作为评估指标的影响因素; 另一类是部分评估指标的判定依据. 结合电网发展特点, 进行影响因素分析, 找出技术类指标、特性类指标和效应类指标的内在耦合关系, 形成指标体系^[7]. 笔者基于可靠性、安全性、经济性等各方面的考虑, 分为定性指标和定量指标. 定量指标的选取如下:

- 1) 可靠性指标的选取. ①发电容量充裕度; ②输变电容量利用率.
- 2) 安全性指标的选取. ①负载均衡度; ②系

收稿日期: 2014-09-27; 修订日期: 2014-11-14

基金项目: 江西省科技计划重点项目(2012BBE50049)

作者简介: 徐敏(1963—), 女, 浙江绍兴人, 南昌大学副教授, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: xumin-8660@163.com.

引用本文: 徐敏, 沈靖蕾, 闫震山. 电网规划的多层面协调性的综合评估方法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 24-28.

统均衡度。

3) 经济性指标的选取. ①供需均衡指数; ②发电侧市场力水平; ③可再生能源发电比。

在考虑可靠性、安全性及经济性的同时, 结合电网发展水平, 笔者拟将电源结构、电网结构及电价水平选取为定性指标。

为了全面贯彻落实以科学发展观为指导的中国科学技术发展的评价体系, 笔者不仅对发、输、配三侧的指标进行了分析, 还对指标就可靠性、安全性、经济性的关联度进行检验。基于这些指标建立的评估指标体系结构如图1所示。

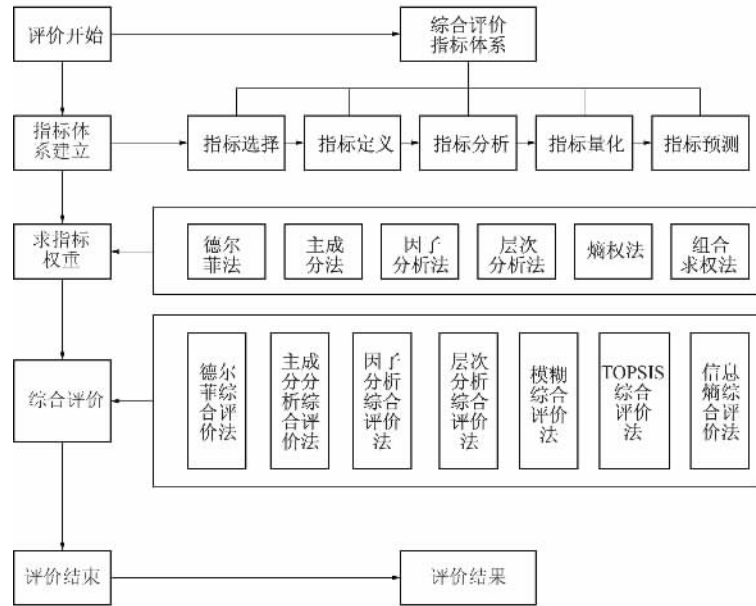


图1 指标评价体系

Fig. 1 Evaluation index system

1.2 评价原理

由于目前没有对电力系统规划协调性的大部分指标具有一个标准的或系统的规定, 所评价结果的合理性或成功程度就是一个相对模糊的概念, 所以笔者采用 TOPSIS 法对评价体系作进一步研究, 意在区分协调性的优劣, 而不在于将规划评价进行精确的等级划分。

1) 模型的建立. 设有 n 个评价对象, m 个评价指标, 形成原始数据矩阵:

$$X = \begin{matrix} \text{指标 } I_1 \\ \text{指标 } I_2 \\ \text{指标 } I_3 \\ \text{指标 } I_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{m1} & X_{m2} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix},$$

$$(i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n). \quad (1)$$

求出指标集 X 的权重 w_i , 则最后的评价结果采用逼近理想解法求出逼近系数, 逼近值越大评价结果越优。

2) 算法介绍. TOPSIS 法意为逼近于理想解的方法^[8-9]。其核心思想是定义决策问题的理想解与负理想解, 然后比较评价方案与理想解和负理

想解的距离远近, 最后计算各个方案与理想解的相对贴近度, 进行方案的优劣排序, 排前者优于排后者。理想解一般设想是最好的方案, 所对应的各个属性至少达到各个方案中的最好值。负理想解是设想最坏的方案, 对应的属性至少不好于各个方案中的最差值^[8]。

由于 TOPSIS 法也是客观评价法, 笔者拟将熵权赋权与多目标决策 TOPSIS 法相结合, 用以评价电力系统发、输、配多层面的协调性, 这在很大程度上避免了评价的主观性。

2 评价过程

笔者结合熵权法和 TOPSIS 法对规划方案的发、输、配多层面协调性进行评价, 并编程实现, 其程序流程如图2所示。

各框说明如下:

1) 指标量化. 评价指标分为定性指标和定量指标。笔者选择以下几个定性指标及定量指标。

定量指标选择的有: 容量裕度、备用裕度、输变电容量利用率、负载均衡度、供需均衡指数、发

电侧市场力水平和可再生能源发电比.

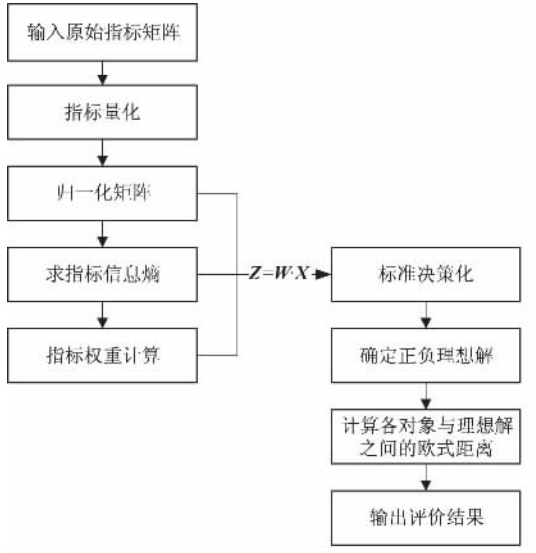


图2 程序流程图

Fig.2 The flow chart of program

定性指标笔者选择的有:电源结构、电网结构和电价水平.

2) 熵权的确定. 原始数据矩阵标准化: 由于参考评价的各项指标有越大越优型和越小越优型, 故需对矩阵(2)中的特征值进行归一化处理.

$$\begin{aligned} X'_{ij} &= X_{ij}/\max X_{ij}; \\ X'_{ij} &= \min X_{ij}/X_{ij}. \end{aligned} \quad (2)$$

其中, X'_{ij} 表示归一化数据, 上式分别为越大越优型和越小越优型指标归一化公式.

据此可得到归一化矩阵 X' :

$$X' = \begin{bmatrix} X'_{11} & X'_{12} & \cdots & X'_{1n} \\ X'_{21} & X'_{22} & \cdots & X'_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X'_{m1} & X'_{m2} & \cdots & X'_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

指标信息熵为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}, (i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n) \quad (4)$$

式中: $p_{ij} = X'_{ij} / \sum_{j=1}^n X'_{ij}$, 当 $p_{ij} = 0$ 时, $p_{ij} \ln p_{ij} = 0$;

$$k = 1/\ln n.$$

指标权重:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, 0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1. \quad (5)$$

根据信息论中熵值与熵权的定义及计算得出以下结论: 某项指标值的变动越明显, 其相应的熵值就越小, 则其熵权越大, 说明该指标隐含的信息

量越丰富; 反之, 若某指标提供的信息量有限, 其相应的权重就越小^[10]. 即熵权可以视为一个用于体现信息量的指标, 其包含的有价值的信息量与其数值正相关. 笔者利用熵权的概念计算各项影响指标的权重, 可以很大程度上避免主观判断的失误, 一切从客观实际出发, 最大程度反映各备选方案的实际情况, 为多指标方案评价及优选提供坚实的事实依据.

3) TOPSIS 综合评价法. ①构造加权标准化矩阵

$$Z = (z_{ij})_{m \times n}, \text{ 其中, } z_{ij} = w_i x_{ij}, i \in m, j \in n.$$

②定理想解 x^* 和负理想解 x^- , 定义两个方案(理想方案和负理想方案):

$$x_i^* = \max_j z_{ij} (i \in U_1); x_i^- = \min_j z_{ij} (i \in U_2). \quad (6)$$

$$x_i^- = \min_j z_{ij} (i \in U_1); x_i^+ = \max_j z_{ij} (i \in U_2). \quad (7)$$

式中: U_1 属于最理想型; U_2 属于最负理想型

③计算各方案分别与理想解和负理想解的欧氏距离 S_j^*, S_j^- :

$$S_j^* = \|z_j - x^*\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (z_{ij} - x_i^*)^2}. \quad (8)$$

$$S_j^- = \|z_j - x^-\| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (z_{ij} - x_i^-)^2}. \quad (9)$$

式中: $z_j = (z_{1j}, z_{2j}, \cdots, z_{mj})$, 是与指标 x_i 相应的加权标准化决策矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 的第 j 列.

④计算各方案与理想解的相对贴近度 $C_j = S_j^- / (S_j^* + S_j^-)$, 若 $x_j = x^+$, 则 $C_j = 1$; 若 $x_j = x^-$, 则 $C_j = 0$. 当 $C_j \rightarrow 1$ 时, 该指标越趋近于理想解.

3 算例分析

以江西某地区电网 2011—2013 期间规划和实际运行数据为基础进行统计分析、权重制定, 并通过笔者提出的协调性评价体系模型对该地区的电网规划的多层面协调性情况进行评价, 且定量分析协调性评价各因素的影响程度.

该地区 2011—2013 期间电网协调性评价指标相关数据如表 1 所示. 由熵权法求得权重如表 2 所示. 从权重计算结果显示可知: 电网结构中电源分布系数和系统供需均衡指数在评价结果中所占权重较大, 这说明其对电网规划的多层面的协调性的影响较大, 造成这种情况的原因可能是电源侧的投入较大. 而其他指标影响相对较小, 造成这种情况的原因可能是输电侧和配电侧的投入较小, 变化较少.

表 1 2011—2013 江西某地区规划指标数据
Tab. 1 Planning index data of Jiangxi area in 2011—2013

年份	容量裕度 /%	备用裕度 /%	220 kV 出线负载	110 kV 出线负载	220 kV 站间负载均衡度	110 kV 站间负载均衡度	35 kV 站间负载均衡度	220 kV 站内负载均衡度
2011	36.33	57.06	55.71	62.55	13.73	12.34	28.97	0.13
2012	32.14	47.36	54.61	60.15	13.42	11.5	27.56	0.12
2013	36.94	47.36	52.13	61.34	12.98	11.8	27.89	0.10
年份	110 kV 站 内负载均衡度	35 kV 站 内负载均衡度	电源分布系数	供需均衡指数	可再生能源发电比 /%	发电侧市场水平	输电容量综合利用率 /%	变电容量综合利用率 /%
2011	0.25	0.22	488	1.257	40.20	10 000	24.51	46.22
2012	0.2	0.31	632	1.179	44.29	9 000	25.20	46.97
2013	0.17	0.25	632	1.508	44.81	10 000	19.45	45.76

表 2 指标权重计算结果
Tab. 2 Calculation results of indexes weight

指标	容量裕度	备用裕度	输电容量综合利用率	变电容量综合利用率	220 kV 出线负载	110 kV 出线负载	220 kV 站间负载均衡度	110 kV 站间负载均衡度
权重	0.027 0	0.069 0	0.059 0	0.058 0	0.006 4	0.002 0	0.004 4	0.006 9
指标	35 kV 站 内负载均衡度	220 kV 站 内负载均衡度	110 kV 站 内负载均衡度	35 kV 站 内负载均衡度	电源分布系数	供需均衡指数	可再生能源发电比	发电侧市场水平
权重	0.003 6	0.101 0	0.105 0	0.097 0	0.230 0	0.155 0	0.040 0	0.040 0

基于 TOPSIS 法评价得分如表 3 所示。

表 3 评价结果
Tab. 3 The evaluation results

年份	评分
2011	0.62
2012	0.55
2013	0.43

由评价结果可知,2011—2013 年规划评分分别为 0.62、0.55、0.43,该系统协调性处于一般水平。结合权重结果分析,由于电源侧的投入较大,输配电侧的投入相对较小,系统供需不平衡,即供大于求,从而导致系统在发、输、配三方的不协调。若是在接下来的规划中,协调好系统的供需投入,以及改善规划的拓扑结构,电网的多层面协调性将会得到显著改善。

4 结论

笔者首先对电网多层面协调性的评价方法进行具体探讨,确立指标评价体系,然后结合熵权法确定其权重,运用 TOPSIS 综合评价法进行评价方法的研究,最后通过具体算例验证本评估算法的合理性和实用性。除此之外,通过该评价方法对规

划方案进行的定量化分析,不仅对于电网规划的多层面协调性评价有一定的应用价值,而且为未来电网规划提供了一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 李春祥,牛东晓,孟丽敏. 基于层次分析法和径向基函数神经网络的中长期负荷预测综合模型[J]. 电网技术,2009,33(2): 4-6.
- [2] 曹炳元. 应用模糊数学与系统[M]. 北京: 科学出版社,2005: 66-72.
- [3] 张文亮,周孝信,印永华,等. 华北-华中-华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16): 1-5
- [4] CARRERAS B A, NEWMAN D E, DOBSON I, et al. "Evidence for Self Organized Criticality in Electric Power System Blackouts" [C]//Hawaii international conference on system sciences. Maui Hawaii: IEEE Press, 2001.
- [5] 杨高峰,康重庆,谷兴凯,等. 电力市场中基于情景分析的电网规划方案适应性评价[J]. 电网技术,2006,30(14): 64-70.
- [6] 李晨光,郭剑波,张东霞. 国外电网规划可靠性准则综述[J]. 中国电力,2000,33(10): 28-30.
- [7] 刘敦楠,陈雪青,何光宇,等. 电力市场评价指标体系的原理和构建方法[J]. 电力系统自动化,2005,

- 29(23): 2-7.
- [8] 梁昌勇, 戚筱雯, 丁勇, 等. 一种基于 TOPSIS 的混合型多属性群决策方法 [J]. 中国管理科学, 2012, 20(4): 109-116.
- [9] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进 [J]. 数学的实践认识, 2002, 32(4): 572-575.
- [10] 尹鹏, 杨仁树, 丁日佳, 等. 基于熵权法的房地产项目建筑质量评价 [J]. 技术经济与管理研究, 2013(3): 3-7.

The Analysis of Comprehensive Assessment Method on Multi-section Coordination of Power Network Planning

XU Min¹, SHEN Jinglei¹, YAN Zhenshan²

(1. School of Electric Power System and Its Automation, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Cooperation of China in Qingfeng, qinfeng 457300, China)

Abstract: In this paper, Entropy Weights Method and TOPSIS method are used to study and analyze the evaluation of multi-section coordination level of the generation side, the transmission side, the distribution side in power system planning. We establish the corresponding evaluation model and evaluate the coordination level of planning examples to verify the feasibility and reliability of the evaluation model. We can learn from the analysis of the evaluation result that the plan need improve the grid structures, new energy investments and reasonable utilization, as well as topological structure. Then coordination will be improved to some extent.

Key words: planning; coordination; entropy method; TOPSIS; power system

(上接第 18 页)

- [11] SAAD S, ZELLOUMA L. Fuzzy controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power [J]. Electric power systems research, 2009, 79(13): 1337-1341.
- [12] 杨龙月, 刘建华, 王崇林. 有源电力滤波器精确反馈线性化准滑模变结构控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(33): 5868-5875.

Current Tracking Control of Three-level Active Power Filter Using Non-singular Terminal Sliding Mode Control Method

WANG Jie, HE Xiangdong, PENG Jinzhu

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

Abstract: To improve the performance of fast convergence and accuracy, a non-singular terminal sliding mode control method is presented for the three-level active power filter to track the command current. Non-singular terminal sliding mode control laws are designed to track the command currents of d 、 q axis so that the compensation currents can reach the command current in a finite time. The stability of the closed-loop system is also proven. The simulation results show that the harmonic current can be effectively suppressed by the proposed control strategy, and a better harmonic suppression performance can be achieved in comparison with the traditional triangular wave comparison control and common sliding mode control.

Key words: three-level active power filter; non-singular terminal sliding mode; current tracking; command current; compensation current

基于 LMD 法的电力系统暂态扰动检测技术研究

韩剑鹏, 鲁改凤, 曹文思

(华北水利水电大学 电力学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 为了实现电力系统暂态扰动信号的精确识别, 针对暂态扰动信号的非线性、不规则性和突变性特点, 采用局部均值分解 (local mean decomposition, LMD) 法检测电力系统暂态扰动; 并用 LMD 法分析了电压暂降、电压暂升、电压中断、振荡暂态、脉冲暂态、频率偏移、谐波加电压暂升信号以及某智能变电站采集的实际扰动信号等典型扰动; 同时与希尔伯特-黄变换 (HHT) 法的分析结果进行比较. 研究表明: 用 LMD 法检测电力系统的暂态扰动信号是有效的, 且在定位精度、运算速度方面比 HHT 法更具优越性.

关键词: LMD 法; 暂态扰动; 端点效应; 智能变电站; 电能质量检测; HHT

中图分类号: TM74

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201509013

0 引言

随着国民经济的高速发展, 电力系统出现了大量的具有非线性、不平衡负荷、冲击性特征的应用设备^[1-4], 同时, 电力系统发生的各种故障、开关操作、负荷波动和雷击等原因, 都会引起电能的暂态扰动^[5-7], 这些扰动足以危及调速电动机、整流装置以及其他灵敏设备的安全运行. 因此, 对暂态扰动信号分析是电力系统故障诊断及暂态保护的基础和依据^[7-8].

目前, 检测电能质量暂态扰动的方法有傅里叶变换、小波变换、S变换、希尔伯特-黄变换 (HHT) 等^[9-11]. 传统的傅里叶变换由于全局变换特性, 不能处理非线性、非平稳的信号, 且在处理谐波时还存在频谱泄漏和栅栏现象等缺点; 小波变换不是真正的自适应变换, 采用小波理论必须构造分频严格、能量集中的小波基函数, 无法保证最优的分解效果; S变换是对加窗傅里叶变换和连续小波变换思想的延伸或推广, 在S变换中, 窗函数是一个可随频率的变化而伸缩的高斯函数, S变换受噪音的影响较大; HHT算法易出现过包络、欠包络现象, 端点效应污染较大, 瞬时频率常出现难以解释的负值.

局部均值分解 (LMD) 法已成功应用于脑电信号的检测和机械故障诊断中^[11-12]. 文献 [13]

应用 LMD 法分析了电力系统中的谐波和间谐波扰动信号, 文献 [14] 分析了某些单一的暂态扰动信号, 但没有进一步分析暂态脉冲和频率偏移等暂态扰动及多扰动. 笔者把 LMD 法应用于电力系统暂态扰动信号的扰动时间、频率和幅值的检测, 通过仿真和实验对比分析, 能够精确定位扰动时刻、扰动幅值和扰动期间的频率, 且端点效应好、具有较快的运算速度, 并且其所求参数的精度高, 特别是求取的频率值始终是正值, 在稳态时几乎和理论值完全相等, 为电力系统暂态扰动信号检测提供了一种新的方法.

1 LMD 法

LMD 法的信号处理过程如下.

1) 对原始信号 $x(t)$ 确定信号中的所有局部极值点 n_i .

2) 计算任意两个相邻的局部极值点平均值

$m_i = \frac{1}{2}(n_i + n_{i+1})$ 和幅值包络估计值 $a_i = \frac{1}{2}|n_i + n_{i+1}|$, 用滑动平均法得到局部均值函数 $m_{11}(t)$ 和幅值包络估计函数 $a_{11}(t)$. 滑动平均处理计算公式为

$$y_s(i) = \frac{[y(i+n) + y(i+n-1) + \cdots + y(i-n)]}{2n+1} \quad (1)$$

收稿日期: 2015-09-07; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61201101)

通信作者: 鲁改凤 (1963—), 女, 河南宜阳人, 华北水利水电大学教授, 学士, 主要从事电气工程及其自动化研究, E-mail: 280624367@qq.com.

引用本文: 韩剑鹏, 鲁改凤, 曹文思. 基于 LMD 法的电力系统暂态扰动检测技术研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 29-33, 59.

式中: $2n+1$ 为滑动宽度, 当 $i < n$ 时, 应相应减小跨度, 以不超过序列端点为限.

3) 求得信号 $h_{11}(t)$,

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t). \quad (2)$$

4) 求得调频信号 $s_{11}(t)$,

$$s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)}. \quad (3)$$

判断 $s_{11}(t)$ 是否为一个纯调频信号, 判断条件是对 $s_{11}(t)$ 重复上述步骤, 得到 $s_{11}(t)$ 的幅值包络估计函数 $a_{12}(t)$, 若 $a_{12}(t) = 1$, 则说明 $s_{11}(t)$ 是一个纯调频信号, 否则 $s_{11}(t)$ 不是纯调频信号, 需重复上述迭代过程, 直至 $s_{11}(t)$ 为一个纯调频信号, 如下式所示:

$$\begin{cases} h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t); \\ h_{12}(t) = s_{11}(t) - m_{12}(t); \\ \vdots \\ h_{1n}(t) = s_{1(n-1)}(t) - m_{1n}(t). \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} s_{11}(t) = \frac{h_{11}(t)}{a_{11}(t)}; \\ s_{12}(t) = \frac{h_{12}(t)}{a_{12}(t)}; \\ \vdots \\ s_{1n}(t) = \frac{h_{1n}(t)}{a_{1n}(t)}. \end{cases} \quad (5)$$

迭代终止的条件为: $\lim_{n \rightarrow \infty} a_{1n}(t) = 1$. 为避免过多分解次数, 设一个迭代终止阈值 Δ , 当 $1 - \Delta \leq a_{1n}(t) \leq 1 + \Delta$ 时, 迭代终止;

5) 求得幅值包络信号 $a_1(t)$, 即瞬时幅值函数:

$$a_1(t) = a_{11}(t) a_{12}(t), \dots, a_{1n}(t) = \prod_{k=1}^n a_{1k}(t). \quad (6)$$

6) 将得到的幅值包络信号 $a_1(t)$ 与纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 做乘积, 得到原始信号 $x(t)$ 的第一个乘积函数分量为

$$PF_1(t) = a_1(t) s_{1n}(t). \quad (7)$$

该函数分量包含了原始信号中最高频率信号的所有瞬时幅值与瞬时频率, 其瞬时频率函数 $f_1(t)$ 可由纯调频信号 $s_{1n}(t)$ 求出, 即

$$f_1(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d[\arccos(s_{1n}(t))]}{dt}. \quad (8)$$

7) 原始信号 $x(t)$ 分离出第一个乘积函数分量后得到剩余信号 $u_1(t)$, 将 $u_1(t)$ 作为新的原始信号重复以上步骤, 循环 k 次, 直到 $u_k(t)$ 为单调函数为止, 计算过程为

$$\begin{cases} u_1(t) = x(t) - PF_1(t); \\ u_2(t) = u_1(t) - PF_2(t); \\ \vdots \\ u_k(t) = u_{k-1}(t) - PF_k(t). \end{cases} \quad (9)$$

原始信号可以由 $u_k(t)$ 和所有乘积函数分量得到, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^k PF_i(t) + u_k(t). \quad (10)$$

2 电能质量扰动数学模型

在理想情况下, 公用电网应当以恒定频率、正弦波形和标准电压为用户提供稳定可靠的电能服务. 在三相交流系统中, 还要求各相电压和电流的幅值大小相等、相位对称且互差 120° , 但是由于非线性负荷、冲击负荷、敏感设备使用、外来干扰和各种故障等因素的存在, 会引起电能的暂态扰动, 从而导致上述理想的电能状态不能在实际中存在.

暂态扰动主要包括电压暂升、电压暂降、电压中断、暂态振荡、暂态脉冲、频率偏移等. 以 IEEE 1159—2009 标准为基础, 将信号归一化处理后的暂态扰动信号数学模型如表 1 所示. 表 1 中的标准信号为正弦曲线, 其余为 6 种典型暂态扰动信号的数学模型, 其中 $\varepsilon(t)$ 代表单位阶跃函数, t_1 和 t_2 分别代表扰动信号的起始时间和终止时间, α 代表扰动幅度, β 代表频率系数, c 代表暂态振荡衰减系数. 下一节我们将采用 LMD 法分解这 6 类典型的扰动信号.

表 1 扰动信号模型

Tab. 1 Disturbance signal mode

扰动类型	数学模型及参数
标准信号	$x(t) = \sin \omega t$ $\omega = 2\pi f, f = 50 \text{ Hz}$
电压暂升	$x(t) = \{1 + \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]\} \sin \omega t$ $0.1 \leq \alpha \leq 0.8, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
电压暂降	$x(t) = \{1 - \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]\} \sin \omega t$ $0.1 \leq \alpha \leq 0.9, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
电压中断	$x(t) = \{1 - \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]\} \sin \omega t$ $0.9 \leq \alpha \leq 1.0, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
暂态振荡	$x(t) = \sin \omega t +$ $\alpha \cdot e^{-c(t-t_1)} \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)] \cdot \sin \beta \omega t$ $0.2 \leq \alpha \leq 0.8, 10 \leq c \leq 20$ $6 \leq \beta \leq 18, 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$
暂态脉冲	$x(t) = \sin \omega t + \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$ $1.0 \leq \alpha \leq 3.0, 0.05T \leq t_2 - t_1 \leq 0.15T$
频率偏移	$x(t) = \sin \omega_s t + \alpha \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$ $\omega_s = 2\pi f_s, f_s$ 为偏移频率

3 暂态扰动信号的检测与分析

3.1 基于 LMD 法的暂态扰动信号检测

本算法采用符合智能变电站要求的频率 4 000 Hz,即每周波采样 80 点. 每组仿真数据均截取 960 个采样点进行分析. 对 6 种暂态扰动信号进行检测,生成扰动信号的数学模型如表 2 所示,其中 $T=0.02$.

单一扰动信号经过 LMD 法分解,得到图 1 ~ 6 的计算结果,其中每组图分别为原始暂态扰动信号波形图、幅值函数曲线图和分解频率曲线图.

表 2 单一暂态扰动仿真信号模型

Tab. 2 Transient disturbance signal simulation model

扰动类型	数学模型
电压暂升	$x(t) = \{1 + 0.45 [\varepsilon(9.5T) - \varepsilon(4.5T)]\} \sin \omega t$
电压暂降	$x(t) = \{1 - 0.55 [\varepsilon(8.53T) - \varepsilon(4.01T)]\} \sin \omega t$
电压中断	$x(t) = \{1 - 0.92 [\varepsilon(7.0T) - \varepsilon(3.97T)]\} \sin \omega t$
暂态振荡	$x(t) = \sin \omega t + 0.8e^{-20(t-t_1)} [\varepsilon(7.25) - \varepsilon(6.25)] \cdot \sin(10\omega t)$
暂态脉冲	$x(t) = \sin \omega t + 1.7 \times [\varepsilon(6.25T) - \varepsilon(6.12T)]$
频率偏移	$x(t) = \begin{cases} \sin \omega t, & t < 4T, \quad t > 8T \\ \sin \omega_s t, & 4 \leq t \leq 8T, \quad \omega_s = 50.5 \text{ Hz} \end{cases}$

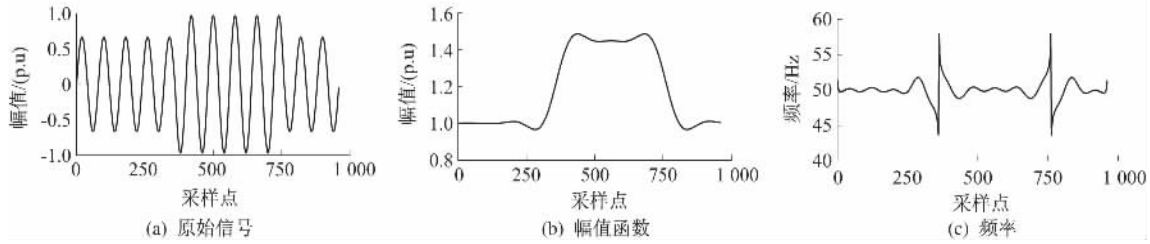


图 1 电压暂升信号检测对比分析图

Fig. 1 Voltage swell signal detection

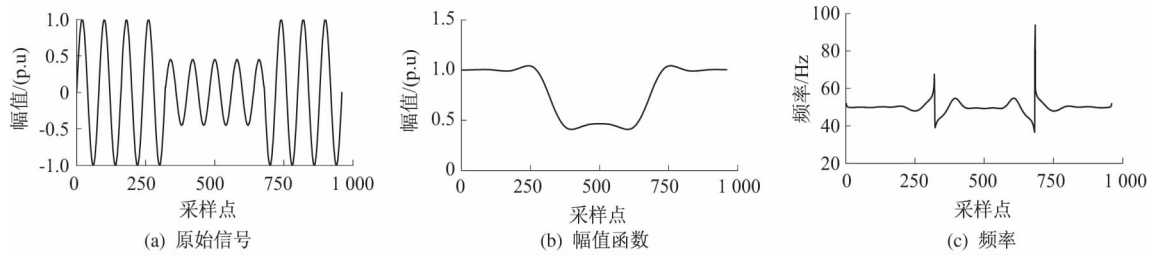


图 2 电压暂降信号检测对比分析图

Fig. 2 Voltage sag signal detection

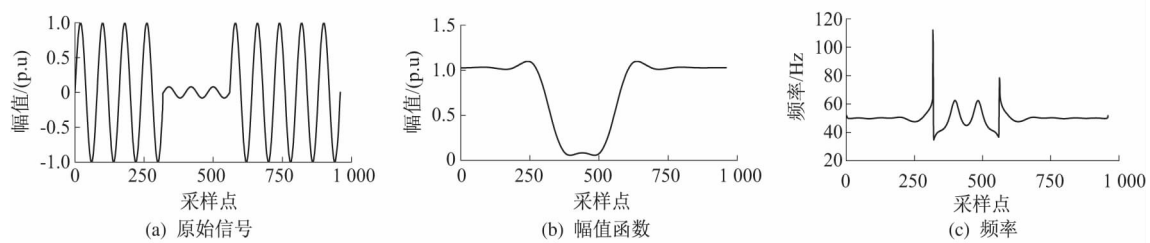


图 3 电压中断信号检测对比分析图

Fig. 3 Voltage interruption signal detection

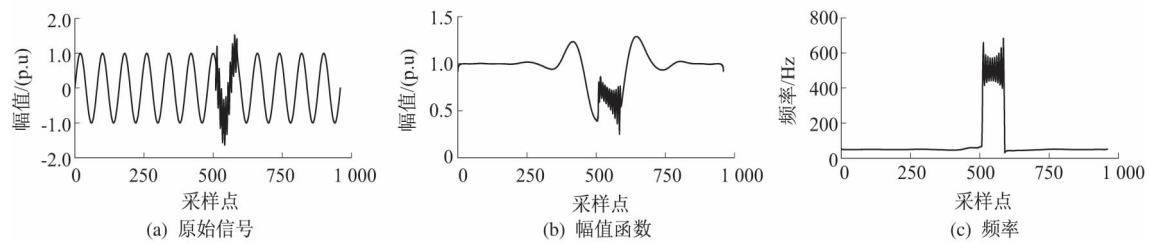


图 4 暂态振荡信号检测对比分析图

Fig. 4 Transient oscillation signal detection

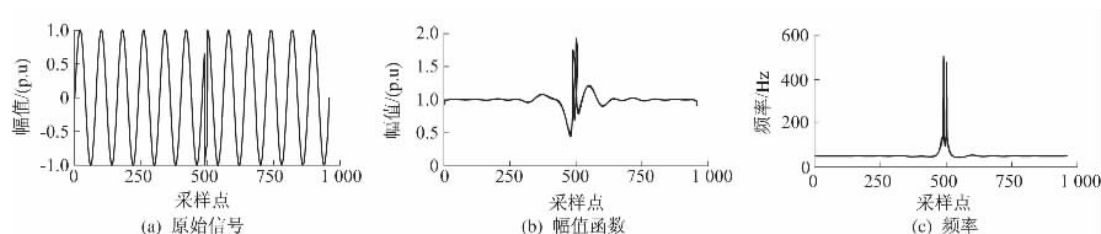


图5 暂态脉冲信号检测对比分析图

Fig.5 Transient pulses signal detection

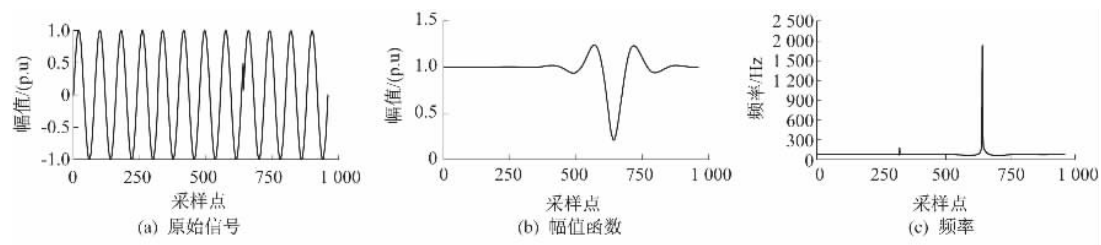


图6 频率偏移信号检测对比分析图

Fig.6 Frequency fluctuation signal detection

瞬时频率曲线中除端点外的两个最大值点为扰动起止时间. 分别对瞬时幅值曲线与瞬时频率曲线扰动时间内所有采样点对应值进行最小二乘拟合处理后, 得到的稳态区间值即为检测结果中扰动幅值及频率值. 基于 LMD 法的暂态扰动检测结果汇总如表 3 所示.

3.2 LMD 和 HHT 法暂态扰动信号检测对比分析

以谐波加电压暂降扰动信号(式(11))为例, 分别采用 LMD 法、HHT 法对扰动信号进行检测, 可得瞬时幅值、频率曲线如图 7 所示.

$$x(t) = \{1 - 0.67[\varepsilon(9.66T) - \varepsilon(6.25T)]\} \cdot [\sin \omega t + 0.18 \sin(3\omega t) + 0.11 \sin(7\omega t)]. \quad (11)$$

表3 基于 LMD 法的暂态扰动检测结果

Tab.3 Detection results Using LMD algorithm

扰动类型	扰动起始时间			扰动终止时间			扰动幅度			频率		
	理论值/s	测量值/s	误差/%	实际值/s	测量值/s	误差/%	实际值/%	测量值/%	误差/%	实际值/Hz	测量值/Hz	误差/Hz
暂升	0.090	0.090	0.00	0.190	0.191	0.53	0.45	0.449	0.22	—	—	—
暂降	0.080	0.080	0.00	0.171	0.171	0.00	0.55	0.551	0.18	—	—	—
中断	0.079	0.080	0.13	0.140	0.141	0.71	0.92	0.921	0.11	—	—	—
振荡暂态	0.125	0.126	1.27	0.145	0.146	0.69	0.80	0.764	4.50	500.0	506.6	1.31
脉冲暂态	0.122	0.123	0.82	0.125	0.126	0.80	1.70	1.840	8.20	—	—	—
频率偏移	0.080	0.080	0.00	0.160	0.160	0.00	—	—	—	50.5	50.9	0.79

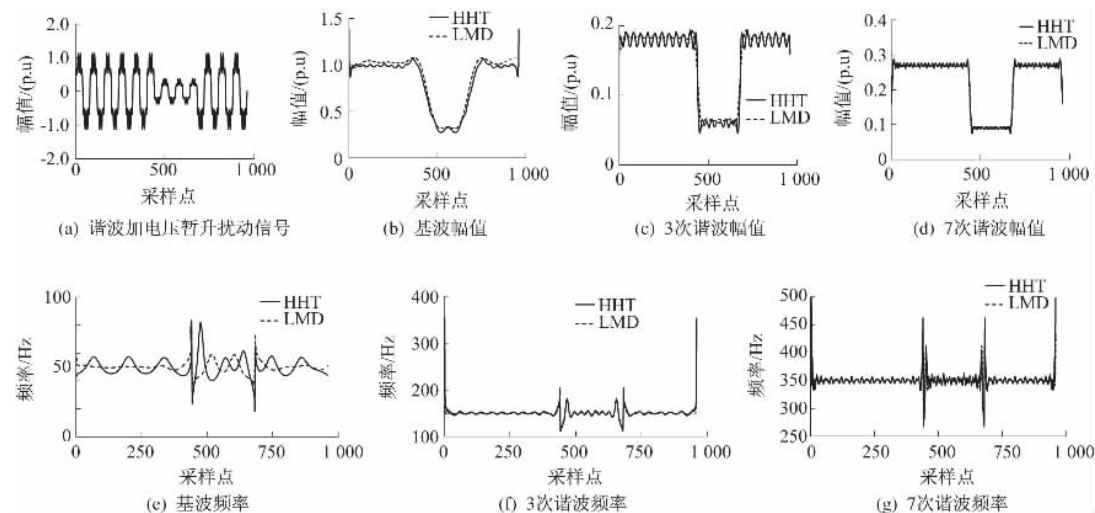


图7 两种检测方法的谐波信号瞬时幅值、频率曲线图

Fig.7 Instantaneous amplitude and frequency curve using LMD algorithm and HHT algorithm

由图 7(b) ~ 图 7(d) 幅值函数可以发现, LMD 法的端点效果明显优于 HHT 法, 在 0.11 s 扰动发生时刻, 电压幅值为 0.825 5 p. u, 在 0.19 s 扰动恢复时刻, 电压幅值为 0.825 5 p. u. 从图 7(e) ~ 图 7(g) 可知, 分析瞬时电压骤降信号时, HHT 法虽然可以根据频率突变点确定扰动发生时

刻, 但 LMD 方法得到的瞬时扰动频率明显比 HHT 法更精确, 而且整个数据序列受端点效应的影响更小.

4 实验验证

笔者对某智能变电站采集的实测数据进行检测与识别处理后得到的分析结果如图 8 所示.

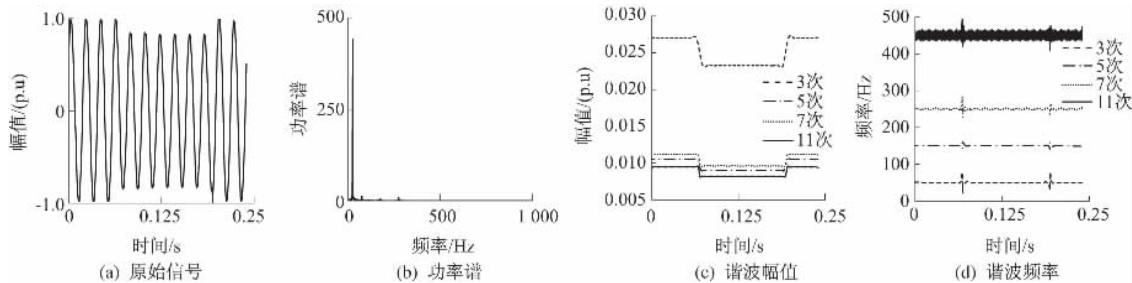


图 8 实测数据分析结果

Fig. 8 Detection results of actual data

从检测结果可知, 电压信号中所含扰动类型为谐波加电压暂降, 其中归一化后得到的电压暂降幅度为 0.141 9 p. u, 起止时间分别为 0.068 s 和 0.194 s, 各次谐波含有率如表 4 所示.

表 4 实测数据中谐波含量

Tab. 4 Harmonic content of measured data

谐波电压次数	各次谐波电压 含有率/%	总谐波电压 畸变率/%
3 次	2.67	3.22
5 次	1.05	
7 次	1.12	
11 次	0.95	

5 结论

根据 LMD 法获得的瞬时幅值函数可以精确定位扰动时刻、扰动幅值和扰动期间的频率, 分析的效果优于 HHT 法; LMD 法的端点效应明显比 HHT 法好, “筛分”次数较少, 向内污染数据的程度较轻, 所求的参数在稳态时基本不变化, 不需要进行数据拟合, 而且所求参数的精度高, 特别是求取的频率值始终是正值, 在稳态时几乎和理论值完全相等; LMD 法不需积分运算, 具有较快的运算速度.

参考文献:

- [1] 张瑞金, 汪爱娟. 基于改进的小波核主元分析故障检测[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1): 97-100.
- [2] 廖晓辉, 梁恒娜, 丁倩. 基于小波变换的电力电缆故障测距研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 6-9.
- [3] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降

扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34, 109.

- [4] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1-6.
- [5] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.
- [6] 李天云, 赵妍, 李楠. 基于 HHT 的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 52-56.
- [7] BOLLEN M. Time-frequency and time-scale domain analysis of voltage disturbances[J]. IEEE Transactions on power delivery, 2000, 15(4): 1279-1284.
- [8] JOSE M, HARLEY R, HABELTER G. Sensorless speed measurement of AC machines using analytic wavelet transform[J]. IEEE Transactions on industry applications, 2001, 38(5): 40-46.
- [9] 周林, 吴红春, 孟婧, 等. 电压暂降分析方法研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1010-1016.
- [10] PARK C, LOONEY D, HULLE V. The complex local mean decomposition[J]. Neurocomputing, 2011, 74(6): 867-875.
- [11] 程军圣, 张亢, 杨宇. 局部均值分解方法在调制信号处理中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 362-367.
- [12] 张杨, 刘志刚. EEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 86-91.
- [13] 黄传金, 曹文思. 局部均值分解在电力系统间谐波和谐波失真信号检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 68-81.
- [14] 宋海军, 黄传金. 基于改进 LMD 的电能质量扰动检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1700-1708.

(下转第 59 页)

文章编号: 1671-6833(2016)01-0034-06

多指标约束下齿轮传动机构模糊可靠性优化设计

胡启国, 谢国宾, 罗天洪, 庾 奎

(重庆交通大学 机电与汽车工程学院, 重庆 400074)

摘 要: 针对齿轮传动的优化设计问题, 以模糊数学为基础, 运用可靠性优化设计理论, 将膜厚比、临界转速比纳入约束条件, 考虑齿轮应力及强度的概率分布, 建立了泥浆泵齿轮传动机构的模糊可靠性优化设计数学模型, 并通过运用 Matlab 遗传算法工具箱编程求解, 得出全局最优解。结果显示, 齿轮传动的综合性能得到有效改善, 并证明了优化方法的正确性与合理性, 为齿轮传动优化设计提供了新的参考。

关键词: 齿轮传动; 多指标约束; 模糊可靠性; 优化设计

中图分类号: TH132.41

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504038

0 引言

随着齿轮传动机构的广泛应用, 齿轮的润滑问题也日益引起人们的关注。美国齿轮制造者协会(AGMA)曾建议把弹流油膜厚度计算作为齿轮设计的一个重要部分^[1]。也正因如此, 润滑膜厚度被认为是齿轮传动设计评价的指标之一^[2], 所以, 为提高齿轮传动的抗胶合能力和润滑性能, 将膜厚比作为约束条件是有必要的。

基于振动理论, 齿轮动力学中提出了关于临界转速比的计算公式, 可以将此公式直接引入到优化设计约束条件中, 这样, 所建立的静态优化数学模型就隐含了一些动态性能指标^[3]。

在机械设计领域中出现的众多现代设计方法中, 可靠性优化设计方法的发展给整个机械设计学科带来了深刻的影响, 该方法的应用取得了良好的效果^[4-6]。根据国内外对齿轮的相关实验结果及对齿面强度和应力的研究分析^[7-8], 笔者将圆柱齿轮应力及强度按对数正态分布计算, 弧线圆锥齿轮应力及强度按正态分布计算。

笔者以泥浆泵齿轮传动机构设计为例, 在静态优化设计中引入部分动态性能指标, 同时考虑润滑油膜厚度的影响, 针对存在的模糊因素, 运用

模糊可靠性优化理论, 以寻求最优的设计参数为宗旨, 建立单目标模糊可靠性优化设计数学模型。

1 可靠性优化设计建模

1.1 建立目标函数

泥浆泵齿轮传动机构的结构示意图如图1所示。第一级传动为弧线圆锥齿轮副, 两齿轮轴轴交角 $\Sigma = 90^\circ$; 第二级传动为斜齿圆柱齿轮副; 第三级传动为直齿圆柱齿轮副。

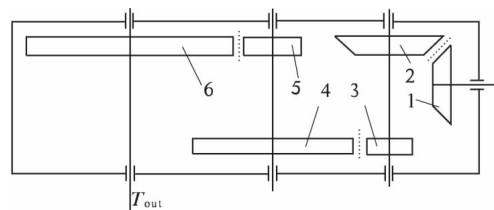


图1 泥浆泵齿轮传动系统结构简图

Fig.1 The structure diagram of mud pump gear transmission system

为使整个系统重量较轻, 达到齿轮传动结构最紧凑的目的, 应使齿轮传动机构的总体积最小。笔者以6个齿轮的体积之和最小作为优化模型的目标函数。

根据圆锥齿轮副的正确啮合条件及各参数之间的计算关系, 并以 m_1 、 β_1 、 Z_1 、 i_1 、 φ_R 分别代表圆

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375519); 重庆交通大学研究生创新基金资助项目(20130109)

作者简介: 胡启国(1968—), 男, 重庆人, 重庆交通大学教授, 博士, 主要从事机械可靠性及机械系统动力学的研究, E-mail: swpihqg@126.com.

引用本文: 胡启国, 谢国宾, 罗天洪, 等. 多指标约束下齿轮传动机构模糊可靠性优化设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 34-39.

锥齿轮大端模数、名义螺旋角、小锥齿轮齿数、传动比和齿宽系数,可得圆锥齿轮副的体积为

$$V_1 = \frac{\frac{\pi}{8} m_1^3 Z_1 \sqrt{1+i_1^2} \varphi_R \left(1 - \varphi_R + \frac{\varphi_R^2}{3}\right) (Z_1^2 \cos \delta_1 + Z_2^2 \cos \delta_2)}{\cos(0.5\beta_1)} = \frac{\frac{\pi}{8} m_1^3 Z_1^3 \varphi_R \left(1 - \varphi_R + \frac{\varphi_R^2}{3}\right) (i_1 + i_1^2)}{\cos(0.5\beta_1)}. \quad (1)$$

式中: δ_1 、 δ_2 分别为两锥齿轮的节锥角; $\cos(0.5\beta_1)$ 是考虑到该齿轮为弧线锥齿轮而引入的,加入此项,使螺旋角 β_1 对目标函数有所影响,能满足优化计算的需要。

两对圆柱齿轮副的体积以齿轮的分度圆圆柱的体积作近似,则两对圆柱齿轮的体积为

$$V_2 = b_2 \pi \left(\frac{m_{n2}}{2 \cos \beta_2} \right)^2 (Z_3^2 + Z_4^2) + b_3 \pi \left(\frac{m_3}{2} \right)^2 (Z_5^2 + Z_6^2) = \frac{\pi \varphi_{d2} (1 + i_2^2) \left(\frac{m_{n2} Z_3}{\cos \beta_2} \right)^3}{4} + \frac{\pi \varphi_{d3} (m_3 Z_5)^3 (1 + i_3^2)}{4}. \quad (2)$$

式中: φ_{d2} 、 φ_{d3} 分别为第二、三级传动中齿轮副的齿宽系数; i_2 、 i_3 分别为第二、三级传动的传动比; Z_3 、 Z_4 、 Z_5 、 Z_6 分别为第 3、4、5、6 号齿轮的齿数; m_{n2} 为第二级传动中齿轮副的法面模数; m_3 为第三级传动中齿轮副的模数; β_2 为第二级传动中齿轮副的螺旋角。

由式(1)、(2)可得该齿轮传动机构的总体积,即模糊可靠性优化设计的目标函数为:

$$f(X) = \frac{\frac{\pi}{8} m_1^3 Z_1^3 \varphi_R \left(1 - \varphi_R + \frac{\varphi_R^2}{3}\right) (i_1 + i_1^2)}{\cos(0.5\beta_1)} + \frac{\pi \varphi_{d2} (1 + i_2^2) \left(\frac{m_{n2} Z_3}{\cos \beta_2} \right)^3}{4} + \frac{\pi \varphi_{d3} (m_3 Z_5)^3 \left(1 + \left(\frac{i}{i_1 i_2}\right)^2\right)}{4}. \quad (3)$$

1.2 确定设计变量

设计变量的选取应结合目标函数,同时必须考察这种参数是否能够控制,变量之间是否相互独立。

由式(3)可知,式中所包含的参数都能对齿轮的体积造成影响,且均为锥齿轮或圆柱齿轮的设计参数,相互独立,故取设计变量为:

$$X = [i_1, m_1, Z_1, \varphi_R, \beta_1, \varphi_{d2}, m_{n2}, Z_3, i_2, \beta_2, \varphi_{d3}, m_3, Z_5]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}]^T.$$

1.3 建立约束条件

1.3.1 接触疲劳强度和弯曲疲劳强度可靠度约束

根据设计要求,接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的可靠度需不小于 0.999,即:

$$[R_H] - R_H \leq 0. \quad (4a)$$

$$[R_F] - R_F \leq 0. \quad (4b)$$

由应力-强度正态分布的干涉模型可知,可靠度 R 与可靠度系数 Z_R 有一一对应的关系,故式(4)亦可表示为:

$$Z_{[R_H]} - Z_{R_H} \leq 0. \quad (5a)$$

$$Z_{[R_F]} - Z_{R_F} \leq 0. \quad (5b)$$

式中: $Z_{[R_H]}$ 和 $Z_{[R_F]}$ 的值分别由给定的可靠度指标 $[R_H]$ 和 $[R_F]$ 的值查正态分布表得到. 可靠度系数可根据齿轮接触疲劳强度的可靠性理论计算得到。

根据应力及强度分布规律,可分别得出圆锥齿轮副接触疲劳强度和弯曲疲劳强度可靠度系数:

$$Z_{R_H} = \frac{\overline{\sigma'_{Hlim}} - \overline{\sigma_H}}{\sqrt{S_{\sigma'_{Hlim}}^2 + S_{\sigma_H}^2}}. \quad (6a)$$

$$Z_{R_F} = \frac{\overline{\sigma'_{Flim}} - \overline{\sigma_F}}{\sqrt{S_{\sigma'_{Flim}}^2 + S_{\sigma_F}^2}}. \quad (6b)$$

圆柱齿轮副接触疲劳强度和弯曲疲劳强度可靠度系数:

$$Z_{R_H} = \frac{\ln(\overline{\sigma'_{Hlim}}/\overline{\sigma_H})}{\sqrt{C_{\sigma'_{Hlim}}^2 + C_{\sigma_H}^2}}. \quad (7a)$$

$$Z_{R_F} = \frac{\ln(\overline{\sigma'_{Flim}}/\overline{\sigma_F})}{\sqrt{C_{\sigma'_{Flim}}^2 + C_{\sigma_F}^2}}. \quad (7b)$$

式中: $\overline{\sigma'_{Hlim}}$ 和 $\overline{\sigma'_{Flim}}$ 分别为齿轮的接触疲劳强度和弯曲疲劳强度的均值; $S_{\sigma'_{Hlim}}$ 和 $S_{\sigma'_{Flim}}$ 分别为其对应的标准差; $C_{\sigma'_{Hlim}}$ 和 $C_{\sigma'_{Flim}}$ 分别为其对应的变异系数; $\overline{\sigma_H}$ 和 $\overline{\sigma_F}$ 分别为齿轮的接触应力和弯曲应力的均值; S_{σ_H} 和 S_{σ_F} 分别为其对应的标准差; C_{σ_H} 和 C_{σ_F} 分别为其对应变异系数。

1.3.2 齿轮传动节点处膜厚比约束

研究表明,基于 Dowson-Higginson 公式计算的油膜厚度的结果同实验测量值非常接近^[1]. 根据 Dowson-Higginson 公式,线接触问题的最小油膜厚度 h_{min} 为

$$h_{min} = 2.65 \alpha^{0.54} (\eta_o U)^{0.7} R^{0.48} E^{-0.03} (F/L)^{-0.13}. \quad (8)$$

式中: α 为润滑油黏压系数, m^2/N ; η_o 为润滑油常

压下的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; U 为接触点处润滑油卷吸速度, m/s ; E' 为当量弹性模量, N/m^2 ; R 为齿轮啮合点的当量曲率半径, m ; F/L 为单位接触宽度上的载荷, N/m . 查阅参考文献 [9] 可得式 (8) 中参量的计算方法.

根据摩擦学知识, 可以用膜厚比 λ 来大致估计两滑动表面所处的摩擦(润滑)状况, 其大小不仅取决于最小油膜厚度, 还与滑动表面的形貌轮廓有关, 膜厚比公式为

$$\lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{(R_{q1}^2 + R_{q2}^2)}}. \quad (9)$$

式中: R_{q1} 、 R_{q2} 分别为两接触齿面形貌轮廓的均方根偏差, μm . 润滑理论方面的专家 Akbarzadeh 曾指出: 当 λ 介于 1 和 3 之间时, 两齿面处于混合摩擦(润滑)状态, 齿面间磨损缓慢; 当 λ 大于 3 时, 两齿面处于流体摩擦(润滑)状态, 为理想状态, 齿面通常不会发生磨损和胶合^[10]. Nogueira 在分析齿轮损伤与油膜参数的关系时, 发现当 λ 大于 1.5 时, 齿轮处于正常工作状态(非边界润滑状态)^[11]. 结合齿轮传动系统工作的实际情况, 取膜厚比 $1.5 < \lambda < 3.0$, 则齿轮传动节点处膜厚比约束为

$$1.5 \leq \frac{h_{\min}}{\sqrt{(R_{q1}^2 + R_{q2}^2)}} \leq 3. \quad (10)$$

1.3.3 动态性能约束

对于大多数工业齿轮, 都是工作在亚临界区. 国标中规定, 当临界转速比 $N \leq 0.85$ 时, 定义为亚临界区. 故得到临界转速比的约束条件为

$$N - N_c \leq 0. \quad (11)$$

式中: N_c 为允许临界转速比, $N_c = 0.85$; N 为临界转速比, $N = n_1/n_{E1}$, n_1 代表小齿轮转速, n_{E1} 表示临界转速.

1.3.4 设计变量的边界约束条件

(1) 齿轮模数的约束.

圆柱齿轮: $2.5 \leq m_{n2} \leq 20$; $2.5 \leq m_3 \leq 20$.

弧齿锥齿轮: $2 \leq m_1 \leq 16$.

考虑到齿轮传动机构随着速度的降低, 各级齿轮所受圆周力将逐级增大的特性, 同时结合设计经验, 应使各级模数符合递增的原则, 所以有:

$$m_1 - m_{n2} \leq 0, m_{n2} - m_3 \leq 0.$$

(2) 小齿轮齿数的约束.

圆柱齿轮: $14 \leq Z_3 \leq 20$; $17 \leq Z_5 \leq 20$.

弧齿锥齿轮: $15 \leq Z_1 \leq 20$.

(3) 螺旋角的约束.

斜齿圆柱齿轮: $8^\circ \leq \beta_2 \leq 20^\circ$.

弧齿圆锥齿轮: $25^\circ \leq \beta_1 \leq 35^\circ$.

(4) 传动比的约束.

$1.2i_2 \leq i_1 \leq 1.5i_2$; $1.2i_3 \leq i_2 \leq 1.5i_3$.

(5) 齿宽系数的约束.

圆柱齿轮: $0.7 \leq \varphi_{d2} \leq 1.15$; $0.7 \leq \varphi_{d3} \leq 1.15$.

弧齿锥齿轮: $0.25 \leq \varphi_R \leq 0.35$.

1.3.5 结构约束条件

为避免齿轮 5 与锥齿轮 2 发生碰撞, 取最小间隙 $\Delta = 5 \text{ mm}$, 得到:

$$a_{34} - 0.5(d_{a5} + d_{a2}) \geq 5. \quad (12)$$

式中: d_{a2} 为齿轮 2 的大端直径; d_{a5} 为齿轮 5 的齿顶圆直径; a_{34} 为齿轮 3 和 4 的中心距.

2 模糊约束条件转化为普通约束

2.1 模糊约束的转换

模糊优化问题的求解需要将模糊优化模型转化为常规优化模型, 其转化以隶属函数为基础. 对模糊约束边界通过引进扩增系数 β (包括上、下扩增系数 $\bar{\beta}$ 和 $\underline{\beta}$) 来确定过渡区间上下界, 如: $\underline{x} \leq \bar{x}$, 取 $\bar{x}^l = \bar{x}^u$, $\bar{x}^u = \bar{\beta} \times \bar{x}$, $\underline{x}^u = \underline{x}$, $\underline{x}^l = \underline{\beta} \times \underline{x}$, 通常, $\bar{\beta} = 1.05 \sim 1.30$, $\underline{\beta} = 0.70 \sim 0.95$. 这样所有隶属函数的表达式可写作:

$$\begin{cases} \bar{x} = \bar{x}^l + \lambda^* (\bar{x}^u - \bar{x}^l); \\ \underline{x} = \underline{x}^u - \lambda^* (\underline{x}^u - \underline{x}^l). \end{cases} \quad (13)$$

式中: λ^* 表示最优水平截集值, 可以运用模糊综合评判法求出其值.

对设计变量的边界约束和膜厚比约束, 采用线性隶属函数中的对称梯形分布; 对结构约束、可靠度约束, 采用升半梯形分布; 对动态性能约束, 采用降半梯形分布.

2.2 最优水平截集值的求解

2.2.1 因素集的建立

针对泥浆泵齿轮传动系统, 找出对其性能的主要影响因素, 按每一因素影响的不同分为 5 个等级如表 1 所示, 因素集为:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_6).$$

表 1 λ^* 值的影响因素、因素等级及隶属度
Tab.1 Affect faces, grade of faces and membership degree of λ^*

影响因素 u_i	因素等级 j					等级隶属度 u_{ij}				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
设计水平 u_1	高	较高	一般	较低	低	0.9	1.0	0.5	0.1	0.0
制造水平 u_2	高	较高	一般	较低	低	0.9	1.0	0.4	0.0	0.0
材质好坏 u_3	好	较好	一般	较差	差	0.8	0.9	0.5	0.0	0.0
使用条件 u_4	好	较好	一般	较差	差	0.0	0.1	0.6	0.9	0.1
重要程度 u_5	重要	较重要	一般	不太重要	不重要	0.9	0.8	0.4	0.1	0.0
维修费用 u_6	大	较大	一般	较少	少	0.0	0.3	0.6	0.4	0.8

2.2.2 备择集的建立

把评判者对评判对象截集水平做出的各种评判结果作为一个集合,此集合由 12 个离散值组成,且 $\lambda \in [0,1]$,其备择集为:

$$\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{12}) = (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0).$$

2.2.3 权重集的建立

1) 因素等级的权重集. 表 1 中, u_{ij} 表示第 i 个因素的第 j 个等级对该因素的隶属度. 将 u_{ij} 归一化,即可得第 j 个因素等级的权重 a_{ij} ,由此可得第 i 个因素等级的权重集为:

$$\tilde{A}_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}, a_{i5}).$$

2) 因素的权重集. 根据各个因素对评判对象的影响,赋予各个因素相应的权重,确定因素权重集为

$$\tilde{A} = (0.22, 0.22, 0.18, 0.17, 0.10, 0.11).$$

2.2.4 建立因素等级评判矩阵

根据各个因素等级对备择集中第 k ($k = 1, 2, \dots, 12$) 个元素的隶属度,建立各因素的各个等级对备择集中各元素的单因素评价,得到等级评判矩阵.

2.2.5 模糊综合评判

采用 $M(\cdot, +)$ 算子,可得一级模糊综合评判集为:

$$\tilde{B}_i = \tilde{A}_i \cdot \tilde{R}_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i12});$$

$b_{ik} = \sum_{j=1}^5 a_{ij} r_{ijk}$ ($i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, 5; k = 1, 2, \dots, 12$) 由此,可得一级模糊综合评判矩阵为

$$\tilde{R} = [\tilde{B}_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3, \tilde{B}_4, \tilde{B}_5, \tilde{B}_6]^T.$$

综合考虑各因素的影响,由模糊变换得二级模糊综合评判集:

$$\tilde{B} = (b_1, b_2, \dots, b_{12}) = \tilde{A} \cdot \tilde{R} =$$

$$(0.1318, 0.1773, 0.2757, 0.3798, 0.5641, 0.6965, 0.8091, 0.7928, 0.6336, 0.5282, 0.2982, 0.1469).$$

2.2.6 评定指标的处理

采用加权平均法,将 b_j 看作权数,对各备择元素 λ_j 进行加权平均,所得值作为评判结果,即

$$\lambda^* = \sum_{j=1}^{12} b_j \lambda_j / \sum_{j=1}^{12} b_j.$$

计算得最优水平截集 $\lambda^* = 0.5945$. 将 $\lambda^* = 0.5945$ 带入到在 2.1 中转化后的普通约束条件中,即可与式(3)组成模糊可靠性优化设计数学模型. 该模型由 1 个目标函数、13 个自变量、24 个线性不等式约束和 16 个非线性不等式约束组成.

3 应用实例

已知泥浆泵齿轮传动机构的传递功率为 $P = 740$ kW,输入轴转速 $n_1 = 1800$ r/min,总传动比 $i = 13.85$,弧线圆锥齿轮材料为 20CrMnTi,渗碳淬火,齿面硬度为 58~65 HRC. 圆柱齿轮大齿轮材料为 45 号钢,正火处理,硬度为 220~260 HBW;圆柱齿轮小齿轮材料为 45 号钢,调质处理,硬度为 230~300 HBW.

基于遗传算法良好的可操作性及较高的并行全局搜索能力,笔者选用 MATLAB R2010b 中的 GADS 遗传算法工具箱进行求解. 对齿轮的齿数、模数这些离散型变量先将其当做连续变量求解,然后把求出的解圆整或凑整到相近的离散值.

根据第 2 节中所建立的优化模型,编写 MATLAB 遗传函数程序进行求解,经过 50 代繁殖取得

最优,最优适应度值如图 2 所示.

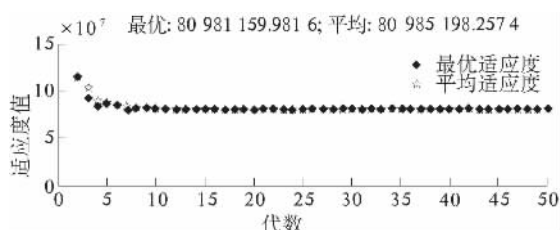


图 2 最优个体适应度函数值

Fig. 2 Best value of fitness function

结合实际情况,对相应的参数优化结果进行圆整,圆整后得到的结果与原设计参数的对比如表 2 所示.

表 2 设计参数的对比

Tab. 2 Comparison of the design parameters

变量	优化前	优化后	变量	优化前	优化后
i_1	3.105	3.267	Z_3	18	17
m_1	8.697	8.614	i_2	2.2	2.520
Z_1	19	18	β_2	10	8.302
φ_R	0.350	0.334	φ_{d3}	0.8	0.727
β_1	30°	26.233°	m_3	12	12
φ_{d2}	0.950	0.727	Z_5	19	18
m_{n2}	12	12			

经过圆整后齿轮传动机构的总体积为 $7.688 3 \times 10^7 \text{ mm}^3$, 相较原设计体积 $8.969 0 \times 10^7 \text{ mm}^3$ 减少了 14.27%, 达到了减小体积、节省材料的目的.

根据该机构的使用期限及疲劳强度寿命系数公式,结合式(6)编程可计算出可靠度与时间的变化关系,与优化前的对比结果如表 3 所示.

表 3 接触强度可靠度的对比

Tab. 3 Comparison of contact strength reliabilities

T/a	弧线圆锥齿轮		斜齿圆柱齿轮	
	优化前	优化后	优化前	优化后
1	0.9 ⁹ 8251	0.9 ⁸ 5192	0.9 ⁹ 5129	0.9 ⁷ 9826
3	0.9 ⁸ 2165	0.9 ⁷ 1734	0.9 ⁸ 7457	0.9 ⁷ 3077
5	0.9 ⁶ 0478	0.9 ⁶ 3119	0.9 ⁷ 3182	0.9 ⁶ 9123
7	0.9 ⁵ 7936	0.9 ⁵ 7561	0.9 ⁶ 5746	0.9 ⁵ 9204
8	0.9 ⁵ 5977	0.9 ⁵ 1293	0.9 ⁶ 0819	0.9 ⁴ 1856
9	0.9 ⁵ 1802	0.9 ⁴ 7892	0.9 ⁵ 9158	0.9 ³ 7625
10	0.9 ⁴ 6115	0.9 ³ 8976	0.9 ⁵ 2036	0.9 ³ 4167

注:0.9⁹表示在小数点后有 9 个 9.

从表 3 中可以看出,优化前的数据 10 a 后其可靠度最低的仍能达到 0.9⁴6115,这很显然造成了材料的浪费.而按笔者的设计方法所得到的齿轮传动的可靠度值相较之前虽略有降低,但在 10 a

的寿命期限内均能达到所要求的可靠度为 0.999,仍在要求范围内,刚好满足设计使用期限,实现零部件的合理利用.按照同样的方法可得到齿轮弯曲强度可靠度与时间的对应关系,经过验证,具有与接触强度可靠度一致的效果,在此就不赘述.

表 4 为优化前后膜厚比的对比,由表 4 可以看出,三级传动中的膜厚比具有不同程度的增加,对于弧线圆锥齿轮,位于高速级,承受扭矩较小,且其结构形式导致其承受复杂的载荷,使其润滑要求也相应较高,但在此膜厚比仅略有降低,均在要求范围内,因此不影响笔者分析结果.对于直齿圆柱齿轮,其位于低速级,且承受较大扭矩,润滑油膜较易遭到破坏,对其良好润滑极其重要,所以较高的膜厚比能够保证其有良好的润滑.

表 4 膜厚比对比

Tab. 4 Comparison of film thickness ratios

项目	弧齿锥齿轮	斜齿圆柱齿轮	直齿圆柱齿轮
优化前	2.715 3	2.671 8	2.014 2
优化后	2.623 1	2.779 4	2.837 5

表 5 为优化前后动态性能的对比,由表 5 可以看出,3 组齿轮的临界转速比均小于允许临界转速比,均工作在亚临界区,满足优化设计的要求,且其临界转速比略有降低,有利于降低动载荷.

表 5 动态性能对比

Tab. 5 Comparison of dynamic performance indicators

项目	弧齿锥齿轮	斜齿圆柱齿轮	直齿圆柱齿轮
优化前	0.639 7	0.728 4	0.596 8
优化后	0.651 8	0.723 3	0.530 6

4 结论

1) 以模糊数学为基础,结合可靠性优化设计理论,建立了模糊可靠性优化设计数学模型,求解结果使齿轮机构总体积减少,可见其优化方法的正确性、合理性.

2) 综合考虑齿轮的可靠度、膜厚比、动态性能,建立了符合实际的优化数学模型,最终结果使得其综合性能得到改善,证明了此优化数学模型的正确性.

3) 对于本文中复杂的数学模型,运用 MATLAB 遗传算法工具箱能够快速准确地求解,可见该算法简单高效,具有较好的空间适应能力和全局搜索性能.

参考文献:

- [1] 刘维民,夏延秋,付兴国. 齿轮传动润滑材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 68-71.
- [2] 张磊. 基于多目标模糊优化的减速器参数化设计 [D]. 合肥: 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 2011: 25-26.
- [3] 杨薇, 官德娟. 具有动态约束的齿轮传动模糊优化设计 [J]. 机械传动, 2001, 25(1): 11-14.
- [4] 胡启国, 谢国宾, 庾奎. 蜗杆传动的可靠性优化设计研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2014(7): 42-44, 48.
- [5] 张锁怀, 万武勇, 孟旭. 风电偏航减速器四级行星传动系统可靠性优化设计研究 [J]. 机械传动, 2012(11): 48-51.
- [6] 蒿丽萍. 基于 MATLAB 的多级齿轮传动多目标可靠性优化设计研究 [J]. 机械传动, 2014(1): 74-77, 91.
- [7] 陶振荣. 齿轮接触疲劳强度计算方法的探讨 [J]. 机械设计与制造, 2007(7): 15-17.
- [8] 刘丽春. 斜齿圆柱齿轮的模糊可靠性设计方法 [J]. 机械科学与技术, 1996, 15(3): 345-348.
- [9] 黄平, 孟永钢, 徐华. 摩擦学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 297-298.
- [10] AKBARZADEH S, KHONSARI M M. Prediction of steady state adhesive wear in spur gears using the EHL load sharing concept [J]. Journal of tribology, 2009, 131(2): 024503.
- [11] NOGUEIRA I, DIAS A M, GRAS R, et al. An experimental model for mixed friction during running-in [J]. Wear, 2002, 253: 541-549.

Fuzzy Reliability Optimization Design of Gear Transmission Mechanism under Multi-specification Restriction

HU Qiguo, XIE Guobin, LUO Tianhong, TUO Kui

(College of Mechatronics and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In view of the problem of the gear transmission optimization design, based on the integration of fuzzy mathematics and reliability optimization design theory, a mathematic model of reliability optimization design of the mud-pump gear transmission mechanism was built with its stress and intensity obeyed certain probability distributions, when the film thickness ratio and critical speeds ratio were put into constraint. The global optimization result was found by using GA toolbox in Matlab. The optimal results show that the comprehensive performance of the gear transmission is improved efficiently, and the correctness and applicability of that optimization method is proved, hence it provides a new reference for the gear transmission optimization design.

Key words: gear transmission; multi-specification restriction; fuzzy reliability; optimization design

文章编号: 1671-6833(2016)01-0040-05

纯电动赛车复合电源动力系统控制研究

贺伊琳, 许世维, 刘 瑞, 谢学飞

(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 提高纯电动赛车性能的关键在于提高其动力性, 而制约电动汽车动力性的主要因素在于储能系统, 提出了一种纯电动赛车用复合电源动力系统的研究方法, 首先确定复合电源的组成并建立数学模型, 其次根据不同工况下复合电源的不同工作模式制定控制策略, 最后搭建试验台对复合电源的性能与控制方法进行试验验证。所做研究工作提高了纯电动赛车复合电源动力系统的控制水平, 对于提升纯电动赛车的动力性、延长蓄电池的使用寿命具有一定的现实意义。

关键词: 纯电动赛车; 复合电源; 动力系统; 控制策略; 试验装置

中图分类号: TM53; TP391.9

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201503042

0 引言

随着新能源汽车技术的不断进步, 纯电动赛车也走进了人们的生活, 纯电动赛车主要通过动力性等指标评判车辆性能, 对动力性要求相对较高。复合电源相比于单一电源能有效提高电动汽车的动力性, 因此, 研究复合电源对于提升电动赛车的性能具有重要意义。文献[1]优化了复合电源控制策略, 验证了 SOC 与制动能量回收率的变化情况, 未考虑动力性的变化; 文献[2]提出了一种复合电源的匹配方法与控制策略, 最后仅对模型进行了仿真, 未对设计复合电源的性能进行实验验证; 文献[3]提出了复合电源的逻辑门限控制策略, 该策略阈值是固定的, 难以满足车辆复杂多变的运行环境。针对上述不足, 笔者针对纯电动赛车的动力系统提出了一种复合电源的设计方案与控制策略, 对设计结果进行模型仿真, 并在实验室环境下对系统进行调试, 使其提高赛车的动力性, 最大限度地回收制动能量, 延长蓄电池使用寿命。

1 复合电源参数匹配及建模

1.1 复合电源的组成及系统分析

蓄电池作为纯电动汽车的能源供给装置, 具有比能量大和比功率小的特点, 而超级电容具有比能量小和比功率大的特点^[4-5], 二者单独用以

驱动赛车行驶, 均难以满足赛车对理想电源的要求, 且大电流充放电易对蓄电池寿命产生不利影响。若使二者取长补短, 组成复合电源作为纯电动方程式赛车动力源, 则可同时具有能量密度高和功率密度高的优点, 从而提高赛车性能。

复合电源的工作原理图如图 1 所示。驱动行驶时, 蓄电池的输出功率应与赛车行驶所需的平均功率相匹配, 在图中即为最大稳态行驶功率与零功率线之间的那部分, 而超级电容用于提供峰值功率, 实现“削峰”作用, 即为需求功率与最大稳态行驶功率之间的部分; 制动时, 将回收的能量优先考虑给超级电容充电, 即图中零功率线之下的那部分, 从而实现“填谷”作用。

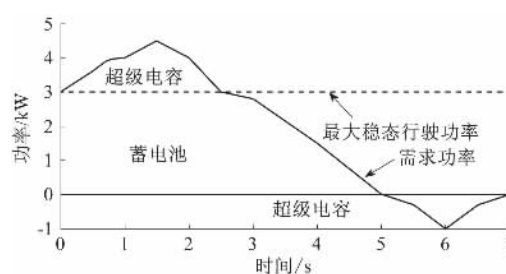


图 1 复合电源工作原理图

Fig. 1 Operating principle of synergistic power supply

由于蓄电池与超级电容的充放电特性不同, 若将其直接并联组成复合电源, 二者端电压相同, 仅当蓄电池电压变化时超级电容才开始工作。为

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507013); 中央高校基金资助项目(310822151025)

作者简介: 贺伊琳(1989—), 女, 新疆塔城人, 工程师, 长安大学博士研究生, 主要从事电动汽车研究工作, E-mail: heyilin@chd.edu.cn.

引用本文: 贺伊琳, 许世维, 刘瑞, 等. 纯电动赛车复合电源动力系统控制研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 40-44.

解决这一问题,在蓄电池和超级电容之间,加装 DC/DC 功率变换器,将其串联在超级电容一端,检测蓄电池电压变化以调节超级电容的输出,控制二者之间的功率分配,实现复合电源的设计目的^[6]。综上,复合电源的结构图如图 2 所示。

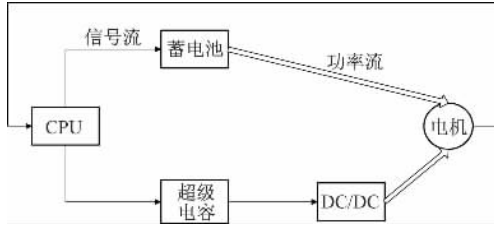


图 2 复合电源的结构

Fig. 2 Structure of synergic power supply

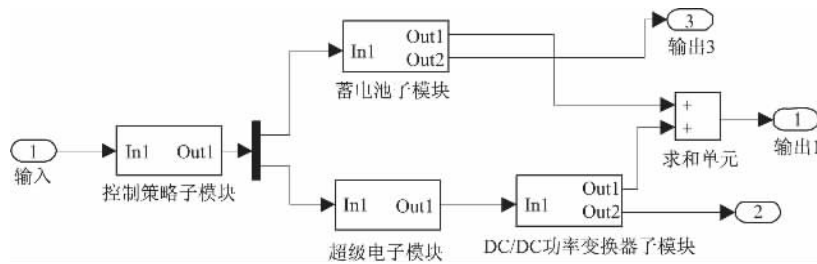


图 3 复合电源的数学模型

Fig. 3 Mathematical model of synergic power supply

2 动力系统的控制策略及仿真

2.1 复合电源的工作模式分析

根据赛车需求功率和复合电源荷电状态的不同,将复合电源的工作模式分为如下 4 种:

1) 超级电容与蓄电池共同驱动模式. 赛车启动及加速行驶时对功率要求很高,此时蓄电池提供平均功率,超级电容提供峰值功率,达到提高赛车动力性、减小蓄电池工作电流的目的。

2) 蓄电池单独驱动模式. 赛车运行稳定且速度不高时,蓄电池输出功率能够满足电机要求,此时超级电容不工作,蓄电池单独放电。

3) 超级电容充电模式. 当电机需求功率较小且超级电容电量不足时,蓄电池给电机提供驱动功率,同时给超级电容充电,保持超级电容高功率放电的能力。

4) 再生制动模式. 赛车制动时,电机处于发电状态,将一部分动能转化为电能,若复合电源的电量未达上限,优先对超级电容充电,避免大电流对蓄电池造成冲击。

2.2 功率分配策略的制定

采用模糊逻辑控制策略确定复合电源中各部

1.2 复合电源模型的建立

复合电源的数学模型由蓄电池、超级电容及 DC/DC 功率变换器 3 个元件的子模型和控制策略模块 4 部分组成。分别基于内阻模型和经典 RC 模型建立蓄电池和超级电容模型,对于 DC/DC 功率变换器,则根据功率变换器的升压效率曲线和降压效率曲线进行耦合,得出 DC/DC 功率变换器的模型^[7-8]。

在 Matlab/Simulink 软件环境下建立的复合电源模型如图 3 所示。其中,In1(输入端口 1)为电机需求功率,Out1(输出端口 1)为复合电源实际输出的功率,Out2(输出端口 2)和 Out3(输出端口 3)分别表示蓄电池和超级电容的工作电流。

分输出功率占需求功率的比例,同时考虑电源的使用寿命与安全性,依据电机的需求功率 P 以及蓄电池的荷电状态 B_{soc} 和超级电容的荷电状态 C_{soc} 3 个参数分配功率,作为模糊逻辑控制策略的输入。

电机所需的功率由蓄电池和超级电容共同提供,即

$$P = P_b + P_c. \quad (1)$$

式中: P 为电机的需求功率; P_b 为蓄电池提供的功率; P_c 为超级电容提供的功率。

将蓄电池提供的功率占电机总需求功率的比例系数记为 k ,

$$k = \frac{P_b}{P} (0 \leq k \leq 1). \quad (2)$$

作为模糊系统的输出量,假定制动时电机反转产生的最大功率为正转所需最大功率的 40%,确定电机需求功率的论域 $P = [-0.4, 1]$; 考虑放电深度的影响,蓄电池荷电状态 $B_{soc} = [0.1, 1]$ 和超级电容荷电状态的论域 $C_{soc} = [0.1, 1]$; 输出量功率分配系数的论域 $k = [0, 1]$ 。

电机的需求功率选择响应最快的三角隶属函数为其隶属度函数,将论域分为负小(NS)、正小

(PS) 和正大(PB) 3 个模糊子集,即 $P = \{NS, PS, PB\}$; 蓄电池荷电状态和超级电容荷电状态选择具有良好过渡性的高斯隶属函数作为其隶属度函数,将论域分为较小(LE)、中间(ME)、较大(GE) 3 个模糊子集,分别为: $B_{soc} = \{LE, ME, GE\}$ 和 $C_{soc} = \{LE, ME, GE\}$; 选用高斯隶属函数、Z 型隶属函数和 S 型隶属函数作为输出量比例分配系数的隶属度函数,将其论域分为较小(LE)、中小(ML)、中间(ME)、中大(MB) 和较大(GE) 5 个模糊子集,即 $k = \{LE, ML, ME, MB, GE\}$.

依据超级电容“削峰填谷”的原则,确定不同工况下复合电源的工作模式,笔者制定的模糊控制规则集如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则集
Tab.1 Rules of fuzzy control

P	B_{soc}	C_{soc}	k
PB	LE	LE	MB
PB	LE	ME	MB
PB	LE	GE	ME
PB	ME	LE	GE
PB	ME	ME	GE
PB	ME	GE	MB
PB	GE	LE	GE
PB	GE	ME	MB
PB	GE	GE	ME
PS	LE	LE	GE
PS	LE	ME	ME
PS	LE	LE	LE
PS	ME	LE	GE
PS	ME	ME	ME
PS	ME	GE	ML
PS	GE	LE	GE
PS	GE	ME	MB
PS	GE	GE	MB
NS	LE	LE	LE
NS	LE	ME	ME
NS	LE	GE	GE
NS	ME	LE	LE
NS	ME	ME	ME
NS	ME	GE	GE
NS	GE	LE	LE
NS	GE	ME	MB
NS	GE	GE	LE

2.3 仿真结果及分析

以 2011 年全国大学生方程式汽车大赛为依托,按照电机组比赛专项规则对赛车参数的要求,确定整车设计目标参数,根据设计目标中最高车速匹配电机,据此确定复合电源的参数. 其中,整车质量为 293 kg,空气阻力系数为 0.34,迎风面积为 1.4 m²,滚动阻力系数为 0.024,设计最高车速为 120 km/h,匹配电机的额定电压为 144 V,确定所选蓄电池电压为 144 V,质量为 99.6 kg,超级电容的额定电压为 64 V,质量为 13.2 kg.

在 Matlab/Simulink 软件环境下将复合电源的数学模型运用模糊控制策略进行仿真,得到蓄电池功率和超级电容功率的仿真结果如表 2 所示.

由表 2 可知,蓄电池和超级电容输入输出功率的变化趋势大致相同,但蓄电池功率变化范围始终小于超级电容. 蓄电池仅承担平均功率部分,超级电容补充剩余部分,有效发挥了其“削峰填谷”的作用,提高电源效率.

单一电源中电池电流和复合电源中电池电流的仿真结果如表 3 所示.

由此可知,由于超级电容的加入,复合电源中电池的电流小于蓄电池单独工作的电流. 电池和超级电容能够很好地发挥各自优势,有效延长蓄电池的使用寿命.

通过车速随时间的变化情况,对赛车动力性进行仿真,结果如图 4 所示.

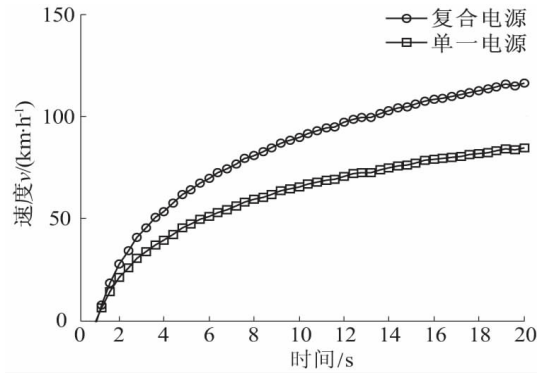


图 4 动力性仿真结果

Fig.4 Simulation result of dynamic performance for vehicle

表 2 电池功率和超级电容功率仿真结果

Tab.2 Simulation result of power of battery and super capacitor

								W
超级电容	6 100	-5 000	4 200	-5 500	6 500	-7 600	7 800	-4 800
蓄电池	2 500	-3 900	2 000	-4 000	3 000	-4 100	3 400	-2 100

表 3 单一电源和复合电源中蓄电池电流仿真结果

Tab. 3 Simulation result of current of battery in single power supply and synergic power supply								A
单一电源	390	-80	360	-100	300	-85	40	-40
复合电源	90	-40	85	-40	150	-40	40	-30

由图 4 可知,采用单一电源赛车的加速曲线始终处于采用复合电源赛车的加速曲线之下,表明在赛车加速过程中的任一时刻,采用复合电源的赛车车速较高,其原地起步加速时间明显小于采用单一电池电源的赛车,有效提高了赛车的动力性。

3 动力系统的试验装置研究

3.1 试验装置的硬件设计

复合电源动力系统试验装置由蓄电池、超级电容、DC/DC 功率变换器、主控制器、电机控制器、电机、传感器、加速踏板、相应的信号调理电路与工作状态监控显示等硬件部分组成。其中,蓄电池和超级电容是试验装置正常运转的能量源;电机需求功率的变化通过调节加速踏板开度实现;传感器包括电压传感器和电流传感器两类,用以检测蓄电池和超级电容的端电压与工作电流;信号调理电路对传感器的输出信号进行相应处理,使其满足主控制器的输入条件;主控制器作为整个系统的核心,接收信号调理电路的输出信号,实现复合电源的功率分配^[9]。同时,将电机转速、蓄电池与超级电容的端电压和电流等主要参数通过工作状态监控显示界面进行实时显示,查看试验装置的运行状态。

复合电源系统由蓄电池放电驱动电机、超级电容放电驱动电机及蓄电池为超级电容充电 3 条支路组成,每条支路中串接一个电子开关,由电子开关的通断状态决定该支路是否参与工作,继而实现对复合电源系统的控制,其电路如图 5 所示。其中,C 为超级电容,B 为蓄电池,R 为限流电阻,MOSFET1 ~ MOSFET3 分别为 3 个电子开关,D1 ~ D3 为 3 个二极管,M 为电机。

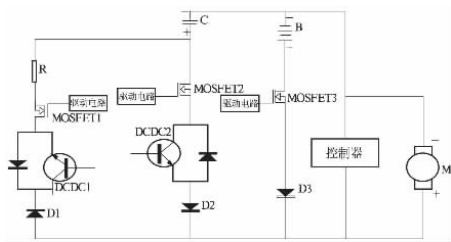


图 5 试验装置电路图

Fig. 5 Circuit diagram of test facility

3.2 试验装置的软件设计

大量试验表明,蓄电池和超级电容的端电压与荷电状态 SOC 近似为一线性关系,因此,在该试验中以端电压的值表示其荷电状态 SOC。

以踏板开度信号为需求功率,根据蓄电池和超级电容的端电压,确定 3 条支路上电子开关的工作状态,其软件流程图如图 6 所示。其中, U_B 和 U_C 分别为蓄电池和超级电容的端电压, K 为加速踏板开度,VT1 ~ VT3 为图 6 中 MOSFET1 ~ MOSFET3 3 个电子开关,值取 1 表示接通,取 0 表示断开。

在 MCGS 嵌入式组态软件 (monitor and control generated system) 环境下设计试验装置的工作状态监控界面^[10],实时显示蓄电池的电压电流、超级电容的电压电流、电机转速以及加速踏板开度等参数,对比复合电源和单一电源在不同工况下的电流变化情况。采用串行通信的方式将中央处理单元计算所得信号的值发送到显示屏,实现信息的传递与显示。

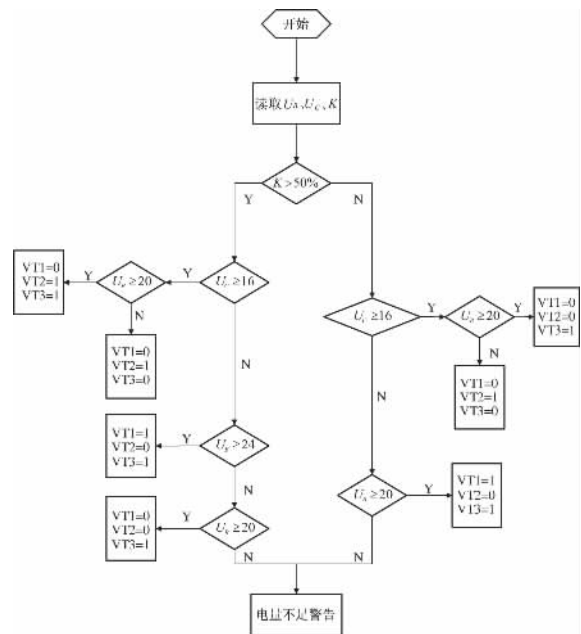


图 6 试验装置软件流程图

Fig. 6 Software flow diagram of test facility

3.3 试验结果及分析

1) 将蓄电池和超级电容充电至额定电压,调节踏板开度使电机转速稳定在 500 r/min,当双能量源的支路均接通时,蓄电池的电流为 8.3 A,仅

蓄电池支路接通时,各支路电流大小不变.试验结果表明,电机需求功率较小且复合电源电量充足时,超级电容不工作,蓄电池单独驱动电机且放电电流不大.

2) 将蓄电池和超级电容充电至额定电压,调节踏板开度使电机转速稳定在 1 500 r/min,当双能量源的支路均接通时,蓄电池电流为 23.4 A,超级电容电流为 27.9 A,仅蓄电池支路接通时,蓄电池电流为 51.7 A,几乎增加了一倍.试验结果表明,电机需求功率较大且复合电源电量充足时,蓄电池和超级电容同时驱动电机,有效减小了蓄电池的工作电流.

3) 将超级电容放电至较低电量,调节踏板开度使电机转速稳定在 500 r/min,双能源支路均接通时,蓄电池电压为 25.5 V,电流为 12.6 A,超级电容电压为 14.9 V,电流为 -4.7 A.试验结果表明,当电机需求功率较小且超级电容电量不足时,蓄电池在驱动电机的同时对超级电容充电.

4) 将蓄电池和超级电容放电至较低电量,调节加速踏板,蓄电池电压为 18.1 V,超级电容电压为 14.7 V,各支路电流为零,即使踩下加速踏板,电机转速仍为零,电量不足警告指示灯变红,表明此时电源电量过低,复合电源不工作.

4 结论

1) 蓄电池-超级电容的复合电源同时具有高比能量和高比功率的特性,与单一电源相比,能最大限度地满足纯电动方程式赛车对动力性的要求;而且超级电容“削峰填谷”的作用还能有效减小蓄电池的工作电流,延长蓄电池使用寿命,有利于赛车制动能量回收性能的提高.

2) 在后续研究工作中,应进一步优化复合电源的功率分配策略,研究多种控制相结合的方法,提高控制精度.设计试验装置时,应考虑制动能量回收的作用,完善纯电动赛车动力系统,为实际应用奠定理论基础与实践经验.

参考文献:

- [1] 张丹红,汪江卫,刘开培,等. HEV 车载复合电源系统控制策略优化研究[J],电源技术,2012,136(5): 650-654.
- [2] 陆建康. 微型纯电动汽车复合电源系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学能源与动力学院,2011.
- [3] 曹国强. 混合动力车用复合电源系统开发与试验验证[D]. 长春: 吉林大学汽车学院,2011.
- [4] 盘朝奉,何志刚,张德望,等. 复合电源电动汽车动力系统建模与仿真[J],广西大学学报(自然科学版),2012,37(2): 284-290.
- [5] SHEN X J, CHEN S, ZHANG Y. Configure methodology of on-board super-capacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles[J] IEEE transaction on industry applications,2012,49(4): 1-8.
- [6] 桑丙玉,陶以彬,郑高,等. 超级电容-蓄电池混合储能拓扑结构和控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2): 1-6.
- [7] 毕东阳. 混合动力客车用复合电源电气架构优化设计[D]. 长春: 吉林大学汽车学院,2014.
- [8] 胡春花. 纯电动大客车复合电源系统能量管理关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学汽车学院,2012.
- [9] 孙同景. Freescale9S12 十六位单片机原理及嵌入式开发技术[M],北京: 机械工业出版社,2008.
- [10] 冀承凯. 基于 MCGS 组态监控技术的溢流染色机集散控制系统研究[D],济南: 济南大学机械工程学院,2012.

Research of Powertrain Control Based on Synergic Power Supply for Electric Racing Vehicle

HE Yilin, XU Shiwei, LIU Rui, XIE Xuefei

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

Abstract: The key to the improvement of the performance of electric racing vehicle is to promote its dynamic performance, while the main factor of restraining dynamic performance is energy resource. In view of this, the research method and experiment scheme of synergic power for electric racing vehicle is put forward. The components of synergic power are obtained and the synergic power mathematical model is established. The control strategy is worked out according to different working models in different conditions. Finally, the performance of synergic is testified with experiment. The research is of great significance to improve the dynamic performance of electric racing vehicle. At the same time, it can also prolong the life span of battery.

Key words: electric racing vehicle; synergic power; power train; control strategy; test facility

最小二乘复指数法在排气管试验模态分析中的应用

曾发林¹, 许凯²

(1. 江苏大学 汽车工程研究院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 最小二乘复指数识别法(least squares complex method, LSCE), 不仅适用于弱阻尼也适用于强阻尼密集模态识别. 针对某轿车双排气管, 采用 LSCE 法进行排气管试验模态分析, 得到该排气管的模式分布比较密集的结论. 试验表明, LSCE 法对模态参数识别具有很强的适应性.

关键词: 排气管; LSCE; 试验模态; 稳态图; 参数识别

中图分类号: U467.3 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201503034

0 引言

汽车排气管通过排气多支管与发动机相连, 并通过吊挂件与车架或车身固定. 由于汽车在行驶时受到路面谱等激励源作用, 导致排气系统的振动较大. 排气管吊悬装置的材料特性决定了其非线性, 其固有频率偏高, 中高阶振型与模态耦合严重^[1]. 试验模态分析是研究汽车排气管动态特性的主要方法, 现广泛应用最小二乘复指数法, 根据极点的稳态图求固有频率和振型. 笔者介绍了 LSCE 模态分析法, 并进行排气系统的模态试验, 对所测得的数据进行了分析, 得到其固有特性.

1 LSCE 法介绍

最小二乘复指数法能够同时识别出不同模式的模态频率以及模态阻尼, 并且对采集的数据进行同步分析并作出整体估计. 冲激响应(IR)的表达式为

$$h_{ij}(t) = \sum_{k=1}^N (r_{ijk} e^{\lambda_k t} + r_{ijk}^* e^{\lambda_k^* t}). \quad (1)$$

从式(1)可知, 极点 λ_k 不是输入自由度或输出自由度的函数, 而是反映结构的总体(而非局部)特性的函数. 对于结构上的所有频响函数来讲, 它们的极点值应该相同. 因此应尽量测得结构的所有数据进行整体估计.

1.1 针对连续模型

通过式(1)来实现上述的整体估计将会出现一个问题, 即留数 r_{ijk} 与输入和输出有一定的关系^[2]. 针对这种情况, 需要找到一种新的参数模型来替代冲击响应函数 h_{ij} , 使得方程系数与输入和输出没有关联, 并能够很好地识别系统的极点 λ_k . 可以由文献[2-3]证明, 该参数模型的线性微分方程的形式为

$$(d/dt)^{2N} h_{ij} + a_1 (d/dt)^{2N-1} h_{ij} + \cdots + a_{2N} h_{ij} = 0. \quad (2)$$

式(2)的主要作用是将数据变成一组复共轭对的有阻尼复指数的线性组合. 这些复指数就是线性微分方程式(3)的特征解^[2-3].

$$(d/dt)^{2N} f(t) + a_1 (d/dt)^{2N-1} f(t) + \cdots + a_{2N} f(t) = 0. \quad (3)$$

式(2)成立的条件:

$$\lambda^{2N} + a_1 \lambda^{2N-1} + \cdots + a_{2N} = 0; \quad (4)$$

$$\lambda = \lambda_k, \lambda = \lambda_k^*, k = 1 \cdots N. \quad (5)$$

利用所测的数据估计出式(2)中的系数 a_1, a_2, \cdots, a_n , 并求出方程(4)、(5)的解, 得到复指数系数 λ_k 的值.

1.2 针对非连续模型

对非连续模型, 用式(6)、(7)计算较合适.

$$h_{ijn} = \sum_{k=1}^N (r_{ijk} z_k^n + r_{ijk}^* z_k^{*n}). \quad (6)$$

$$z_k = e^{\lambda_k \Delta t}. \quad (7)$$

收稿日期: 2015-03-08; 修订日期: 2015-06-18

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助项目(11KJA580001)

作者简介: 曾发林(1965—), 男, 江苏宜兴人, 江苏大学副教授, 硕士, 主要研究方向为噪声与振动控制, E-mail: 740369505@qq.com.

引用本文: 曾发林, 许凯. 最小二乘复指数法在排气管试验模态分析中的应用[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 45-48.

式(6)、(7)用来取代有阻尼复指数,并用基函数 z_k 来表示.与连续模型相似,在非连续模型中也需要找到一个常系数线性微分方程:

$$h_{ijn} + a_1 h_{ijn-1} + \cdots + a_{2N} h_{ijn-2N} = 0. \quad (8)$$

特征值 z_k 可由下面的方程求出:

$$z_k^{2N} + a_1 z_k^{2N-1} + \cdots + a_{2N} = 0. \quad (9)$$

LSCE法主要利用所测的数据带入式(8)中求出其系数,并对极点进行估计.因此为了更好地对整体估计,尽量利用所有的数据频响函数 h_{ijn} 进行分析^[3].

要对全部的时间点、响应和参考自由度在最小二乘上进行估计,需要求解方程(10),该方程是强超定方程.利用二次系数矩阵组成的压缩方程可以求解该方程,式(11)为式(10)的简化形式.

$$\begin{bmatrix} h_{11,2N-1} & \cdots & h_{11,0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{11,N_t-1} & \cdots & h_{11,N_t-2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{ij,n-1} & \cdots & h_{ij,n-2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_0 N_t, N_t-1} & \cdots & h_{N_0 N_t, N_t-2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s - h_{11,2N} \\ \vdots \\ -h_{11,N_t} \\ \vdots \\ -h_{ij,n} \\ \vdots \\ -h_{N_0 N_t, N_t} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中: N_t 为最终可取得时间抽样; N_0 为响应自由度.

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & sr_{1,2} & \cdots & r_{1,2N} \\ \cdot & r_{2,2} & \cdots & r_{2,2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdot & \cdot & \cdot & r_{2N,2N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{1,0} \\ -r_{2,0} \\ \vdots \\ -r_{2N,0} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

其中,协方差矩阵中的系数表示为

$$r_{k,j} = \sum_{i=1}^{N_0} \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_t} (h_{ij,n-k} h_{ij,n-1}). \quad (12)$$

1.3 最佳模态参数的确定

求出方程(11)中的解,就能够得到式(8)所表示模型中的系数最小二乘估计.相应的还能够求出最小二乘误差值,此误差对确定最佳模态数有很大的帮助.上述的推论中是基于数据中有 N 个模态存在的前提,但是实际数据中模态数量却是未知的. LSCE法通过最小二乘误差与假定模态数之间的变化关系来确定模型的真实模态情况,因此在建立方程(11)的时候,认为模态数 N 是足够大的.求解模型系数的方程中的每个解集就表示一个模态,方程如式(13)所示:

$$\begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ \cdot & r_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_{1,0} \\ -r_{2,0} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

对应的最小二乘误差值用 ε_1 表示.当假定的模态数与实际存在的模态数相同时,求出的最小二乘误差值将会比假定模态数与实际模态数相差很大时小很多^[4].

为了得到准确的模态数,可以针对不同模态数的模型所评估出的阻尼及频率进行比较分析,真实的模态不会随假定模态数变化而变化.真实的模态应该是很稳定的.通过极点稳态图如图1所示,可以很好地分辨出模态数.其中,极点稳态图中的符号意义如表1所示.

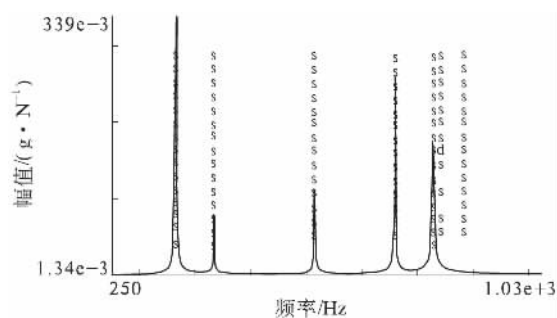


图1 极点稳态图

Fig. 1 Pole steady figure

表1 模态极点图符号意义

Tab. 1 Code meaning of modal pole

符号	状态
o	极点不稳定
f	极点的频率在公差范围内稳定
d	极点的阻尼和频率在公差范围内稳定
v	极点向量在公差范围内稳定
s	极点的频率、阻尼、向量在公差范围内都稳定

2 汽车排气系统仿真模型建立

2.1 汽车排气系统的组成

排气系统一般指的是从与发动机相连的排气多支管开始至排气尾管结束之间的零件组合.排气系统大致包括以下几个部分:排气多支管、三元催化器、Y型管、波纹管、前置消声器、中间连接管、副消声器、挂钩、吊耳等.如图2所示为双排气管排气系统的结构图.排气系统一端通过排气多支管与发动机相连接,另一端通过挂钩吊耳与车架或者车身柔性连接.

2.2 排气系统几何模型的建立

笔者研究的排气系统为双排气管,由三元催化器、柔性连接、消声器、连接管、吊钩、法兰和尾管组成,其基本结构如图3所示.其中在建模时,以汽车的前进方向为 x 轴,驾驶员的左手方向为

y 轴,垂直向上为 z 轴.



图 2 双排气管排气系统的结构图
Fig. 2 The exhaust system figure of twin tailpipes

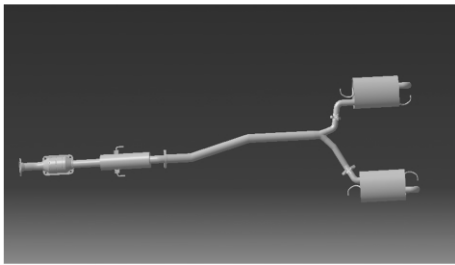


图 3 双排气管排气系统的 CATIA 模型图
Fig. 3 CATIA model figure of the exhaust system of twin tailpipes

3 排气管模态试验

模态试验是指通过试验的手段来获取模型或系统的固有特性,如模态频率、模态振型、模态阻尼等^[5]. 笔者根据实际双排气管排气系统的实际模型进行约束模态试验. 试验时,由于排气管的长度比较大,质量刚度分布不均,所以布置了 50 个激励点和 12 个 3 向传感器,即在 x 、 y 、 z 3 个方向上的 36 个方向的响应. 为保证试验的可靠与准确性,响应点和激励点均设置在刚度和质量比较大的地方. 将排气管用 4 根非常柔软的弹性绳吊起,来模拟其自由的状态. 所用的试验硬件设备为鲁文测试系统(leuven measurement & system, LMS). 通过 LMS 进行了信号采集,利用 LMS Test. Lab 中的 PolyMax 进行模态提取与分析. 各测点的传递函数试验数据获取时,需观察其信号相干性,相干系数在 0.8 以上的信号方能有效^[6].

试验的系统主要由 3 大部分组成: 试验激振系统、数据采集系统和模态处理系统. 激振系统主要包含脉冲锤. 数据采集系统包括: 力传感器、加速度传感器和 LMS 信号采集系统^[7]. 试验中所使用的测试和分析仪器设备如表 2 所示. 实验安装与测试如图 4 所示.

表 2 试验仪器和设备

Tab. 2 Test instruments and equipment

编号	仪器名称	数量	仪器型号
1	加速度传感器	12	美国 PCB 的 ICP 加速度传感器
2	力锤	1	美国 PCB 公司模态力锤
3	数据采集系统	1	LMS SCADASIII
4	数据分析软件	1	LMS Test. lab 11A



图 4 排气管的自由模态试验安装与测试
Fig. 4 Free modal experiments installation and test of exhaust pipe

4 基于 LSCE 法对采样数据分析

对所采集的信号进行选择时,选取相干性较好的数据,得到的自由模态极点稳态图如图 5 所示.

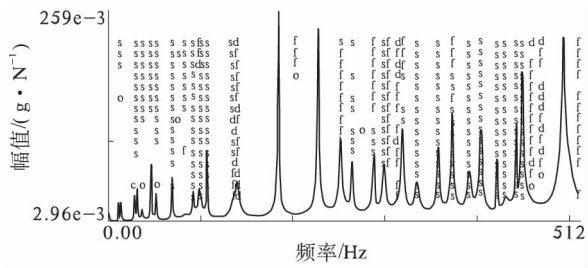


图 5 极点稳态图

Fig. 5 Pole Steady figure

从图 5 中可以看出,排气管模态数较多,模态耦合严重,通过极点的稳定性能够轻易地分出固有频率^[8]. 分析出的固有频率如表 3 所示,振型图如图 6 所示. 由于篇幅有限,只列出了前六阶模态阵型图.

由上述得到的模态振型能够轻易地分辨出在对应固有频率处的振动情况. 例如,在第五阶固有频率 45. 627 Hz 处,排气管振动为沿着 y 法向的横向振动和绕着 z 轴的扭转耦合振动. 可以通过一些技术手段,改变排气管以及吊耳刚度来调整系统的固有频率,使激励频率避开其固有频率,从而达到对排气系统减振降噪的效果^[9-10].

表3 试验自由模态频率表

Tab.3 Experiment free modal frequency table Hz

阶次	固有频率	阶次	固有频率
1	12.238	11	106.454
2	27.892	12	133.480
3	30.838	13	183.853
4	36.183	14	227.602
5	45.627	15	252.389
6	50.970	16	263.777
7	68.856	17	287.875
8	82.179	18	298.133
9	91.695	19	319.558
10	98.574	20	333.893

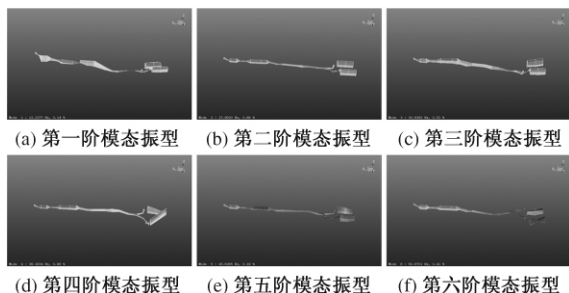


图6 排气管前六阶模态振型图

Fig.6 The first six-order modal shape of exhaust pipe

5 结论

笔者通过对某典型轿车的排气管进行自由模态分析,可知此排气管的模态分布比较密集,使用 LSCE 法对试验数据进行处理,分析表明,该方法能够更好地识别模态参数,具有较好的适应性和

推广应用价值.

参考文献:

- [1] 张修路,姚国风,韩春杨,等.汽车排气系统的悬挂点对减振效果的仿真分析[J].系统仿真学报,2014,26(4):796-801.
- [2] 李德葆.实验模态分析及其应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] 郑锦涛.车身试验模态分析方法对比研究[D].广州:华南理工大学机械与汽车工程学院,2012.
- [4] 魏传峰,周铨,陈栋华,等.多参考最小二乘复频域法在轮胎试验模态分析中的应用[J].汽车技术,2006,23(10):32-37.
- [5] 谢维波,林劲松.复指数信号模型非线性最小二乘解的几何结构及迭代算法[J].电子学报,2002,30(5):757-759.
- [6] 谢小平,韩旭,吴长德,等.基于 PolyMax 方法的某轿车白车身试验模态分析[J].汽车工程,2009,31(5):440-443.
- [7] 庞剑,何华.汽车噪声与振动理论与应用[M].北京:北京理工大学出版社,2013.
- [8] 马维金,熊试波.基于 LSCE 算法和 FDD 算法的振动筛动态特性研究[J].振动、测试与诊断,2003,23(3):195-200.
- [9] 杨剑辉.结构阻尼时域识别方法的研究[D].武汉:武汉理工大学土木工程与建筑学院,2007.
- [10] 王卫华,杨转运,刘会.利用 LSCE 方法识别桥梁启动导数研究[J].试验流体力学,2009,23(1):85-89.

Application of the LSCE Method in the Exhaust Pipe Mode Analysis

ZENG Falin¹, XU Kai²

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Identification method of least squares complex exponential LSCE (least squares complex method) is applied to both the weak and strong damping damping to identify the intensive modal. For a car dual exhaust pipes, exhaust pipe experimental modal has been to be analyzed by using LSCE method and the conclusion is drawn that modal distribution of the exhaust pipe is more intensive. The tests showed LSCE method has strong adaptability for modal parameter identification.

Key words: exhaust pipe; LSCE; experimental modal; steady chart; parameter identification

文章编号: 1671-6833(2016)01-0049-05

基于离散-连续耦合方法的土工格室加筋碎石 承载能力数值模拟

汪海年^{1,2}, 张 然¹, 周 俊¹, 刘 玉¹, 尤占平^{1,3}

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中交通力建设股份有限公司, 陕西 西安 710075; 3. 密歇根理工大学 土木工程与环境学院, 美国 霍顿 49931)

摘 要: 土工格室加筋碎石基层材料具有较强的适应路基变形能力, 然而其承载能力与变形机理并不明确. 通过采用离散-连续耦合的算法分别对格室高度为 100、150、200 mm; 格室焊矩为 400、600、800 mm 的 9 种土工格室加筋碎石基层复合结构与无格室碎石基层复合结构在加载过程中的力学性能进行数值计算, 并对土工格室结构弹性模量进行对比分析. 研究表明: 对碎石采用土工格室加筋处理后, 路基承载能力得到了较大的提高, 土工格室结构层弹性模量提高比例最大为 38.61%; 格室高度一定的情况下, 土工格室结构层的承载能力随着格室焊矩的减小而增强; 在格室焊矩一定的情况下, 土工格室结构层的承载能力随着格室高度的增大相应提高; 型号为 400~200 mm 的土工格室结构层, 竖向变形大的区域占整个下承层顶面面积的 17.36%, 且分布较均匀, 加筋效果最好.

关键词: 道路工程; 土工格室; 加筋结构; 承载能力; 数值模拟

中图分类号: U416

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201410012

0 引言

川藏公路南线路基受水分和季节性冻融等因素的影响比较显著, 易使道路发生结构性的破坏^[1]. 目前土工格室的加固对象多为土体颗粒^[2-4], 对级配碎石层进行加固, 构成的复合整体直接作为路面结构层使用的相关应用鲜见报道. 柔性基层(级配碎石)能够适应路基产生的大变形, 但柔性基层的路面结构使面层层底产生较大的拉应力^[5]. 采用土工格室对级配碎石层进行加固, 可以抵消一部分拉应力, 起到侧向约束作用^[6-7]. 因此, 在路面结构中设置级配碎石层, 并采用土工格室对碎石进行加筋处理, 对于土工格室的工程应用有很大的实际意义. 在以上研究基础上, 本研究提出在路面结构中应用土工格室来降低路基不均匀变形对路面结构产生的影响.

离散元方法在对散体材料进行研究时存在明显的优势^[8]. 但是需要数目庞大的颗粒单元, 且受制于目前计算机的发展水平, 研究无法实

现^[9]. 而能够发挥离散元与有限差分法各自优势的离散-连续耦合的方法, 已成为目前工程界研究的热点课题^[9-10].

目前, 国内研究者采用的离散元方法多运用二维流程序, 不能真实地反映土工合成材料与填料间的力学行为^[11-13]. 因此, 采用三维颗粒流程序 PFC3D 结合有限差分软件 FLAC3D, 对土工格室加固碎石的作用机理进行分析, 既能与实际更加吻合, 又可节约计算资源.

1 离散-连续耦合的分析方法

1.1 土工格室加筋碎石基层复合结构模型

采用 PFC3D 建立土工格室结构层和保护层的模型, 同时采用 FLAC3D 建立下承层的模型, 其模型示意如图 1 所示^[14].

1.2 离散-连续耦合计算思路

本文中的离散-连续耦合算法通过考虑交界处 PFC3D 中的墙体单元与 FLAC3D 中的连续有限单元的相互接触位移作用实现. 在计

收稿日期: 2014-10-10; 修订日期: 2014-12-01

基金项目: 交通运输部科技资助项目(201231879210); 国家科技支撑计划课题资助项目(2014BAG05B04); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CHD2012ZD013)

作者简介: 汪海年(1977—), 男, 江苏涟水人, 长安大学教授, 博士, 主要从事路面结构与材料性能及道路工程数值仿真研究, E-mail: wanghainian@aliyun.com.

引用本文: 汪海年, 张然, 周俊, 等. 基于离散-连续耦合方法的土工格室加筋碎石承载能力数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 49-53.

算过程中交界面处的信息,在 FLAC3D 和 PFC3D 模型中来回交互,通过多次耦合完成数值模型的计算.数据按照二进制方式传递,以保证数据传输的准确性.

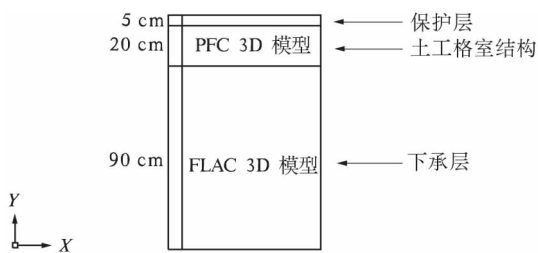


图1 数值模型结构

Fig.1 Numerical model structure

2 土工格室加筋碎石复合结构数值计算模型的建立

2.1 土工格室加筋碎石复合结构数值计算模型

土工格室模型采用规则排列的球体单元建立,如图2所示.下承层三维计算模型下承层采用 FLAC3D 建立,计算模型高为 0.9 m,长和宽都为 0.6 m,三维计算模型如图3所示.

2.2 材料模型参数

土工格室 PFC3D 模型中颗粒单元的微观参数以及下承层模型物理力学参数取值如表1所示.

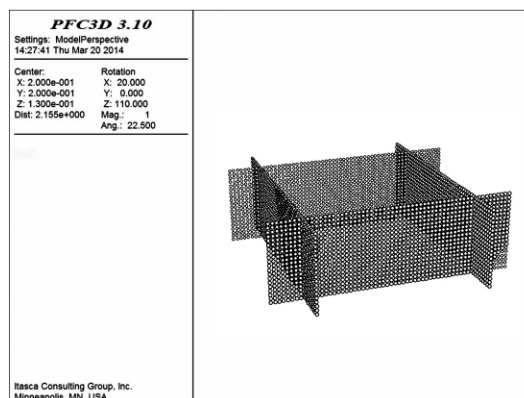


图2 土工格室模型

Fig.2 The model of the geocell

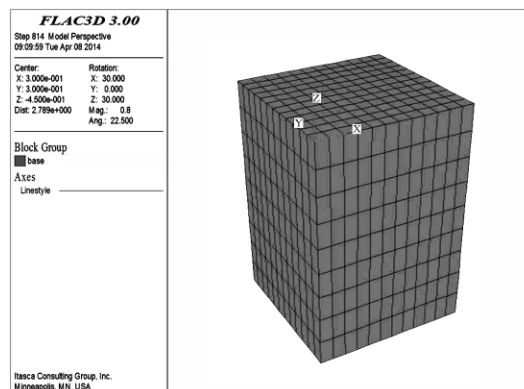


图3 下承层土基模型

Fig.3 The model of soil base on the bearing layer

表1 材料模型参数

Tab.1 Material model parameters

PFC3D 模型参数					FLAC3D 模型参数				
颗粒密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	颗粒半径 r / cm	刚度比	黏结刚度比	摩擦系数 μ	密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	体积模量 K / Pa	剪切模量 G / Pa
1 600	0.5	1	10	0.5	2 100	25.4	15	$3.3\text{E} + 07$	$1.1\text{E} + 07$

3 土工格室加筋碎石结构的耦合分析

3.1 格室焊距对加筋效果的影响

土工格室焊距有 400、600、800 mm3 种,格室高度为 100、150、200 mm.加载位置为格室中孔正上方,逐级加载,最大荷载为 1.1 MPa.当达到最大荷载时,继续对土工格室保护层模型进行加载.虚拟加载过程中不同土工格室加筋碎石结构层的应力-应变曲线如图4所示.由图4可以看出,在加载前期由于荷载逐级增大,土工格室结构层的应力与应变同时增大,此时的结构层处于弹性变形阶段.在加载后期,荷载维持在 1.1 MPa 的水平,此时应力不再增加,应变缓慢的增长,结构层表现出塑性变形的特性.为了更精确地分析不同

焊距对土工格室承载能力的影响,从图4中统一选取弹性区间内应变为 2‰,计算得到结构层的弹性模量,利用这一指标来表征各结构层的承载能力.

在同一高度下,对不同焊距的土工格室结构层的弹性模量进行比较,如图5所示.由图5可以看出,碎石结构层采用土工格室进行加筋之后,构成的复合结构的弹性模量均有显著的提高.土工格室结构层弹性模量的提高比例最小为 15.91%,最大为 38.61%.在同一高度条件下,随着格室焊距的减小,其弹性模量逐渐提高,结构层的承载能力也随之提高.焊距为 400 mm 时,弹性模量提高百分比最大,分别为 23.12%、30.54%、38.61%.

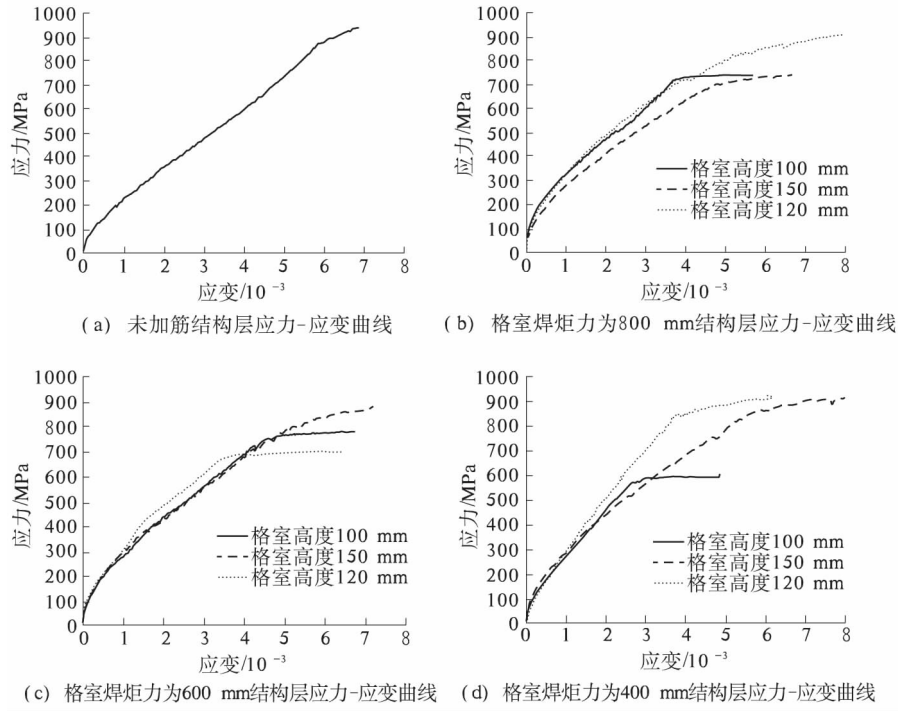


图 4 不同焊炬结构层应力应变曲线

Fig. 4 The stress-strain curve of structure layer in different welding torch

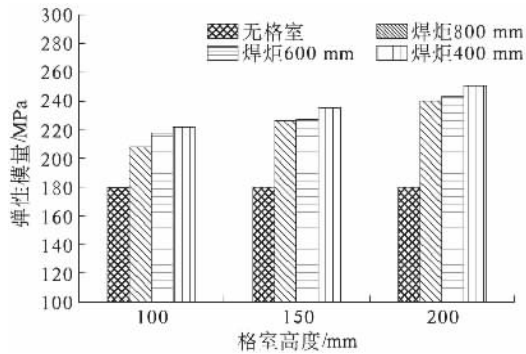


图 5 相同高度结构层的弹性模量

Fig. 5 The elasticity modulus of structure layer with the same height

数值模拟验证: 室内采用承载板试验,取土工格室高度为 150 mm 时的室内试验数据与数值模拟计算数据进行对比,如表 2 所示. 由表 2 可知,室内试验、数值模拟两者采用土工格室进行加筋后,碎石结构层的弹性模量均有显著的提高,结构层的弹性模量都是随着焊距的增大逐渐降低,弹性模量误差分别为 4.90%、5.29%、4.24%,误差较小. 因此该数值模拟计算的结果是可靠的.

3.2 格室高度对加筋效果的影响

对焊距相同条件下,格室高度不同的土工格室结构层的弹性模量进行比较分析,如图 6 所示.

表 2 室内试验与数值计算弹性模量对比

Tab. 2 The contrast of elasticity modulus between lab testing and numerical calculation

格室焊炬/mm		弹性模量/MPa		提高百分比/%	
室内试验	数值模拟	室内试验	数值模拟	室内试验	数值模拟
无格室	无格室	205	180	—	—
400	400	247	234.9	20.5	30.54
600	600	240	227.3	17.1	26.3
800	800	236	226	15.1	25.84

从图 6 中可以看出,与未加筋结构层的弹性模量相比,对碎石进行土工格室加筋后,结构层的弹性模量明显提高,提高量最小为 15.91%,最大为 38.61%. 在格室焊距相同时,随着格室高度的增加,且土工格室结构层的弹性模量值得到了显

著的提高,土工格室结构层的承载能力也随之提高. 当格室高度为 200 mm 时,弹性模量提高最大,分别为 38.61%、31.67%、35.42%. 这说明,在同一焊距条件下,土工格室的承载能力随着格室高度的增加而增强.

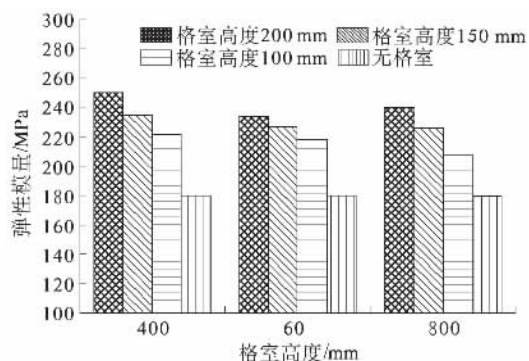


图6 相同焊距结构层的弹性模量

Fig. 6 The elasticity modulus of structure layer with the same welding torch

3.3 下承层竖向变形分析

为了比较不同型号的加筋结构层对下承层竖向变形的影响,笔者选取了400~200 mm、600~200 mm、800~200 mm的加筋结构层与未加筋的结构层的FLAC3D的下承层模型的竖向位移进行了对比.将不同的变形范围的区域面积所占下承层顶面面积的比例进行统计,其结果如表3所示.

表3 不同加筋结构下承层竖向变形统计表

Tab. 3 The statistics of the vertical deformation on the bearing layer with different reinforcement structure

土工格室结构层型号	不同变形范围的区域占下承层顶面面积的比例/%				
	>8 mm	8~7 mm	7~6 mm	6~5 mm	5 mm 以下
无格室	2.8	17.36	19.44	24.31	36.09
800~200	—	20.14	25	24.31	30.55
600~200	—	9.7	11.1	6.9	72.3
400~200	—	—	17.36	10.4	72.24

从表3中可以发现,对未加筋的结构层施加完荷载后,下承层竖向变形量大于8 mm的范围占整个下承层顶面面积的2.8%,且变形大的区域主要集中在加载位置的正下方.对碎石采用土工格室加筋处理且加载完成后,下承层的竖向位移明显降低,其中采用型号为400~200 mm的土工格室结构层的加筋效果最好,竖向变形大的区域占整个下承层顶面面积的17.36%,且分布较均匀.出现这种情况主要是因为:采用土工格室对碎石层进行加筋处理后,土工格室加筋结构的网兜效应与梁板效应的作用开始体现.

4 结论

1) 对碎石采用土工格室加筋处理后,路基承载力得到了很大的提高.土工格室结构层弹性模量提高比例最大为38.61%.

2) 在格室高度一定的情况下,随着格室焊距的减小,土工格室结构层的承载能力增强.

3) 在格室焊距一定的情况下,随着格室高度的增大,土工格室结构层的承载能力相应提高.

4) 型号为400~200 mm的土工格室结构层竖向变形大的区域占整个下承层顶面面积的17.36%,且分布较均匀,加筋效果最好.

笔者所模拟的级配碎石为单一级配,下一步将对不同级配、不同公称最大粒径碎石的加筋效果进行分析计算,同时采用定量方法分析加筋结构层力链分布,考虑加筋结构与路面结构的耦合受力分析,对加筋碎石结构层施工性能与长期性能也有待进一步验证.

参考文献:

- [1] 钟勇强,黄晓明,廖公云,等.融沉变形对柔性路面应力应变影响试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(1):181-185.
- [2] 赵明华,刘猛,龙军,等.双向增强复合地基土工格室加筋体变形分析[J].中国公路学报,2014,27(5):97-105.
- [3] 王广月,王杏花,魏金祥.土工格室坡面侵蚀特性[J].应用基础与工程学报,2013,21(2):249-257.
- [4] 王广月,韩燕,王杏花.降雨条件下土工格室柔性护坡的稳定性分析[J].岩土力学,2012,33(10):3020-3024.
- [5] 陈静云,任瑞波,李玉华,等.沥青路面柔性基层和半刚性基层模量理论研究[J].大连理工大学学报,2004,44(4):536-538.
- [6] BIAN X C, SONG G, CHEN Y M. Deformation behaviors of geocell reinforcement in pasternak ground[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(5): 147-155.
- [7] DASH S K. Effect of geocell type on load-carrying mechanisms of geocell-reinforced sand foundations[J]. International journal of geomechanics, 2012, 12(5): 537-548.
- [8] JIANG M J, YU H S, HARRIS D. Discrete element modeling of deep penetration in granular soils[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2006, 30(4): 335-361.
- [9] 周健,黄金,张姣,等.基于三维离散-连续耦合方法的分层介质中桩端刺入数值模拟[J].岩石力学与工程学报, 2012(12): 2564-2571.
- [10] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.

- [11] 周健,王家全,孔详利,等. 砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J]. 岩土工程学报, 2010(1): 61-67.
- [12] 郭书魁. 竖向加筋砂土直剪试验的颗粒流数值分析[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2013.
- [13] 陈建峰,李辉利,柳军修,等. 土工格栅与砂土的细观界面特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(S): 66-71.
- [14] 马晋. 土工格室加固碎石基层承载能力试验研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2013.

Numerical Simulation of the Bearing Capacity for Geocell Reinforced Gravel Based on Discrete-Continuous Coupling Calculation

WANG Hainian^{1,2}, ZHANG Ran¹, ZHOU Jun¹, LIU Yu¹, YOU Zhanping^{1,3}

(1. Key Laboratory of Road Structure and Material Transportation, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Traffic in The Power Construction Co., LTD, Xi'an 710064, China; 3. School of Civil Engineering and Environment, Polytechnic University of Michigan, Horton 49931, America)

Abstract: The base material of geocell reinforced gravel has strong ability to adapt to the deformation of the subgrade, but its bearing capacity and deformation mechanism not clear. The discrete-continuous coupling calculation was used to calculate the mechanical properties of different geocell reinforced gravel composite structure and the composite structure in which the geocell was not set up in the process of loading. The geocells include 9 kinds whose height is 100mm, 150mm and 200mm, whose welding torch is 400 mm, 600 mm and 800 mm. Then the elasticity modulus of the bearing layer is analyzed. The results indicated that the bearing capacity of the subgrade got an obvious improvement after gravel was enforced by the geocell. Elasticity modulus of structure layer increased by 38.61%. When the height of the geocell is fixed, with the decreasing of the geocell welding torch, the loading capacity of geocell structural layer is increasing. When the geocell welding torch is fixed, with the increasing of the geocell height, the loading capacity of geocell structural layer is accordingly increasing. The geocell model of 400-200mm, which big vertical displacement accounted for 17.36% of whole bearing layer area, evenly distributed, and the best reinforced.

Key words: road engineering; geocell; reinforced structure; bearing capacity; numerical modeling

文章编号: 1671-6833(2016)01-0054-06

基于有限元法的某 SUV 后部碰撞分析研究

胡雪芳

(青岛黄海学院 交通与船舶工程学院, 山东 青岛 266427)

摘 要: 基于有限元分析法,以某 SUV 为研究对象,建立了其有限元模型,对后保险杠中心和车角碰撞过程进行了模拟,通过分析其吸能特性,评价了后保险杠的碰撞性能,然后根据法规要求,对后部 100% 和 40% 重叠低速碰撞进行了仿真,分析了碰撞过程各部件的变形、应力分布及能量变化等,验证了设计的合理性,为结构的进一步优化提供了依据,该方法为研究整车后部碰撞提供了新的思路,对深入研究后保险杠、整车碰撞仿真及实车碰撞试验具有重要的参考价值。

关键词: SUV; 有限元分析; 后保险杠; 低速; 后部碰撞

中图分类号: U463.1

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504040

0 引言

随着电子计算机硬件、软件技术的不断发展,在提高汽车安全性能方面,有限元法起着越来越重要的作用,在这方面,外国尤其欧美等国已取得较大的成效,并形成了比较成熟的处理碰撞技术的经验,国内虽然也取得了一定的成就,但是由于起步较晚,技术有待完善,因此,有限元在汽车碰撞安全性方面的研究具有非常广阔的前景.汽车的耐撞性能最终都需要通过实车碰撞试验来检验,但前期一般通过有限元法进行模拟,有限元模拟能够节省成本、缩短开发周期,为汽车设计或改进提供一些基本规律和指导方向.

汽车的碰撞主要分为正面、侧面和后面的碰撞,发生的比例正碰约 49%,侧碰约 25%,后碰约 22%,其他类碰撞占 4%^[1],由于后碰发生频率低且造成的后果轻,所以对其研究相比前两者较少,笔者就此以某 SUV 为研究对象,对其后部碰撞进行了详细分析,从局部和整体两方面进行研究,提出研究车辆后部碰撞的新思路.

1 整车参数及有限元模型

为了使计算结果更加精确,笔者对整车的参数进行了详细的了解及确认,同时在建立有限元模型时采取了最低限度的简化,这样一来计算精

度越高,对实际的指导意义越大.整车的详细参数如表 1 所示.

表 1 整车详细参数

Tab.1 The vehicle parameters in detail

参数	数值
外观尺寸/mm	4 786 × 1 928 × 1 807
轴距/mm	2 910
轮距,前/后/mm	1 646/1 648
前悬/mm	878
后悬/mm	1 000
行李箱容积/L	835
整备质量/kg	2 210
空载轴荷,前/后/kg	1 148/1 062
空载轴荷百分比,前/后/%	52/48
乘载质量/kg	375
满载质量/kg	2 585
满载轴荷,前/后/kg	1 251/1 334
满载轴荷百分比,前/后/%	48.4/51.6
质心位置(整备)/mm	(1 473, -386, 439)

笔者选用 Hypermesh 对整车进行前处理,对车身、梁等钣金件使用壳单元,发动机、变速器等刚性结构采用实体单元.通过设置密度参数赋予其质量;通过设置不同材料属性定义零部件的材料特性;整车的装配连接关系根据实际的连接方式,使用了点焊单元(spotweld)、刚性单元(rigid)和各种形式的运动副,保证碰撞过程中各部件的

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-10-19

作者简介: 胡雪芳(1965—),女,福建长汀人,青岛黄海学院副教授,硕士,主要从事车辆工程方面的教学及研究工作, E-mail: liuxiangbin560@126.com.

引用本文: 胡雪芳. 基于有限元法的某 SUV 后部碰撞分析研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 54-59.

变化能够反映真实的运动情况^[2]. 最终的有限元模型如图 1 所示, 该模型包含单元数 1 876 153 个, 节点数 1 846 723 个, 根据要求对网格质量进行检查, 使其满足碰撞分析的要求.



图 1 整车有限元模型

Fig.1 Finite element model of the vehicle

为了保证后面分析结果的正确性, 对有限元模型进行了验证, 笔者采用模态试验法进行验证. 根据某公司提供的试验模态结果, 与有限元模态分析结果进行对比, 试验得到的振型与计算得到的振型基本一致, 计算得到的固有频率与试验得到的固有频率存在一定的误差, 主要是因为计算结果是建立在对实际模型简化的基础上, 同时, 试验模态是采用线性分析, 忽略了部分会出现非线性的情况, 所以, 存在一定的误差是合理的. 计算模态与试验模态基本一致, 验证了所建有限元模型的

可靠性.

2 后保险杠低速碰撞分析

由于在后碰撞时, 首先接触的是后保险杠, 其是最主要的承力部件之一, 可以吸收低速撞击的能量, 缓和外界对车身的冲击, 对车体结构起着主要的防护作用, 所以笔者对后保险杠在后碰撞过程中的特性进行了分析, 在 Hypermesh 中进行前处理之后得到其有限元模型, 有限元模型包括 16 958 个单元, 75 362 个节点, 主要由 CTRIA3、CQUAD4 和 CTETRA 单元组成^[3].

2.1 后保险杠强度和刚度分析

为了了解后保险杠抵抗外部载荷的能力及其刚度特性, 对其强度和刚度进行分析, 分析时后保险杠与车身连接处约束全部自由度.

静态下后保险杠在汽车纵向(X 方向)、横向(Y 方向) 受到来自车身的力很小, 垂向(Z 方向) 受到车身重力较大, 根据汽车保险杠设计的经验, 对后保险杠进行了 3 种载荷工况的静强度分析: 分别对其施加沿 X 方向的加速度 5 g, 沿 Y 方向的加速度 5 g, 沿 Z 方向的加速度 10 g. 由 Nastran 求解后得到的后保险杠不同零部件的应力分布^[4]. 3 种工况下后保险杠的静强度特性如表 2 所示.

表 2 3 种工况下的后保险杠静强度特性

Tab.2 Static strength characteristics of the rear bumper under the three conditions

部件名称	材料	屈服极限 /MPa	最大 Mises 应力 /MPa		
			5G-X	5G-Y	10G-Z
后保险杠本体	—	—	2.2	1.7	3.3
后保险杠拖钩盖板	PP + EPDM - TD20	20	—	—	—
后保险杠装饰板	—	—	1.1	0.2	2.0
后保险杠中骨架	PP - TD20	26	1.6	0.8	4.1
后保险杠安装支架	POM	44	3.9	4.3	3.1

材料的安全系数为 0.9, 所以从分析结果可以看出, 后保险杠各部件的最大应力远小于材料的屈服极限, 所以后保险杠能够满足强度要求.

刚度分析时采用的方法是: 在后保险杠较为平坦的区域布置一定数量的测点, 然后在测点位置分别施加垂直于其表面的 100 N 载荷, 利用 Nastran 进行求解, 计算出各测点的侵入量, 最后得出后保险杠的刚度值. 笔者在选取测点位置时, 沿边缘向内约 50 mm, Y 向间隔约 100 mm, Z 向间隔约 100 mm, 共选取 42 个测点, 如图 2 所示.

经过计算之后, 得到各个测点的位移变化量, 计算后得到各个测点的刚度值, 表 3 是具体的分

析结果. 通过分析结果可以看出, 所有测点的刚度值都大于 12 N/mm(设计时目标值), 所以, 后保险杠的刚度特性能够满足要求.

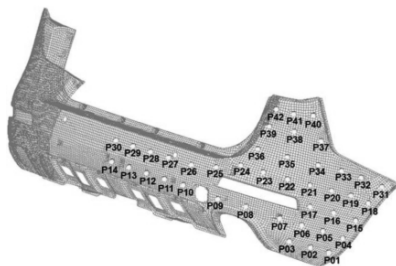


图 2 刚度测点分布图

Fig.2 Stiffness measuring point distribution

表 3 后保险杠刚度特性

Tab.3 Stiffness characteristics of the rear bumper

序号	位移/ mm	刚度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)	序号	位移/ mm	刚度/ ($\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$)
1	6.6	15.15	22	1.5	66.67
2	4.3	23.26	23	2.2	45.45
3	2.3	43.48	24	2.3	43.48
4	7.8	12.82	25	2.7	37.04
5	2.9	34.48	26	4.1	24.39
6	1.9	52.63	27	4.2	23.81
7	4.2	23.81	28	4.2	23.81
8	5.3	18.87	29	4.2	23.81
9	3.8	26.32	30	4.3	23.26
10	5.2	19.23	31	1.7	58.82
11	3.8	26.32	32	2.9	34.48
12	3.8	26.32	33	5.2	19.23
13	3.7	27.03	34	4.1	24.39
14	3.5	28.57	35	3.3	30.30
15	6.2	16.13	36	3.7	27.03
16	7.2	13.89	37	2.3	43.48
17	4.1	24.39	38	3.2	31.25
18	4.9	20.41	39	3.7	27.03
19	8.4	13.10	40	1.5	66.67
20	4.7	21.28	41	2.4	41.67
21	2.4	41.67	42	2.5	40.00

2.2 低速中心碰撞和车角碰撞

由于整车结构相对于保险杠质量要大得多,低速碰撞过程中,可认为车体基本不发生位移.考虑到计算的时效性,分析过程中只取后部结构进行分析,在保险杠系统与车身连接部位进行刚体耦合约束,将保险杠与车身连接部位统一用刚性单元连接,并约束此刚性单元的自由度,同时给此刚体赋予整车的质量、惯量等.根据法规 ECE R42 中关于中心碰撞试验和车角碰撞试验要求进行相关设置,碰撞模型如图 3 所示.



图 3 中心碰撞和车角碰撞模型

Fig.3 Center and angle car collision model

碰撞时分为整车整备质量碰撞和加载试验车质量碰撞,由于后者的碰撞能量更高,所以笔者只对加载试验车质量碰撞进行了研究^[5].为了更好地模拟实际情况,分析过程中,碰撞器的速度分别为 4.25 km/h(中心碰撞)和 2.6 km/h(车角碰

撞),计算碰撞时间为 250 ms.经过 Lsdyna 仿真模拟后得到相应结果.图 4~5 分别为具体的仿真结果.

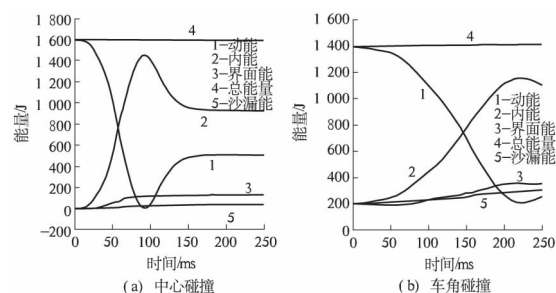


图 4 能量平衡曲线

Fig.4 Energy equilibrium curve

能量曲线表征碰撞过程中动能向内能转化的过程,从碰撞能量曲线可以看出:总能量基本保持不变,沙漏能与总能量的比例控制较好.中心碰撞和车角碰撞分别在 92 ms 和 220 ms 左右内能达到最大,之后构件发生弹性回弹.随着碰撞器能量的衰减,保险杠各构件变形逐渐稳定,发生永久塑性变形.

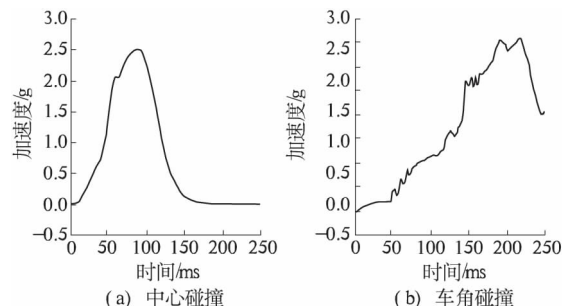


图 5 加速度变化曲线

Fig.5 The acceleration curve

由加速度曲线可知,中心碰撞加速度最大值约为 2.5 g,发生在内能最大时刻,最大值持续时间约 15 ms,且 92 ms 之后碰撞器开始回弹;车角碰撞加速度最大值约为 0.72 g,发生在内能最大时刻,最大值持续时间约 30 ms,且 220 ms 之后碰撞器开始回弹.由于碰撞器动能大多转化为保险杠内能,因此模型开始稍做反弹振荡后,碰撞器与保险杠开始分离,至此碰撞结束.

2.3 仿真结果分析

参照碰撞法规 ECE R42 的要求,对后保险杠系统进行了两种工况下(中心碰撞及车角碰撞)的低速碰撞仿真分析,从分析结果可以看出:

1) 碰撞过程中,能量的主要传递途径是:通过结构的弹塑性变形吸收一部分能量(内能);通

过试验车辆与碰撞器之间的速度再分配保留一部分碰撞动能. 总能量基本守恒, 主要由动能、内能和沙漏能组成, 其中沙漏能较小.

2) 碰撞过程中, 变形主要发生在后保险杠等可拆卸部件上. 保险杠后部结构(包括保险杠横梁以及后地板纵梁后端)几乎没有变形, 这样能大大降低维修成本.

3) 虽然保险杠系统产生了较大的塑性变形, 但仍保持较好的完整性. 碰撞能量主要被后保险杠系统吸收, 其具有较好的低速耐撞性能.

3 整车后部低速碰撞分析

3.1 100% 重叠低速碰撞

根据 GB 20072—2006《乘用车后碰撞燃油系统安全要求》^[6] 法规的要求, 设置后部 100% 重叠低速碰撞条件. 分析过程中, 刚性移动壁障的质量为 1 100 kg, 初速度为 50 km/h, 方向为 X 轴负向, 计算碰撞时间为 100 ms. 能量平衡曲线如图 6 所示.

从能量曲线可以看出: 总能量基本保持不变, 沙漏能与总能量的比例控制较好. 由于试验车的初

速度为零, 开始只有台车具有动能. 碰撞发生后, 总能量转化为试验车和台车的动能, 及试验车发生弹性变形和塑性变形的内能、系统具有的沙漏能和摩擦能.

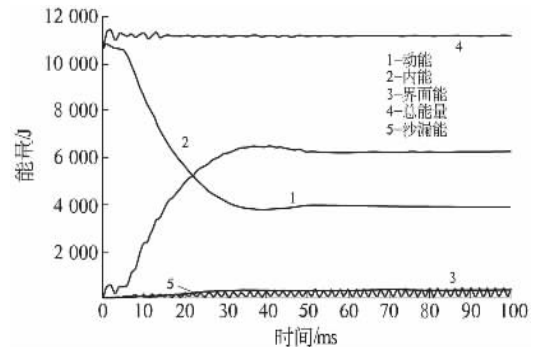


图6 100%重叠碰撞能量平衡曲线

Fig.6 100% overlap collision energy equilibrium curve

在碰撞仿真过程中, 确定碰撞结束后能否在规定作用力下正常开启车门难度较大, 但可以通过对门框变形量的分析对其进行间接评价^[7]. 分析时取门框上有代表性的点, 测出各点碰撞过程中最大变形量. 表4为各测点的最大变形量, 图7为各测点的位置分布.

表4 各测点最大变形量

Tab.4 Biggest deformation of each measuring point

测点	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
LH	4.59	7.63	11.35	14.92	17.33	16.98	15.42	13.02	10.63	8.22
RH	4.61	7.72	11.42	15.03	16.52	15.78	14.63	12.88	10.69	8.43

注: LH—左侧门框; RH—右侧门框

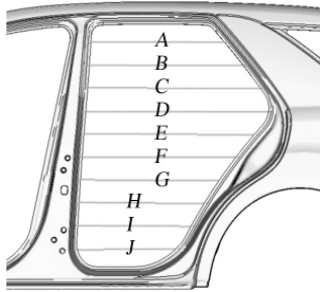


图7 后门框各测点变形曲线

Fig.7 Each measuring point distribution

碰撞过程中, 在纵向冲击力的作用下门框主要表现为纵向压缩. 当门框变形量足够大, 以致于与车门发生挤压, 使车门发生变形. 在变形力的作用下会出现门框与车门之间的卡死现象, 是导致车门不能开启的主要原因. 由分析结果可以看出, 后门

框左/右侧的最大变形量分别为 17.33 mm 和 16.52 mm, 按照设计要求一般低于 30 mm, 所以能够满足目标要求.

图8是碰撞过程燃油箱应力应变分布云图.

通过观测油箱的塑性应变来评估碰撞过程中油箱是否开裂, 如果塑性应变超过材料的断后伸长率, 则会造成材料失效而产生破坏. 从分析结果可以看出, 碰撞过程中油箱的最大塑性应变几乎为0, 因此, 油箱能够满足燃油泄露的要求.

图9是后碰过程中的牵引处失效部位. 通过分析碰撞时牵引处的变化过程, 得出 A、B 连接处螺栓轴向力未收敛, 所以后碰过程中, 牵引机构与后纵梁的连接螺栓失效, 避免了油箱处纵梁的过大变形.

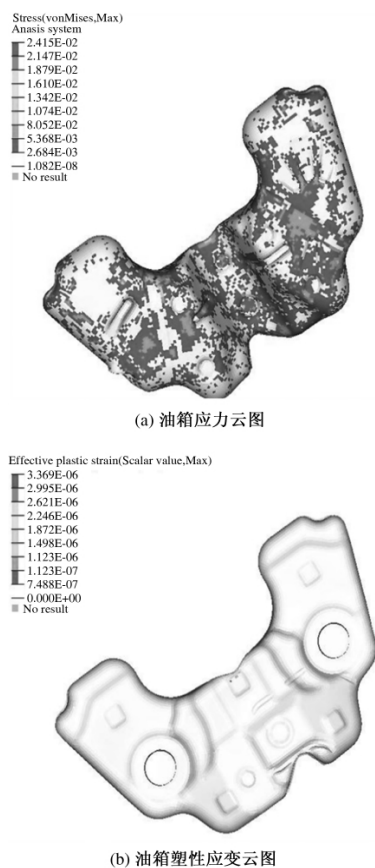


图8 油箱应力和塑性应变云图

Fig.8 Stress and plastic strain contours of the fuel tank

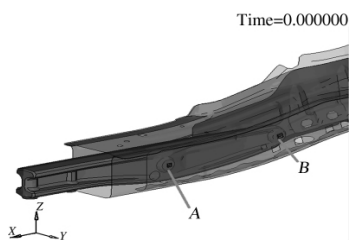


图9 牵引处失效位置

Fig.9 Traction failure position

3.2 40% 重叠低速碰撞

根据 RCAR 法规的要求,设置后部 40% 重叠低速碰撞条件,分析过程中,台车的速度为 16 km/h,方向为 X 轴负方向,与试验车辆重叠率为 40%,计算碰撞时间为 140 ms. 经过计算得到碰撞能量的分布^[8]. 图 10 和表 5 反映了不同部位的吸能量.

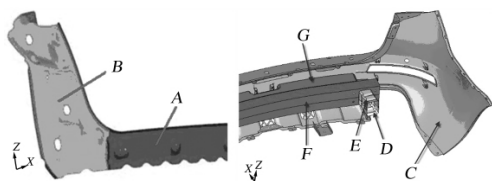


图10 后部主要吸能部位

Fig.10 The main energy absorption area of the rear

表5 后部不同部位的吸能量

Tab.5 The energy absorption of the rear different parts

测点	吸能量/J	总内能/J	吸能百分比/%
A	87	11 872	0.73
B	15		0.13
C	1 792		15.09
D	1 342		11.30
E	1 256		10.58
F	302		2.54
G	195		1.64

后部 40% 碰撞过程中 $C \sim G$ 点是主要的吸能部件,吸收能量约占总内能的 41% 左右,变形主要在后保险杠、吸能盒等可拆卸部件上,其中吸能盒吸收能量最大,发生了轴向压溃,吸能充分,变形较理想,其截面力的变化情况如图 11 所示. A 、 B 为车身后围,仅有较小的变形,变形吸能只占总内能的 0.86%,碰撞结束后塑性应变较小,这样能大大降低维修成本. 由台车与后背门的相对位置关系可知,后碰时不会造成后背门的损坏,减小了维修量及维修成本.

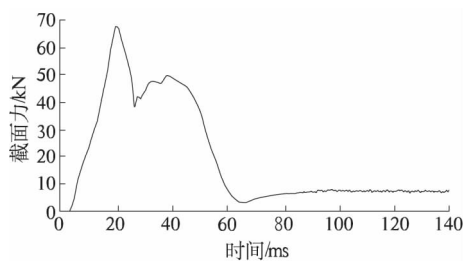


图11 吸能盒截面力变化曲线

Fig.11 The energy absorbing box section force curve

综上所述,该 SUV 具有较好的后部低速耐撞性能,分析结果为 SUV 车型结构设计提供参考依据,同时为研究汽车后部碰撞分析提出了一种新的思路和方法,该方法较全面而有效地模拟了汽车后部碰撞的过程,给实际中经常发生的追尾等交通事故提供了仿真分析的方法.

4 结论

笔者利用有限元法,首先对某 SUV 后保险杠的耐碰撞特性进行了分析,利用 3 个方向强度和有规则分布的测点刚度反映整体强度及刚度特性,然后从 100% 重叠和 40% 重叠两个方面研究了整车后部低速碰撞特性,最终验证了该 SUV 后部结构设计的合理性,提出了局部和整体结合研究汽车后部碰撞的新思路和方法,为进一步研究 SUV 结构优化提供了依据. 在研究中,如果能够

进行实车试验,得到的试验结果与仿真结果进行对比分析,对整车的碰撞分析具有更好的指导意义.

参考文献:

- [1] 吴海京. 某 SUV 高速追尾碰撞结构安全性优化研究 [D]. 秦皇岛:燕山大学车辆与能源学院, 2014: 31 - 40.
- [2] HANS Z, MANOAR P. Implicitly parametric crash and NVH Analysis model in the vehicle concept design phrase [J]. Modellierung LS-DYNA, 2005, 12: 61 - 69.
- [3] AXEL S. New optimization strategies for crash design [J]. Keynote-Vortrag LS-DYNA, 2005, 18: 1 - 13.
- [4] 张国胜, 王维. 车辆正面碰撞的仿真与试验 [J]. 东北大学学报, 2011, 32(10): 15 - 19.
- [5] 张乐平. 某 SUV 正面碰撞仿真分析及其优化 [D]. 长沙: 湖南大学机械与运载工程学院, 2014: 36 - 45.
- [6] 中国汽车技术研究中心. 乘用车后碰撞燃油系统安全要求: GB 20072—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [7] 黄世霖, 张金换. 汽车碰撞与安全 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 30 - 42.
- [8] 曾应龙. 提高陆风 SUV 汽车正面碰撞安全性的研究 [J]. 汽车工程, 2008, 32(10): 42 - 45.

Research and Analysis of a SUV Rear Collision Based on FEM

HU Xuefang

(College of Traffic and Marine Engineering Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China)

Abstract: The finite element model which takes a SUV as the object is established based on finite element analysis, and this paper simulates the center and angle collision process of the rear bumper. It evaluates the performance of the rear bumper collision by analyzing the energy absorption characteristics. According to the laws and regulations, this paper simulates the 100% and 40% overlap of the rear part low-speed collision and analyzes the collision deformation of every part, stress distribution and energy change. In the end, it verifies the rationality of the design. The results provide a basis for the further optimization of the structure and offer a new idea for the vehicle collision, and they are of great reference value for further study of the rear bumper, the vehicle collision simulation and real vehicle crash test.

Key words: SUV; finite element analysis; rear bumper; low speed; rear collision

(上接第 33 页)

Research of the Transient Disturbance Detection Technology of Power System Using Local Mean Decomposition Algorithm

HAN Jianpeng, Lu Gaifeng, Cao Wensi

(School of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The transient disturbance signals of power system have characteristics of nonlinear, irregular and mutation. Thus the local mean decomposition (LMD) algorithm is used for detecting disturbance signals to get higher measurement accuracy. And the typical power quality transient disturbance signals including voltage swell signal, voltage sag signal, voltage interruption signal, transient oscillation signal, transient pulses signal, frequency fluctuation signal, harmonics and voltage swell signals as well as actual disturbance signals occurred in smart substation are analyzed with the LMD algorithm. The simulation results show that LMD algorithm is rather effective in measuring transient disturbance signals of power system and has higher precision and faster computing speed than Hilbert-Huang transform (HHT) algorithm.

Key words: LMD algorithm; transient disturbance signal; end effect; smart substation; power quality detection; HHT

文章编号: 1671-6833(2016)01-0060-05

水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响

宋丹青¹, 王 丰², 梅明星³, 刘鹏飞⁴

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030; 2. 河南大学 生命科学学院, 河南 开封 475004; 3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 4. 河南大学 黄河文明与可持续发展研究中心, 河南 开封 475004)

摘 要: 水库蓄水使库岸边坡稳定性变化较大, 以甘肃省九甸峡库区燕子坪(28#)滑坡为例, 采用 GPS 对滑坡的位移进行定期监测, 分析蓄水对库岸边坡稳定性的影响规律, 并采用边坡熵的方法进行验证. 分析结果表明: ①蓄水过程可分为 3 个阶段, 包括蓄水位 0~70 m, 70~100 m 和 100~130 m 3 个阶段, 且每个蓄水阶段对滑坡的影响程度不同. ②蓄水位 100~115 m 与 115~130 m 两个蓄水范围内滑坡的稳定性受影响程度不同. ③采用边坡熵的方法验证蓄水与库岸滑坡稳定性的关系是适用的, 对于其他类似研究可以提供借鉴作用.

关键词: 水库蓄水; 库岸滑坡; 稳定性; 九甸峡水库

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201503040

0 引言

水库蓄水使地下水位和河流局部侵蚀基准面抬升, 造成库区沿岸的水文地质条件发生显著变化, 从而导致库岸边坡的稳定性也发生显著变化^[1-2]. 水库蓄水初期李家峡水电站附近发生两起大型滑坡^[3]; 湖北省秭归县千将坪因库水位上升导致滑坡灾害的发生^[4]; Malpasset 薄拱坝在蓄水后的第 5 年, 左坝头岩体发生失稳; Vajont 水库由于蓄水造成了大型滑坡灾害的发生^[5]. 因此, 水库蓄水与库岸边坡的稳定性关系密切. 在国内外, 大量学者对库水位升降影响库岸边坡稳定性的研究已取得大量优秀成果. 王明华等^[6]分析了蓄水改变了临水边坡的安全系数和变形模式; 李晓等^[7]分析了库区临水坡稳定性与库水位下降之间存在的规律; 张文杰等^[8]模拟了库水位变化时滑体内的孔压场; 李绍军等^[9]模拟了库水位升降条件下的滑坡变形破坏过程; 贾官伟等^[10]对于库水位突降条件下库岸滑坡失稳模式和原因进行了研究. 笔者采用 GPS 对滑坡位移进行监测, 通过分析监测点的位移研究蓄水对库岸边坡稳定性的影响, 对于类似水利工程的建设具有重要借

鉴意义.

1 工程概况

1.1 燕子坪滑坡基本概况

九甸峡库区位于洮河中游的临潭、卓尼县的九甸峡峡口处, 库区面积约 916 km², 为典型的河谷型水库, 总体地势西高东低, 沟壑纵横, 山势挺拔, 属西秦岭北缘山区. 区内年均气温约 7℃, 年均降水量 588.2 mm, 多集中在 7~9 月份. 28# 滑坡位于燕子坪以南, 滑坡平面平均宽约 400 m, 形态呈长舌形, 分布高程 2 095~2 360 m, 上部以大块石为主, 中部块石和土体混杂, 下部以黄土类土为主. 滑体基座面上覆盖有松散堆积层, 厚约 30~73 m, 坡度局部较陡, 约为 30°~40°(图 1), 滑体平坦蓄水水层厚度为 10~35 m, 埋深 1~15 m. 滑体前缘发育有宽约为 100 m 的 I 级侵蚀堆积阶地, 滑体表面发育两条冲沟, 基座面较窄. 前初始水位 2 070 m, 正常水位坡在蓄水过程中发生多次局部失稳, 由于离主坝较近, 对库区主坝及下游危害严重.

1.2 滑坡现场监测

基于滑体各监测点的位移量的不同, 将该滑

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41401107)

作者简介: 宋丹青(1989—), 男, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究, E-mail: danqingsonglzu@163.com.

引用本文: 宋丹青, 王丰, 梅明星, 等. 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 60-64.

坡分为 I、II₁、II₂、III 区 4 个区(图 1),采用北极星 9 600 GPS 对滑坡外部变形进行监测. 根据滑坡特点选择布设方案(包括 19 个监测点),且依据九甸峡公司滑坡外部变形监测报告^[11],各区的位移变化如图 2~图 5 所示.

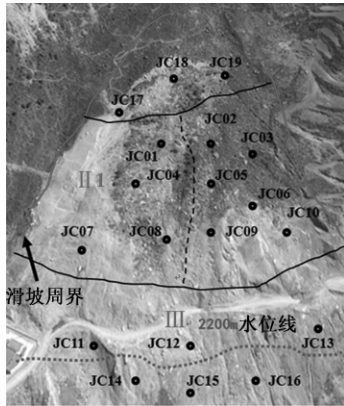


图 1 滑坡监测点布置及分区图

Fig. 1 The monitoring plan and partition

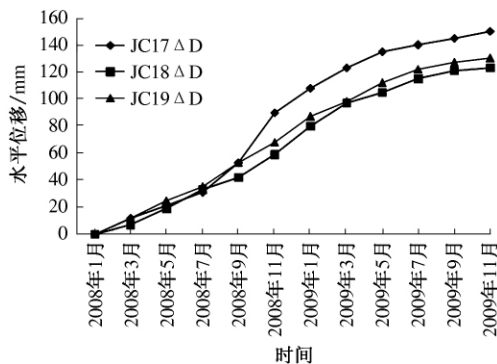


图 2 I 区监测位移

Fig. 2 The monitoring displacement in I area

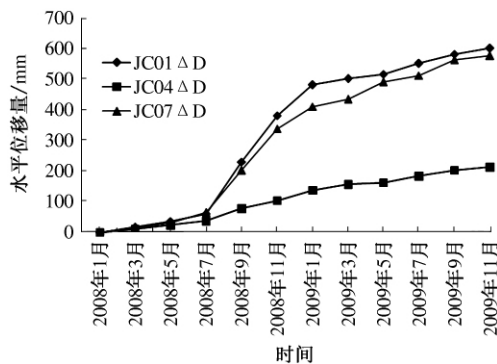


图 3 II₁ 区监测位移

Fig. 3 The monitoring displacement in II₁ area

2 影响因素分析

库岸滑坡与水有密切关系的约占 90%,在影响库岸滑坡发生的众多因素中,水是最难定量研究、最活跃的因素^[12]. 研究水库蓄水对库岸滑坡

的稳定性的影响,主要选取库水位和蓄水速率两个主要影响因素进行分析. 在蓄水后期(蓄水位 100 m 至正常蓄水位)库区沿岸的水文地质条件已趋于稳定,库岸边坡内的渗流场变化较小,正常运营阶段的库水位变化与蓄水后期相似,因此研究蓄水后期的库岸滑坡的稳定性具有重要意义.

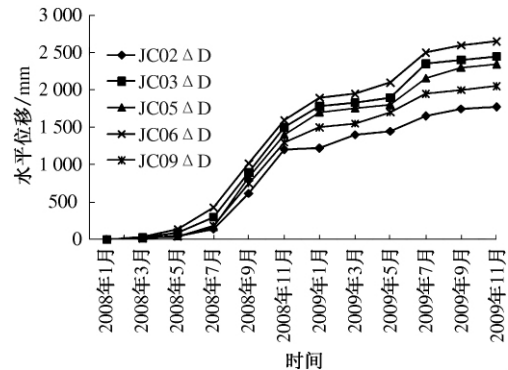


图 4 II₂ 区监测位移

Fig. 4 The monitoring displacement in II₂ area

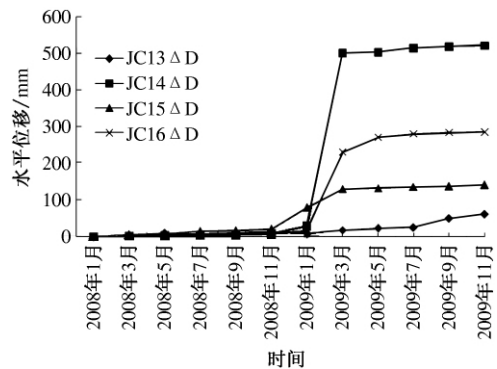


图 5 III 区监测位移

Fig. 5 The monitoring displacement in III area

2.1 库水位变化的影响

以 I 区为例进行数据分析,由图 2 和图 6 可知:在蓄水位 0~70 m 阶段,JC17~JC19 最大水平位移量约为 40 mm,且随着蓄水位(图 2)的增加呈线性上升关系. 蓄水位 70~100 m 阶段,各监测点的位移增量约为 80 mm;蓄水位 100 m 至正常蓄水位阶段,位移增量约为 20 mm,其余各区均有相似规律. 由数据分析可知:蓄水至 70 m 前蓄水对该滑坡的稳定性影响很小;蓄水位 70~100 m 阶段,蓄水对该滑坡稳定性有较大的不利影响;蓄水位 100 m 后蓄水有利于该滑坡的稳定.

2.2 蓄水速率的影响

蓄水速率也是影响库岸边坡稳定性的重要因素之一,以 JC17~JC19 监测点的位移变化为例,研究蓄水速率对滑坡稳定性的影响. 根据实际监测资料^[11]:JC17 的水平位移增量为 18 mm,水平

位移变化率为 0.6 mm/d ; 蓄水速率为 0.11 m/d 时, JC17 水平位移增量为 15 mm , 水平位移变化率为 0.5 mm/d ; 蓄水速率为 0.04 m/d 时, JC17 水平位移增量为 8 mm , 水平位移变化率为 0.27 mm/d ; 蓄水速率为 0.46 m/d 时, JC18 及 JC19 变化趋势与之相似. 因此, 蓄水速率对水平位移量有较大影响.

蓄水速率较小时, 库水位上升较慢, 滑体内的地下水位抬升也相对较慢, 产生的孔隙水压力较小; 蓄水速率较大时, 由于库水位的抬升相对滞后, 产生的超孔隙水压力, 削弱滑坡的稳定性. 蓄水速率保持在 0.35 m/d 范围内, 对该滑坡的变形破坏影响较小; 随着蓄水速率的升降, 位移量及其变化率的大小也随之升降. 蓄水速率的变化对该临水边坡的稳定性有着重要影响. 蓄水速率越大, 越不利于该滑坡的稳定; 蓄水速率变化愈大, 越不利于该滑坡的稳定, 容易导致库岸边坡失稳.

2.3 蓄水后期库岸边坡稳定性的影响

由于 II_2 区水平位移量变化最大, 以该区为例具有实际意义. 图 6 为九旬峡水库蓄水位随时间变化图, 图 7 为 II_2 区水平位移量随时间变化图. 由图 6 和图 7 可知: 2009 年 3 月 ~ 7 月, 蓄水位在 $100 \sim 115 \text{ m}$ 内波动, 其位移增量约为 500 mm ; 7 月至 12 月, 蓄水位在 $115 \sim 130 \text{ m}$ 变化, 其位移增量约为 200 mm . 在蓄水位 $100 \sim 115 \text{ m}$ 阶段, 库水位速率改变量越小, II_2 区的位移增量较大, 不利于库岸滑坡的稳定, 库水位升降速率建议保持在 0.03 m/d 内; 在蓄水位 $115 \sim 130 \text{ m}$, 九旬峡库水速率的变化较大, II_2 区的位移增量较大, 滑坡处于较为稳定状态; 在蓄水位 $115 \sim 130 \text{ m}$ 范围内, 库水位下降有利于 28# 滑坡的稳定. 根据实际监测资料显示^[11]: I 区和 III 区位移很小, 较为稳定; II 区的位移较大, 其中 II_2 区最大, 很可能发生局部失稳.

3 边坡熵计算结果分析

3.1 滑坡稳定性计算模型及原理

安全熵是在关系矩阵和信息熵的基础上提出的, 具有关系矩阵对敏感性及信息熵对紊乱度的量化的优点^[13-14]. 当边坡变形无序时, 其熵值较高, 安全系数较大, 稳定性较好; 反之边坡信息熵低, 处于熵减状态. X_i 为主要影响边坡稳定性的因素, 其中 X_i 的对应影响指数为 P_i , 边坡信息熵为 SE, 量化协调值为 SSE, 其中 P_i 、SE 和 SSE 的计算公式可从文献 [13] 中查出.

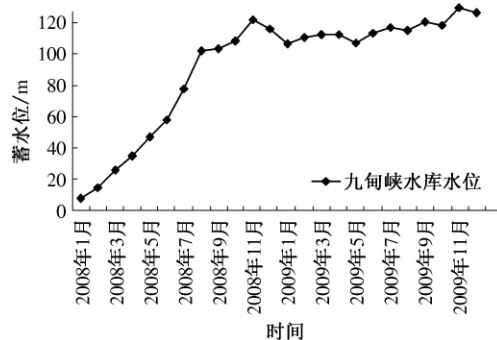


图6 九旬峡水库蓄水位

Fig.6 The water level of Jiudianxia Reservoir

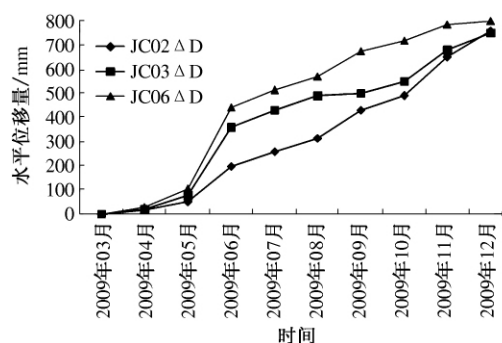


图7 II_2 区水平位移量

Fig.7 The Horizontal displacement of II_2 area

采用边坡安全熵(SSE)方法, 以 II_1 区为例, 计算蓄水位至 2130 m 时的安全熵, 通过其计算结果与数据分析结果进行对比, 验证蓄水对库岸边坡稳定性的影响规律. 选取燕子坪(28#)滑坡的边坡坡度、边坡高度、地下水、岩土体性质、施工、降雨和蓄水高程 7 个主要影响该滑坡稳定性的因素, 并对 7 个主要影响因素进行赋值. 采用方法定量评价边坡稳定性^[15].

3.2 不同蓄水位条件下稳定性分析

3.2.1 边坡熵计算

按照安全熵模型计算出蓄水位至 50 m 时的边坡熵(表 1), 滑坡的变形表现为杂乱无序, 因而蓄水初期整体稳定性较好, 并采用同样方法计算在蓄水全过程中不同蓄水位时的边坡熵值. 图 8 为不同水位下各区边坡熵值. 由图 8 可知: I 区的边坡熵值整体上表现为杂乱无序, 稳定性较好, 边坡熵高. II_1 区在蓄水位 70 m 之前变形杂乱无序, 较为稳定. 在蓄水位 $70 \sim 100 \text{ m}$ 阶段, 滑坡变形朝着一个方向发展, 已经开始变形有序, 熵值在不断减小, 这时边坡安全系数较小, 稳定性差; 在蓄水位 $100 \sim 130 \text{ m}$ 阶段, 边坡熵值整体上杂乱无序, 稳定性较好. II_2 区蓄水位 70 m 之前阶段, 变形无序, 稳定性较好. 在蓄水位 $70 \sim 100 \text{ m}$ 阶段处于

熵减状态,也即内部变形有序,稳定性较差,发生了局部滑动,符合实际勘测情况.在蓄水位 100 ~ 130 m 阶段,边坡熵值整体上杂乱无序,稳定性较好.在蓄水位 80 ~ 100 m 阶段,Ⅲ区处于熵减状态,朝着一个方向发生变形,但是位移量不大.

表 1 边坡熵值及稳定性分区

Tab. 1 Slope entropy values and the stability of the partition

结果及 分级	边坡分区			
	I 区	Ⅱ ₁ 区	Ⅱ ₂ 区	Ⅲ区
边坡信息熵(SE)	0.987	0.967	0.964	0.979
安全熵(SSE)	0.870	0.670	0.640	0.790
边坡分级	很稳定	稳定	稳定	稳定

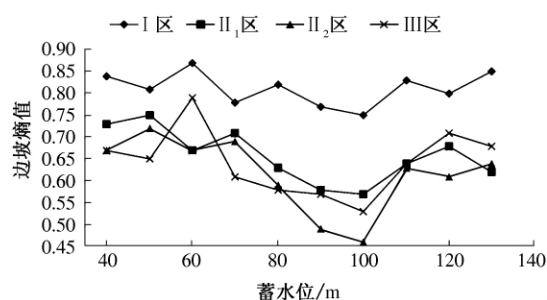


图 8 不同水位下各区边坡熵值

Fig. 8 The slope entropy of each area under different water levels

3.2.2 滑坡的安全系数

采用极限平衡法计算出不同蓄水位工况下的滑坡安全系数,如表 2 所示^[16].蓄水前 28#滑坡的稳定性较好;蓄水位上升至 80 m 过程中,其安全系数下降约 17%,发生局部失稳现象;在蓄水位 80 m 至正常蓄水位阶段,滑体的安全系数逐渐增加.该现象说明安全系数最小发生在蓄水位 80 ~ 100 m 阶段.因此,采用边坡安全熵(SSE) 方法的计算结果符合前文对各区水平位移监测数据的分析结果,这也与甘肃省水电勘测设计研究院的计算结果相吻合.

表 2 不同工况滑坡稳定性计算表

Tab. 2 The stability calculation table in different condition of landslide

蓄水位	安全系数
蓄水前	1.05
50 m	0.99
80 m	0.87
100 m	0.96
130 m	1.42

4 结论

库岸边坡的稳定性由于水库蓄水发生了较大变化,通过分析可得到如下结论:

1) 该滑坡的稳定性随着蓄水位抬升,呈现先下降后上升的趋势;在蓄水位 0 ~ 70 m 阶段稳定性减小,但是整体上较稳定;70 ~ 100 m 阶段稳定性最差,容易发生失稳;100 ~ 130 m 阶段,该滑坡稳定性增大,且逐渐趋于稳定.

2) 蓄水位 100 ~ 115 m 库岸边坡的稳定性较差;蓄水位 115 ~ 130 m 范围内稳定性较好、建议蓄水完成后蓄水位保持在 115 ~ 130 m 范围内,有利于库岸边坡的稳定.

3) 采用边坡安全熵的方法分析蓄水对库岸滑坡稳定性的影响的规律,验证了利用 GPS 平面位移变形监测得出的规律.除此之外,利用边坡熵的方法研究蓄水与库岸滑坡稳定性的关系是适用的,对于其他类似研究可以提供借鉴作用.

参考文献:

- [1] PARONUZZI P, RIGO E, BOLLA A. Influence of filling-drawdown cycles of the vajont reservoir on Mt. Toc slope stability [J]. Geomorphology, 2013, 191: 75 - 93.
- [2] 朱继良,黄润秋.某大型水电站水文站滑坡蓄水后的稳定性三维数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1384-1389.
- [3] 白俊光,吕生弟,韩建设.李家峡水电站坝前水库滑坡蓄水前后稳定性预测[J].岩土力学,2008,29(7):1723-1731.
- [4] 廖秋林,李晓,李守定,等.三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(17):3146-3153.
- [5] 王兰生.意大利瓦依昂水库滑坡考察[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):145-148.
- [6] 王明华,晏鄂川.水库蓄水对库岸滑坡的影响研究[J].岩土力学,2007,28(12):2722-2725.
- [7] 李晓,张年学,廖秋林,等.库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3714-3720.
- [8] 张文杰,詹良通,凌道盛,等.水位升降对库区非饱和和土质岸坡稳定性的影响[J].浙江大学学报(工学版),2006,40(8):1365-1370.
- [9] 李邵军,KNAPPELT J A,冯夏庭.库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(8):1586-1593.
- [10] 贾官伟,詹良通,陈云敏.水位骤降对边坡稳定性影

- 响的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1799–1803.
- [11] 甘肃省水利水电勘察设计研究院第一分院. 28#滑坡外部变形监测报告[R]. 兰州: 甘肃省水利水电勘察设计研究院第一分院, 2010.
- [12] 彭良泉, 王钊. 对边坡稳定性分析中危险水力学条件的研究[J]. 人民长江, 2003, 34(5): 39–41.
- [13] 程东幸, 刘大安. 基于安全熵的边坡稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 851–856.
- [14] 丁继新, 周圣华, 陈梦熊, 等. 基于多因素相互作用关系矩阵的边坡稳定性定量评价[J]. 工程勘察, 2006(7): 5–8.
- [15] HUDSON J A. Rock Engineering Systems: Theory and Practice [M]. Chichester: Ellis Horwood, 1992.
- [16] 甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院. 洮河九甸峡水利枢纽灾害危险性评估报告[R]. 兰州: 甘肃省地质灾害防治工程勘察设计院, 2003.

Study on Influence of Water Impounding on Reservoir Landslide

SONG Danqing¹, WANG Feng², MEI Mingxing³, LIU Pengfei⁴

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Life Science, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 4. The Yellow River Civilization and the Sustainable Development of Henan University Research Center, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: The landslide stability is affected by the reservoir impoundment in a large degree, taking an example of Yanziping(28#) Landslide of Jiudianxia reservoir in Gansu province. The landslide displacement was monitored by using GPS regularly for analyzing the law of the landslide stability affected by the the impoundment, and the law is validated by using the method of slope entropy. The results show that: (1) the process of impoundment can be divided into three stages including the 0~1/2, 1/2 to 3/4 and 3/4 above the stage of the storage level, which is affected to different influence degrees; (2) the landslide stability is affected at different levels between the range of water level I (100 m~115 m) and II (115 m~130 m) in different degree; (3) it is suitable that the relationship between impoundment and the stability of reservoir bank landslide is validated by using the method of slope entropy with being provided by other similar studies.

Key words: water impounding; reservoir bank landslide; stability; Jiudianxia reservoir

建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究

魏雁冰^{1,2}, 范明桥¹, 林生法¹, 徐 锴¹, 吴志强¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 为了寻求更为经济和环保的建筑废弃泥浆处理方法, 采用3种不同排水系统的真空预压方法对泥浆池的处理开展了试验研究. 系统分析了不同真空预压试验场地的表面沉降、孔隙水压力等监测数据. 真空卸载后, 通过原位十字板试验和平板载荷试验对地基承载力进行了检测, 并对处理前后土体的物理力学特性变化进行了总结. 结果表明, 3个试验场地的地基承载力均有显著提高, 其中以气管-滤管结合的真空抽吸排水方法效果最优.

关键词: 废弃泥浆; 真空预压; 沉降; 孔隙水压力; 地基承载力

中图分类号: TU472.99

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201503055

0 引言

建筑工程施工常会产生一定数量的废弃泥浆, 这些泥浆基本上采用管道输送或车运方式集中倾倒堆放到空地集中贮存, 形成了面积数百平方米到数万平方米不等的泥浆池. 建筑泥浆的排放不仅占用土地, 而且会带来诸多环境问题. 近年来, 国内对废弃泥浆处理的研究日益增多, 目前常用的处理方法有土地耕作处理法^[1]、化学絮凝固液分离处理法^[2-4]和化学固化处理法^[5-7]等. 楼春晖等^[8]采用压滤技术对建筑废弃泥浆进行处理, 并进行了理论分析和试验研究. 但是这些处理方法施工工艺相对复杂且费用较高, 因此废弃泥浆处理技术必须有更为经济、环保的发展.

建筑泥浆由黏土颗粒及水体组合而成, 并包含有各类添加剂, 其基本的工程性质与河湖及海底淤泥相近. 这类泥浆由于形成时间短, 其工程特性表现为高含水率、高孔隙比、高压缩性、极低强度、低渗透性, 自重条件下未完成固结, 属欠固结土, 具有不稳定性 and 一定的流动性, 称为超软土. 基于建筑泥浆的这些性质, 笔者提出采用就地真空预压水土分离方式处理废弃泥浆的方法. 试验表明: 该方法能够就地解决泥浆处理问题, 且泥浆池处理后的地基承载力满足设计要求.

1 场地概况

某经济开发区由生态休闲区、城市中心区、启动区块、环湖景观带等区块组成, 规划控制面积为85 km². 近年来随着开发区基本设施建设的逐步推进, 产生了大量的建筑废弃泥浆, 这些泥浆集中贮存在待开发的郊区洼地中, 形成了数个深度约为1.5~2.5 m的泥浆池. 泥浆池经过长期晾晒, 表面失水, 形成约10 cm厚的硬壳层, 表面长满小手指粗细的芦苇等灌木植物, 植物平均高度达2 m左右.

本试验选定拟建体育馆附近3 000 m²的泥浆池作为现场试验区, 城市规划中试验区为绿化用地. 通过对试验场区泥浆池浅层开挖的初步踏勘, 发现泥浆沉积土为灰黄至灰黑色, 饱和, 可见分布全区植物根系, 地下水位约为地表下0.5 m. 试验区泥浆深度约为2~2.5 m, 虽经长期晾晒, 但场地硬壳层厚度只有10 cm, 不能满足人员及机械的施工承载力需求. 其天然含水率大于液限含水率, 由现场十字板剪切试验得到的不排水强度极低, 泥浆范围内均小于4 kPa. 颗粒分析试验结果表明, 该泥浆土所有粒组的粒径小于0.075 mm的黏粒含量为87.3%, 其中粒径小于0.005 mm的黏粒含量为43.4%. 基本的物理力学指标如表1及图1所示.

收稿日期: 2015-03-22; 修订日期: 2015-05-06

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201401006)

通信作者: 范明桥(1962—), 男, 安徽定远人, 南京水利科学研究院教授级高级工程师, 主要从事地基处理及土的基本性质测试理论等方面的研究, E-mail: mqfan@nhri.cn.

引用本文: 魏雁冰, 范明桥, 林生法, 等. 建筑废弃泥浆真空预压方法处理试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 65-69.

表 1 处理前泥浆土物理力学性质指标

Tab.1 Physical and mechanical properties of slurry before treatment

含水率	湿密度 $\rho/$	干密度 $\rho_d/$	液限	塑限	塑性指数	颗粒分析试验/%		
$w/\%$	$(g \cdot cm^{-3})$	$(g \cdot cm^{-3})$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$>0.075\text{ mm}$	$0.075 \sim 0.005\text{ mm}$	$<0.005\text{ mm}$
65.5	1.59	0.96	54.9	24.4	30.5	12.7	60.8	26.5

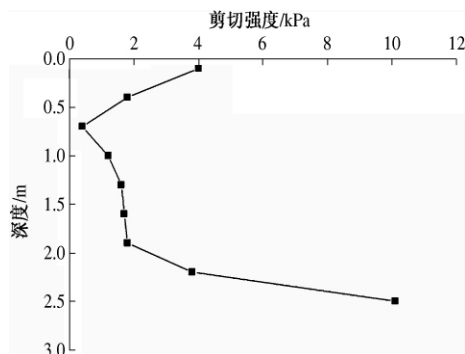


图 1 试验前场地十字板剪切强度

Fig.1 Vane-shear strength of the site before treatment

从常规土工试验结果来看, 试验区泥浆土与附近海底吹填淤泥的颗粒级配、液塑限、渗透性等物理性质均相近. 且吹填淤泥采用真空抽吸水土分离方法处理取得了成功, 处理深度达到了 15 m^[9], 因此对经济开发区内的泥浆土也可以采用类似方法进行处理. 泥浆土与淤泥物理性质对比见表 2.

2 泥浆土处理试验方案设计

就地真空吸水水土分离是通过在泥浆中插设塑料排水板, 作为竖向排水通道, 然后地表布置水

表 2 泥浆土和海底淤泥物理性质比较

Tab.2 Comparison of physical properties of slurry and silt

土样名称	液限	塑限	塑性指数	渗透系数 $k/$	颗粒分析试验/%		
	$w_L/\%$	$w_p/\%$	$I_p/\%$	$(cm \cdot s^{-1})$	$>0.075\text{ mm}$	$0.075 \sim 0.005\text{ mm}$	$<0.005\text{ mm}$
漩门淤泥	46.7	23	23.7	0.53	3.0	64.5	32.5
泥浆土	54.9	24.4	30.5	0.47 ~ 0.96	12.7	60.8	26.5

平向滤管或者气管与排水板相连, 铺设密封膜封闭后接入真空抽吸装置(射流泵), 形成负压, 负压沿塑料排水板向下传递, 进而向土中传递. 在负压作用下, 孔隙水渗流到排水通道排出, 降低了泥浆含水率, 使泥浆土得到排水固结^[10-11]. 泥浆经这样处理后其承载力预计可以达到 40 ~ 50 kPa, 可以作为建筑地基或填料, 从而达到综合处理建筑泥浆的目的. 真空抽吸水土分离方法如图 2 所示.

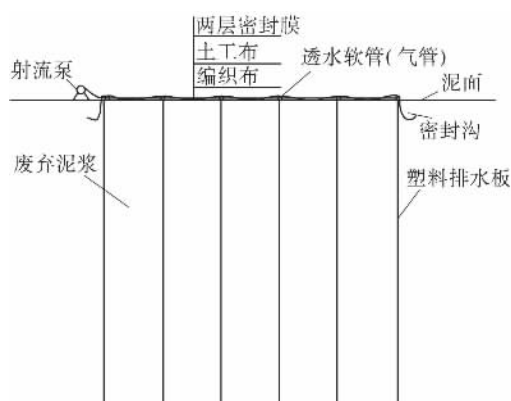


图 2 真空抽吸水土分离剖面图

Fig.2 Profile of vacuum preloading

将泥浆池分为 3 个区块, 每个区块 1 000 m²,

采用 3 种不同排水系统的真空抽吸方法进行处理, 探索建筑泥浆技术可行、经济快速、环境污染最小的处理技术方法. 具体试验分区实施方案如下.

分区 A: 滤管 + 排水板 + 覆膜, 简称滤管区. B 型排水板间距 0.8 m, 正方形布置. 该区的滤管布置方法与常规真空预压施工方法一致^[12].

分区 B: 气管 + 排水板 + 覆膜, 简称气管区. B 型排水板间距 0.8 m, 正方形布置. 该区水平排水系统采用气管, 在排水板顶部插入带有出水口的塑料板帽. 板帽为敞口内收间距形式, 便于排水板插入. 板帽通过 PE 专用快速气动接头和 PU 专用气管相连, 气管内径 8 mm. 每排气管用主管串联后连接到真空泵, 开启真空泵可以直接抽吸泥浆中孔隙水. 该连接方法称为气管直吸法, 连接效果如图 3 所示.

分区 C: 滤管 + 气管 + 排水板 + 铺膜, 二次抽吸模式, 简称气滤区. 采用 B 型塑料排水板, 正方形布置, 每部分排水板间距均为 0.8 m. 其中第 1 部分排水板采用滤管连接; 第 2 部分排水板用气管连接, 采用气管直吸方法. 两部分抽吸系统相互独立. 覆膜后气管部分先真空抽气, 根据场地监测

数据,1~2个月后开启滤管部分真空抽气;二次抽吸系统布置图见图4。



图3 气管抽吸系统

Fig.3 Air pipe suction system

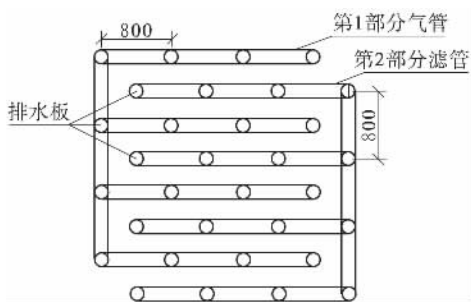


图4 分区C二次抽吸系统布置示意图

Fig.4 Twice suction system of partition C

3个分区的排水板的插设深度根据泥浆池的深度而定,滤管区因位于泥浆池边缘位置,深度较浅,经探杆试探该区平均深度约为2 m;气管区和气滤区的泥浆平均深度约为2.5 m。

3 监测数据分析

每个区块布置一台7.5 kW的射流泵,做好维护工作,并对各区块进行了膜下真空度、地表沉降、土体中孔隙水压力等监测。从2014年11月8日开始抽真空至2015年2月6日停泵,抽真空历时90 d。抽真空过程中3个区块膜下真空度基本一致,均稳定在85 kPa以上。

3.1 地表沉降

地表沉降能够直观地反映真空预压的处理效果。3个区块真空预压过程中的总沉降:滤管区280 mm、气管区364 mm、汽滤区402 mm。沉降速率初期可达10~20 mm/d,70 d后平均沉降速率已低于2 mm/d,趋于稳定。各分区的沉降历时曲线见图5。

从沉降历时曲线看,气管区沉降量明显大于滤管区沉降量,这是由于气管直吸系统排水板芯通过板帽、气管与真空泵直接相连,泵与排水板之

间是密封直通的,真空传递几乎没有损失。而滤管系统排水板芯要透过板芯外面包裹的滤布、滤管外面包裹的滤布、滤管与真空泵相连,泵与排水板之间多了2层滤布,真空传递有一定损失,影响了处理效果。

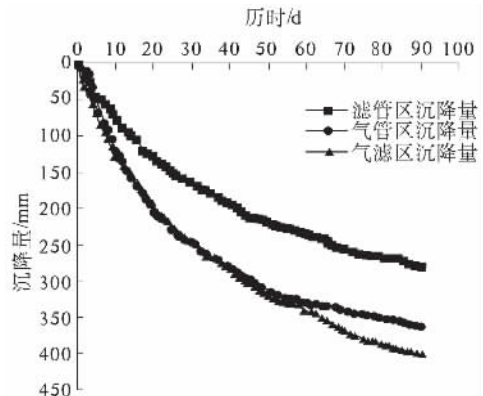


图5 各分区表面沉降时程曲线

Fig.5 Time travel curve of ground surface settlement

将气滤区和气管区相比较,在抽真空的前45 d,两区的沉降曲线基本一致。但45 d后,气滤区停止气管抽吸,开启滤管抽吸,之后其沉降量明显超过气管区沉降量,由此说明二次抽吸系统即第二部分滤管及其下的排水板发挥作用且超过了单一气管抽吸系统。

3.2 孔隙水压力消散

根据有效应力原理,排水固结就是土中超静孔隙水压力消散,有效应力增长的过程。对于真空抽吸方法来说,就是土中孔隙水压力负向增长形成有效应力增长的过程。本次试验中监测了泥浆土中孔隙水压力的变化,1.2 m深度处各区超静孔隙水压力消散(负压增长)结果见图6。

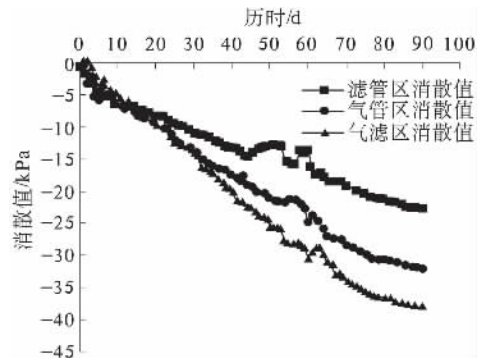


图6 各分区超静孔隙水压力消散时程曲线

Fig.6 Time travel curve of excess pore pressure dissipation

由图6可知,在真空抽吸作用下,泥浆土中负向孔隙水压力增长明显,气管区比滤管区的负向

孔隙水压力增长更大. 气滤区与气管区在抽真空期间的前 45 d 孔隙水压力曲线基本重合,但在 45 d 后,气滤区停止气管抽吸开启滤管抽吸,负向孔隙水压力增长明显超过单一气管区.

由监测数据分析可知,气滤区的处理效果最好,其原因是:由于泥浆土呈流动状,在经过一段时间的真空抽吸之后,泥浆中部分细小土颗粒也会向排水板处集聚,导致排水板淤堵. 经试验发现,淤堵使排水板滤膜的渗透系数降低到原来的 1/12,这直接导致排水板的排水功能严重下降. 但这时开启第二部分未受淤堵的滤管排水板可以起到新打设排水板的排水效果,即气滤区的二次抽吸系统可以使排水板的淤堵影响降到最低.

4 处理效果检测

处理结束后,在各分区分别做了原位十字板剪切试验、载荷板试验,并同时取土进行室内土工试验,以进一步了解泥浆池的处理效果.

4.1 十字板剪切试验

各分区的十字板剪切强度均有显著提高,其中气滤区的表层十字板强度更是达到了 23.5 kPa,从各分区同一深度处的十字板剪切强度来看,均是气滤区最高,气管区次之. 滤管区 2.2 m 深度的十字板剪切强度达到了 30.5 kPa,这是由于此深度已经到达原状土的原因. 处理后各分区的十字板强度见图 7.

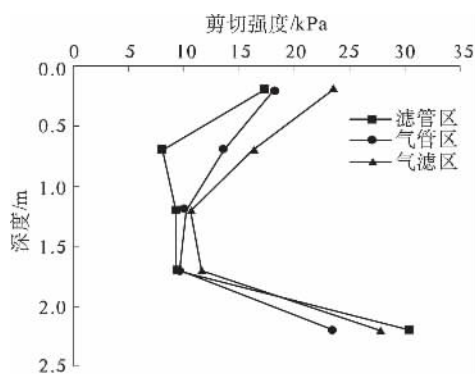


图 7 处理后各分区的十字板剪切强度

Fig. 7 Vane-shear strength of the site after treatment

4.2 平板载荷试验

平板载荷试验是确定地基承载力最直接的检测方法,处理结束后,在各分区分别做了平板载荷试验,载荷板是边长为 1 m 正方形钢板. 根据平板载荷试验试验结果,按照规范^[13],确定各分区的地基承载力特征值分别是滤管区 51 kPa、气管区 57 kPa、气滤区 66 kPa,采用二次真空抽吸系统的

气滤区处理效果最优.

4.3 取样试验

为进一步检测泥浆池的处理效果,了解处理后泥浆土的物理力学性质变化,处理后各分区还进行了取样室内试验如果如表 3 所示.

表 3 处理后泥浆土物理力学性质指标
Tab. 3 Physical and mechanical properties of slurry after treatment

土样	含水率 $w/\%$	湿密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度 $\rho_d/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	直剪快剪试验	
				黏聚 力 c/kPa	内摩擦 角 $\Phi/(\circ)$
A 区	47.0	1.72	1.17	17	3.2
B 区	46.1	1.73	1.18	18	2.1
C 区	45.0	1.70	1.19	20	0.2

从室内试验结果看,经处理后泥浆土的含水率均有较大幅度的降低,即从 60% 以上普遍降低到 45% 左右;剪切强度超过了 17 kPa,其中气滤区直剪快剪试验的剪切强度最高,达到了 20 kPa. 完全达到了预期要求.

综合以上结果发现:无论是原位试验还是室内试验,检测结果均是采用二次抽吸模式的气滤区为最优. 这是由于在先进行了一段时间的气管系统抽吸后,泥浆的物理力学性质得到了很大的改善,有了一定的强度,此时再开启第二部分抽吸系统,减弱了滤管系统排水板的淤堵,保证了排水板的排水通畅,有利于泥浆土的固结.

5 结论

(1) 通过现场踏勘及取样室内试验,发现泥浆土与超软土具有类似的工程性质,因此,可以采用既经济又环保的真空预压方法对泥浆池进行处理.

(2) 设置了 3 种不同排水系统对泥浆池进行了真空预压方法处理,结果表明:气管区处理效果优于滤管区,其中气滤区的气管-滤管结合的二次抽吸方法可以在一定程度上规避排水板的淤堵,效果最优. 处理后各分区的地基承载力均有显著提高,可以作为一般过程场地,真空预压方法可在类似工程中推广.

(3) 经初步计算,试验区 3 种方法的费用:滤管区约为 55 元/ m^2 ,气管区约为 60 元/ m^2 ,气滤管区约为 75 元/ m^2 ,而常规的化学固化法费用约为 130 元/ m^3 ,对于一般建筑场地承载能力 50 kPa 要求,可采用滤管区的真空抽吸方法进行处理;对于较高的承载能力要求(80 kPa 以下),可采用气

管区的真空抽吸方法或气滤区的二次抽吸方法进行处理。

参考文献:

- [1] 伍丹丹,杨旭,李颖,等. 土地处理法处理钻探泥浆的土壤特性研究[J]. 污染防治技术,2006,19(3):3-5.
- [2] 万玉纲,余学海. 桩基工程泥浆水处理技术[J]. 环境工程,1999,17(1):14-15.
- [3] 刘勇健,沈军,张建龙. 废泥浆固液分离的试验研究[J]. 广东工业大学学报,2000,17(2):53-56,75.
- [4] 欧孝夺,曹净,周东. 广西平果铝尾矿泥浆化学絮凝处理试验研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(2):201-203.
- [5] 王冀川. 川东北地区钻井废弃泥浆固化法处理技术及运用[J]. 科技创业月刊,2007,20(11):185-187.
- [6] 董娅玮. 废弃钻井泥浆固化处理技术研究[D]. 西安:长安大学环境科学与工程学院,2009.
- [7] 肖遥,王蓉沙,邓皓. 废弃钻井液化学强化固液分离处理[J]. 中国环境科学,2000,20(5):453-456.
- [8] 楼春晖,张忠苗,房凯. 泥浆压滤处理技术理论分析及试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2012,34(6):57-61.
- [9] 林生法,范明桥,姜彦彬,等. 气管直吸联合覆膜真空预压现场试验研究[J]. 中国港湾建设,2014(7):34-38.
- [10] 张志允,翟国民,张明晶. 堆载预压法和真空预压法加固机理的比较研究[J]. 岩土工程界,2002,5(11):24-26.
- [11] 董江平,张雄壮,洪雷,等. 无砂垫层真空预压法提高吹填淤泥地基承载力试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(4):131-133,180.
- [12] 娄炎. 真空排水预压法加固软基技术[M]. 2版. 北京:人民交通出版社,2013.
- [13] 建设部. 岩土工程勘察规范:GB/T 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.

Experimental Study on Construction Waste Slurry Treatment by Vacuum Preloading

WEI Yanbing^{1,2}, FAN Mingqiao¹, LIN Shengfa¹, XU Kai¹, WU Zhiqiang¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to seek more economic and environmental protection treatment methods. Three different vacuum preloading methods were adopted in this paper to study the treatment of building mud pool, and monitoring data of settlement and pore water pressure were analyzed. After unloading, the field vane test and plate loading test were conducted to detect the bearing capacity of foundation. Moreover, the physical and mechanical parameters of soil were compared. The results show that the foundation bearing capacity of different sites has been improved significantly, and the combination of air pipe and chimney filter can get a better treatment effect.

Key words: construction waste slurry; vacuum preloading; settlement; pore water pressure; bearing capacity of foundation.

具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析

马 强, 朱 健, 邢文文, 胡 兴

(湖北工业大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 依据涵洞两侧填土荷载的特点, 基于极限平衡理论, 在迈耶霍夫-汉纳极限承载力公式基础上, 推导了用于计算具有硬壳层的涵洞地基极限承载力的计算公式. 将汉森加权平均法、应力扩散角法、本文提出的改进公式法和有限元法的计算结果进行对比分析, 研究了路堤填土高度、硬壳层厚度、硬壳层与下卧软土层的黏聚力比和内摩擦角比对极限承载力的影响, 并将工程实例结果与4种理论计算方法的结果进行对比. 结果表明: 随着路堤填土高度和硬壳层厚度的增加, 改进公式法和有限元法计算的地基承载力结果最为接近; 黏聚力比和内摩擦角比的变化对改进公式法和有限元法的计算结果影响较为一致; 改进公式法的计算结果比汉森加权法和扩散应力角法更加接近工程实例.

关键词: 硬壳层; 涵洞; 地基; 极限承载力; 数值模拟

中图分类号: TU411.3

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504039

0 引言

在软土地区, 地基上部通常会覆盖一层强度比下卧软土层大得多的硬壳层. 高速公路涵洞建设中, 若能充分利用硬壳层, 可以简化设计并降低工程成本. 现有关于涵洞地基承载力的研究主要针对均质或人工地基展开^[1-2], 这些研究未能考虑硬壳层的作用. 而关于硬壳层承载力的研究又未能考虑涵洞两侧填土的旁压荷载作用^[3-4]. 现行TJG D63—2007《公路桥涵地基与基础设计规范》^[5]也未给出具有硬壳层的涵洞地基承载力的计算方法.

因此, 在考虑涵侧填土旁压荷载对涵洞地基承载力提高作用的基础上, 对迈耶霍夫-汉纳公式进行改进, 得到具有硬壳层的涵洞地基极限承载力计算公式. 并将笔者提出的改进公式法与现有理论方法、有限元法及工程实例进行对比, 验证所提出改进公式的适用性和准确性.

1 理论分析

1.1 迈耶霍夫-汉纳承载力公式^[6]

当软弱土层上覆一定厚度硬壳层时, 根据迈

耶霍夫(Meyehof)和汉纳(Hanna 1978年)的研究, 此时在上部硬壳层中将发生冲剪破坏^[7], 而下部软弱土层中则出现整体剪切破坏. 中间柱状土体受到两侧的被动土压力 p_p , 基础上部压力 q_u 及下部软土层的反力 q_b 的作用, 由极限平衡方程可推导出双层地基的最终极限承载力计算公式. 双层地基迈耶霍夫-汉纳计算示意图如图1所示. 其双层地基迈耶霍夫-汉纳极限承载力计算公式为

$$q_u = q_b + \frac{2(c_a H + p_p \sin \delta)}{B} - \gamma_1 H. \quad (1)$$

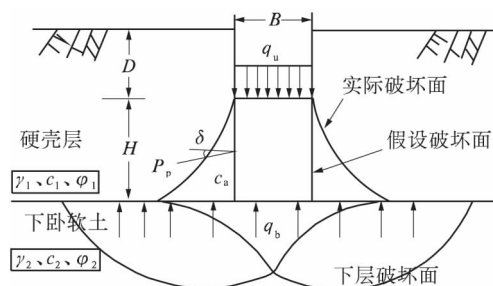


图1 双层地基迈耶霍夫-汉纳计算示意图

Fig. 1 Diagram of two-layered foundation calculation of Meyehof and Hanna

收稿日期: 2015-04-03; 修订日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208187); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y12-11)

作者简介: 马强(1983—), 男, 湖北丹江口人, 湖北工业大学副教授, 博士, 主要从事土与结构相互作用及环境岩土方面的研究工作, E-mail: maqiang927@163.com.

引用本文: 马强, 朱健, 邢文文, 等. 具有硬壳层的涵洞地基极限承载力分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 70-74.

式中: q_b 为下卧软土层的极限承载力; γ_1 为硬壳层的容重; c_a 为假设破坏面上的附着力; p_p 为假设破坏面上沿基础轴线单位长度的被动土压力; δ 为被动土压力作用线与水平面的倾角。

下卧软土层的极限承载力为

$$q_b = c_2 N_{c_2} + \gamma_1 (D + H) N_{q_2} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2}. \quad (2)$$

式中: N_{c_2} 、 N_{q_2} 、 N_{γ_2} 分别为下卧软土层的迈耶霍夫公式承载力系数; c_2 和 γ_2 分别为下卧软土层的黏聚力和容重。

被动土压力 p_p 按照下式确定, 即

$$p_p = \frac{1}{2} \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D}{H} \right) \frac{k_{pH}}{\cos \delta}. \quad (3)$$

若令 $k_{pH} \tan \delta = k_s \tan \varphi_1$, 则将式(3)代入式(1)中整理得

$$q_u = q_b + \frac{2c_a H}{B} + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D}{H} \right) \frac{k_s \tan \varphi_1}{B} - \gamma_1 H. \quad (4)$$

式中: k_s 为冲剪系数, 它是 q_2/q_1 和 φ_1 的函数, 其中 q_1 和 q_2 分别为当假设基础位于上下土层表面时的极限承载力, 由式(5) 计算得到。

$$\begin{cases} q_1 = c_1 N_{c_1} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma_1}; \\ q_2 = c_2 N_{c_2} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: N_{c_1} 、 N_{c_2} 和 N_{γ_1} 、 N_{γ_2} 分别为上、下土层的迈耶霍夫承载力系数, 均可根据文献[6]查得。

1.2 改进的迈耶霍夫-汉纳公式

由迈耶霍夫-汉纳计算公式可知, 基础埋置在上层坚实土中, 其上方无任何荷载作用。而涵洞两侧填土的旁压作用对涵洞地基承载力有较大的提高作用, 故迈耶霍夫-汉纳计算公式不能准确计算涵洞地基极限承载力。笔者在迈耶霍夫-汉纳公式的基础上, 推导了具有硬壳层的涵洞地基极限承载力的计算公式。

软土硬壳层上填方涵洞的受力如图 2 所示。涵洞两侧路堤填土参数为 γ_0 、 c_0 和 φ_0 , 硬壳层土体参数为 γ_1 、 c_1 和 φ_1 , 下卧软土层的土体参数为 γ_2 、 c_2 和 φ_2 , 涵侧填土荷载为 $\gamma_0 H_0$, 涵洞基础所受上部极限荷载为 q_u 。基底硬壳层土体依然采用迈耶霍夫-汉纳公式的破坏模式, 基底冲切土柱两侧的被动土压力为 p_p , 下卧软土极限承载力为 q_b 。

由极限平衡方程得出硬壳层涵洞地基的极限承载力计算公式为

$$q_u = q_b + \frac{2(c_a H_1 + p_p \sin \delta)}{B} - \gamma_1 H_1. \quad (6)$$

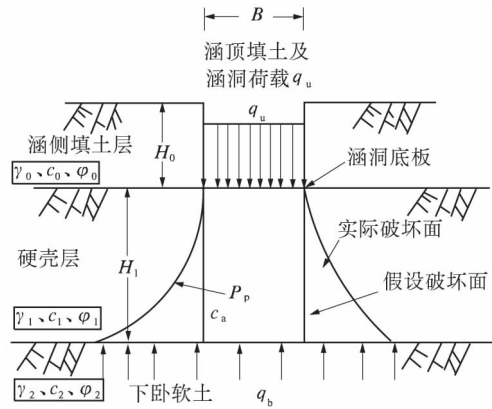


图 2 硬壳层涵洞地基极限承载力计算示意图

Fig. 2 Diagram of ultimate bearing capacity calculation of the culvert foundation with crust layer

其中, 下卧软土层的极限承载力为

$$q_b = c_2 N_{c_2} + \gamma_0 H_0 N_{q_2} + \gamma_1 H_1 N_{q_2} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma_2}. \quad (7)$$

被动土压力 p_p 按照下式确定, 即

$$p_p = \left(\frac{1}{2} \gamma_1 H_1^2 + \gamma_0 H_0 H_1 \right) \frac{k_{pH}}{\cos \delta}. \quad (8)$$

将被动土压力公式(8)代入式(6)整理得, 若令 $k_{pH} \tan \delta = k_s \tan \varphi_1$, 则软土硬壳层涵洞地基承载力为

$$q_u = q_b + 2c_a \frac{H_1}{B} + \left(\gamma_1 H_1^2 + 2\gamma_0 H_0 H_1 \right) \frac{k_s \tan \varphi_1}{B} - \gamma_1 H_1. \quad (9)$$

式中: γ_0 为路堤填土容重; H_0 、 H_1 分别为路堤填土高度和硬壳层厚度。

由于涵洞基础形状为矩形, 其宽为 B , 长为 L , 故应该考虑涵洞基础宽长比对极限承载力的影响, 其计算公式形式为

$$q_u = q_b + \left(1 + \frac{B}{L} \right) 2c_a \frac{H_1}{B} + \left(1 + \frac{B}{L} \right) \left(\gamma_1 H_1^2 + 2\gamma_0 H_0 H_1 \right) \cdot \frac{k_s \tan \varphi_1}{B} - \gamma_1 H_1. \quad (10)$$

2 数值分析

2.1 数值模型

为了验证改进后的地基极限承载力计算公式的适用性, 笔者利用数值模拟手段对具有硬壳层的涵洞地基进行模拟, 并选取两种典型的层状地基极限承载力计算公式(扩散角法、汉森加权平均法^[7])进行计算, 将数值模拟结果, 扩散角法、汉森加权平均法与本文公式的计算结果进行对比。

笔者采用有限元软件 PLAXIS (3D Foundation) 建立全断面模型进行模拟。在数值模拟中,选取 15 节点的高精度三角形单元,地基土采用服从 Mohr-Coulomb 屈服准则的理想弹塑性模型,涵洞基础采用理想线弹性模型,模型四周采用法向约束,模型底面采用固定约束。将硬壳层上的路堤填土和涵洞荷载等效为均布荷载施加在硬壳层上,不考虑土体固结影响。在分析路堤填筑加载过程中,利用平板载荷试验方法得到涵洞基础荷载与沉降量的关系曲线($P-S$ 曲线),进而确定极限承载力。涵洞路堤纵向断面如图 3 所示。

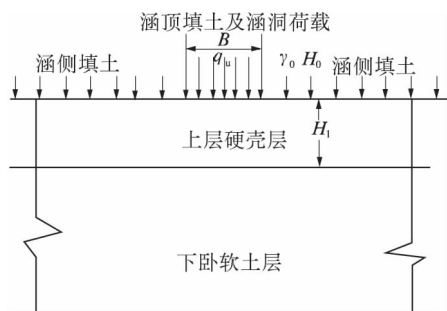


图 3 涵洞纵向断面

Fig. 3 Culvert longitudinal section

在数值模拟中,地基土总厚度 $h = 15$ m,路堤宽 $b = 20$ m,路堤长 $l = 20$ m,模型如图 4 所示,模拟中所采用的土体物理力学参数见表 1,参数分析中,其变化情况将在后述数值模拟中进行说明。

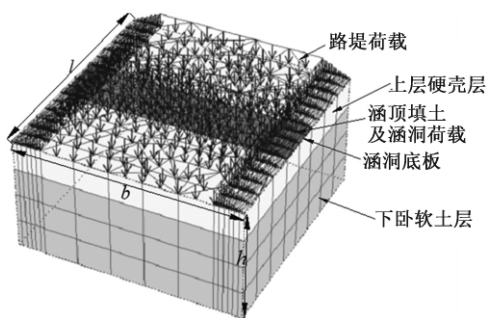


图 4 3-D 有限元计算模型

Fig. 4 3-D model for finite element calculation

表 1 模型计算参数

Tab. 1 Model parameters of the calculations

材料名称	模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
硬壳层	30	0.2	16	20	18
下卧软土层	15	0.35	10	10	15
填土	30	0.27	2.5	25	20
涵洞基础	30 000	0.15	—	—	25

2.2 承载力影响因素分析

2.2.1 填土高度的影响

考虑路堤填土高度 H_0 对地基极限承载力的影

响,选取的模拟参数如下:硬壳层厚度 $H_1 = 3$ m,重力荷载从 0 增加到 200 kPa,即填土高度从 0 m 增加到 10 m,涵洞基础宽长比 $B/L = 0.2$,将 4 种计算方法得到的结果对比,其极限承载力随填土高度的变化规律如图 5 所示。

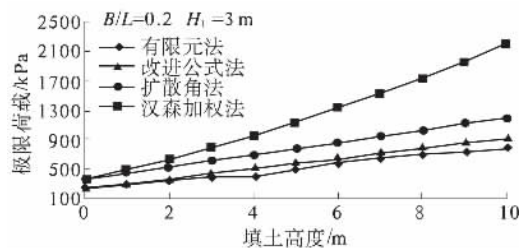


图 5 填土高度对极限承载力影响

Fig. 5 Embankment height impact on ultimate bearing capacity

由图 5 可知,不同方法计算的极限承载力均随着填土高度的增加而增大,且当填土高度 $H_0 \leq 1$ m 时,同一填土高度的极限荷载相差都不是很大;当 $H_0 > 1$ m 时,改进公式法和数值模拟的计算结果较其他两种方法更为接近。随着路堤填土的增高,这种差距也越来越大。而汉森加权法与其他 3 种方法计算结果相差很大的原因是软土硬壳层地基上下两层土的强度差别很大,故按照加权平均法计算承载力必然会引起较大误差。

2.2.2 硬壳层厚度的影响

考虑硬壳层厚度 H_1 对极限承载力的影响,选取填土高度 $H_0 = 10$ m,涵洞底板宽长比 $B/L = 0.2$ 时,由有限元模拟和不同极限承载力公式得出的具有硬壳层的涵洞地基极限承载力变化规律,如图 6 所示。

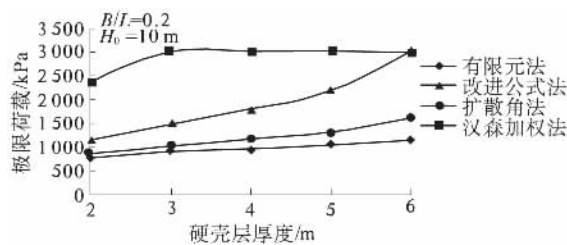


图 6 硬壳层厚度对极限承载力影响

Fig. 6 Impact of crust layer's thickness on the ultimate bearing capacity

由图 6 可知,不同方法计算的极限承载力均随着硬壳层厚度的增加呈非线性增大趋势。当 $H_1 \geq 3$ m 时,汉森加权法计算结果逐渐趋于稳定不再增长,这是因为在两层土体强度一定的条件下,由汉森建议的近似确定持力层的最大深度

Z_{\max} 已达到最大值,其持力层范围内土的容重和强度指标计算的加权平均值均不变,从而按照均质地基计算的承载力也不会发生变化.从图 6 中还可以看出,由扩散应力角法计算的结果增长率大于改进公式法和有限元法.由上述结果可知,在具有硬壳层的涵洞地基极限承载力计算过程中,有限元法和改进公式法的计算结果相近.

2.2.3 基础宽长比的影响

考虑涵洞基础 B/L (宽长比) 对极限承载力的影响,笔者在 $B/L = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$, 填土高度 $H_0 = 10$ m, 硬壳层厚度 $H_1 = 3$ m 的条件下,对 4 种方法计算的涵洞地基极限承载力结果进行对比分析,变化规律如图 7 所示.

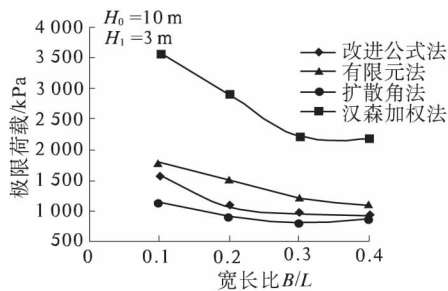


图 7 基础宽长比 B/L 对极限承载力的影响

Fig. 7 Impact of foundation's length-width ratio B/L on the ultimate bearing capacity

由图 7 可知,4 种方法计算的结果均随宽长比 B/L 的增大呈非线性减小的趋势,汉森加权法计算的结果减小的速率最大,有限元法最小,并且 B/L 越大,改进公式法、扩散角法和有限元法得到的结果越接近.同一宽长比条件下,极限荷载大小顺序为:汉森加权法 > 扩散应力角法 > 改进公式法 > 有限元法.

2.2.4 地基土黏聚力比和内摩擦角比的影响

考虑地基土黏聚力比和内摩擦角比对极限承载力的影响,在填土高度 $H_0 = 10$ m, 硬壳层厚度 $H_1 = 3$ m, 涵洞底板宽长比 $B/L = 0.2$ 的条件下,对 4 种方法计算的涵洞地基极限承载力结果进行对比分析,结果如图 8 和图 9 所示.

由图 8 可知,随着黏聚力比的增大,汉森加权法计算结果呈线性增长,扩散角法结果保持不变,改进公式法结果略有降低,而有限元法计算结果呈非线性增长,增加速率非常缓慢.

由图 9 可知,随着内摩擦角比的增大,汉森加权法和有限元法结果均呈非线性增长趋势,但有限元法增长非常缓慢;扩散角法结果保持不变,改进公式法结果先增大后略有减小.同时还可以看

出,与填土高度、硬壳层厚度和基础宽长比 B/L 相比,上下两层土体的黏聚力比和内摩擦角比对地基的极限承载力的影响较小.

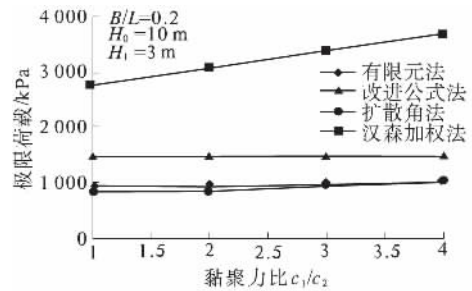


图 8 黏聚力比对极限承载力的影响

Fig. 8 Ratio of cohesion on the ultimate bearing capacity

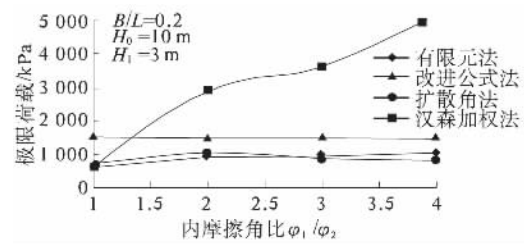


图 9 内摩擦角比对极限承载力的影响

Fig. 9 Ratio of internal friction's angle on the ultimate bearing capacity

3 算例比较

文献 [8] 和文献 [4] 对同一个实例进行了验证: 杭州市某住宅小区, 根据钻探资料, 该建筑场地表层有 0.5 m 厚的耕田土, 容重 $\gamma_0 = 20$ kN/m³, 内摩擦角 $\varphi_0 = 8^\circ$, 黏聚力 $c_0 = 5$ kPa, 约 2.5 ~ 3.0 m 厚的亚黏土层和轻亚黏土层组成的硬壳层, 其 $\gamma_1 = 19$ kN/m³, $\varphi_1 = 15^\circ$, $c_1 = 18$ kPa, 下卧软土层平均容重 $\bar{\gamma}_2 = 17.8$ kN/m³, 内摩擦角 $\varphi_2 = 0^\circ$, 黏聚力 $c_2 = 18$ kPa, 基础宽度 $B = 12$ m, $L = 67.4$ m, 埋置深度 1 m. 两篇文献计算得到其极限承载力分别为 131.15、162.98 kPa. 将其结果与 4 种计算方法所得结果进行对比, 见表 2.

从表 2 中可以看出, 对同一地质条件下, 利用不同方法计算的双层地基极限承载力结果, 汉森加权法较之其他方法差异最大, 其中扩散应力角法结果比文献 [8]、[4] 和有限元法分别大 41.3%、13.8% 和 54.5%; 采用笔者改进的计算公式法结果比文献 [8] 大 3.1%, 比有限元法大 9.3%, 而比文献 [4] 小 19.5%, 故更为接近实例中计算的极限承载力数值, 证实了本研究方法的适用性和准确性.

表 2 不同计算方法得出的双层地基极限承载力

Tab. 2 Different computing methods of ultimate bearing capacity of two-layered foundation							kPa
计算方法	有限元法	改进公式法	文献[8]中方法	文献[4]中方法	扩散应力角法	汉森加权法	
极限承载力	120.0	135.23	131.15	162.98	185.41	287.96	

4 结论

1) 同一填土高度下,所确定的极限承载力大小顺序为:汉森加权法 > 扩散角法 > 改进公式法 > 有限元法,且随着路堤填土的增高,4 种方法计算的极限承载力差值也越来越大。

2) 随着硬壳层厚度的增加,除了汉森加权法计算结果趋于稳定以外,其他 3 种方法计算值均有所增长;基础宽长比增大,4 种方法计算值均减小。

3) 硬壳层与下卧软土层的黏聚力比和内摩擦角比对比地基承载力有复合影响,黏聚力比和内摩擦角比的变化对汉森加权法计算值影响最大,应力扩散角法不变,而对有限元法和改进公式法影响比较一致,均较缓。改进公式法计算结果与有限元法以及工程实例的计算结果较为接近,证实了改进公式法的适用性。

参考文献:

[1] 刘保健,谢永利,程海峰,等.上埋式公路涵洞地基

及基础的设计[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(3):17-20.

[2] 郑俊杰,马强,陈保国.高填方涵洞地基承载力分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(4):115-118.

[3] 杨果林.硬壳层软土地基极限承载力研究[J].湘潭矿业学院学报,1995,10(2):51-56.

[4] 金问鲁,谢德贵.双层地基承载力的计算及其在天然软土地基中的应用[J].岩土工程学报,1987,9(1):61-71.

[5] 中华人民共和国交通部.公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.

[6] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:水利水电出版社,1996.

[7] 问延熙.双层地基承载力与变形特性研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2007.

[8] 徐洋,谢康和,刘干斌,等.复合双层地基的极限承载力计算[J].土木工程学报,2004,37(4):82-86.

Analysis of Ultimate Bearing Capacity of Culvert Foundation with Crust Layer

MA Qiang, ZHU Jian, XING Wenwen, HU Xing

(School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: According to the characteristics of the load of the lateral embankment filling on the culvert, based on the limit equilibrium theory and the ultimate bearing capacity formula of Meyehof and Hanna, the formula for calculating ultimate bearing capacity of the culvert foundation with crust layer was deduced. A series of comparisons were carried out among the calculation results obtained from Hansen's weighted average method, the stress diffusion angle method, the improved formula proposed in this paper and the finite element method. And the influences of the height of embankment filling, the thickness of crust layer, the ratio of cohesive and the internal friction angle of the crust layer to the subjacent soil layer on the ultimate bearing capacity were investigated, in addition, a comparison of the results was made from engineering practical examples and the calculation results from the four theoretical calculation methods. The results show that with the increase of height of embankment filling and the thickness of crust layer, the results of the foundation bearing capacity calculated by the proposed improved formula method and finite element method are the closest. The influence of the variations of cohesive ratio and internal friction angle ratio on the calculated results of the proposed formula method is more consistent with that of the finite element method. The results of the proposed formula method are more approximate to the engineering practical examples than Hansen's weighted method and the stress diffusion angle method.

Key words: crust layer; culvert; foundation; ultimate bearing ability; numerical simulation

TBM 盘形滚刀破岩过程的数值研究

张银霞, 江志强, 段留洋, 王 栋, 刘治华

(郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 采用 ANSYS/LS-DYNA 对 TBM(tunnel boring machine) 滚刀切削岩石的过程进行动态模拟和动力学分析, 研究了破岩过程中滚刀的受力情况和滚刀贯入度及滚动速度对切削力的影响规律. 结果表明, 当岩石单轴抗压强度为 45 MPa 时, 滚刀承受的侧向力、滚动力及正向力的平均值分别约为 0.0.45、4.5 kN, 在该工况下滚刀的最佳贯入度及滚动速度分别为 10 mm 和 3.6 r/min. 研究结果为工程人员在次硬围岩的工况下设计工作参数提供了合理依据.

关键词: TBM 滚刀; 破岩过程; LS-DYNA; 有限元仿真

中图分类号: TH164 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201503065

0 引言

硬岩隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)作为一种先进的隧道施工机械被广泛用于水电隧洞、城市地下工程、河海地下隧洞、公路隧道等重要工程中. 盘形滚刀是 TBM 切削岩石的刀具, 属于易损耗件, 在工程中消耗量非常大, 其费用约占工程施工费用的三分之一, 它的性能直接影响到工程造价与工期. 因此, 对滚刀破岩过程进行数值模拟, 研究滚刀的受力预测模型和破岩机理, 对改进滚刀的结构设计, 提高 TBM 的破岩能力和掘进效率, 从而实现高效、低能耗的隧道掘进具有重要意义^[1-2].

目前, 国内外已有不少研究人员对盘形滚刀的破岩过程和破岩机理进行了一定的理论和试验研究. 张魁等^[3]和谭青等^[4]采用离散元法(DEM)建立了滚刀切削模型, 分析了不同围压、刀具间距以及切削顺序对滚刀破岩的影响; 谭青等^[5]采用离散元法建立岩石与盘形滚刀的二维模型, 研究了贯入度、切削力与裂纹数三者的关系; Teale 进行了滚刀切削试验, 分析了刀刃角度对切削载荷的影响规律, 并得出刀圈的刀刃角度一般不小于 90°; Cho 等^[6]采用 AUTODYN-3D 模拟了滚刀破

岩的动态过程; Onate 等^[7]用 DEM 分析了刀具切削岩石时的动态行为; 谭青等^[8]利用 ANSYS/LS-DYNA 对盘形滚刀破岩过程进行了数值研究, 分析盘形滚刀破岩机理及其在破岩过程中的受力. 然而, 有关滚刀滚动速度对切削力的影响方面的研究很少. 笔者利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立滚刀破岩过程的仿真分析模型, 研究了破岩过程中滚刀的切削力以及贯入度和滚动速度对切削力的影响规律.

1 盘形滚刀破岩过程的有限元建模

1.1 建立几何模型

在建立几何模型时, 不考虑刀盘及刀体, 只考虑滚刀刀圈在岩石表面滚动切削, 因此只建立刀圈和岩石的几何模型. 根据 19 英寸刀圈的实际尺寸进行建模, 其截面尺寸如图 1 所示. 为了保证仿真的正确性, 同时提高计算效率, 建立岩石的简化模型, 其形状为长方体, 长、宽、高分别为 2、1、0.1 m, 整个破岩仿真的几何模型如图 2 所示.

1.2 定义材料

1.2.1 岩石材料模型

岩石材料选用一种在 ottosen 四参数破坏准则基础上引入损伤因子的弹塑性本构模型 JOHN-

收稿日期: 2015-03-27; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2012AA041801); 河南省教育厅科学技术研究重点资助项目(14A460001); 河南省重点科技攻关资助项目(152102210045)

作者简介: 张银霞(1974—), 女, 河南新乡人, 郑州大学副教授, 博士, 主要研究方向为精密与超精密加工技术、抗疲劳制造技术、难加工材料高效加工技术, E-mail: zhangyinxia@zzu.edu.cn.

引用本文: 张银霞, 江志强, 段留洋, 等. TBM 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 75-78.

SON-HOLMGUIST CONCRETE, 这种材料模型比较符合岩石的真实特性, 等效屈服强度是压力、应变率及损伤的函数, 压力是体积应变(包括永久压垮状态)的函数, 损伤积累是塑性体积应变、等效塑性应变及压力的函数. 具体的材料模型参数如表 1 所示, 岩石单轴抗压强度 f_c 为 45 MPa, 材料失效准则采用最大拉静水力失效和最大主应变失效, 在 K 文件中设置岩石最大拉静水力值为 2 MPa, 最大主应变失效值为 0.06.

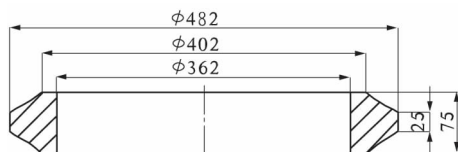


图 1 刀圈截面尺寸

Fig. 1 Size of the disc cutter cross section



图 2 破岩仿真的几何模型

Fig. 2 The geometric model of rock breaking simulation

表 1 岩石本构模型参数

Tab. 1 The constitutive model parameters of rock

A	B	C	N	S_{MAX}	f_c / MPa
0.79	1.6	0.007	0.61	7	45
P_{crush} / MPa	μ_{crush}	P_{lock} / MPa	μ_{lock}	K_1 / GPa	K_2 / GPa
16	0.001	800	0.1	85	-171
K_3 / GPa	D_1	D_2	T / MPa	G / MPa	EF_{min}
208	0.04	1	2	15	0.01

1.2.2 滚刀材料模型

TBM 盘形滚刀大多用高强度、高耐磨性的合金钢制造而成, 其弹性模量比岩石大很多. 因笔者不分析滚刀的磨损, 故将滚刀定义为刚体材料.

1.3 定义接触及边界条件

滚刀和岩石之间采用 ANSYS/LS-DYNA 软件中的 * CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 接触算法. 这种算法属于侵蚀接触算法, 专门用于两个面接触时一个面发生失效的问题^[9]. 失效后的单元直接被删除, 新的接触在剩余的单元接着进行. 将滚刀面作为接触面, 岩石面作为目标面, 静摩擦数为 0.35, 动摩擦系数为 0.3.

刀盘转速随着刀盘直径增大而减小^[10]. 根据本工况可知, 刀盘直径为 12 m, 取转速为 $n = 3.6 \text{ r/min}$, 滚刀安装位置位于刀盘半径为 1 m 处的单把正滚刀, 计算出滚刀的滚动速度 $\omega = 1.56 \text{ rad/s}$. 为了防止刀圈在破岩过程中剧烈振动与倾斜, 限制刀圈 X 方向(轴向)的平动自由度, 允许 Y 方向(可施加和改变切削速度)和 Z 方向(可施加和改变贯入度)的移动, 限制沿 Y 轴和 Z 轴两个方向的转动自由度. 对于岩石, 底面采用全固定约束, 添加无反射边界约束, 使简化的岩石模型代表无限大的岩石层.

2 仿真结果与分析

2.1 破岩过程中切削力的变化规律

对于岩石单轴抗压强度为 45 MPa, 贯入度为 7 mm 的仿真结果如图 3 所示. 当岩石受到的等效应力超过材料失效准则所设定的单轴抗压强度之后, 单元失效删除, 滚刀接着与前方的岩石接触作用. 盘形滚刀切削岩石, 主要受到三个方向的作用力: 正向力 F_V , 滚动力(切向力) F_R 和侧向力 F_S .

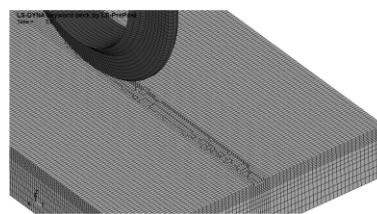


图 3 局部破岩展示

Fig. 3 The local rock breaking display

2.1.1 侧向力随时间变化的曲线

侧向力 F_S 是由于岩石的不均匀性、各向异性或者因转动受到离心力而产生. 侧向力与时间的关系如图 4 所示, 从图 4 可以看出, 侧向力大小基本都在零左右, 偶尔有较大的波动, 这是因为切削时振动会使刀圈发生侧移现象, 造成岩石与滚刀的接触力急剧增大, 甚至损坏滚刀. 在工程中, 由此而破坏刀具的情况也较为常见. 正常情况下, 侧向力很小, 而且与切深的关系不大.

2.1.2 滚动力随时间变化的曲线

滚动力 F_R 是滚刀向前滚动的阻力, 也是设计刀盘转动电机的依据^[11]. 从图 5 可知, 滚动力并非定值, 而是切削稳定后在一定数值范围内上下波动. 这是脆性材料切削的基本特征, 也符合岩石跃进式切削的基本特征. 切削开始时, 形成岩石小块破碎体, 滚动力比较小, 随着滚刀向前滚动切削, 载荷逐渐增大, 当压力超过岩石的抗压强度

时,岩石会发生崩碎,随之刀具切入载荷会瞬时下降,然后遇到新岩石,载荷又上升,跃进切削再次发生. 由本次仿真结果知,滚动力 F_R 的平均值约为 0.45 kN.

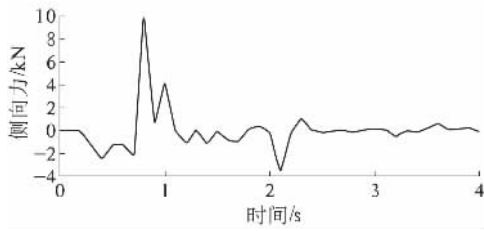


图 4 侧向力与时间的关系

Fig. 4 The relationship between lateral force and time

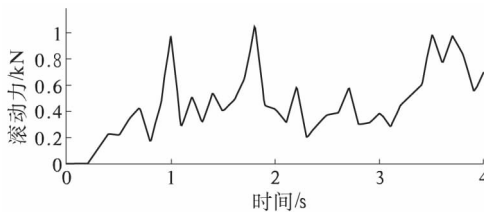


图 5 滚动力与时间的关系

Fig. 5 The relationship between rolling force and time

2.1.3 正向力随时间变化的曲线

正向力 F_v 是刀圈挤压破碎岩石时的正压力,也是设计 TBM 推进液压缸的依据^[11],其数值随岩石的软硬程度变化. 岩石越硬,正向力越大. 与滚动力和侧向力相比,其数值是最大的,也是滚刀受到磨损破坏的主要原因. 根据脆性材料切削的特性,正向力通常在小范围内波动,偶尔有较大波动是因为切削不稳定导致的,如图 6 所示. 本次仿真的正向力 F_v 平均大小为 4.5 kN.

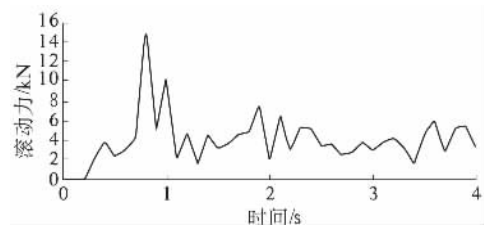


图 6 正向力和时间的关系

Fig. 6 The relationship between normal force and time

中南大学研究人员根据 TBM 施工特性,将整个 TBM 施工过程简化为一个滚刀切削水泥砂浆的实验平台^[12]. 利用直线式切削试验机,通过电阻应变片、动态应变仪、数据采集卡和计算机等组成的检测系统测试滚刀的切削载荷. 试验用的水泥砂浆抗压强度为 19.14 MPa,抗拉强度为 1.2 MPa,贯入度为 7 mm,根据实测数据可知,切削稳定后,正向力的大小约为 2.0 kN,滚动力的大小约

为 0.4 kN. 实测数据与仿真实验相对比数值偏小,主要是因为仿真使用的岩石单轴抗压强度为 45 MPa,要比实验中水泥砂浆的抗压强度 19.14 MPa 大 1 倍以上. 但是在切削稳定以后,实验切削力的变化趋势与仿真切削力的变化趋势基本相同,这在一定程度上验证了仿真的正确性.

2.2 贯入度与滚动速度对切削力的影响

2.2.1 贯入度对切削力的影响

当滚动速度为 3.6 r/min,滚刀贯入度分别为 7、10、13、15 mm 时,正向力和滚动力的变化趋势如图 7 所示. 切削稳定后,当贯入度分别为 7、10、13、15 mm 时,滚刀正向力平均值约为 4.5、5、6、9 kN. 随着贯入度增大,滚动力也增加,但是当贯入度从 13 mm 增大到 15 mm 时,滚动力增大的幅度显著提高;当贯入度分别为 7、10、13、15 mm 时,滚刀滚动力平均值约为 0.45、0.5、0.6、0.85 kN,滚动力的增幅并不大,但是随着贯入度从 13 ~ 15 mm,滚刀力的增幅也较明显. 分析可知,在一定范围内贯入度越大,切削载荷越大,切削载荷的增长率也越大. 切削载荷增大会导致滚刀磨损严重,因此在 TBM 施工过程中必须选择合适的贯入度,以延长滚刀的使用寿命,在该工况下滚刀贯入度为 10 mm 较合适.

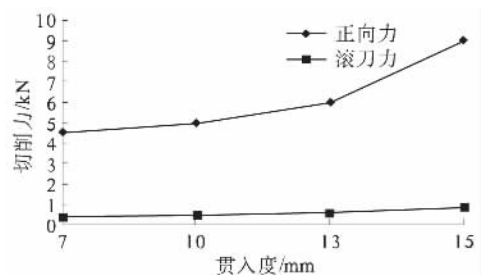


图 7 不同贯入度下切削力对比

Fig. 7 The comparison of cutting force under different penetration

2.2.2 滚动速度对切削载荷的影响

当贯入度为 11 mm,滚动速度分别为 2.4、3.6、4.8 r/min 时,得到滚刀的正向力平均值分别约为 5、6、10 kN,滚动力平均值分别约为 0.5、0.6、0.8 kN,分析可知,在一定的范围内随着滚动速度的增加,切削力随之增加,且随着滚动速度的增加,切削力的增长率也随之增大,这是由于切削速度增大,使压实核的形成和裂纹扩展的速率加快,以致需要更大的力来驱动滚刀. 而在实际工程中,随着切削速度的加快,势必会导致滚刀和岩石之间的摩擦加剧,产生大量的切削热,加速刀圈的

磨损. 因此, 在确保切削效率的前提下, 刀盘的滚动速度不宜选择过大, 本工况适宜的滚动速度为 3.6 r/min.

3 结论

基于 ANSYS/LS-DYNA, 建立了 TBM 滚刀破岩的三维仿真模型, 分析了滚刀破岩机理、贯入度及滚动速度对切削力的影响规律. 结果表明, 对于岩石单轴抗压强度为 45 MPa 的次硬岩地带, 刀盘直径为 12 m 的 TBM, 工作中推荐的贯入度为 10 mm, 滚动速度为 3.6 r/min, 这样既有较高的切削效率, 又不至于使刀圈过度磨损.

参考文献:

- [1] 刘志杰, 滕弘飞, 史彦军, 等. TBM 刀盘设计若干关键技术 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(16): 1980 - 1983.
- [2] 屠昌锋. 盾构机盘形滚刀垂直力和侧向力预测模型研究 [D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2009.
- [3] 张魁, 夏毅敏, 徐孜军. 不同围压及切削顺序对 TBM 刀具破岩机制的影响 [J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 100 - 106.
- [4] 谭青, 张魁, 周子龙. 球齿滚刀作用下岩石裂纹的数值模拟与试验观测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 163 - 169.
- [5] 谭青, 李建芳, 夏毅敏, 等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究 [J]. 岩石力学, 2013, 34(9): 2707 - 2713.
- [6] CHO J W, JEON S, YU S H, et al. Optimum spacing of TBM disc cutters: A numerical simulation using the three-dimensional dynamic fracturing method [J]. Tunnelling and underground space technology, 2010, 25(3): 230 - 244.
- [7] ONATE E, ROJEK J. Combination of discrete element and finite element methods for dynamic analysis of geomechanics problems [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 2004, 193(27): 3087 - 3128.
- [8] 谭青, 张魁, 夏毅敏, 等. TBM 刀具三维破岩仿真 [J]. 山东大学学报(工学版), 2009, 39(6): 72 - 77.
- [9] 杨金强. 盘形滚刀受力分析及切割岩石数值模拟研究 [D]. 北京: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2007.
- [10] 水利部科技推广中心. 全断面岩石掘进机 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [11] 沈建奇. 盾构掘进过程数值模拟方法研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2009.
- [12] 薛静. 盘形滚刀切削力影响因素及滚刀刃形优化设计研究 [D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2010.

Numerical Research on Rock Fragmentation Process of TBM Disc Cutter

ZHANG Yinxia, JIANG Zhiqiang, DUAN Liuyang, WANG Dong, LIU Zhihua

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

Abstract: In this paper, the dynamic simulation and analysis of TBM (Tunnel Boring Machine) hob cutting rock process is simulated by using ANSYS/LS-DYNA. The load of TBM hob in the cutting process and the effect of cutting parameters such as disc rotation speed and cutting depth of hob effects on the hob cutting load are studied. The results show, when the epitaxial compressive strength of rock is 45 MPa, the average value of the lateral force, rolling force and normal force under the hob is about 0 kN, 0.45 kN, 4.5 kN, and the best penetration and rational cutting speed is 10 mm and 3.6 r/min, which provides a reasonable basis for the designing staff parameters under the condition of the second hard rock.

Key words: TBM disc cutter; rock fragmentation process; LS-DYNA; FEA simulation

QT280 拖挂式牵引机牵引轮结构分析与优化

刘竹丽¹, 周 浩¹, 侯东红²

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南电力博大科技有限公司, 河南 郑州 450001)

摘 要: 论述了牵引机的基本组成结构及其工作原理, 以牵引轮为研究对象, 对牵引轮上的载荷进行计算, 最后运用 ANSYS 有限元分析软件对牵引轮进行静力分析, 并结合牵引机的实际工作情况, 提出改进方案, 优化设计后的牵引轮最大应力降低 28.9%, 最大位移降低 23.8%, 优化效果显著。

关键词: 拖挂式牵引机; ANSYS; 拉力计算; 静力分析; 优化设计

中图分类号: TH132.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.201411034

0 引言

架线施工是输电线路建设中最关键的工序之一, 在架线施工中, 通常采用牵引机放线, 张力机拉紧导线。相对于人工放线, 这两种机械设备配合使用不仅可以提高工程进度, 还可以保证施工质量^[1]。

目前牵引机的研究主要集中在轻量化、智能化、设备可靠性等方面^[2-3]。架线施工的环境非常恶劣, 牵引作业时工作强度高、设备自重大。因此对牵引机的可靠性要求很高。在实际工作过程中, 出现过牵引轮筒体变形过大, 结构损坏的情况。笔者以牵引轮为研究对象, 运用 ANSYS 有限元分析软件对牵引轮进行静力分析, 得到笛卡尔坐标系和柱坐标系下牵引轮的应力、线位移和扭转位移情况, 然后与牵引轮实际出现过的损坏情况对比, 最后结合牵引轮的制造工艺, 制定优化方案, 在不增加牵引轮重量的基础上提高牵引轮的强度和刚度, 从而提高牵引机工作可靠性。

1 牵引机工作原理

QT280 拖挂式牵引机是河南电力博大科技有限公司研发的一款用于大跨越、山区、丘陵地形的 500 kV 四分裂成 220 kV 双分裂 LGJ-800 及以下导线的架线施工设备。该设备主要由主梁、副梁、牵引轮、前犁、后犁、液压系统和动力系统等组成。

成^[4], 牵引机结构简图如图 1 所示。其中, 牵引轮安装在主梁和副梁之间, 由牵引轮筒体、套管、轴承座等组成, 每个牵引轮筒体上均有 11 个轮槽, 牵引轮结构布置如图 2 所示。该牵引机最大持续牵引力为 250 kN, 相应的牵引速度为 2.5 km/h, 发动机提供整机的牵引动力, 驱动液压马达带动两个减速机, 减速机的输出齿轮带动牵引轮上的大齿圈, 从而驱动牵引轮转动。在进行牵引作业时, 首先调节前犁、后犁高度, 使行走轮悬空, 钢丝绳通过进线机构绕进牵引轮 2 的第 1 个轮槽, 然后顺次交替进出牵引轮 1 和牵引轮 2 的轮槽, 最后从牵引轮 1 的第 11 个轮槽绕出, 绕出的钢丝绳通过出线机构绕卷到尾架上的线盘上。牵引作业结束后, 降低前犁、后犁高度, 使行走轮与地面接触, 进行转场作业。

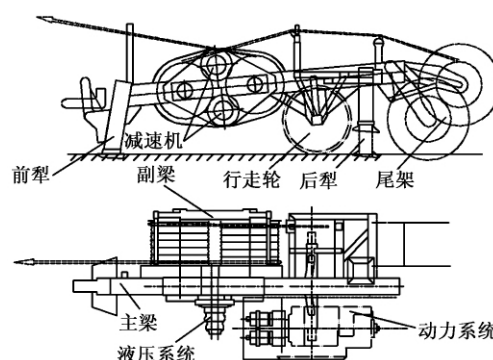


图 1 牵引机结构简图

Fig. 1 Structure model of the Trailer-Tractor

收稿日期: 2014-11-28; 修订日期: 2015-03-19

基金项目: 郑州市产学研合作促进计划项目(131PCXY144)

作者简介: 刘竹丽(1968—), 女, 河南灵宝人, 郑州大学副教授, 硕士, 主要研究方向为机械强度及结构优化设计、虚拟样机技术、CAD/CAE/CAM 集成等, E-mail: zhuli_liu@126.com。

引用本文: 刘竹丽, 周浩, 侯东红. QT280 拖挂式牵引机牵引轮结构分析与优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 79-83.

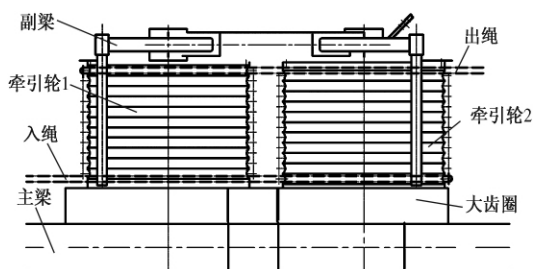


图2 牵引轮结构布置图

Fig.2 Structure model of the entry capstan

2 牵引轮静力分析

2.1 牵引轮载荷计算^[5-7]

钢丝绳上的拉力是逐渐变小的,为了更精确地模拟钢丝绳对轮槽上的作用力,现将钢丝绳与牵引轮轮槽的包络区域分为3等份,每等份的包角为 α ,如图3所示。

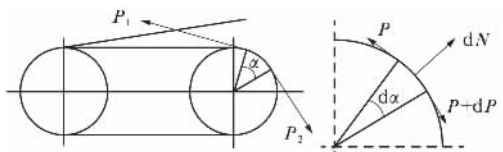


图3 钢丝绳牵引力计算

Fig.3 Tension calculation of wire rope

如图3所示,以牵引轮2上的第1圈轮槽为例,假设 $d\alpha$ 是包角 α 上的微弧段。

$$dN = P \sin \frac{d\alpha}{2} + (P + dP) \sin \frac{d\alpha}{2}. \quad (1)$$

$$\mu dN + P \cos \frac{d\alpha}{2} = (P + dP) \cos \frac{d\alpha}{2}. \quad (2)$$

由于 $d\alpha$ 很小, $\sin \frac{d\alpha}{2} = \frac{d\alpha}{2}$, $\cos \frac{d\alpha}{2} = 1$,并略去二次微量 $dP \sin \frac{d\alpha}{2}$,可以得到 $dN = Pd\alpha$,将该等式代入式(2)可以得到 $dP = \mu Pd\alpha$,两边积分可以得到: $\int_{P_2}^{P_1} P^{-1} dP = \int_0^\alpha \mu d\alpha$,即得 $\frac{P_1}{P_2} = e^{\mu\alpha}$ 。又因为钢丝绳在牵引轮上存在缠绕效率 η_k ,故得

$$\frac{P_i}{P_{i+1}} = e^{\mu\alpha} \eta_k. \quad (3)$$

$$q_i = \frac{2(P_i + P_{i+1}) \sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha(D_s + d_s)d_s}. \quad (4)$$

$$T = \frac{\mu(D_s + d_s) \sum_{i=1}^3 (P_i + P_{i+1})}{2}. \quad (5)$$

式中: i 为钢丝绳与轮槽包角的等分数, $i = 1, 2, 3; \mu$

为钢丝绳和轮槽间的摩擦系数; q_i 为第 i 等分包角上钢丝绳对轮槽面的平均单位面积压力, N/m^2 ; D_s 为牵引轮槽底直径,mm; d_s 为钢丝绳直径,mm。

根据上述计算公式可以计算出每一圈钢丝绳牵引力 P_1, P_2, P_3, P_4 ,每等分轮槽面上的压强 q_1, q_2, q_3 ,钢丝绳张紧时产生的摩擦扭矩为 T 。

2.2 实体建模和网格划分

牵引轮筒体和轴承座的材料不同,且工作时无相对运动,因此采用过盈配合^[8],两个套管焊接在轴承座上,在建模时直接将三者建成一个整体。牵引轮筒体上的大齿圈简化为以齿根圆直径代表的光滑表面。牵引轮模型选用 Solid45 单元,施加扭矩的刚性节点选用 Mass21 单元,采用自由网格划分,共计 533 804 个节点,315 098 个四面体单元。

2.3 载荷及约束施加

由于钢丝绳首先绕上牵引轮2,并且钢丝绳的牵引力逐渐减小,因此,牵引轮2上所受的作用力比牵引轮1上所受的作用力大,在有限元分析时,只对牵引轮2进行静力分析。牵引轮是由减速机上的齿轮驱动牵引轮上的大齿圈转动的,在此,仅建立两个轮齿模拟施加驱动齿轮啮合产生的载荷,即在大齿圈齿轮的啮合面和齿顶面上分别施加均布压力来模拟减速机的输出扭矩。牵引轮还受到钢丝绳张紧时对轮槽面施加的均布压力,以及钢丝绳张紧产生的摩擦扭矩。

在有限元分析软件 ANSYS 中,扭矩的施加有直接法和间接法两种。间接法是根据圆柱面的直径,将扭矩转换成切向力,然后将切向力施加到节点上^[9];直接法是通过 CERIG 命令生成一个刚性区域,然后对刚性节点直接施加扭矩^[10]。牵引轮剖视图及施加载荷后的模型如图4所示。根据牵引轮的实际工作方式,需要对牵引轮轴承座的内孔施加全约束。

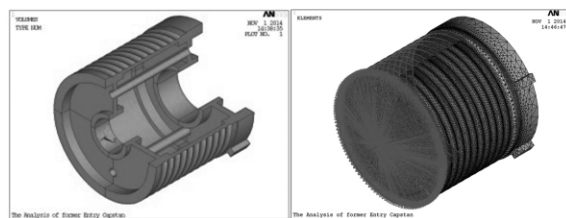


图4 模型剖视图及加载

Fig.4 3D model after applying the load

2.4 计算结果及分析

2.4.1 牵引轮应力计算结果及分析

图5为牵引轮应力云图。由分析可得牵引轮上的最大应力约为90 MPa,出现在牵引轮筒体与

轴承座的接触区域, 钢丝绳与牵引轮筒体接触区域上的最大应力约为 60 MPa, 沿圆周方向分布, 牵引轮其余各部位的应力均较小。

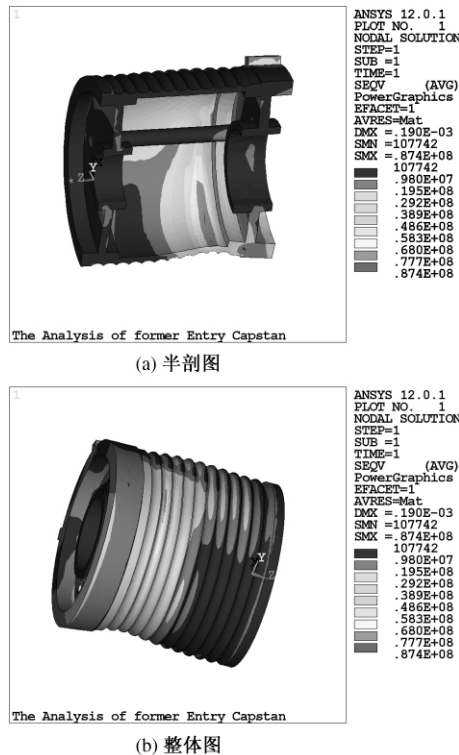


图 5 牵引轮应力云图

Fig. 5 The stress diagram of model

轴承座材料为 45#钢, 经正火处理后, 屈服极限 σ_s 为 360 MPa, 抗拉强度 σ_b 为 650 MPa; 牵引轮筒体材料为 35CrMoAlA, 调质、氮化后, 屈服极限 σ_s 为 850 MPa, 抗拉强度 σ_b 为 1 000 MPa; 套管为 20#钢, 屈服极限 σ_s 为 250 MPa, 抗拉强度 σ_b 为 400 MPa. 根据 DL/T 875—2004 输电线路施工机具设计、实验基本要求, 牵引机结构的屈服安全系数不小于 1.75, 断裂安全系数均不小于 2.5, 因此, 牵引轮筒体、轴承座、套管的静强度均满足设计要求^[11].

2.4.2 牵引轮线位移计算结果及分析

图 6 为笛卡尔坐标系下的线位移云图. 牵引轮上的最大位移为 0.190 mm, 出现在第二轮槽和第三个轮槽附近, 如图 6(a) 所示. 从牵引轮 x 方向(沿牵引轮体径向方向, 垂直于两套管中心连线)的位移云图可知, 节点偏离原始位置的最大变形量为 0.125 mm, 轮廓最大变形量为 0.167 mm, 如图 6(b) 所示; y 方向上(轴线方向沿牵引轮体径向, 通过两套管中心的方向)节点偏离原始位置的最大变形量为 0.119 mm, 轮廓最大变形量为 0.273 mm, 如图 6(c) 所示; z 方向上(沿牵引轮轴线方向)节点偏离原始位置的最大变形量为 0.077 mm, 轮廓最大变形量为 0.08 mm, 如图 6(d) 所示. 以上表明在各载荷作用下, 变形后的牵引轮筒体呈椭圆形。

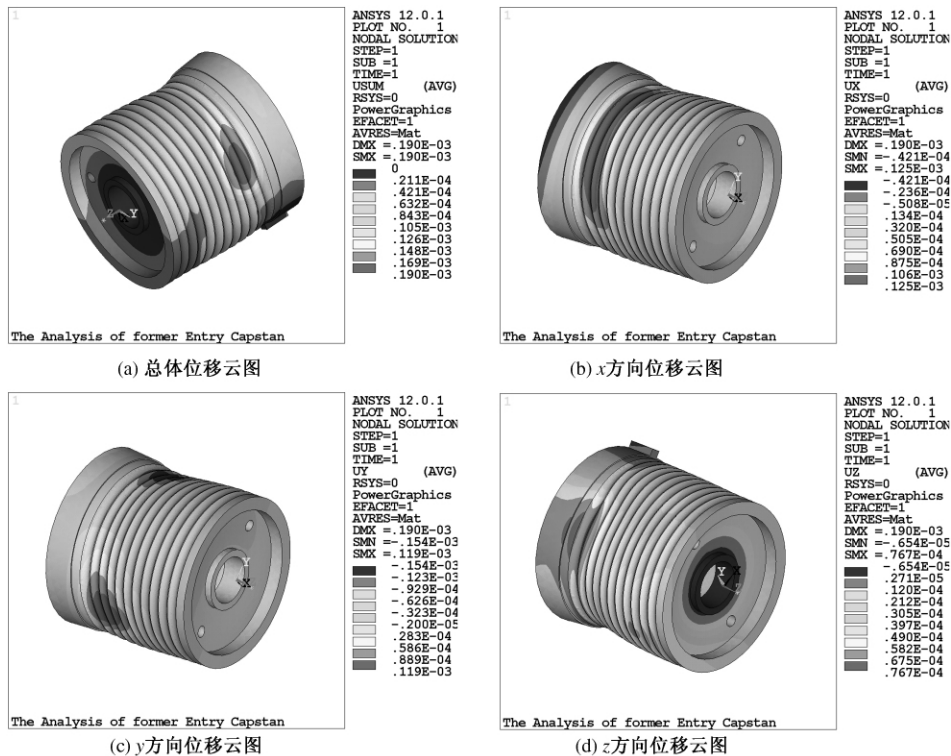


图 6 牵引轮线位移云图

Fig. 6 The linear displacement diagram of model

2.4.3 牵引轮扭转位移计算结果及分析

图7为柱坐标系下扭转位移云图。沿 x 方向(R)位移云图如图7(a)所示,筒体内凹变形最大处在第二轮槽和第三个轮槽附近,内凹变形量为0.181 mm,且内凹变形区较大,而外凸变形区较小,发生于牵引轮不受牵引绳作用的一侧,变形量也较小;沿 y 方向(θ)位移云图如图7(b)所示,筒

体发生切向变形,最大值为0.071 mm;沿 z 方向位移云图如图7(c)所示,位移改变较小;扭转变形云图如图7(d)所示,摩擦扭矩沿 z 方向产生的最大扭转角为 1.86° 。在实际工作时出现过套管被扭断的情况,通过以上分析可以表明,在各载荷作用下,存在扭转变形,这种扭转变形可能导致套管被扭断。

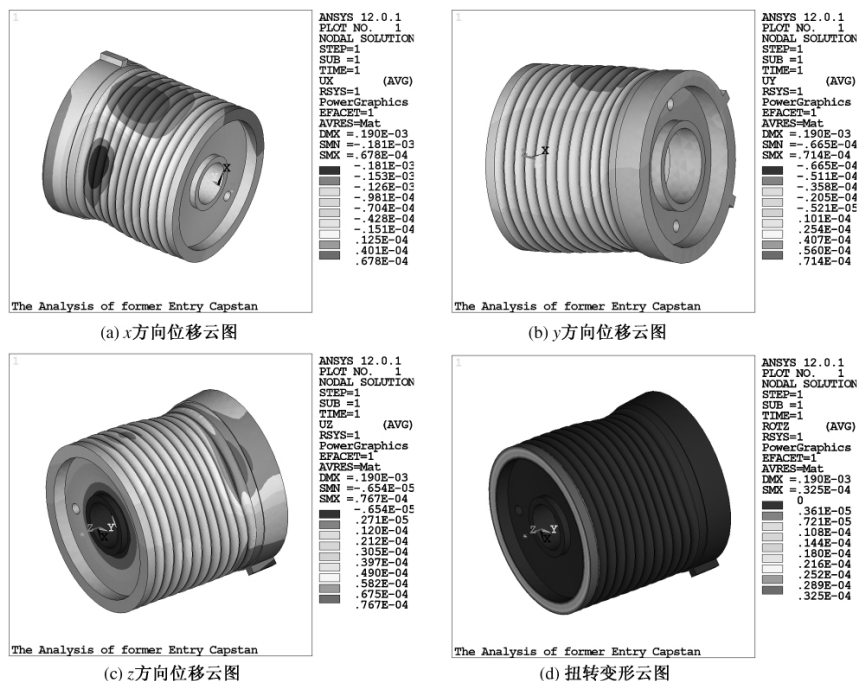


图7 牵引轮的扭转位移云图

Fig.7 Torsional displacement diagram of model

3 优化设计

在实际施工中,牵引轮的第二个轮槽和第三个轮槽破坏的概率较高。由于牵引轮筒体和轴承座之间是热装的,装配难度比较大,同时考虑到不更改其它零部件的设计,现将靠近主梁的轴承座向内移30 mm,载荷和约束条件均与上述分析相同。优化设计后的牵引轮最大应力为62.8 MPa,如图8所示;最大位移为0.141 mm,如图9所示。

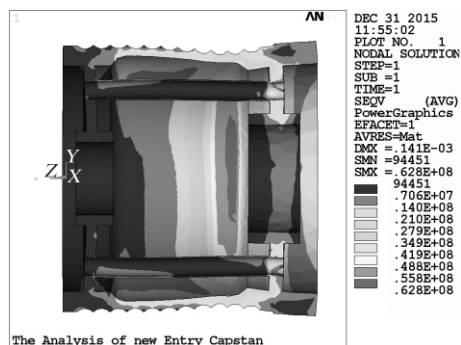


图8 优化后的应力云图

Fig.8 The stress diagram of new model

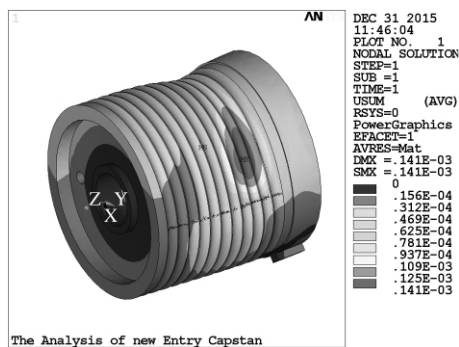


图9 优化后的位移云图

Fig.9 The displacement diagram of new model

4 结论

以ANSYS为平台对牵引轮进行了静力分析,得到了牵引轮应力云图、线位移云图及扭转位移云图。通过分析可得牵引轮的最大应力和最大位移均出现在第二个轮槽和第三个轮槽附近,与实际工作情况相符。然后对牵引轮进行结构优化,优化设计后的牵引轮最大应力降低28.9%,最大位移降低23.8%,优化效果显著。

参考文献:

- [1] 蒋平海. 张力架线机械设备和应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 33 – 36.
- [2] 许立太. SAQ-150 牵引机智能化改造 [D]. 兰州: 兰州理工大学机电工程学院, 2006: 1 – 5.
- [3] 聂金宁. 电缆牵引机关键零部件有限元分析与结构优化 [D]. 济南: 济南大学机械制造及自动化, 2012: 3 – 10.
- [4] 王慧, 李刚炎, 杨可森, 等. 新型自驱式电缆牵引机关键技术研究 [J]. 机床与液压, 2007, 35(7) : 8 – 10.
- [5] 濮良贵. 机械设计 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1960: 145 – 164.
- [6] 黄超胜, 杨世锡, 金红专, 等. 牵引卷筒磨损对钢丝绳和轴承的影响 [J]. 起重运输机械, 2006, 21(8) : 63 – 65.
- [7] 聂金宁, 王慧, 付秀丽. 新型电缆牵引机双摩擦卷筒应力分析与仿真 [J]. 机械设计, 2012, 29(4) : 73 – 76.
- [8] 张琳娜. 精度设计与质量控制基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 3 – 43.
- [9] 刘竹丽, 赵敏敏, 马朋朋, 等. 基于 ANSYS 的斜齿轮副接触分析与可靠性分析 [J]. 郑州大学学报(工学版) , 2015, 36(2) : 6 – 9.
- [10] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 227 – 234.
- [11] 国电电力建设研究所. 输电线路施工机具设计、实验基本要求: DL/T 875—2004 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

Finite Element Analysis and Optimization of QT280 Trailer-Tractor Entry Capstan

LIU Zhuli, ZHOU Hao, HOU Donghong

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Electric Power BODA Technology . Ltd. , Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The basic structure and operating principle of the trailer-tractor are introduced. The loads on entry capstan are calculated. Then, the static analysis is obtained by large finite element analysis software ANSYS. Finally, in combination with the actual working status, the improvement project is proposed. Compared with the former entry capstan, the maximum stress of new structure reduces 28.9% and the maximum displacement reduces 23.8%. The aim of optimization design is achieved.

Key words: trailer-tractor; ANSYS; tension calculation; static analysis; optimization design

文章编号: 1671-6833(2016)01-0084-03

石墨填充聚四氟乙烯复合材料的拉伸试验研究

靳遵龙¹, 郭月明¹, 李赵^{1,2}, 王定标¹, 王永庆¹

(1. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省锅炉压力容器安全检测研究院, 河南 郑州 450016)

摘 要: 通过对添加石墨的聚四氟乙烯(PTFE)复合材料进行拉伸试验, 考察石墨的添加量对改性复合材料拉伸强度的影响. 得到了试样的拉伸强度及其拉伸性能曲线. 试验结果表明, 石墨的添加量对改性PTFE的性能影响很大. 当石墨体积分数为24%时, 改性PTFE复合材料的拉伸强度较纯聚四氟乙烯降低了48%, 仅为12.2 MPa; 随着石墨含量的继续增加, 改性PTFE复合材料的力学性能持续明显降低.

关键词: 聚四氟乙烯; 石墨; 拉伸试验

中图分类号: TQ327.6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201510015

0 引言

随着社会工业生产的不断发展, 人们对石油、化工、航天、制药、轻工等领域中使用的导热材料的综合性能要求越来越高. 单一材质的材料很难满足目前工业发展的特殊要求. 在某些特殊场合, 传统的金属和非金属材料已经无法满足使用要求, 复合材料的开发与研究显得非常必要.

在化工、制药、轻工等生产中使用的热交换器, 需要所用的材料具有良好的力学性能, 同时也要耐高温和耐腐蚀. 高分子材料有很好的耐高温和耐腐蚀性, 并且价格较合金材料有很大的优越性, 但纯高分子材料的热导率都很低, 一般通过添加具有高热导率的填料来改变其性能, 由此可制取价格低廉、加工容易、耐腐蚀性强、力学性能好的复合材料. 因此, 开发适用于这些特殊工况的高性能导热复合材料显得非常重要^[1].

王红凯等^[2]利用催化剂使有机硅的甲氧基与环氧树脂的仲羟基反应生成共聚物, 增加了固化产物的抗高温性和韧性.

Gaier等^[3]将不同导热性的纤维布置于复合材料的不同方向上, 得到具有导热各向异性的复合材料. Ishida等^[4]用质量分数为88%的氮化硼作为填充物, 来填充联二苯甲胺类聚合物, 最终获得的复合材料的导热系数可达32.5 W/(m·K). Yamada等^[5]采用试验研究和有限元分析相结合

的方法研究了碳纤维复合材料的导热性. Adams^[6]分析研究了高导热碳纤维的微观结构, 通过研究发现高导热碳纤维是高度石墨化的, 得到这些材料的导热性与石墨状态相关的结论. Danes^[7]指出, 在一些对传热性能要求高的场合, 可以用导热复合材料来代替单纯的聚合物.

综上所述, 对于石墨改性PTFE复合材料的影响, 众人研究的焦点大多集中在其热力学性能的改变上, 而对其力学性能的影响研究甚少. 鉴于此, 笔者对石墨改性PTFE复合材料进行拉伸测试, 目的在于研究石墨对改性复合材料拉伸强度的影响, 为改性PTFE复合材料力学性能的预测提供基础数据和参考依据.

1 试验方案

1.1 试验试样及仪器

石墨, F-1型粉剂, $d \leq 4 \mu\text{m}$, 上海胶体化工厂; PTFE, SFX-1型悬浮颗粒, $d \leq 15 \mu\text{m}$, 四川中昊晨光化工研究院; 扫描电子显微镜, 型号为JSM-7500F, 日本电子株式会社; 微机控制电子万能试验机, 型号为WDW-100D, 上海华龙测试仪器有限公司. 此处按国标GB/T 1040—2006《塑料拉伸性能的测定》^[8] 5.1中的要求, 选用并制备适用于纤维增强热固性和热塑性塑料的试验的Ⅲ型试样, 其模型如图1所示, 尺寸数据见表1. 具体试样由廊坊中润密封材料有限公司提供所需配比

收稿日期: 2015-10-07; 修订日期: 2015-11-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21576245); 中国博士后科学基金资助项目(2014M552011); 河南省高等学校重点科研项目(15A470005)

通信作者: 王永庆(1979—), 男, 河南安阳人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事高导热复合材料强化传热及力学性能研究工作, E-mail: wangyq@zzu.edu.cn.

引用本文: 靳遵龙, 郭月明, 李赵, 等. 石墨填充聚四氟乙烯复合材料的拉伸试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 84-86, 91.

的板材,然后经由自己加工成类似于标准模型的试样(试样表面应保证平整、无裂纹、气泡、分层且无加工损伤及明显杂质等缺陷).共有 8 组编号为 01~08 不同配比的待测试样.研究表明,石墨的填充使得 PTFE 的热导率明显提高^[9].为保证试样的导热性、强度、耐腐蚀性等性能在试验要求的范围内,01 至 08 号试样中石墨质量分数分别为 25.5%、23.6%、21.8%、19.9%、18.1%、16.3%、14.4%、12.5% (对应体积分分数分别为 28%、26%、24%、22%、20%、18%、16%、14%).

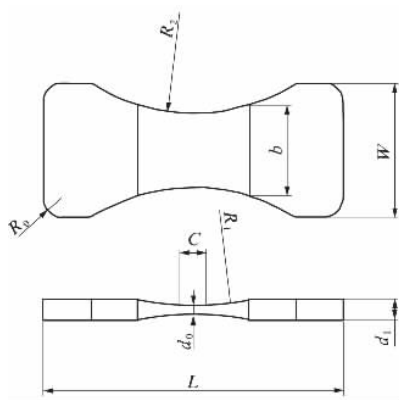


图 1 III 型试样尺寸数据

Fig. 1 Measurement of III type sample

表 1 输入变量的重要性排序

Tab. 1 The importance ranking of the input variables

名称	尺寸/mm
总长 L	110
中间平行部分长度 C	9.5
端部宽度 W	45
端部半径 R_0	6.5
表面半径 R_1	75
侧面半径 R_2	75
中间平行部分厚度 d_0	3.2
端部厚度 d_1	6.5
中间平行部分宽度 b	25

1.2 试验步骤

(1) 按 GB/T 2918—1998《塑料试样状态调节和试验的标准环境》^[10]规定的试验环境进行试验并对石墨填充 PTFE 复合材料试样状态进行调节.(2) 试样准备.在被测石墨填充 PTFE 复合材料试样上划出长度为 l 的标距线;测量石墨填充 PTFE 复合材料试样中间平行部分的厚度及宽度,测量结果精确到 0.01 mm,分别取 3 个不同的点进行试样厚度和宽度的测量,取其算术平均值作为试样计算宽度和厚度.(3) 试验机准备.先打开拉力试验机,再打开计算机,开机预热 10 min 后进行试验,并按配套软件使用手册运行配套软件.

(4) 夹持试样.对拉力试验机夹具进行检查,先将试样夹持在上夹具上,进行力清零以消除试样自重后再对另一端用下夹具进行夹持;确保上、下夹具的中心线连线与被测试样的纵轴线重合;以适宜的夹持力度对试样进行夹持,以防被测试样在夹具内断裂或者从夹具脱离.(5) 开始试验.点击主机小键盘上的试件保护键,消除夹持力并对位移清零;按运行命令按钮,按照软件设定的方案以及 GB/T 1040—2006《塑料拉伸性能的测定》^[8]的规定选用 $5 \text{ mm/min} \pm 20\%$ 的拉伸速度进行试验.(6) 数据记录.分别记录试样屈服时的载荷和断裂负荷;试样拉断后,取下断裂的两段试样,将其两端对齐、靠紧并用游标卡尺测出试件断裂后的标距长度 l_f (若被测试样在拉伸过程中,断裂的部分在中间平行部分外时,认定此试样作废,须另取试样重新进行试验).

1.3 试验结果与分析

试件在拉伸过程及断裂前瞬间在万能试验机上的状态见图 2,拉伸过程中,试样的拉伸性能曲线见图 3.



图 2 试样拉伸断裂前瞬间图

Fig. 2 The specimen was stretched to fracture

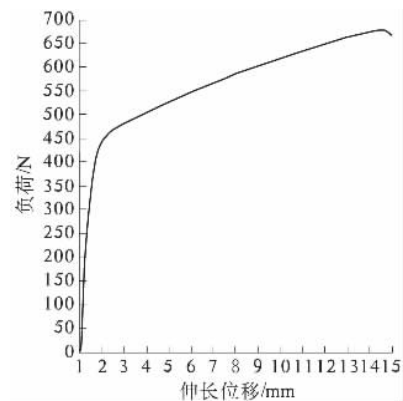


图 3 编号 01 试样拉伸性能曲线

Fig. 3 Tensile performance curve of specimen 01

拉伸试验中,被测试样的最大负荷见表 2,试

样拉伸强度见表 3, 试样拉伸强度与石墨体积分数的关系见图 4.

表 2 试样最大负荷

Tab. 2 The maximum loads of the specimens

试样编号	最大负荷 P/N	试样编号	最大负荷 P/N
01	681	05	951
02	751	06	1 096
03	795	07	1 196
04	845	08	1 290

被测试样的拉伸强度以式(1)进行计算:

$$\sigma_t = \frac{P}{bd} \quad (1)$$

式中: σ_t 为试样拉伸强度, MPa; P 为试样最大负荷, N; b 为试样宽度, mm; d 为试样厚度, mm.

表 3 试样的拉伸强度

Tab. 3 Tensile strength of the material

试样编号	拉伸强度 σ_t /MPa	试样编号	拉伸强度 σ_t /MPa
01	10.4	05	14.6
02	11.5	06	16.7
03	12.2	07	18.3
04	12.9	08	19.7

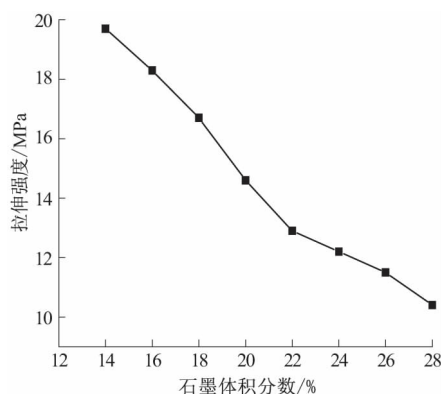


图 4 试样的拉伸强度与石墨体积分数的关系

Fig. 4 Relationship of tensile strength and volume fraction of the materials

从表 3 及图 4 可以看到, 石墨对改性 PTFE 复合材料力学性能影响很大, 随着石墨含量的继续增加, 改性复合材料的力学性能会持续明显降低. 纯 PTFE 基体材料的拉伸强度约为 23.35 MPa, 当石墨体积分数为 24% 时, 改性 PTFE 复合材料的拉伸强度较纯 PTFE 降低了 48%, 仅为 12.2 MPa. 试验得到的石墨改性 PTFE 复合材料的拉伸强度, 为该材料更广泛的应用提供了参考.

2 结论

根据塑性材料拉伸试验原理, 按 GB/T

1040—2006《塑料拉伸性能的测定》对石墨改性 PTFE 复合材料进行拉伸试验, 得到改性后复合材料的拉伸性能曲线及相应石墨添加体积分数下的拉伸强度, 从定量上论证了石墨含量与改性 PTFE 复合材料力学性能的关系: 在石墨含量仅为 24% 时, 改性 PTFE 复合材料拉伸强度降低 48%, 仅为 12.2 MPa; 随石墨含量增加, 改性 PTFE 复合材料力学性能持续明显降低. 所得相应石墨含量下改性 PTFE 复合材料的拉伸强度, 为改性 PTFE 复合材料力学性能的预测提供了基础数据.

参考文献:

- [1] 涂善东, 汪祖洪. 对新材料在过程装备中应用的进展[J]. 化工设备与防腐蚀, 2002, 5(1): 6-10.
- [2] 王红凯, 李华, 李明雪, 等. 增韧耐温改性环氧树脂的制备及其表征[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(4): 28-32.
- [3] GAIER J R, YODER V Y, BERKEBILE S, et al. The electrical and thermal conductivity of woven pristine and intercalated graphite fiber-polymer composites[J]. Carbon, 2003, 41(12): 2187-2193.
- [4] ISHIDA H, RIMDUSIT S. Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine[J]. Thermochimica acta, 1998(320): 177-186.
- [5] YAMADA R, IGAWA N, TAGUCHI T, et al. Highly thermal conductive, sintered SiC fiber-reinforced 3D-SiC/SiC composites: experiments and finite-element analysis of the thermal diffusivity/conductivity[J]. Journal of nuclear materials, 2002, 307(12): 1215-1220.
- [6] ADAMS P M, KATZMAN H A, RELICK G S, et al. Characterization of high thermal conductivity carbon fibers and a self-reinforced graphite panel[J]. Carbon, 1998, 36(3): 233-245.
- [7] DANES F, GARNIER B, DUPUIS T. Predicting, measuring, and tailoring the transverse thermal conductivity of composites from polymer matrix and metal filler[J]. International journal of thermophysics, 2003, 24(3): 771-785.
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 塑料拉伸性能的测定: CB/T 1040—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [9] 邓艳文, 张小平, 杨波. 聚四氟乙烯复合材料填充改性研究进展[J]. 有机硅氟资讯, 2005(6): 11-13.
- [10] 国家质量技术监督局. 塑料试样状态调节和试验的标准环境: CB/T 2918—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

(下转第 91 页)

基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计

陈恩庆, 肖素珍

(郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 提出了一种基于因子图的多输入多输出正频分复用(MIMO-OFDM)时变信道估计算法. 该算法在占用少量导频的基础上, 建立一阶 AR 信道模型, 使用消息传递算法进行 MIMO-OFDM 信道估计, 并将该方法与 LS 算法、MMSE 算法、基于 Kalman 滤波的信道估计算法进行比较. 通过 MATLAB 仿真表明, 该算法可以很好地估计 MIMO-OFDM 信道, 算法复杂度低于 MMSE 算法, 且在低信噪比情况下, 估计性能优于其他的算法.

关键词: MIMO-OFDM; 时变信道; 信道估计; 因子图; 消息传递算法

中图分类号: TN911.5

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201503064

0 引言

多输入多输出正交频分复用(MIMO-OFDM)技术是无线通信领域的重大突破, 能够解决频率选择性衰落的问题, 并满足宽带多媒体应用高信道容量、高比特信息速率的需求, 是下一代无线通信的核心技术之一^[1].

目前针对 MIMO-OFDM 系统的信道估计方法有很多, 在文献[2]中介绍了多种 MIMO-OFDM 信道估计算法, 文献[3]介绍了 OFDM 系统中基于因子图信道估计算法, 文献[4-5]介绍了基于 Kalman 滤波的信道估计算法, 而笔者介绍一种新的算法, 即基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计算法. 因子图是将一个含有多个变量的全局函数进行因子分解, 得到几个局部函数的乘积, 并以此为基础得到的一个双向图^[6]. 在因子图中按照和积算法^[7](sum-product algorithm, SPA)进行消息传递和迭代就可以获得对因子图中参数的估计. 和积算法在自适应滤波、信道均衡^[8]、编码解码、神经网络等领域都有广泛的应用, 笔者将它应用于信道估计. 该算法主要是在因子图消息传递算法的思想, 建立一阶 AR 信道模型, 并利用迭代算法估计信道信息. 除此之外, 通过仿真验证该算法在信道估计中可以达到比 LS 算法^[9]、MMSE 算法^[10]、Kalman 滤波算法^[11]更好的性能.

1 系统模型

首先介绍 MIMO-OFDM 系统模型结构. 假设系统发送天线数目为 N , 接收天线数目为 M , OFDM 子载波数目为 L , 发送信号为 \mathbf{X} , 接收信号为 \mathbf{Y} . MIMO-OFDM 基带系统模型^[12]如图 1 所示.

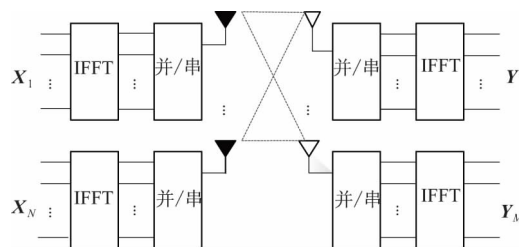


图 1 MIMO-OFDM 基带系统模型

Fig. 1 The base band system model of MIMO-OFDM

为了简化系统模型, 笔者采用的是两发一收的 MIMO-OFDM 系统, 故有 $N=2, M=1$. 文中采用的导频方案是天线轮流发送, 既大大减少了导频的使用量, 也将多天线问题转化为单天线问题. 该系统在发送端第 n 个发射天线上的一个 OFDM 符号^[13]可以表示 $\mathbf{X}_n = [\mathbf{X}_n^1, \dots, \mathbf{X}_n^L]^T$ ($n=1, 2$). 其中 \mathbf{X}_n^l 表示第 l 个子载波, L 表示总子载波数.

假设存在一个导频符号, 考虑到接收天线接收到的第 k 个子载波上的符号情况, 用矩阵形式可表示为:

收稿日期: 2015-03-27; 修订日期: 2015-10-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61201251, 61172086, 61210005, 61331021)

作者简介: 陈恩庆(1977—), 男, 福建龙海人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事宽带无线通信等研究, E-mail: ceq2003@163.com.

引用本文: 陈恩庆, 肖素珍. 基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 87-91.

$$\mathbf{Y}^k = \mathbf{H}^k \mathbf{X}^k + \mathbf{V}^k, (k=1, 2, \dots, L). \quad (1)$$

式中: \mathbf{Y}^k 为接收到的第 k 个子载波上信号; \mathbf{V}^k 是均值为 0, 方差为 σ_n^2 的高斯白噪声; $\mathbf{X}^k = [\mathbf{X}_1^k, \mathbf{X}_2^k]^T$ 为两个发射天线的发送信号; \mathbf{H}^k 为第 k 个子载波上的频域信道响应矩阵. 其中 \mathbf{H}^k 可表示为:

$$\mathbf{H}^k = [\mathbf{H}_{1,1}^k, \mathbf{H}_{1,2}^k]^T. \quad (2)$$

2 因子图及和积算法

因子图^[6-7]是由变量节点、函数节点和线组成的, 因子图的边线是指变量节点和函数节点的连线, 当且仅当该变量是函数的自变量时, 对应的变量节点才与对应的函数节点相连^[8], 其中函数节点用方框表示, 变量节点用圆圈表示. 和积算法用于计算因子图中变量节点与函数节点之间的消息传递, 具体公式^[13]如下.

1) $\mu_{x \rightarrow f}(x)$ 表示由变量节点 x 传递给函数节点 f 的消息:

$$\mu_{x \rightarrow f}(x) = \prod_{h \in n(x) \setminus f} \mu_{h \rightarrow x}(x). \quad (3)$$

2) $\mu_{f \rightarrow x}(x)$ 表示由函数节点 f 传递给变量节点 x 的消息:

$$\mu_{f \rightarrow x}(x) = \sum_{\sim x} (f(X) \prod_{y \in n(f) \setminus x} \mu_{y \rightarrow f}(y)). \quad (4)$$

式中: $X = n(f)$ 表示与函数 f 相关的所有变量.

3 基于因子图信道估计算法

基于因子图信道估计算法具体步骤如下.

Step 1: 建立信道模型. 对于第 n 根发射天线到接收天线之间的信道频率响应 \mathbf{H}_n , 近似看成是一个一阶自回归 (AR) 过程, 则发送天线 n 与接收天线之间对应第 $i+1$ 个 OFDM 符号 (OFDM 总符号数为 I) 的子信道的频率响应可以由第 i 个 OFDM 符号的信道频域响应表示为

$$\mathbf{H}_n(i+1) = F_n \mathbf{H}_n(i) + \mathbf{W}_n(i). \quad (5)$$

式中: F_n 表示 AR 过程的系数; $\mathbf{W}_n(i)$ 为均值为 0 方差为 σ^2 的高斯白噪声.

由于该信道模型为慢时变信道, 且采用的是 AR 模型, 所以 AR 过程系数和噪声方差都为常数, 可以用 Y-K 方程求出:

$$F_n = J_0(2\pi f_d T_s); \quad (6)$$

$$\sigma_w^2 = 1 - F_n^2. \quad (7)$$

式中: f_d 表示多普勒频移; T_s 表示 OFDM 符号周期; $J_0(\cdot)$ 表示第一类 0 阶 Bessel 函数.

以下考虑一根发射天线与接收天线之间的情况. 根据 AR 模型和 MIMO-OFDM 信道系统模型, 信道频域响应 \mathbf{H} 和接收信号 \mathbf{Y} 可简单描述为

$$\mathbf{H}_{i+1} = F \mathbf{H}_i + \mathbf{W}_i; \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{X}_i \mathbf{H}_i + \mathbf{V}_i. \quad (9)$$

式中: \mathbf{W}_i 为均值为 0, 方差为 σ_w^2 的高斯白噪声; \mathbf{V}_i 为所对应的信道噪声, 是均值为 0, 方差为 σ_v^2 的高斯白噪声.

信道矩阵 \mathbf{H} 可以表示为函数形式:

$$f(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_I) = \prod_{i=1}^I f(\mathbf{H}_i | \mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_{i-1}) = \prod_{i=1}^I f(\mathbf{H}_i | \mathbf{H}_{i-1}). \quad (10)$$

Step 2: 将联合概率密度函数进行因式分解.

$$f(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_I, \mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_I) = \prod_{i=1}^I f(\mathbf{H}_i | \mathbf{H}_{i-1}) \cdot f(\mathbf{Y}_i | \mathbf{H}_i). \quad (11)$$

所以, 由接收信号 \mathbf{Y} 来估计信道 \mathbf{H} 的条件概率密度函数可以因式分解为:

$$f(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_I | \mathbf{Y}_1, \dots, \mathbf{Y}_I) \propto \prod_{i=1}^I f(\mathbf{H}_i | \mathbf{H}_{i-1}) f(\mathbf{Y}_i | \mathbf{H}_i). \quad (12)$$

Step 3: 由因式分解的结果画出因子图. 由因式分解的式子 (12) 可以画出该信道估计的因子图, 结果如图 2 所示.

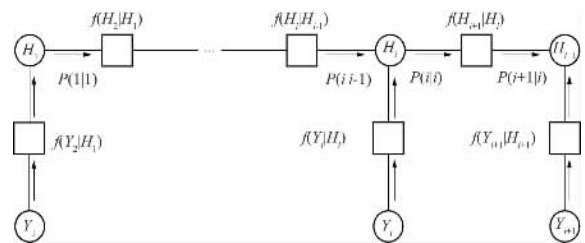


图2 信道估计因子图

Fig. 2 Factor graph of channel estimation

设 $P_{i|i-1}(\mathbf{H}_i) = \mu_{f(\mathbf{H}_i | \mathbf{H}_{i-1}) \rightarrow \mathbf{H}_i}$, 由于信道满足高斯分布, 所以由函数节点 $f(\mathbf{H}_i | \mathbf{H}_{i-1})$ 传递给变量节点 \mathbf{H}_i 的消息可以正比于 $N(\mathbf{H}_i, \hat{\mathbf{m}}_{i|i-1}, \sigma_{i|i-1}^2)$.

同理, 设 $P_{i|i}(\mathbf{H}_i) = \mu_{f(\mathbf{Y}_i | \mathbf{H}_i) \rightarrow \mathbf{H}_i}$, 表示由变量节点 \mathbf{H}_i 到函数节点 $f(\mathbf{Y}_i | \mathbf{H}_i)$ 的消息, 正比于 $N(\mathbf{H}_i, \hat{\mathbf{m}}_{i|i}, \sigma_{i|i}^2)$.

Step 4: 给定初始条件, 从左到右按和积算法求信道估计结果. 假设信道的初始状态等于导频获得的信道初始值, 再由和积算法公式计算因子图中消息传递得:

$$P_{1|1}(\mathbf{H}_1) = N(\mathbf{H}_1, \hat{\mathbf{H}}_1, E). \quad (13)$$

$$P_{2|1}(\mathbf{H}_2) = \sum_{\sim \mathbf{H}_2} P_{1|1}(\mathbf{H}_1) f(\mathbf{H}_1 | \mathbf{H}_2). \quad (14)$$

那么由变量节点 \mathbf{H}_i 传递到函数节点 $f(\mathbf{H}_{i+1} | \mathbf{H}_i)$ 的消息为

$$P_{i|i}(\mathbf{H}_i) = P_{i|i-1}(\mathbf{H}_i) f(\mathbf{Y}_i | \mathbf{H}_i) \propto N(\mathbf{H}_i, \hat{\mathbf{m}}_{i|i-1}, \sigma_{i|i-1}^2) N(\mathbf{Y}_i, \mathbf{X}_i \mathbf{H}_i, \sigma_v^2) \propto$$

$$\frac{N(\mathbf{H}_i, \hat{\mathbf{m}}_{i|i-1}, \sigma_{i|i-1}^2) N(\mathbf{H}_i, \mathbf{X}_i^H \mathbf{Y}_i, \mathbf{X}_i \sigma_v^2)}{N(\mathbf{H}_i, \hat{\mathbf{m}}_{i|i}, \sigma_{i|i}^2)} \propto \cdot \quad (15)$$

其中:

$$\hat{\mathbf{m}}_{i|i} = \frac{\sigma_v^2 \hat{\mathbf{m}}_{i|i-1} + \sigma_{i|i-1}^2 \mathbf{X}_i^H \mathbf{Y}_i}{\mathbf{X}_i^H \sigma_{i|i-1}^2 \mathbf{X}_i + \sigma_v^2}; \quad (16)$$

$$\sigma_{i|i}^2 = \frac{\sigma_v^2 \sigma_{i|i-1}^2}{\mathbf{X}_i^H \sigma_{i|i-1}^2 \mathbf{X}_i + \sigma_v^2} v. \quad (17)$$

由函数节点 $f(\mathbf{H}_{i+1} | \mathbf{H}_i)$ 传递到变量节点 \mathbf{H}_{i+1} 的消息为

$$P_{i+1|i}(\mathbf{H}_{i+1}) = \int P_{i|i}(\mathbf{H}_i) N(\mathbf{H}_{i+1}, F\mathbf{H}_i, \sigma_w^2) d\mathbf{H}_i \propto N(\mathbf{H}_{i+1}, \hat{\mathbf{m}}_{i+1|i}, \sigma_{i+1|i}^2). \quad (18)$$

其中:

$$\hat{\mathbf{m}}_{i+1|i} = F\hat{\mathbf{m}}_{i|i}; \quad (19)$$

$$\sigma_{i+1|i}^2 = F^2 \sigma_{i|i}^2 + \sigma_w^2. \quad (20)$$

由以上迭代计算得到的 $\hat{\mathbf{m}}_{i|i}$ 组成 $L \times I$ 维矩阵即为估计得到的信道频域响应。

4 仿真结果

根据以上算法分析,为了验证基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计算法的有效性,建立该系统的仿真平台,为了简单起见,该系统采用两发一收的 MIMO-OFDM 系统,OFDM 的符号数为 1 000,调制方式采用 QPSK 调制。

图 3 中 (a)、(b) 分别为 SNR 在 10 dB 和 30 dB 时的信道原始值与基于因子图信道估计值的比较图,从图中可以看到笔者所提算法可以进行信道估计,并且随着信噪比的增加,因子图算法的信道估计准确度提高。

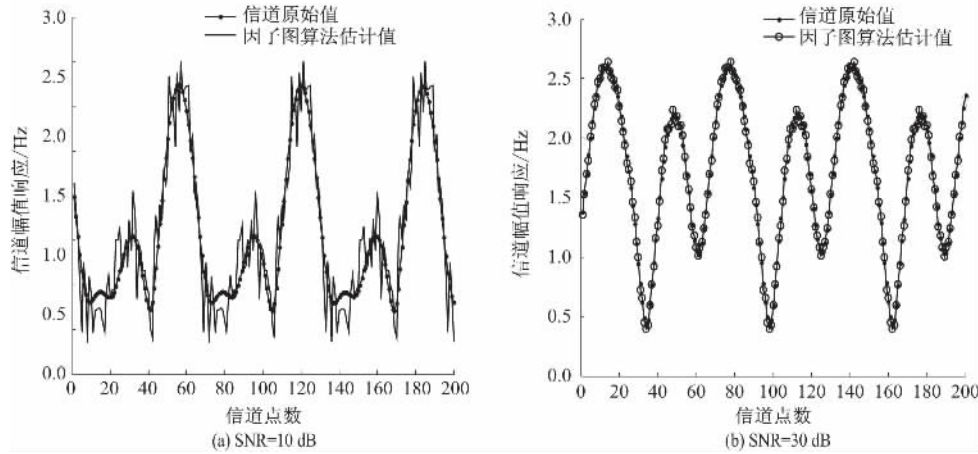


图 3 信道真实值与估计值比较

Fig.3 Compare the real and estimation values of channel

多普勒频移为 10 Hz 和 100 Hz 时,随着信噪比 SNR 的变化,因子图信道估计算法与 LS 算法、MMSE 算法、Kalman 滤波算法信道估计均方误差 (MSE) 的比较如图 4 所示。从图中可以看出,因子图信道估计算法误差始终比 LS 算法估计误差小,且随着信噪比的增加,其估计性能逐渐提升;当多普勒频移 $f_d = 10$ Hz 时,因子图信道估计算法始终好于 MMSE 信道估计算法,但当多普勒频移 $f_d = 100$ Hz 时,随着信噪比的增加,本文算法性能有所降低,低信噪比情况下比 MMSE 算法性能好,能有效提高低信噪比情况下信道估计的性能,且算法复杂度低于 MMSE 算法;同时,将笔者所提算法与文献 [4-5] 中所提到的基于 Kalman 滤波的信道估计算法进行比较,从图中可以看到两种算法估计性能接近。如图 5 所示为多普勒频移 $f_d = 10$ Hz 时,两种算法误码率的比较,仿真结果表

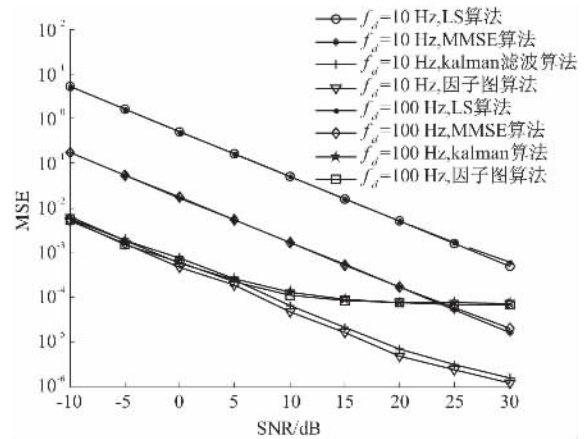


图 4 不同多普勒频移下 MSE 比较

Fig.4 The MSE under different dopple frequencies

明,笔者所提算法估计误差优于基于 Kalman 滤波的信道估计算法。

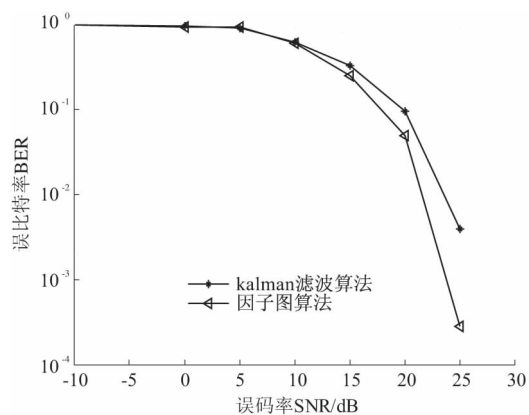


图5 误码率比较

Fig. 5 Compare the BER

图6所示为多普勒频移 $f_d = 10$ Hz, 信噪比 $\text{SNR} = 12$ dB 时, 不同 OFDM 符号数下 4 种信道估计算法 MSE 比较. 仿真结果表明, 随着 OFDM 符号数的增加, 基于因子图的 MIMO-OFDM 信道估计误差减小, 而 LS 算法、MMSE 算法的信道估计均方误差不随 OFDM 符号数的增加而减小, 因而可以增加 OFDM 符号数提高信道估计性能.

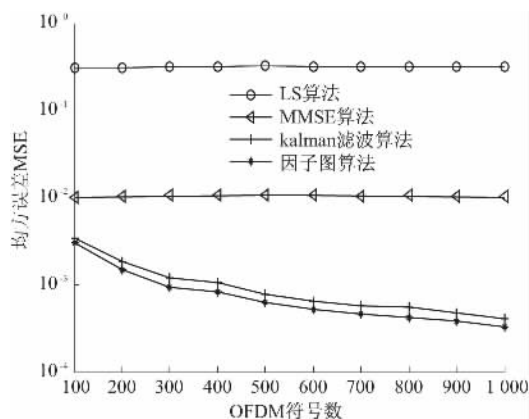


图6 不同 OFDM 符号数下性能比较

Fig. 6 The performance under different OFDM symbol

图7所示为笔者所提算法在不同导频间隔下误码率的比较, 其中 $f_d = 10$ Hz 时, 仿真结果表明, 导频插入间隔越小, 估计准确度越高, 因此导频间隔也是影响该算法信道估计的重要因素之一. 该算法可以在较少导频情况下获得比 LS 等传统方法更好的估计性能. 如果导频数较多, 且假设传统 LS 等方法已能获得接近最好的性能, 那么因子图方法则也只能获得接近最好的性能, 因此改善不大, 且这时数据传输效率也很低, 性能比较已意义不大, 所以笔者对不同导频下的几种算法性能不再做出比较仿真.

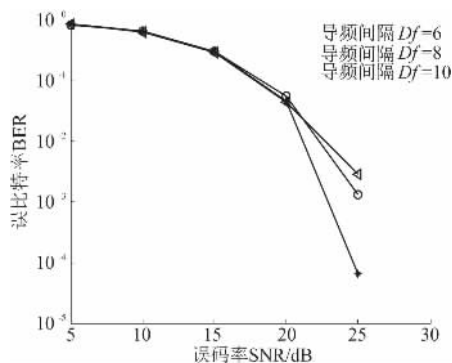


图7 不同导频间隔下的 BER 比较

Fig. 7 BER under different pilot frequency interval

5 结论

笔者针对慢时变信道估计的特点, 提出了一种基于因子图的 MIMO-OFDM 时变信道估计算法. 由仿真结果可知, 基于因子图信道估计算法可以很好地跟踪信道. 笔者所提算法估计性能受多普勒频移影响较大, 但是当多普勒频移较大、低信噪比情况下估计算法性能优于 MMSE 算法, 且算法复杂度低, 随着 OFDM 符号数的增加 MSE 减小, 即增加迭代次数减小算法误差, 而且仿真结果表明, 导频间隔也是影响估计性能的一个重要因素.

参考文献:

- [1] 郭连城. MIMO-OFDM 技术浅析[J]. 科技信息, 2012 (16): 246.
- [2] 申京. MIMO-OFDM 系统中信道估计及信号检测算法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学信息与通信工程学院, 2012.
- [3] 郭艳华, 郭心悦, 徐伯庆. OFDM 系统中基于因子图信道估计算法[J]. 计算机工程, 2013, 39(3): 72-76.
- [4] 顾婷婷, 罗汉文, 梁永明. 基于无迹卡尔曼滤波的 MIMO-OFDM 系统信道估计算法[J]. 高技术通讯, 2008, 18(6): 584-590.
- [5] 宋铁成, 尤肖虎, 沈连丰, 等. 基于导频和修正 Kalman 滤波的 MIMO-OFDM 信道估计方法[J]. 通信学报, 2007, 28(2): 23-28.
- [6] 王桂凤. 基于因子图信道均衡研究[D]. 大连: 大连理工大学电子信息与电气工程学部, 2011.
- [7] FRANK R K, BRENDAN J F, HANS A L. Factor graphs and the sum-product algorithm[J]. IEEE Transactions on information theory, 2001, 47(2): 498-519.
- [8] 李建平, 王宏远. 因子图原理及其应用前景[J]. 电讯技术, 2000, 40(2): 20-24.
- [9] 龚汉东, 王瑞春. 一种新的 MIMO-OFDM 系统自适应快时变信道估计算法[J]. 电讯技术, 2013, 53

- (7): 922 – 926.
- [10] 路奇, 归琳, 方向忠. OFDM 系统信道估计方法研究 [J]. 电视技术, 2006(9): 20 – 23.
- [11] 张贤达. 现代信号处理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [12] 王平. 基于训练序列的 MIMO 信道估计及相关技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学信息科学与技术学院. 2010.
- [13] LIANG Y M. Channel estimation based on extended kalman filtering for MIMO-OFDM systems [C] // Channel estimation based on extended kalman filtering for MIMO-OFDM systems. Wuhan: IEEE Press, 2006: 1 – 4.

MIMO-OFDM Time-varying Channel Estimation Based on the Factor Graph

CHEN Enqing, XIAO Suzhen

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

Abstract: Based on the characteristics of the system struture of MIMO-OFDM, a novel MIMO-OFDM channel estimation algorithm based on factor graph is proposed. The algorithm uses a small amount of pilot carrier, establishes first-order AR channel model, and uses the message passing algorithm to estimate the MIMO-OFDM channel. Compared with other traditional algorithms, the MATLAB simulation shows that this algorithm can accurately estimate the MIMO-OFDM channel, with lower complexity than MMSE algorithm. Especially under the condition of low SNR, the estimation performance of MIMO-OFDM is better than other algorithms.

Key words: MIMO-OFDM; time-varying channel; channel estimation; factor graph; message passing algorithm

(上接第 86 页)

Tensile Test on PTFE Composites Filled with Graphite

JIN Zunlong¹, GUO Yueming¹, LI Zhao^{1,2}, WANG Dingbiao¹, WANG Yongqing¹

(1. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Province Institute of Boiler and Pressure Vessel Safety Testing, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Tensile test on PTFE composites filled with graphite was carried out to investigate the effect of the graphite content on the tensile strength of modified composite materials. The tensile performance curve and tensile strength were obtained. The results showed that the mechanical properties of modified PTFE composites were influenced significantly by the graphite content. When the volume fraction of graphite is 24%, the tensile strength of the modified PTFE composites decreased by 48%, which was only 12.2 MPa. With the increase of the graphite content, the mechanical properties of the modified PTFE composites continued to decrease obviously.

Key words: PTFE; graphite; tensile test

LIDAR 点云数据全自动滤波算法研究

李 健¹, 方宏远¹, 崔雅博², 范 涛³

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 开封大学 实验实训中心, 河南 开封 475004;

3. 河南省地质环境监测院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 提出了一种基于移动最小二乘法的点云数据全自动滤波算法, 该方法首先对 LIDAR 点云数据进行合理分块, 并建立分块网格的动态四叉树空间索引, 便于数据操作和管理. 对分块网格中的点云数据利用精简移动最小二乘法拟合出参考地形, 将拟合得到的参考地形用于 LIDAR 点云高程阈值的迭代计算, 将每次迭代前后高差小于阈值的点划为地面点, 其余点划分为非地面点, 迭代运算直至阈值满足要求为止. 实验表明, 精简移动二乘法效率高, 计算量小, 并且精度高, 适合点云数据 DEM(digital elevation model) 拟合, 利用该算法对 LIDAR 点云数据进行滤波的速度快、精度高, 能够有效地识别地面点和非地面点, 并保留地形的细节信息.

关键词: 点云数据; 数字地面模型; 滤波算法; 动态四叉树; 移动最小二乘法

中图分类号: P237

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-6833.201504004

0 引言

随着激光技术的快速发展和完善, 激光数据在众多领域得到了广泛的应用. 由于激光能在短时间内获得地物三维坐标信息, 并且数据量极大, 故而如何快速从海量 LIDAR 点云数据中提取有用的信息是目前研究的热点和难点^[1]. 国内外许多学者都对点云滤波进行了讨论和研究, 并且提出了许多滤波算法, 包括基于数学形态学的滤波算法^[2-3]、基于坡度的滤波算法^[4-6]、基于 TIN 的渐进加密算法^[7-8]等, 都取得了一些研究成果, 但其中还存在一些问题尚未解决. 不管是机载 LIDAR 数据还是地面 LIDAR 数据大部分是基于激光点云中高程突变信息进行滤波, 假定点云中高程低的点为地面点, 高程较高的点为非地面点, 由于系统误差的存在, 这种情况未必完全正确. 另外一些滤波算法适用范围有限. 从上述问题可看出, 提出一种简单、快速、适用范围广、效率高的点云滤波算法是非常必要的^[9].

由于激光点数据量大, 并且点云数据的不规则、散乱复杂等性质决定了点云数据处理工作的复杂困难^[10-11]. 针对 LIDAR 点云数据的特点, 笔

者提出了先将点云数据进行网格分块, 保证点云数据的原始性, 减少单次数据处理量. 对分块数据建立空间索引, 提高点云数据处理的效率.

1 关键技术与算法

1.1 LIDAR 点云数据的滤波流程

将海量激光点云分块并建立相应的空间索引关系后, 进行地物的自动过滤处理, 滤波要考虑当前点所在的网格, 并对其进行计算, 每次计算的结果再以索引的方式动态存储, 作为下次迭代计算的基础数据, 具体滤波流程如图 1 所示.

1.2 点云数据的网格分块与动态四叉树空间索引

为了进行激光点云的海量数据管理、处理与显示, 对激光点云分块处理显得尤为必要. 分块的大小直接影响到数据处理层次及深度, 相应地影响算法的效率. 分块越小, 分割越细, 效率就越低, 其合并的区域相对增大, 数据的压缩比就越高; 反之, 效率就越高, 而压缩比相对降低. 最小网格大小的选择应是最小采样间距的整数倍, 具体数值的确定取决于被测对象的复杂度、仪器的最小采样间距以及期望的数据压缩比.

收稿日期: 2015-04-02; 修订日期: 2015-10-28

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(41404096); 河南省教育厅基金资助项目(14A420002, 15A420002)

作者简介: 李健(1983—), 男, 河南孟州人, 郑州大学讲师, 博士, 主要从事点云数据处理, E-mail: jianli@zzu.edu.cn.

引用本文: 李健, 方宏远, 崔雅博, 等. LIDAR 点云数据全自动滤波算法研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2016, 37(1): 92-96.

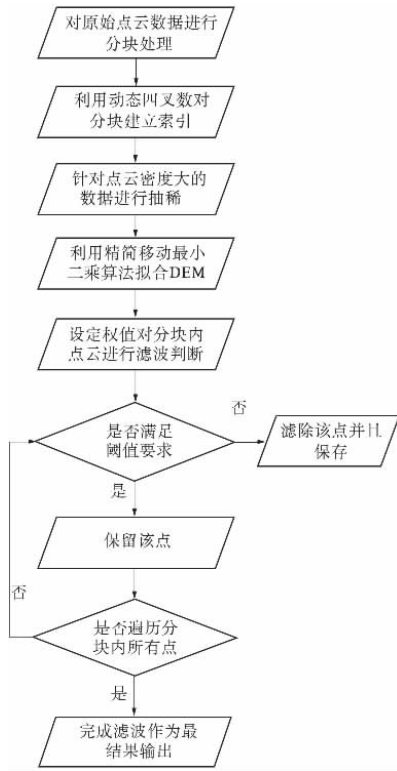


图 1 点云滤波处理流程图

Fig. 1 Flow chart of point clouds filtering process

为了高效地管理和存储分块网格及网格内的激光点云数据,需要对所有存在点的网格与点云之间建立索引关系,在对点云进行处理和过滤时,只需要考虑点所在的网格即可,这里采用四叉树结构^[12].

由于激光点云的分布不均匀和边界形状极其不规则,为了克服常规四叉树空间索引结构中的问题,笔者采用空间动态四叉树的方法对分块网格建立索引关系.其算法要点为:在开始建立四叉树时,不需要事先确定工作区域的范围,只须把要插入空间数据库的第一个对象的 MBR (minimum bounding rectangle) 中心作为四叉树的顶点,随着数据处理工作的进行,对作业空间进行分解.

1.3 精简移动最小二乘法拟合 DEM

移动最小二乘法提供一种较高次数的多项式逼近方式对散乱点云进行曲面拟合^[13],并且要求拟合函数在各个节点处的误差的平方和最小,能够保证比较高的精度.用该算法拟合的曲面比较平滑,与实际曲面近似^[14-15].但是移动最小二乘法比较复杂,运算效率不高,如果点云数据量比较大,则处理比较困难,因此需要对该方法进行精简,在保证精度前提下提高其运算效率.精简移动最小二乘法采用带权的正交函数作为基函数^[16-18],在求解系数矩阵时可只考虑对角线元素,不用求逆矩阵,减少了运算量、提高了运算效

率,同时也提高了精度,适合于数据量比较大的点云数据拟合.

最小二乘拟合函数:

$$f(X) = \sum_{i=1}^n p_i(X) \alpha_i(X) = \mathbf{P}^T(X) \alpha(X). \quad (1)$$

式中: $\alpha_i(X)$ 为待求系数 ($i = 1, 2, \dots, n$), 是坐标 X 的函数; $p_i(X)$ 称为基函数,它是一个 k 阶完备的多项式; n 是基函数的项数.

对于二维空间拟合,基函数 $\mathbf{P}^T(X)$ 的形式为线性基: $\mathbf{P}^T = (1, x_1, x_2)$. (2)

二次基: $\mathbf{P}^T = (1, x_1, x_2, x_1^2, x_1x_2, x_2^2)$. (3)

为了使得曲面在点 x 局部拟合最优,定义误差方程:

$$J = \sum_{i=1}^m w(X - X_i) [f(X_i) - f(X)]^2 =$$

$$\sum_{i=1}^m w(X - X_i) \left[\sum_{j=1}^n p_j(X_i) \alpha_j(X) - f(X) \right]^2. \quad (4)$$

式中: $w(X - X_i)$ 为权重函数; m 为计算域内节点总数.

式 (4) 可写为

$$J = (\mathbf{P}\alpha - f)^T \mathbf{W}(X) (\mathbf{P}\alpha - f). \quad (5)$$

式中:

$$\mathbf{F} = [f(X_1) \ f(X_2) \ \cdots \ f(X_m)]^T. \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1(X_1) & p_2(X_1) & \cdots & p_n(X_1) \\ p_1(X_2) & p_2(X_2) & \cdots & p_n(X_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_1(X_m) & p_2(X_m) & \cdots & p_n(X_m) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

$$\mathbf{W}(X) =$$

$$\begin{bmatrix} w(X - X_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w(X - X_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w(X - X_m) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

待求系数 $\alpha(x)$ 通过求取目前函数 J 的极值获取 (见式 (9)).

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = A(x) \alpha(x) - B(x) f = 0. \quad (9)$$

式中:

$$A(x) = \mathbf{P}^T \mathbf{W}(x) \mathbf{P}. \quad (10)$$

$$B(x) = \mathbf{P}^T \mathbf{W}(x). \quad (11)$$

为了避免式 (9) 在求解过程中出现病态和奇异,这时如果假定对于点集 $\{x\}$ 和权 $\{w_i\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 若存在一组函数 $p_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 满足:

$$(p_k, p_j) = \sum_{i=1}^n w_i p_k(x_i) p_j(x_i) = \begin{cases} 0, & (k \neq j) \\ A_k, & (k = j) \end{cases} \quad (k, j = 1, 2, \dots, n). \quad (12)$$

则称 $p_i(x)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为点集 $\{x\}$ 和权 $\{w_i\}$ 的正交函数集, 那么移动最小二乘可变为:

$$\begin{bmatrix} p_1(x_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2(x_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_n(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1(x) \\ \alpha_2(x) \\ \vdots \\ \alpha_n(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (p_1(x), f(x_1)) \\ (p_2(x), f(x_2)) \\ \vdots \\ (p_n(x), f(x_n)) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

那么很容易就解出 $\alpha_i(x)$:

$$\alpha_i(x) = \frac{(p_i(x), f(x_i))}{(p_i(x), p_i(x))}. \quad (14)$$

待定系数 $\alpha_i(x)$ 可以通过求解式(14)得到, 并且 $\alpha_i(x)$ 的求解过程避免了求矩阵的逆, 避免了求解病态方程, 计算效率得到了提高.

为了验证该算法, 利用扫描点云数据中 2 658 个点来检测对比精简移动最小二乘算法与移动最小二乘算法拟合的 DEM, 图 2 为在 MATLAB 中使用移动最小二乘拟合的 DEM, 耗时 156 s, 从拟合 DEM 数据可以看出构建的 DEM 精度较低, 而使用 IDL(interactive data language) 编程开发的精简移动最小二乘法拟合的 DEM(如图 3 所示), 只用了 30 s, 时间减少了 126 s, 效率得到提高, 从效果来看, 拟合 DEM 比较平滑, 与实际地形较接近.

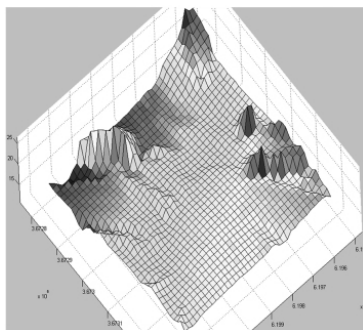


图 2 MLS 算法拟合 DEM

Fig. 2 MLS Fitting DEM

2 实验与应用

笔者主要通过 IDL 编程实现上述算法, IDL 是面向矩阵、语法简单的第四代可视化语言, 可以应用于任何领域的三维数据可视化、数值计算、三

维图形建模、科学数据读取等功能中. IDL 是完全面向矩阵的, 它具有快速分析超大规模数据的能力, 这在海量点云处理方面具有独特的优势^[19].

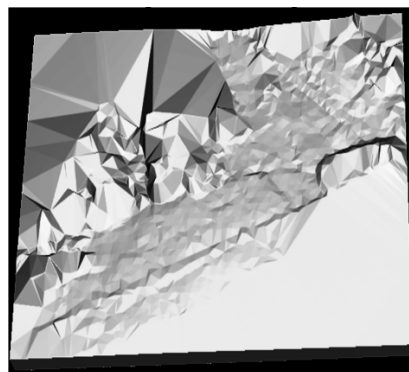


图 3 精简 MLS 算法拟合 DEM

Fig. 3 Simplify MLS Fitting DEM

为了验证本算法的精度, 将滤波算法得到的地面点云数据进行抽稀, 与本区域内采集 GPS 测量数据进行对比, 来评定该算法的精度. 通过十站扫描采集约一平方公里的点云, 原始点云数据约 2.5G(如图 4), 获得本区域内 200 个 GPS 点数据. 将扫描点云数据拼接后使用笔者提出的算法对点云数据进行滤波, 得到地面点云数据并进行抽稀, 如图 5 所示. 将抽稀后的地面点云数据在 CAD 中进行高程展点, 并将 200 个 GPS 点高程数据加入 CAD 中, 将两组数据进行统计对比, 如图 6 所示. 浅色为激光点云高程数据, 深色为 GPS 高程数据. 在这里由于获得的地面点云数据与采集的 GPS 点坐标不是同名点, 因此只能根据离 GPS 点最近或者附近的地面激光点的高程进行统计, 存在一些高程异常点, 高程点误差范围见表 1.



图 4 原始扫描激光点云数据

Fig. 4 Raw laser scanning point clouds

利用笔者提出的滤波算法对十站扫描点云数据滤波, 过滤后地面激光点云个数约为 8 145 631 个. 在滤波算法中分块网格大小为 2 m, 迭代 3 次, 普通笔记本电脑过滤时间约 1 min 将过滤后激光点云数据构建间距 2 m 的 DEM 网格如图 7 所示.



图 5 滤波抽稀 10 m 点云数据

Fig.5 Rarefied ground points after point clouds filtering

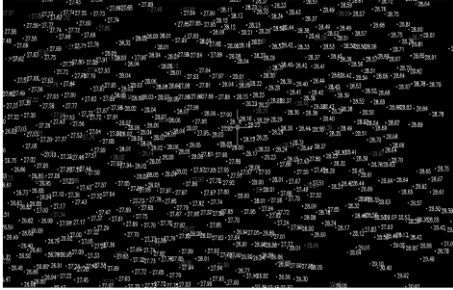


图 6 激光点云高程与 GPS 高程数据对比

Fig.6 Comparison laser points with GPS points

表 1 不同误差范围内点云个数统计表

Tab.1 Experiment on the accuracy of the algorithm proposed

绝对值高程误差/cm	激光点云数目
< 1	54
2 ~ 5	77
6 ~ 10	28
11 ~ 15	22
16 ~ 20	14
高程异常点	7

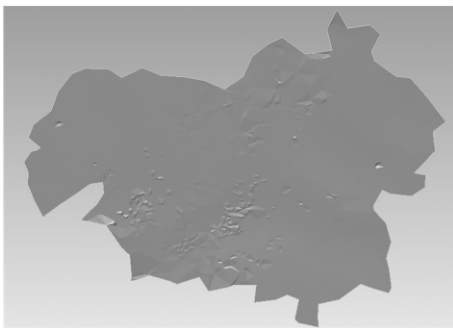


图 7 过滤后的激光点云数据生成 DEM 数据

Fig.7 The DEM using point clouds data after filtering

3 结论

(1) 根据 LIDAR 点云数据的特点,提出了基于网格分块的过滤方法,并建立了分块网格的动态四叉树的空间索引方法,解决了海量激光点云数据的存储和管理,进而实现了海量激光点云数

据的快速处理. 并且使用动态最小二乘法拟合 DEM 对点云数据进行滤波,拟合平面比较平滑,与实际地形接近.

(2) 从分类得到点云数据与 GPS 高程点精度对比可以看出,笔者所采用的滤波算法精度较高,能够快速有效地从激光点云数据中识别地面点和非地面点,实用性强.

(3) 从文中两个案例可以看出本算法适用于机载 LIDAR 和地面 LIDAR 的滤波处理,且能够高效地对海量点云数据进行滤波处理. 但对一些特殊地形(如悬崖)仍然存在一定的问题,需要采用转换坐标系或进行局部过滤等处理方法.

参考文献:

- [1] AXELSSON P. Processing of laser scanner data algorithms and applications [J]. ISPRS international journal of photogrammetry and remote sensing, 1999, 54 (2/3): 138 - 147.
- [2] 隋立春,张熠斌. 基于改进的数学形态学算法的 LiDAR 点云数据滤波 [J]. 测绘学报, 2010, 39 (4): 390 - 396.
- [3] 罗伊萍,姜挺,龚志辉,等. 基于多尺度和自适应数学形态学的数据滤波方法 [J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26 (6): 426 - 429.
- [4] 杨应,苏国中,周梅. 影像分类信息支持的 LiDAR 点云数据滤波方法研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35 (12): 1453 - 1456.
- [5] 袁枫,张继贤,张力,等. 结合强度信息的 LiDAR 数据滤波方法 [J]. 测绘科学, 2010, 35 (5): 39 - 41.
- [6] 刘凯斯. 机载激光 LiDAR 点云数据滤波和分类算法研究 [D]. 北京: 首都师范大学资源环境与旅游学院, 2014.
- [7] 左志权,张祖勋,张剑清. 知识引导下的城区 LiDAR 点云高精度三角网渐进滤波方法 [J]. 测绘学报, 2012, 41 (2): 246 - 251.
- [8] AXELSSON P. DEM Generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. International archives of photogrammetry and remote sensing, 2000, XXXIII (B4): 110 - 117.
- [9] KRAUS K, PFEIFER N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data [J]. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 1998, 5 (4): 193 - 203.
- [10] 李乐林. 基于等高线族的机载 LiDAR 数据建筑物三维模型重建方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 2012.
- [11] KHAMARRUL A R, MICHELE S C J, VAN W. , et al. Generating an optimal DTM from airborne la-

- ser scanning data for landslide mapping in a tropical forest environment [J]. *Geomorphology*, 2013, 190: 112 – 125.
- [12] 赵波, 边馥苓. 面向移动 GIS 的动态四叉树空间索引算法 [J]. *计算机工程*, 2007, 33(15): 86 – 88.
- [13] LANCASTER P. SALKASKAS K. Surfaces generated by moving least squares methods [J]. *Mathematics of computation*, 1981, 37: 141 – 158.
- [14] TSCHKO T B, Lu Y Y, GU L. Elements-free galerkin methods [J]. *International journal for numerical methods in engineering*, 1994, 37: 229 – 256.
- [15] LEVIN D. The Approximation power of moving least squares [J]. *Mathematics of computation*, 1998, 67: 1517 ~ 1531.
- [16] 陈美娟, 程玉民. 改进的移动最小二乘法 [J]. *力学季刊*, 2003, 24(2): 266 – 272.
- [17] 倪慧, 李重, 宋红星, 等. 带插值条件的最小移动二乘曲线拟合 [J]. *浙江理工大学学报*, 2011, 28(1): 135 – 139.
- [18] 任红萍, 程玉民, 张武. 改进的移动最小二乘插值法研究 [J]. *工程数学学报*, 2010, 27(6): 1021 – 1029.
- [19] 韩培友. IDL 可视化分析与应用 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.

An Automatic Point Clouds Filtering Algorithm Based on Grid Partition and Simplified Moving Least Squares

LI Jian¹, FANG Hongyuan¹, CUI Yabo², FAN Tao³

(1 College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2 Training Center, Kaifeng University, Kaifeng 475004, China; 3 Henan Geological Environment Information, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: An automatic point clouds filtering algorithm is presented on the basis of Grid Partition using Dynamic Quad Trees and reference surface fitted by Moving Least Squares. The filtering processing contains three major steps: Firstly, it gives the LIDAR point clouds reasonable grid partitions and establishes the corresponding dynamic quad trees spatial indices. Secondly, the points in the partitioned grids are utilized to fit a DEM reference plane using moving least squares technology. Finally, the elevation threshold is setup to separate ground points from those non-ground ones who are positioned above the reference plane and have a distance exceeding the threshold value to the plane. The aforementioned steps have to be repeated on the obtained ground points with gradually decreasing thresholds and grid size until desired precision is achieved. The experiments show that simplified moving least squares is high efficiency, small amount of calculation and high precision DEM data for point cloud fitting, and the filtering algorithm has high precision and can effectively identify ground points and non-ground ones without losing the detailed information of topography.

Key words: point clouds data; DEM; filtering algorithm; dynamic quad trees; moving least square

《郑州大学学报(工学版)》征稿简则

1. 刊登内容

本刊主要刊登机械、电气、信息、水利、化工、土木、交通、材料、环境工程等学科领域的学术论文。

2. 投稿要求

(1) 原创性论文,有创新性,主题明确、结构完整、论据可靠、论证合理、层次分明、逻辑严密、文字精炼、可读性强。

(2) 投稿具有合法性,不存在抄袭、剽窃、侵权等不良行为;来稿未在任何正式出版物上公开发表过,不允许一稿多投。

(3) 请严格遵守国家有关保密规定,不泄漏国家机密。

(4) 稿件请用 Word 编辑排版,若系基金资助课题,请在首页地脚处注明(包括项目编号)。

(5) 文稿格式要求规范、项目齐全,按顺序给出:题目(一般不超过 20 字),作者(包括工作单位含二级机构、邮编),摘要(包括研究的目的、方法、结果和结论四要素,200~300 字,内容应具体、准确,切忌空洞和主观评价),关键词(3~8 个),中图分类号,正文(包括图、表,6000 字左右为宜),参考文献,英文信息(摘要与中文摘要一一对应,包括英文题目、作者姓名、单位、地址、邮编及关键词),并在首页地脚处注明第一作者和/或通信作者简介(包括出生年、性别、籍贯、职称、学位、研究方向、电子邮箱和电话)。

(6) 物理量的符号和法定计量单位必须符合国家标准、国际标准。例如,物理量的符号用斜体,单位要用正体;矩阵、向量、矢量、张量等,用黑斜体表示。

(7) 文中图、表只附必要的,图、表应有中、英文图题和表题,小图、表宽度不超过 75 mm,大图、表宽度 120~150 mm;插图的纵、横坐标的标目(物理量的符号和单位)要齐全;表格采用三线表。应按标准方式标注,如:时间的标注方式应为 t/s 或 t/min 或 t/h,速度的标注方式应为 $v/(m \cdot s^{-1})$ 。

(8) 参考文献须在文中标引,并按在文中引用的次序排序;按照 GB/T 7714—2015 著录:

期 刊 [序号] 作者. 题名[J]. 刊名, 年, 卷(期): 起止页码.

专 著 [序号] 作者. 题名[M]. 出版地: 出版社, 出版年: 起止页码.

学位论文 [序号] 作者. 题名[D]. 保存地: 保存单位(包括二级学院/系), 年份.

论文集 [序号] 作者. 题名[C]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.

析出文献 [序号] 作者. 题名[C]//源文献. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.

标 准 [序号] 起草单位. 标准编号 标准名称[S]. 出版地: 出版社, 出版年.

专 利 [序号] 专利所有者. 题名: 专利号[P]. 日期.

电子文献 [序号] 作者. 电子文献题名[J/OL]. 刊名, 年, 卷(期): 起止页码. 发表或更新日期/引用日期(任选). 电子文献的出版或可获得地址.

3. 投稿方法

请登录《郑州大学学报(工学版)》网站(<http://www.zdxbgxb.com>)进行在线投稿(需要先注册)。同一篇稿件只需投稿一次,以免系统给出多个编号,如果要修改请登录按照提示提交修改稿。若需查询稿件处理状况,请通过“作者登录”进行查询。

4. 作者须知

本刊实行三审制,双盲式同行评议。一般审稿周期为 6 周左右,论文刊发以后给作者赠送当期样刊。本刊已经加入“中国知网”、“万方数据——数字化期刊群”等数据库和检索机构,所付作者稿酬中已包含其著作权使用费,不再另付。如作者不同意,请在来稿时说明,本刊将做适当处理。本刊编辑部使用“科技期刊学术不端文件检测系统”,请作者规范投稿,维护自身及期刊的良好声誉,如果造成“重复发表”,将择期发出撤消论文通告,并在今后 5 年内拒收来稿,通报作者单位,取消论文效用。

5. 联系地址

通信地址:(450001) 郑州市高新区科学大道 100 号郑州大学学报(工学版)编辑部

联系电话:0371—67781276 / 67781277, E-mail: gxb@zzu.edu.cn

本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(光盘版)》
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《万方数据系统》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国无机分析化学文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《工程机械文摘》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《电子科技文摘》

郑州大学学报(工学版)
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)

双月刊 (1980年创刊)

第37卷 第1期 总第145期 2016年1月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)

Bimonthly (Started in 1980)

Vol.37 No.1 Sum No.145 Jan.10, 2016

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 国内外公开发售
征 订 处 全国各地邮政局
发行单位 河南省邮政发行局

Administrated by The Education Department
of Henan Province
Sponsored by Zhengzhou University
Edited & Published by Editorial Board of Journal of
Zhengzhou University
E-mail gxb@zzu.edu.cn
Address No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China
Telephone (0371)67781276 67781277
Chief Editor LI Yanyan
Executive Chief Editor 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