

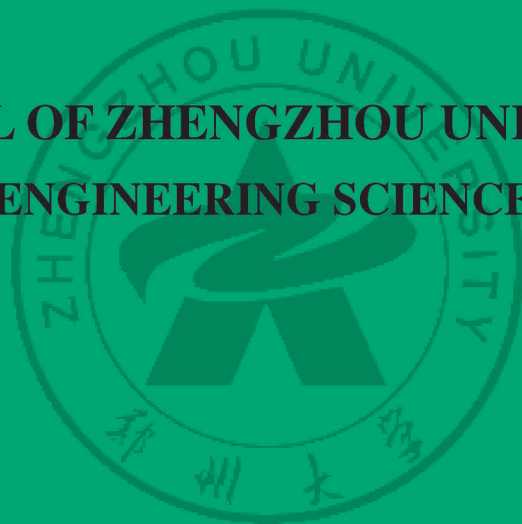
- 全国中文核心期刊
- 中国科技核心期刊
- RCCSE中国核心学术期刊

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

郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE



2020.1

第41卷 第1期
Vo1.41 No.1
2020年1月出版

ISSN 1671-6833



郑州大学学报

工 学 版

JOURNAL OF ZHENGZHOU UNIVERSITY
ENGINEERING SCIENCE

编 委 会

特邀编委：

申长雨(中国科学院院士)

何季麟(中国工程院院士)

张孟杰(新西兰惠灵顿维多利亚大学)

刘炯天(中国工程院院士)

金耀初(英国萨里大学)

Kay Chen Tan (香港城市大学)

编委会主任：

邵国胜(郑州大学)

编委(按姓氏笔画为序)：

王 凌(清华大学)

王忠勇(郑州大学)

公茂果(西安电子科技大学)

叶国田(郑州大学)

刘国际(郑州大学)

关绍康(郑州大学)

麦立强(武汉理工大学)

李勇平(上海应用物理所)

张 冰(郑州大学)

张少军(郑州大学)

陈静波(郑州大学)

庞新厂(郑州大学)

赵明皞(郑州大学)

高丹盈(河南工程学院)

唐 珂(南方科技大学)

梁长浩(合肥物质科学院)

韩一帆(郑州大学)

潘复生(重庆大学)

王亚明(郑州大学)

王宗敏(中原工学院)

左其亭(郑州大学)

刘 波(中国科学院数学与系统科学研究院)

刘春太(郑州大学)

许 群(郑州大学)

李 杰(同济大学)

吴泽宁(郑州大学)

张 涛(北京航空航天大学)

陈伟能(华南理工大学)

陈德良(郑州大学)

单崇新(郑州大学)

贾 瑜(郑州大学)

郭院成(郑州大学)

梁 静(郑州大学)

董 林(郑州大学)

臧双全(郑州大学)

目 次

土木与交通工程

- 架空导线径向温差及允许载流量研究 张 猛, 梁 任, 赵桂峰(1)
- 生猪转运车烘干房风系统优化研究 李会知, 翟 参, 肖方怡, 邢金超(8)
- 基于 Trucksim 整车操纵稳定性影响参数的研究 陈 静, 徐延海, 朱鹏兴, 李 爽, 唐云飞(13)
- 断续节理岩体的 TBM 滚刀破岩机理研究 翟淑芳, 曹世豪, 冯 永, 高 萌(20)
- 钢桥面板顶板-U 肋焊缝多轴疲劳效应评估 吉伯海, 蒋 斐, 王益逊, 傅中秋(25)

智能计算

- 基于遗传算法优化的机械臂动态矩阵预测控制 赵庆岩, 黎 杰, 吴 顺, 涂海波, 汤奇荣(32)
- 基于维度扰动的快速非支配排序遗传算法 II
..... 张茂清, 李东洋, 胡 博, 汪 镭, 崔志华, 郭为安(38)
- 基于自适应主成分分析的化工过程在线监测 吕照民, 周 革, 苗 晨(44)
- 基于进化计算的特征选择方法研究概述 王艳丽, 梁 静, 薛 冰, 岳彩通(49)
- 融合位置注意力机制和改进 BLSTM 的食品评论情感分析 李 勇, 金庆雨, 张青川(58)

电气与信息工程

- 基于小波包变换和支持向量机的故障选线方法 高金峰, 秦瑜瑞, 殷红德(63)
- 融合差分进化和 Taylor 级数的超宽带定位解算方法
..... 张 勇, 高光辉, 郭一楠, 巩敦卫, 杨建建(70)
- 计及功率预测误差的主动配电网运行方式优化 王克文, 刘 凯, 刘艳红(75)
- 融合交通心理学的车辆群组运动仿真研究综述
..... 王 华, 何晓宇, 徐静, 徐明亮, 霍二福, 李冠峰, 金保华(83)

机械工程

- 水射流工艺对渗碳钢圆棒表层改性影响的研究 马咏涛, 安乐乐, 张伦敦, 赵乐川(91)

CONTENTS

【Civil Engineering and transportation Engineering】

- Study on Radial Temperature Distribution and Maximum Ampacity of Overhead Conductors
..... **ZHANG Meng , LIANG Ren , ZHAO Guifeng (1)**
- Optimization of Air System in Drying Room of Pig Transport Truck
..... **LI Huizhi , ZHAI Can , XIAO Fangqia , XING Jinchao (8)**
- Research on Vehicle Handling Stability Affected Parameters Based on Trucksim
..... **CHEN Jing , XU Yanhai , ZHU Pengxing , LI Shuang , TANG Yunfei (13)**
- The Influence of Intermittent Joint on Rock Fragmentation by TBM Cutter
..... **ZHAI Shufang , CAO Shihao , FENG Yong , GAO Meng (20)**
- Multiaxial Fatigue Evaluation of U-rib to Deck Welded Joint in Steel Bridge Deck
..... **JI Bohai , JIANG Fei , WANG Yixun , FU Zhongqiu (25)**

【Computational Intelligence】

- Dynamic Matrix Predictive Control of Manipulators Based on Genetic Algorithms
..... **ZHAO Qingyan , LI Jie , WU Shun , TU Haibo , TANG Qirong (32)**
- Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II Based on Dimensionality Perturbation
..... **ZHANG Maoqing , LI Dongyang , HU Bo , WANG Lei , CUI Zhihua , GUO Weian (38)**
- Online Monitoring of Chemical Process Based on Adaptive Principal Component Analysis
..... **LYU Zhaomin , ZHOU Ge , MIAO Chen (44)**
- Research on Evolutionary Computation for Feature Selection
..... **WANG Yanli , LIANG Jing , XUE Bing , Yue Caitong (49)**
- Improved BLSTM Food Review Sentiment Analysis with Positional Attention Mechanisms
..... **LI Yong , JIN Qingyu , ZHANG Qingchuan (58)**

【Electrical Engineering and Information Engineering】

- Fault Line Selection Based on Wavelet Packet Transform and Support Vector Machine
..... **GAO Jinfeng , QIN Yurui , YIN Hongde (63)**
- Ultra-wideband Positioning Solution Method Based on Differential Evolution and Taylor Series
..... **ZHANG Yong , GAO Guanghui , GUO Yinan , GONG Dunwei , YANG Jianjian (70)**
- Optimization of Run Mode of Active Distribution Network with Power Prediction Error
..... **WANG Kewen , LIU Kai , LIU Yanhong (75)**
- Survey of Psychology Based Traffic Simulation
..... **WANG Hua , HE Xiaoyu , XU Jing , XU Mingliang , HUO Erfu , LI Guanfeng , JIN Baohua (83)**

【Mechanical Engineering】

- Study on the Influence of Water Jet Modification Process on Carburized Steel Round Bars
..... **MA Yongtao , AN Lele , ZHANG Lundun , ZHAO Lechuan (91)**

架空导线径向温差及允许载流量研究

张 猛,梁 任,赵桂峰

(郑州大学 土木工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:以常用的 LGJ300/50 钢芯铝绞线为例,基于稳态热平衡方程和 IEEE Std 738—2012 标准,考虑线股空气间隙和实际接触情况,利用 ANSYS 建立了精细化导线模型,对其径向温差及考虑径向温差时的允许载流量进行了分析。结果表明:导线运行时存在内部高、表面低的径向温度场,温差可达 4~10℃;导线温度对风速 0~3 m/s、风向角 0~45°以及导线直径(型号)较为敏感;径向温差对导线允许载流量的影响可达 10% 以上。考虑径向温差时,导线允许温度限值的定义对其允许载流量影响较大,建议将规范规定的导线允许工作温度理解为导线的平均温度。

关键词:架空导线;径向温差;敏感性分析;允许温度;允许载流量

中图分类号:TM743

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.021

0 引言

近年来,随着我国经济的快速发展,高峰期供电紧张的问题日益突显。解决该问题的方法,除了架设新的输电线路外,实施既有线路动态增容又有技术改造的方案是另一有效途径,这势必会使架空导线长期处于高温负荷状态,当导线温度超过其长期运行允许温度时,可能会引起导线强度损失、连接点氧化和对地安全距离降低,这给线路的安全带来严重隐患。现有的动态增容方法常采用非接触式红外测温技术,以测得的导线表面温度作为其允许温度^[1-2],据此对线路载流量进行实时调控。该法对导线运行时的温度场考虑不足,忽略了导线径向温差对其载流量的影响,有可能得到偏于不安全的调控结果。

实际架空导线多采用钢芯铝绞线,由于内外层线股接触和散热条件不同,使得导线运行时存在径向温差。我国 110~750 kV 架空输电线路设计规范^[3]规定:验算导线允许载流量时,钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度宜取 70℃。该规定虽然给出了允许温度限值,但并未明确其含义。事实上,当考虑导线径向温差时,其允许工作温度的不同定义对于其允许载流量亦有较大影响。因此,准确分析架空导线的径向温度场,进而

对其允许温度限值的定义进行讨论,对于确定导线最大载流量,合理指导线路动态增容,保证电网系统的安全稳定运行具有重要意义。

针对架空导线温度场及载流量,国内外已开展了相关研究^[4-13],这些研究分析了风速、风向、环境温度和日照强度等因素对导线工作温度的影响。但是,上述研究主要集中在导线温度场的分析方法方面,对于导线径向温差的分布规律及其对导线允许载流量影响的研究较少。因此,笔者以常用的 LGJ300/50 钢芯铝绞线为例,采用 ANSYS 软件建立其精细化有限元模型,综合考虑导线内部空气间隙及线股接触情况,采用数值方法分析架空导线的径向温度场,并与规范 IEEE Std 738—2012^[14]结果对比,规范最后结合工程实例分析导线允许温度限值的不同定义对其允许载流量的影响,以期望为线路动态增容提供参考。

1 架空导线载流量计算的基本原理

目前,架空导线载流量的计算多采用热平衡理论解析方法^[3,12-14],其基本原理是:当导线热量等于散热量时,达到热稳定,此时导线温度相对恒定。架空导线生热主要包括载流产生的焦耳热和太阳照射热;散热则是导线与外界的对流散热及导线辐射散热。该过程可用稳态热平衡方程

收稿日期:2019-04-22;修订日期:2019-10-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578512)

作者简介:张猛(1978—),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事电力系统结构防灾减灾研究,E-mail: zhangmeng@zzu.edu.cn。

(1) 表示, 从而可得导线载流量, 如式(2)所示。

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R_{T_{avg}}; \quad (1)$$

$$I = \sqrt{(q_c + q_r - q_s) / R_{T_{avg}}}, \quad (2)$$

式中: q_c 为对流散热量; q_r 为辐射散热量; q_s 为日照生热量; I 为导线允许载流量; T_{avg} 为导线平均温度; $R_{T_{avg}}$ 为平均温度时对应的导线电阻值。

1.1 对流散热量

对流散热量计算如式(3)~(5), 其中式(3)、(4)适于强制对流, 式(5)适于自然对流。在低风速时, 文献[14]推荐用强制对流和自然对流散热的最大值来表示导线的对流散热量。

$$q_{c1} = K_{angle} \cdot [1.01 + 1.35 \cdot Re^{0.52}] \cdot k_f \cdot (T_s - T_a); \quad (3)$$

$$q_{c2} = K_{angle} \cdot 0.754 \cdot Re^{0.6} \cdot k_f \cdot (T_s - T_a); \quad (4)$$

$$q_{cn} = 3.645 \cdot \rho_f^{0.5} \cdot D_0^{0.75} \cdot (T_s - T_a)^{1.25}, \quad (5)$$

式中: K_{angle} 为风向因子, 表征风向角对强制对流散热的影响, 可由式(6)计算; Re 为雷诺数, 由式(7)计算; k_f 为空气导热系数, 与环境温度和导线温度等有关系, 由式(8)计算; T_s 为导线温度; T_a 为环境温度; ρ_f 为空气密度; D_0 为导线直径。

$$K_{angle} = 1.194 - \cos \varphi + 0.194 \cdot \cos 2\varphi + 0.368 \cdot \sin 2\varphi, \quad (6)$$

式中: φ 为风向与导线轴向的夹角。

$$Re = (D_0 \cdot \rho_f \cdot V_w) / \mu_f, \quad (7)$$

式中: V_w 为风速; μ_f 为空气运动黏度。

$$k_f = 2.424 \times 10^{-2} + 7.477 \cdot 10^{-5} \cdot T_{film} - 4.407 \cdot 10^{-9} \cdot T_{film}^2, \quad (8)$$

式中: T_{film} 为导线与空气接触面的流体定性温度, $T_{film} = (T_s + T_a) / 2$ 。

1.2 辐射散热量

当架空导线的温度高于环境温度时, 导线会对外辐射散热。辐射能力取决于导线与环境的温差。辐射散热量可由式(9)计算, 式中包含 Stefan-Boltzmann 常量 σ , 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

$$q_r = 17.8 \cdot D_0 \cdot \varepsilon \cdot [(0.01T_s + 2.73)^4 - (0.01T_a + 2.73)^4], \quad (9)$$

式中: ε 为导线表面的辐射散热系数^[3], 对于光亮新线取 0.23~0.43, 对发黑旧线或涂黑色防腐剂的导线取 0.90~0.95。

1.3 日照生热量

日照生热量与太阳所处位置、太阳常数、线路方位、导线表面的吸热系数等有关, 可按式计算:

$$q_s = \alpha \cdot Q_{se} \cdot \sin \theta \cdot A', \quad (10)$$

式中: α 为导线表面的吸热系数^[3], 对于光亮新线取 0.35~0.46, 对发黑旧线或涂黑色防腐剂的导线取 0.90~0.95; Q_{se} 为太阳辐射海拔修正值; θ 为太阳入射有效角; A' 为单位长度导线的投影面积。

1.4 电阻计算

架空导线的电阻因导线的横截面积、频率、电流和温度而异, 而且在交流情况下, 导线会受到集肤效应、磁滞和涡流损耗的影响, 使得导线的电阻增加。笔者按照规范[14]建议值查表选用, 表中未列的数值, 可用线性插值计算:

$$R_{T_{avg}} = \left[\frac{R_{T_h} - R_{T_l}}{T_h - T_l} \right] \cdot (T_{avg} - T_l) + R_{T_l}, \quad (11)$$

式中: R_{T_l} 和 R_{T_h} 是当温度分别为 T_l 和 T_h 时查表所得的导线电阻值。该式可广泛用于计算导线在高温和低温时的电阻, 其中包含磁滞效应、集肤效应和绞距系数的影响, 但是 T_h 的取值应不小于所要计算的导线温度。

2 导线径向温度场及载流量的模拟

考虑到规范[14]计算导线载流量时无法考虑导线内部温度分布的影响, 这与导线实际情况不符。因此, 为更准确地指导线路实时增容, 保证线路运行安全, 有必要准确了解导线内部的温度分布规律。近年来, 随着计算技术的发展, 采用有限元方法分析导线温度场也趋于成熟^[8-10, 15], 因此, 笔者以下利用 ANSYS 软件建立导线精细化有限元模型, 考虑导线内部空气间隙和线股接触情况, 采用数值方法分析其径向温度场。

2.1 计算参数选取

以常用的钢芯铝绞线 LGJ120/20、LGJ150/25、LGJ240/40、LGJ300/50、LGJ400/35、LGJ400/65 为例进行分析, 导线截面特性如表 1 所示。上述 6 种导线除截面特性不同外, 其他参数均相同: 导线的电阻率为 $2.8264 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, 电阻温度系数为 $4.03 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, 导热系数为 $237 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 均为 20°C 时的值^[16]。以夏至日、北纬 30° 、东西走向、平均海拔 100 m、环境清洁的导线为例, 分析其径向温度分布规律。

2.2 有限元模型的建立

采用 ANSYS 电热耦合单元 Solid69 模拟钢芯和铝线, 分别赋予其不同的材料属性, 其中铝线外表面施加对流换热、太阳辐射热, 钢芯和铝线整体施加焦耳热。最终所建的导线横截面有限元模型及网格划分情况如图 1 所示。

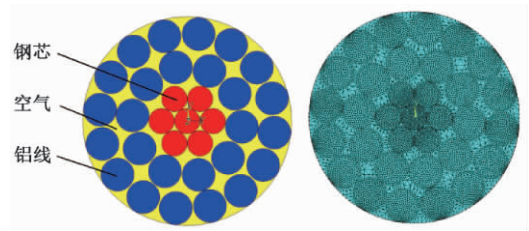


图 1 架空导线截面有限元模型及网格划分
Figure 1 Finite element model and mesh generation of overhead conductor

表 1 钢芯铝绞线截面特性

Table 1 Parameters of ACSR

型号	LGJ120/20		LGJ150/25		LGJ240/40		LGJ300/50		LGJ400/35		LGJ400/65	
材料	钢	铝	钢	铝	钢	铝	钢	铝	钢	铝	钢	铝
数量/直径/mm	7/1.85	26/2.38	7/2.1	26/2.7	7/2.66	26/3.42	7/2.98	26/3.83	7/2.5	48/3.22	7/3.44	26/4.42
面积/mm ²	18.82	115.67	24.25	148.86	38.9	238.85	48.82	348.86	34.36	390.88	65.06	398.94

表 2 风速 0.5 m/s 时 ANSYS 仿真与 IEEE 理论对比

Table 2 Comparison of ANSYS simulation value and IEEE theoretical value(wind speed 0.5 m/s)

温度均值/℃	径向温差/℃	温度均方差	IEEE 值/A	ANSYS 值/A	偏差/%
53.11	5.11	2.03	525.53	510	2.96
56.47	5.66	2.25	569.32	560	1.64
60.21	6.26	2.49	613.69	610	0.60
64.27	6.91	2.76	657.93	660	0.31
68.64	7.60	3.04	701.76	710	1.17
73.46	8.35	3.35	746.45	760	1.82
78.28	9.15	3.67	788.09	810	2.78
83.55	10.01	4.02	830.57	860	3.54

注: 偏差 = |ANSYS 值-IEEE 值|/IEEE 值 × 100% , 下同。

考虑环境温度为 20 ℃、风速为 0 m/s、风向角为 90°时,当 ANSYS 仿真的载流量从 410 A 增加到 760 A 时,计算结果如表 3 所示。

由表 2 和表 3 可知: ①无论强制对流(风速 0.5 m/s)还是自然对流(风速 0 m/s),按照 IEEE 公式得到的导线载流量与 ANSYS 仿真值的最大偏差仅为 6.21% ,说明本文模型是较为可靠的; ②随着载流量增加,导线径向温差逐渐增大,可达到 4 ~ 10 ℃ ,说明径向温差与载流量存在正相关性。

图 2 和图 3 分别给出了风速为 0.5 m/s 和 0 m/s 时,载流量为 510 A 时导线的径向温度。从图 2 和图 3 可以看出: 导线内部温度呈中心高、表面低的特点,这主要是由导线内部空气间隙及线股间接触情况不同引起的。

为更清楚了解导线径向温度随风速、载流量

2.3 计算结果分析及对比验证

限于篇幅,以下仅以 LGJ300/50 导线为例进行分析。取环境温度为 20 ℃、风速为 0.5 m/s、风向角为 90° ,当 ANSYS 模拟的载流量从 510 A 按步长 50 A 增加到 860 A 时,仿真得到的导线径向温度分布如表 2 所示。为便于比较,表中还给出了对应 ANSYS 仿真得到的导线不同温度均值时,按照规范 [14] 中的公式计算的导线载流量。

表 3 风速 0 m/s 时 ANSYS 仿真与 IEEE 理论对比

Table 3 Comparison of ANSYS simulation value and IEEE theoretical value(wind speed 0 m/s)

温度均值/℃	径向温差/℃	温度均方差	IEEE 值/A	ANSYS 值/A	偏差/%
61.10	4.21	1.66	437.13	410	6.21
64.84	4.66	1.84	481.72	460	4.51
68.99	5.15	2.04	526.68	510	3.17
73.49	5.70	2.26	571.53	560	2.02
78.34	6.30	2.50	616.11	610	0.99
83.53	6.95	2.77	660.43	660	0.06
89.06	7.65	3.05	704.53	710	0.78
94.91	8.40	3.36	748.26	760	1.57

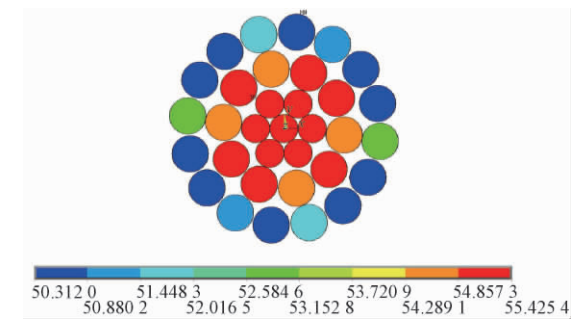


图 2 导线截面径向温度分布

Figure 2 Radial temperature distribution of the conductor 的变化规律,沿导线径向选取若干测点,提取各测点的温度。当载流量为 560 A ,风速分别为 0、0.5、1 m/s 时,导线温度沿径向变化如图 4 所示;当风速为 0.5 m/s ,载流量分别为 560、610、660 A 时,导线温度沿径向变化如图 5 所示。考虑到导线温度沿径向并非对称分布,笔者分别计算每层导线的平均温度作为该层中心点的温度。当载流量为 560 A ,风速分别为 0、0.5、1 m/s 时,导线温

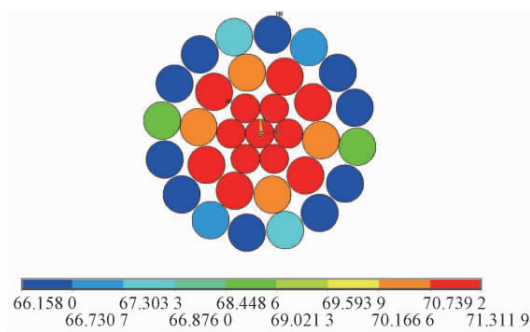


图3 导线截面径向温度分布

Figure 3 Radial temperature distribution of the conductor

度沿径向变化情况如图6所示;当风速为0.5 m/s,载流量分别为560、610、660 A时,导线温度沿径向变化情况如图7所示。

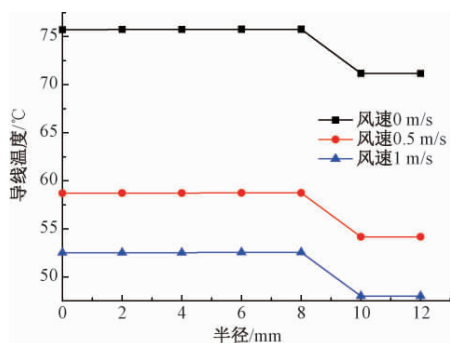


图4 导线温度沿径向变化(载流量 560 A)

Figure 4 Radial temperature distribution (ampacity 560 A)

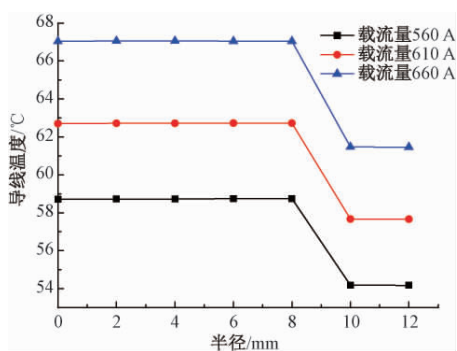


图5 导线温度沿径向变化(风速 0.5 m/s)

Figure 5 Radial temperature distribution (wind speed 0.5 m/s)

由图4~图7可知,钢芯和内层铝线温度变化平缓,而外层铝线温度明显降低,这是因为外层铝线与空气直接接触,散热条件有利,而钢芯电阻率较高,载流产生的焦耳热较高,且内层钢芯接触紧密,散热条件差,因此温度较高且变化较小。

2.4 架空导线温度对其影响因素的敏感性分析

选用导线模型内所有节点的平均温度作为导线温度,分析导线温度随风速、风向角、环境温度、

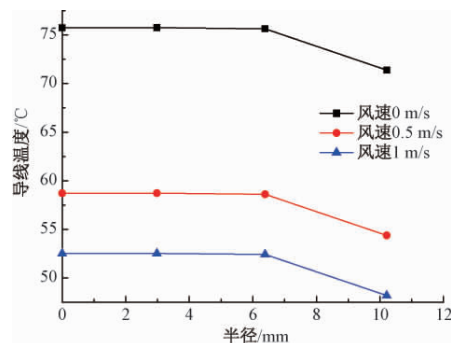


图6 导线各层温度均值沿径向变化(载流量 560 A)

Figure 6 The average temperature of each layer of the conductor along the radial direction (ampacity 560 A)

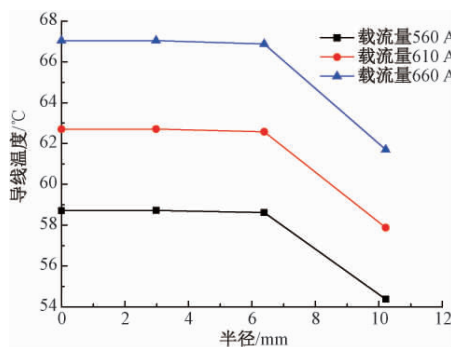


图7 导线各层温度均值沿径向变化(风速 0.5 m/s)

Figure 7 The average temperature of each layer of the conductor along the radial direction (wind speed 0.5 m/s)

日照强度和导线直径等因素变化时的敏感性。为简化,取以下参数进行分析。环境温度 20 °C,风速 0.5 m/s,风向角 90°,中午 12 时对应的日照强度,导线型号 LGJ300/50,直径为 24.26 mm。

导线温度随风速变化特点如图8所示。由图8可以看出,随着风速增加,导线温度逐渐降低。当风速在 0~3 m/s 时,导线温度对风速变化较为敏感,温度下降较快;当风速大于 3 m/s 时,温度下降速度趋于平缓。

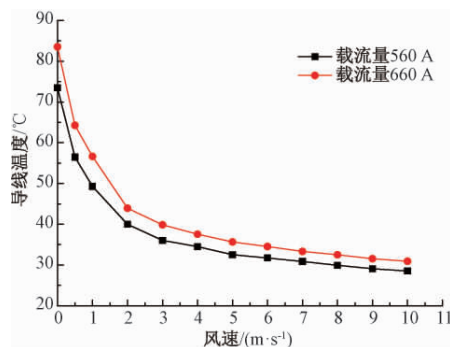


图8 风速对导线温度的影响

Figure 8 The effect of wind speed on conductor temperature

风向角变化时,导线温度变化如图9所示。由图9可知,随风向角增大,导线温度降低。当风向角小于 45° 时,导线温度对风向角变化较为敏感;当风向角大于 45° 时,导线温度对风向的敏感性降低,温度变化也趋于平缓。

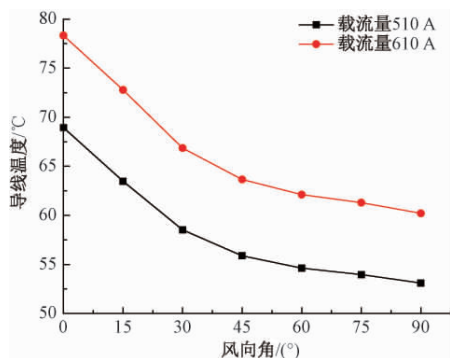


图9 风向角对导线温度的影响

Figure 9 The effect of wind direction on conductor temperature

环境温度变化时导线温度变化如图10所示。由图10可知,导线温度与环境温度近似呈线性关系,即环境每升温 1°C ,导线升温约 0.9°C 。这是由于环境温度的升高使空气导热率增加,空气与导线间的热交换加强,因而导线的温升略小于 1°C 。

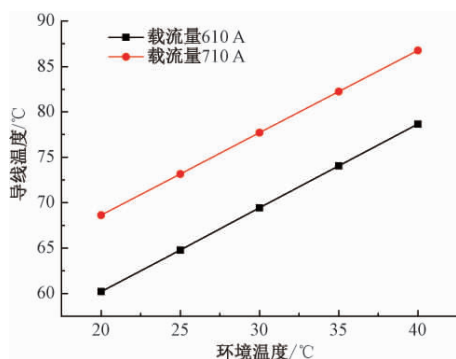


图10 环境温度对导线温度的影响

Figure 10 The effect of ambient temperature on conductor temperature

日照强度变化时导线温度变化如图11所示。由图11可以看出,导线温度与日照强度近似呈线性关系,日照强度每上升 100 W/m^2 ,导线温度约上升 1.5°C 。

当固定载流量,变化导线直径时,导线温度变化如图12所示。图中导线直径分别为15.07、17.10、21.66、24.26、28.00 mm;对应型号分别为LGJ120/20、LGJ150/25、LGJ240/40、LGJ300/50、LGJ400/65。由图12可以看出,固定载流量时,随导线直径增加,导线温度降低,这是因为大直径导线与空气接触面增大,对流散热量增加,因此导线

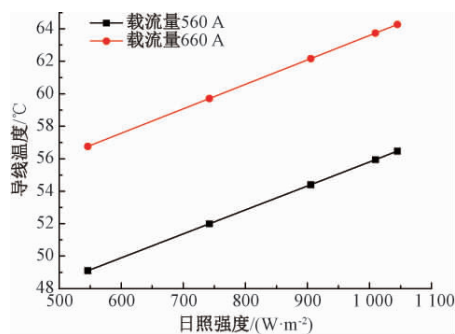


图11 日照强度对导线温度的影响

Figure 11 The effect of sunlight intensity on conductor temperature

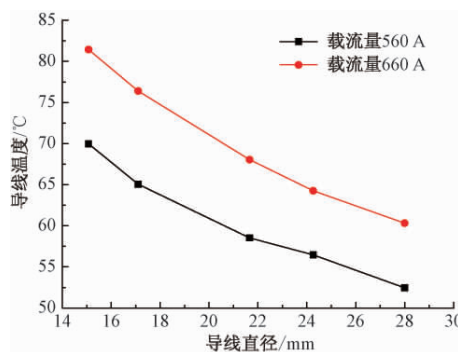


图12 导线直径对导线温度的影响

Figure 12 The effect of conductor diameter on conductor temperature

温度降低。

综上可知,导线温度对风速、风向角和导线直径(型号)的变化较为敏感。

3 基于径向温差的导线允许载流量

3.1 径向温差对导线允许载流量的影响

前文分析可知,随载流量变化,导线内部径向温差可达 $4\sim 10^\circ\text{C}$ 。为进一步了解径向温差对导线允许载流量的影响,本节仍以钢芯铝绞线LGJ300/50为例,分析径向温差对导线允许载流量的影响,结果如表4所示。

由表4可知,根据导线径向最高和最低温度计算的导线允许载流量差异较大,可达 $70\sim 80\text{ A}$,约为导线容许载流量的 $9\%\sim 13.7\%$ 。这说明,导线径向温差对其允许载流量的影响不可忽视。当考虑径向温差时,由于导线内部温度较高,其实际容许载流量低于以表面温度测算的线路允许载流量。因此,在实际中,如果取导线表面温度的监测结果为导线允许温度限值来调整线路的输送容量是不安全的。

3.2 对规范导线允许温度限值含义及其对导线允许载流量影响的探讨

我国 $110\sim 750\text{ kV}$ 架空输电线路设计规范^[3]

表4 不同径向温差时对应的导线允许载流量

Table 4 Allowable ampacity of the conductor corresponding to the different radial temperature

I/A	径向温差/ $^{\circ}\text{C}$	I_{\max}/A	I_{\min}/A	$(I_{\max} - I_{\min})/A$
510	5.11	556.18	485.70	70.48
560	5.66	600.21	529.26	70.95
610	6.26	644.88	573.11	71.77
660	6.91	689.54	616.74	72.8
710	7.60	733.92	659.86	74.06
760	8.35	779.08	703.86	75.22
810	9.15	821.46	744.50	76.96
860	10.01	864.70	785.98	78.72

注: I 为利用 ANSYS 仿真导线径向温度场时的载流量; I_{\max} (I_{\min}) 为对应 ANSYS 仿真得到的导线温度最高(低)值时按照 IEEE 规范公式得到的导线允许载流量。

规定: 验算导线允许载流量时, 钢芯铝绞线和钢芯铝合金绞线的允许温度宜取 70°C 。该规定虽然给出了导线的允许温度限值, 但是并未明确其含义是指导线的表面温度、平均温度还是内部最高温度。当分别按照上述三者理解时, 由于径向温差的存在, 对应的导线允许载流量也随之不同。为此, 本节以江苏电网 220 kV 旗淮 4090 线采用的 LGJ400/35 钢芯铝绞线^[16]工程实例进行分析。

该导线运行环境温度为 40°C , 风速为 0.5 m/s , 风向角为 90° 。按前文方法建立 ANSYS 仿真模型, 如图 13 所示。

由此可知, 当限定导线允许工作温度为 70°C 时, 上述 3 种情况导线允许载流量的差值可达 $45 \sim 124.1\text{ A}$, 约为容许载流量的 $9.7\% \sim 26.9\%$ 。这再次说明, 线路动态增容时, 仅以在线监测的导线表面温度不超过允许温度限值为依据调整线路的输送容量是偏于不安全的。考虑到规范^[14]通常按照导线平均温度计算允许载流量, 因此, 笔者建议可将规范^[14]规定的导线允许工作温度限值理解为导线的平均温度。按照笔者分析结果, 3 种情况导线径向温差在 $5.55 \sim 6.87^{\circ}\text{C}$, 由于实际中更易测得导线表面温度, 当控制导线平均温度不超过允许温度 70°C 时, 可将测得的导线表面温度控制在 $60 \sim 67^{\circ}\text{C}$ 。

4 结论

(1) ANSYS 仿真法能较充分地考虑导线内部空气间隙及线股接触情况, 较准确地计算导线内部的温度分布情况, 可弥补现有输电线路温度监测技术仅监测导线表面温度的不足。

(2) 导线运行时, 内部径向温差随载流量增

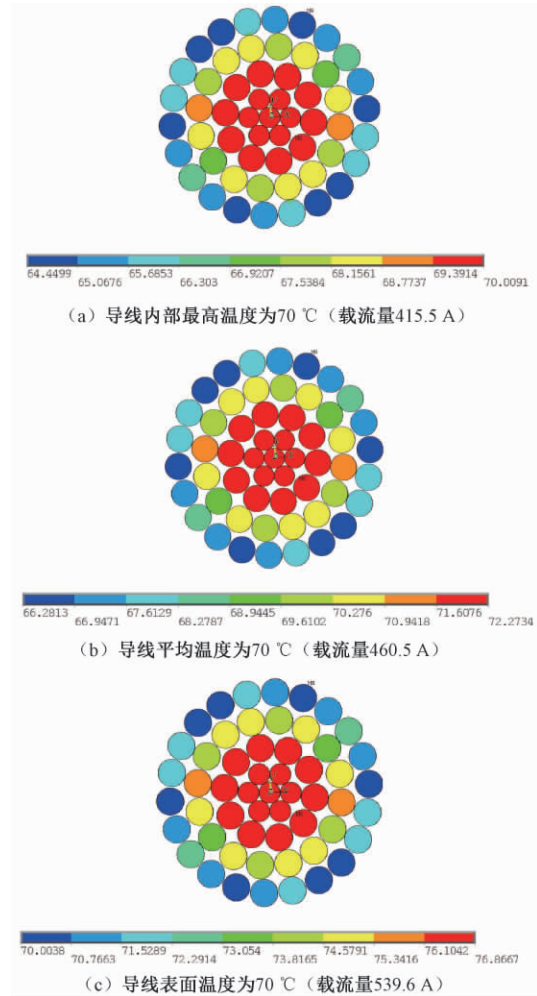


图13 不同允许温度含义对应的导线截面径向温度分布情况及允许载流量

Figure 13 Radial temperature distribution and allowable ampacity of the conductor under the different definition of allowable temperatures

加而变化, 以 LGJ300/50 导线为例, 径向温差可达 $4 \sim 10^{\circ}\text{C}$, 且呈内部温度高、表面温度低的特点。

(3) 导线温度的变化在风速 $0 \sim 3\text{ m/s}$ 、风向角 $0 \sim 45^{\circ}$ 时较为敏感; 固定载流量时, 导线温度随其直径(型号)增加而降低; 环境温度、日照强度对导线温度的影响近似呈线性关系。

(4) 导线径向温差对其允许载流量的影响不可忽视, 温差引起的导线容许载流量变化可超过 10% 。

(5) 考虑导线径向温差时, 其允许温度限值的定义对导线允许载流量的影响较大, 建议将规范^[14]规定的导线允许工作温度限值理解为导线平均温度。

参考文献:

- [1] 高强, 仝杰, 雷煜卿, 等. ANSYS 下导线发热及相互间接触的数值模拟 [C]// 电力通信管理暨智能

- 电网通信技术论坛论文集. 北京: 中国通信学会普及与教育工作委员会, 2013: 395-400.
- [2] 刘刚, 林杰, 陈荣锋, 等. 架空线路载流量的导线温度测量方法研究 [J]. 电测与仪表, 2013, 50(4): 41-44.
- [3] 中国电力企业联合会. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [4] 叶自强, 朱和平. 提高输电线路输送容量的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(S1): 258-263.
- [5] DOUGLASS D A. Radial and axial temperate gradients in bare stranded conductor [J]. IEEE transactions on power delivery, 1986, 1(2): 7-15.
- [6] BLACK W Z, COLLINS S S, HALL J F. Theoretical model for temperature gradients within bare overhead conductors [J]. IEEE transactions on power delivery, 1988, 3(2): 707-715.
- [7] HALL J F, DEB A K, SAVOULLIS J. Wind tunnel studies of transmission line conductor temperatures [J]. IEEE transactions on power delivery, 1988, 3(2): 801-812.
- [8] 赵成运, 郑良华, 田春光, 等. 66 kV 架空输电线路温度场的数值研究 [J]. 电网技术, 2007, 31(S2): 34-36.
- [9] 何整杰, 李震彪, 梁盼望. 输电线温度及载流量的 ANSYS 计算方法 [J]. 浙江电力, 2010, 29(8): 1-5.
- [10] 肖凯, 刘永斗, 李鹏云, 等. 架空导线径向温度场的数值模拟 [J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(4): 65-70.
- [11] LINDBERG E. The overhead line sag dependence on weather parameters and line current [D]. Uppsala University: Uppsala, 2011.
- [12] 袁永毅, 孙廷玺. 影响钢芯铝绞线允许载流量的因素 [J]. 电力安全技术, 2001, 3(5): 19-21.
- [13] 张猛, 张玉莹, 赵桂峰, 等. 考虑温度场的架空钢芯铝绞线线股应力研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(4): 7-11.
- [14] IEEE Power Engineering Society. IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2013.
- [15] 唐科, 文武, 丁俊杰, 等. 基于有限元法的电缆接头温度场仿真 [J]. 电力建设, 2016, 37(2): 145-150.
- [16] 梁任. 架空导线运行温度及载流量的数值模拟分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.

Study on Radial Temperature Distribution and Maximum Ampacity of Overhead Conductors

ZHANG Meng, LIANG Ren, ZHAO Guifeng

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

Abstract: The commonly used conductor LGJ300/50 and LGJ400/35 were taken as examples. The radial temperature distribution of overhead conductors, sensitivity of influence factors of overhead conductor temperature and the influence of radial temperature difference on the allowable current carrying capacity of conductors were analyzed based on the conductor steady-state heat balance equation, the IEEE 738-2012 standard and the ANSYS software. The air gap within the conductor and the actual contact between the strands were considered during analysis. The results showed that there was a radial temperature field when the conductor was running. The temperature difference could reach 4~10 °C. The conductor temperature has a high sensitivity when the wind speed was 0~3 m/s and the wind direction angle was 0~45°. The radial temperature difference had a great influence on the allowable current carrying capacity of the wire, and the degree of influence could reach over 10%. The definition of allowable temperature limit of conductor had a great influence on the allowable ampacity of the conductor. It was suggested that the allowable temperature limit should be understood as the average temperature of the conductor.

Key words: overhead conductors; radial temperature difference; sensitivity analysis; allowable temperature; allowable ampacity

生猪转运车烘干房风系统优化研究

李会知¹, 翟 参¹, 肖方怡¹, 邢金超²

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州力之天农业科技有限公司, 河南 郑州 450001)

摘 要: 生猪转运车烘干房用于杀灭车内的细菌和病毒, 避免生猪感染疾病。初步设计的烘干房存在升温能耗偏大和烘干区域温度场、风速场不够合理的问题。通过现场试验和数值仿真模拟相结合的方法, 对烘干房的风系统进行了优化改进研究。首先, 利用烘干房现场试验数据, 检验数值仿真模拟研究方法的可行性; 然后, 通过分别改变烘干房送风口位置、后置风机位置和送风工艺参数进行仿真模拟优化, 得出合理的风系统设计形式和参数。研究表明: 送风工艺参数优化后, 烘干房一次升温理论能耗成本降低了16%。

关键词: 烘干房; 数值仿真模拟; Airpak; 优化研究; 能耗计算

中图分类号: TU834.3+3

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.004

0 引言

在生猪转运过程中, 为防止猪只在车内遭遇疾病感染, 转运车在进入养殖场之前需进行彻底的清洗、消毒和烘干。最后的烘干效果直接决定了清洗、消毒后车上的病菌是否除尽。利用烘干房在生猪转运车车身内部形成合理的温度场和风速场, 保证车辆快速干燥, 投入运营, 提高了车辆的利用效率和经济效益。

郑州力之天农业科技有限公司和郑州大学合作研发了专利产品^[1], 在此基础上初步建造的生猪转运车烘干房, 存在升温能耗偏大和烘干区域温度场、风速场不够合理的问题。如果现场不断调整烘干房风系统布置形式进行流场优化和测量试验研究, 必将取得可靠的成果, 但存在工作量大、周期长、成本高等问题。

由于畜牧转运车烘干房的研究不成熟, 笔者在研究中借鉴了汽车涂装烘干房^[2-4]和茯茶烘房^[5-7]的干燥技术。研究中首先利用初步设计的烘干房进行现场试验, 检验数值仿真模拟研究方法的可行性; 然后, 通过分别改变烘干房送风口位置、后置风机位置和送风工艺参数来进行数值仿真模拟优化, 在车辆烘干区形成合理的温度场和风速场, 得出合理的风系统设计形式和参数, 为生

猪转运车烘干房的设计改进提供依据, 为其他畜牧运输车辆烘干房的研究提供参考。

1 数值模拟及验证

1.1 物理模型

初步设计的烘干房主要由燃烧系统、热风烘干系统、智能化控制系统和烘干房室体4部分组成。燃烧室加热新风后送入烘干室内, 烘干室采用侧墙送风、顶部排风的气流组织方式, 并利用后置风机来加速室内气流循环。

烘干房的物理模型如图1所示。把车辆模型简化为车头、车轮、车身侧栏杆、车身底板4部分, 并对烘干房内结构进行一定程度的简化。表1为烘干房结构形式, 表2为烘干房风系统参数。

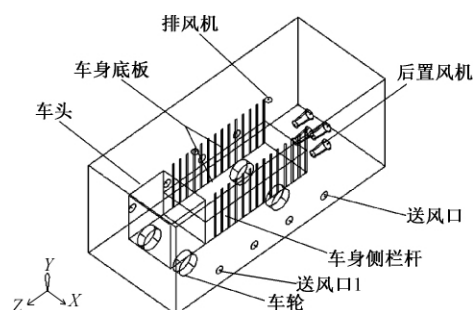


图1 烘干房物理模型

Figure 1 Physical model of the drying room

收稿日期:2018-12-02; 修订日期:2019-02-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608486)

作者简介:李会知(1965—),男,河南永城人,郑州大学教授,博士,主要从事建筑环境控制研究,E-mail:Lhz6380@zzu.edu.cn。

表 1 烘干房结构形式

Table 1 Structural style of drying room

外形尺寸/m	墙体材料	屋面材料	进出口形式
12 × 5 × 5	200 mm 厚 加气混凝土砌块	200 mm 厚现 浇钢筋混凝土屋面板	升降式铝 合金卷 帘门

表 2 烘干房风系统参数

Table 2 Physical parameters of air system in drying room

送风口 数量/个	送风 口间 距/m	送风 口直 径/m	后置 风机 数量/ 个	后置 风机 高度/ m	后置 风机 间距/ m	排风 口数	排风 口直 径/m
2 × 4	2	0.38	2 × 2	0.8、 1.8	1	2	0.3

1.2 控制方程

烘干房内空气为低速、不可压缩湍流流动气体,且遵循基本物理守恒规律。

(1) 质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

(2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = \text{div}[\mu \cdot \text{grad}(u)] - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u. \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = \text{div}[\mu \cdot \text{grad}(v)] - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v. \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = \text{div}[\mu \cdot \text{grad}(w)] - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w. \quad (4)$$

(3) 能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{T}) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T. \quad (5)$$

方程(1)~(5)联立湍流模型方程可构成封闭方程组对温度场、风速场进行求解。湍流计算模型选择标准 $k-\varepsilon$ 模型^[8]。

1.3 网格划分

使用 Airpak 数值模拟软件划分六面体网格,并对风口位置等进行局部加密处理。采用 4 套网格进行网格独立性考核,经过计算和结果处理,当网格数在 20×10^4 时即可满足网格无关性要求^[9]。笔者选取总网格数量为 214 086,图 2 为烘干房各坐标轴中部网格示意图。

1.4 数值方法

选择 Reynolds 时均法作为本文的数值模拟方法,有限体积法 FVM 作为离散方法,对控制方程进行离散化后,选取分步法进行迭代求解。

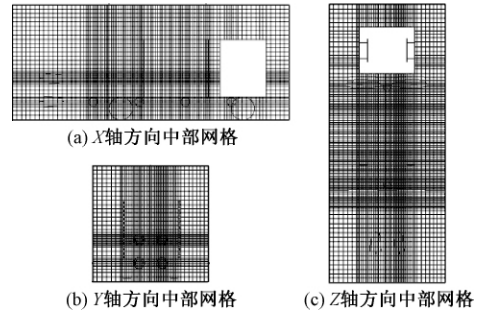


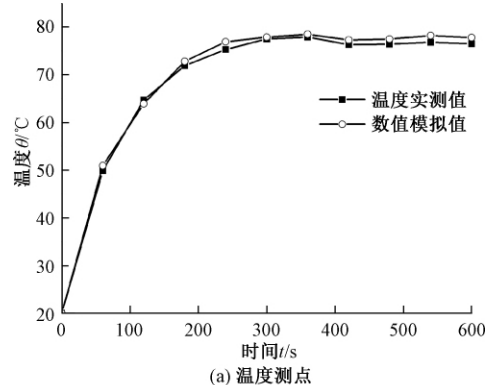
图 2 烘干房网格示意图

Figure 2 Grid of the drying room

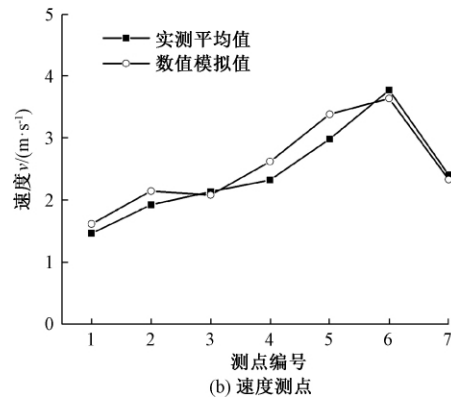
使用 Airpak 进行模拟求解,根据烘干房物性参数设置边界条件,选择离散辐射模型,采用双精度求解器^[10],并采用 SIMPLE 算法^[11]。动量、温度、湍流动能、湍流耗散率等项选用一阶迎风格式。

1.5 试验验证

现场试验选取 1 个温度测点和 7 个速度测点来验证模拟结果准确性,速度测点布置在车身左侧栏杆距墙 1.25 m、高为 0.8 m 处,测点间隔 1.5 m;温度测量探头布置在一层猪笼地板中部,高度 1.8 m 处。试验开始后每隔 60 s 记录一次温度读数,测得 600 s 温升数据。在室内流场充分发展并稳定后进行风速测量,每个测点读数 6 次并取其算术平均值,图 3 为试验数据与数值模拟结果对比。图(a)为温度测点前 600 s 瞬态模拟值和实测数



(a) 温度测点



(b) 速度测点

图 3 数值模拟与试验结果对比

Figure 3 Comparison of simulation and experiment

据对比;图(b)为速度测点的稳态模拟结果和实测数据的对比。分析可知,各温度测点相对误差均在 1.5% 以下,各速度测点相对误差均在 8% 之内,模型的准确度较高。通过数值模拟结果与试验数据的比较表明,使用 Airpak 软件模拟烘干房内气流组织,并进行后续仿真优化研究是可行的。

2 烘干房风系统设计优化

2.1 优化技术路线

理论上讲,猪笼上、下层地板平面处容易积水,其烘干效果的优劣直接影响病菌的杀灭效果,因此,在这两处烘干区域获得合理的流场是烘干房风系统优化的核心。

文献[12]指出:影响烘干房内气流组织的因素是送、排风口和后置风机的位置。结合数值模拟分析,排风口位置对车身周围流场影响较小,因此,影响初始烘干房流场的主要因素是送风口和后置风机的位置。

分别改变送风口和后置风机的位置,进行数值模拟和优化分析,引入速度的不均匀系数^[13]作为评价风速场合理性的指标之一,并引入温度不均匀系数作为评价温度场均匀性的指标之一,计算方法如下:

$$K_t = \frac{\sqrt{n \sum (\theta_i - \bar{\theta})^2}}{\sum \theta_i}, \quad (6)$$

式中: n 为研究区域内测点数; θ_i 为各测点的温度值; $\bar{\theta}$ 为区域内测点温度的算数平均值; K_t 为区域内测点温度的不均匀系数。

2.2 优化结果

(1) 温度场优化。烘干房内送风口数量及位置对温度场影响较大,保持初始后置风机位置和送风口间距不变,通过改变送风口 1 距入口卷帘门的距离及送风口的高度,组合成 12 种优化方案如表 3 所示。

根据数值模拟结果分别选取高度为 1.1 m、2.35 m 的猪笼一、二层地板内均匀的 8 个测点,计算平均温度和温度不均匀系数作为衡量指标,图 4 为温度场优化数据分析。

根据送风口优化结果,达到稳态后,猪笼一、二层地板平均温度都能达到烘干要求的 70 ℃ 以上,综合比较,方案 8 的上、下两层地板温度不均匀系数均较小,且都具有适中的平均温度,因此,

表 3 送风口优化方案

Table 3 Optimization scheme of air inlet

优化方案	送风口 1 距入口 距离/m	送风口高度/ m
1	1.25	1.1
2		1.3
3		1.5
4	2.25	1.1
5		1.3
6		1.5
7	3.25	1.1
8		1.3
9		1.5
10	4.25	1.1
11		1.3
12		1.5

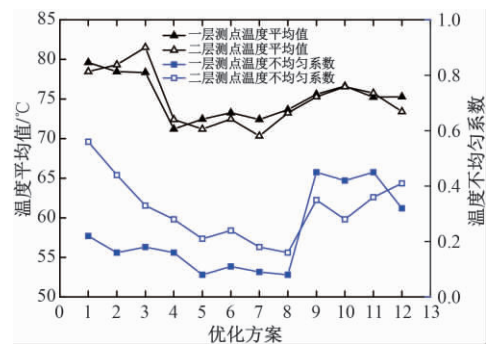


图 4 送风口优化结果分析

Figure 4 Result analysis of air inlet optimization

将其作为较理想的温度场优化结果。

(2) 速度场优化。烘干房内后置风机的摆放位置对风速场影响较大,根据温度场优化结果设置送风口位置后,将后置风机的摆放高度和间距组合为表 4 所示的 12 种优化方案。

表 4 后置风机优化方案

Table 4 Optimization scheme of rear fan

优化方案	双层后置风机 高度/m	同层后置风机 间距/m
1	1.2、2.45	1.0
2		1.5
3		2.0
4		2.5
5	1.6、2.85	1.0
6		1.5
7		2.0
8		2.5
9	1.8、3.05	1.0
10		1.5
11		2.0
12		2.5

根据数值模拟结果,两层烘干平面风速场相近,选取高度为1.1 m猪笼一层地板内均匀的8个测点,计算最大风速、平均风速和速度不均匀系数,并将它们作为衡量指标,图5为速度场优化数据分析结果。

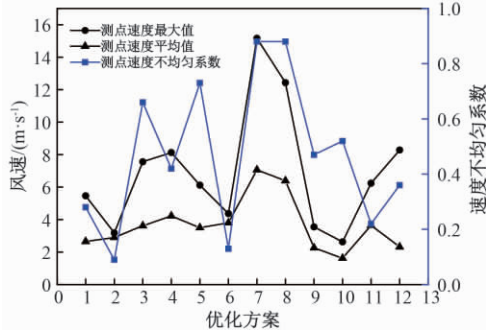


图5 后置风机优化结果分析

Figure 5 Result analysis of rear fan optimization

根据后置风机优化结果,方案7、8平均风速较高,但风速不均匀,方案2、6、11风速不均匀系数均较低,综合比较,方案6的优化效果最显著,最大风速、平均风速合理,均匀性较好,因此,将其作为较理想的风速场优化结果。

综上所述,首先采用送风口优化方案8使烘干区域具有良好的温度场,然后采用后置风机优化方案6使烘干区域具有良好的风速场。烘干房风系统优化结果为:送风口高度为1.3 m,送风口1距入口卷帘门3.25 m,送风口间距为2 m,后置风机高度分别为1.6 m和2.85 m,后置风机间距为1.5 m。

3 烘干房工艺参数优化

3.1 优化方案及结果

研究发现,升温阶段的最终温度应稳定在70~80℃之间,并持续干燥一段时间以杀灭大部分猪只易感染病菌,温度过低影响杀菌效果,过高则造成能耗浪费。因此,考虑灭菌效果和能耗因素,烘干房升温阶段达到的设计温度为75℃。

初始设计的烘干房存在升温阶段时间偏长,能耗偏大的问题。影响烘干房的升温阶段时间长短的主要因素按影响程度从大到小排列为:①入口温度,②入口速度,③室内初始温度,④室内初始湿度^[1]。

保持室内初始温度22℃,相对湿度31%不变,设置不同的入口温度和入口风速,进行瞬态数值模拟求解,将达到设计温度所需时间作为衡量指标,进行工艺参数优化,结果发现选取入口温度82℃和入口速度3.5 m/s作为送风工艺参数优化的结果,烘干房达到75℃的升温时间最短,为

496 s。

3.2 理论能耗比对

影响烘干房的能耗因素很多,主要是风机的电能耗和燃烧器消耗的能量^[1],烘干房内升温过程需要消耗的总热量:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (7)$$

式中: Q_1 为烘干房内壁面受热升温所消耗的热量 kJ; Q_2 为烘干房外壁面散失的热量 kJ; Q_3 为烘干房内空气和补充的新风升高到设计温度所消耗的热量 kJ。

(1) 烘干房内壁面吸收的热量主要用来提升内壁面的温度 Q_1 简化计算公式:

$$Q_1 = M_1 c_1 (T_1 - T_0), \quad (8)$$

式中: M_1 为烘干房内壁材料的质量 kg; c_1 为内壁材料的比热容 kJ/(kg·K); T_0 为内壁面加热前的温度 K; T_1 为内壁面加热至稳定状态下的温度 K。

(2) 烘干房主要是通过外壁面的对流传热向外界空气进行换热的 Q_2 简化计算公式:

$$Q_2 = AK(T_1 - T_w)t, \quad (9)$$

式中: A 为烘干房外壁表面积 m²; K 为外壁面对流换热系数 kJ/(m²·h·K); T_w 为外壁面平均温度 K; t 为烘干时间 h。

(3) 烘干房内空气升温所消耗的热量 Q_3 简化公式:

$$Q_3 = \Delta h m_2, \quad (10)$$

式中: Δh 为空气的焓值增量 kJ/kg; m_2 为空气的质量,分为两部分(补充的新风和烘干室内空气) kg。

为提供烘干房升温阶段热量,燃烧器所消耗的燃油量计算如式(11),送风机所消耗的电能计算如式(12)。

$$L_g = \frac{Q}{q_1}, \quad (11)$$

式中: q_1 为燃油燃烧的热值 kJ/kg。

$$P = \frac{Q_s \cdot p_1}{3600 \times 1000 \eta_0 \cdot \eta_1} \cdot t, \quad (12)$$

式中: Q_s 为送风量 m³/h; p_1 为风机的全压 Pa; η_0 为风机的内效率 %; η_1 为机械效率 %; t 为升温时间 s。

假设外墙体温为室外温度,且外侧无风,烘干房内没有无组织渗透风,室内排风量等于新风量。烘干房所在地区的柴油价格为6000元/t,工业用电价格为1.2元/度,则按照初始烘干房的工艺参数及物性参数,带入式(7)~(12),计算得一

次升温时间内能耗理论成本为 82.47 元。按照工艺参数优化结果进行能耗计算,在一次升温时间内能耗理论成本为 69.28 元,相比之前减少了 13.19 元,降低了 16%。

4 结论

(1) 通过现场试验测量与模拟结果的数据对比分析,表明数值模拟方法适用于生猪转运车烘干房流场组织的优化研究。

(2) 在初步设计的烘干房中,温度场、风速场不够合理。分析发现,影响烘干区域流场的主要因素是送风口和后置风机的位置。首先通过改变送风口位置来优化温度场,然后通过改变后置风机的高度和间距来优化风速场,得出了能够在烘干区域形成较合理的温度场和风速场的风系统形式:送风口离地面 1.3 m,送风口 1 距入口卷帘门 3.25 m,风口间距为 2 m;后置风机高度分别为 1.6 m 和 2.85 m,后置风机水平间距为 1.5 m。

(3) 为缩短烘干房升温阶段时间,降低能耗,通过改变烘干房入口温度和风速来进行送风工艺参数优化,模拟了不同送风优化方案烘干房的升温时间,获得了较短升温时间的工艺参数并进行了理论能耗计算,发现在一次烘干的升温期,送风工艺参数优化后的理论能耗成本降低了 16%。

参考文献:

- [1] 李传宗. 大型汽车烘干房气流组织的数值模拟及优化研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [2] 石长宏, 徐林, 伍昕忠, 等. 大型车辆烘干室技术浅谈: 能源的合理利用[J]. 上海涂料, 2007, 45(5): 36-38.
- [3] 林海, 叶永伟, 陈建, 等. 基于 CFD 的汽车车身烘房节能研究[J]. 机械制造, 2010, 48(10): 71-73.
- [4] 黄思, 丁田田, 晏超, 等. 基于数值模拟的烘房加热通风方案优选[J]. 科技导报, 2013, 31(4): 32-35.
- [5] 谢韬, 涂福炳, 刘慧, 等. 热风循环工艺参数对茯苓烘房的影响研究[J]. 工业加热, 2016, 45(2): 14-17.
- [6] 刘雄文, 涂福炳, 刘庆赞, 等. 茯苓烘房的数值模拟[J]. 工业加热, 2015, 44(1): 35-38.
- [7] 刘慧, 涂福炳, 谢韬, 等. 基于风扇强制对流的茯苓烘房数值优化研究[J]. 工业加热, 2016, 45(1): 39-41.
- [8] 孙帮成, 李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [9] 吴金星, 王超, 王明强, 等. 内置扭带管内湍流流动与传热数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(3): 10-14.
- [10] 王林林, 高歌. 碟形升力体流场数值模拟分析[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(4): 116-119.
- [11] PATANKAR S V, SPALDING D B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows[J]. International journal of heat and mass transfer, 1972, 15(10): 1787-1806.
- [12] 肖方怡. 运猪汽车烘干房的气流组织试验及数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [13] 张庆力, 陈为慧, 谢迎春, 等. 船舶居室层式通风出口位置的优化[J]. 洁净与空调技术, 2016(3): 118-122.

Optimization of Air System in Drying Room of Pig Transport Truck

LI Huizhi¹, ZHAI Can¹, XIAO Fangqia¹, XING Jinchao²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Lizhitian Agricultural Science and Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to avoid pig infect disease, drying room was used to kill bacteria and viruses of pig transport truck. The preliminary design of drying room had rather high energy consumption in heating period and unreasonable flow distribution in drying area. The combined methods of field test and numerical simulation were adopted to optimize the air system in the drying room. Firstly, the computational simulation method was validated by field test data. Then, the simulation and optimization were conducted by changing the position of air outlet and rear fan in the drying room, as well as the technology parameters of the air supply process, the reasonable design type and parameters of the air system were obtained. Research results showed that the cost of one heating period in the drying room was reduced by 16% after optimized the process parameters.

Key words: drying room; computational simulation; Airpak; optimization research; energy consumption calculation

基于 Trucksim 整车操纵稳定性影响参数的研究

陈 静¹, 徐延海^{1,2}, 朱鹏兴¹, 李 爽¹, 唐云飞¹

(1. 西华大学 汽车与交通学院, 四川 成都 610039; 2. 汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘 要: 为提高商用车驾驶的操纵稳定性, 通过 Trucksim 建立了商用车整车仿真模型及双移线闭环试验仿真环境。通过改变商用车的结构参数对车辆进行动力学仿真实验, 详细分析了不同的结构参数对整车操纵稳定性的影响; 结合汽车操纵稳定性的客观定量评价指标, 定量分析商用车结构参数对整车操纵稳定性的影响。结果表明: 增加装载质量, 使各项危险指标和综合客观评价指标数值变高, 表明操纵稳定性变差; 相反, 随着轴距的增大, 各项指标和综合评价指标都在降低, 商用车操纵稳定性变好。

关键词: Trucksim; 双移线; 整车操纵稳定性; 客观评价指标

中图分类号: U461.6 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.003

0 引言

商用车载重大、强度高、时间久、速度快等特点对商用车操纵稳定性提出了更高的要求^[1], 同时操纵稳定性是车辆动力学性能中较为复杂的一项性能, 因此对商用车操纵稳定性的影响因素研究就显得尤为重要。得益于计算机技术的大量应用, 众多学者对汽车操纵稳定性进行了相关仿真研究^[2-4]。文献[5]通过 Adams 建立整车模型, 并利用遗传算法有效提高了商用车的操纵稳定性; 文献[6]利用 Carsim-Simulink 联合仿真研究了汽车的操稳性; 文献[7]基于 Trucksim 对整车操纵稳定性进行了仿真分析研究, 但缺少参数对性能影响的量化研究; 文献[8]利用 Matlab/Simulink 建立电动助力转向系统控制策略, 改善了商用车的操纵稳定性。商用车结构参数的设计对其操纵稳定性有较大影响, 因此, 笔者利用 Trucksim 建立整车及道路模型, 结合汽车操纵稳定性的客观定量评价指标和综合客观评价指标, 定量分析商用车结构参数的变化对整车操纵稳定性的影响。通过改变商用车结构参数, 建立商用车操纵稳定性与自身结构参数之间的量化关系, 并结合蛛网图对整车操纵稳定性影响参数进行综合评价, 为商用车在设计阶段提供部分数据上的参考

依据。

1 系统建模

1.1 整车建模

基于 Trucksim 的友好用户界面及快速化建模特性, 笔者基于大运某款轻型载货汽车基本参数进行整车动力学模型的建立。该模型主要由整车外形、轮胎参数、转向系统、动力传动系统、制动系统和悬架系统等几部分组成^[9], 由于在仿真中仅涉及到整车操纵稳定性的仿真, 因此模型是以 speed control 通过 PID 控制来调节车速, 不需要详细的动力传动系统参数, 只需提供发动机功率限制最高车速。仿真车辆参数见表1所示, 建立仿真模型如图1所示。

1.2 道路建模

笔者采用 Trucksim 中的3维平整路面作为道路模型, 仿真道路的几何线形根据仿真工况的国家标准确定, 设置相应的环境参数和路面参数。

在相关研究中, 通过采用双移线仿真(double lane change, DLC)试验, 可以对汽车操纵稳定性进行全面评价。根据 GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》^[10]的规定, 并考虑实车情况, 设定本文中的仿真条件: 在试验过程中不施加制动力, 只有转向操作; 试验车速按汽车最高车速的

收稿日期:2018-12-03; 修订日期:2019-03-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775448); 四川省科技厅重点资助项目(2015GZ0150, 2016GZ0346)

通信作者:徐延海(1970—), 男, 湖北黄冈人, 西华大学教授, 博士, 主要从事整车性能测试与仿真等方面的研究, E-mail: xuyanhai@mail.xhu.edu.cn。

表 1 仿真车辆主要参数

Table 1 Main parameters of simulation vehicle

参数	数值
长×宽×高 $L \times D \times H/\text{mm}$	5 960 × 1 844 × 2 250
质心高度 H_g/mm	1 173
质心距前轴距离 L_f/mm	1 113
轮距 B/mm	1 844
轴距 L_s/mm	3 360
整车最大总质量 m/kg	6 000
发动机功率 P_e/kW	96
后悬钢板弹簧刚度 $K_r/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	160
驱动形式	4 × 2
轮胎规格	7.00R16



图 1 轻型载货汽车仿真模型

Figure 1 Simulation model of light truck

70%的整数倍确定,试验的初速度取 85 km/h。仿真采用驾驶员转向模型来控制车辆动作,在 Trucksim 中输入双移线轨迹坐标数据如表 2 所示,采用 3 次样条插值得到轨迹如图 2 所示,仿真距离为 150 m。

表 2 双移线坐标参数

Table 2 Coordinate parameters of double shift line

坐标点	X 轴	Y 轴	坐标点	X 轴	Y 轴
1	0	0	9	120	3.5
2	65	0	10	125	3.3
3	70	0.1	11	130	2.4
4	75	0.7	12	135	1.1
5	80	1.8	13	140	0.2
6	85	2.8	14	145	0
7	90	3.4	15	150	0
8	95	3.5			

2 汽车操纵稳定性客观评价指标

汽车操纵稳定性受汽车结构参数、环境条件和人为感觉等多种因素的影响,使得对其评价变得错综复杂。考虑到多种因素,笔者采用轨道跟踪好坏、翻车危险、侧滑危险等几种评价指标,该评价方法与驾驶员主观评价的相关性达到 99% 以上,具体评价指标包括以下几种。

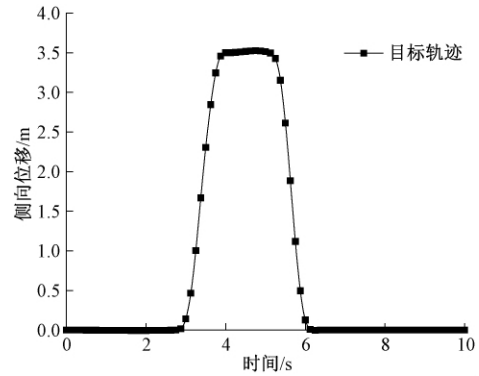


图 2 双移线试验驾驶员模型输入与时间关系

Figure 2 Between driver model input and time relationship under double-shift test

2.1 轨道跟踪好坏的指标

(1) 轨道误差指标。汽车轨道跟踪的好坏直接影响其主动安全性,因此,轨道误差的总方差对于汽车主动安全性是一个重要指标,其标准化后表达式为:

$$J_{e1} = \int_0^h \left\{ \frac{[f(t) - y(t)]}{\hat{E}} \right\}^2 dt, \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 为期望路径; \hat{E} 为轨迹误差标准门槛值; $y(t)$ 为试验时汽车目标轨迹; t_n 为试验时间。

(2) 方向误差指标。侧向加速度 $a_y = v + u\omega_r$, 汽车纵向速度与横摆角速度的乘积 $u\omega_r$ 是非稳态量,影响汽车的行驶方向,因此将其作为方向误差考虑。标准化后总方差表达式为:

$$J_{e2} = \int_0^h \left(\frac{u\omega_r}{\hat{\omega}_r} \right)^2 dt, \quad (2)$$

式中: ω_r 为汽车质心横摆角速度; $\hat{\omega}_r$ 为横摆角速度标准门槛值。

2.2 翻车危险性指标

(1) 侧向加速度。侧向加速度是操纵稳定性中最重要的汽车响应参数和评价指标,它代表汽车的侧向行驶性能。侧向加速度 a_y 的总方差表达式为:

$$J_{e1} = \int_0^h \left(\frac{a_y}{\hat{a}_y} \right)^2 dt, \quad (3)$$

式中: \hat{a}_y 为侧向加速度标准门槛值。

(2) 侧倾角。从驾驶员的角度考虑,车身侧倾角也代表翻车危险性,可以间接反映驾驶员的紧张程度,但与侧向加速度所表示的意义又有所不同,其标准化的总方差表达式为:

$$J_{e2} = \int_0^h \left(\frac{\varphi}{\hat{\varphi}} \right)^2 dt, \quad (4)$$

式中: φ 为汽车的侧倾角; $\hat{\varphi}$ 为汽车的侧倾角标准

门槛值。

2.3 侧滑危险指标

汽车前、后轮的侧滑是实际行驶中经常遇到的情况,它直接影响汽车的行驶安全性及驾驶员的安全感。因此,汽车的侧滑是影响驾驶员主观评价的一个因素。当汽车前、后轮的侧向力大于地面附着力,地面附着力不足以提供汽车所需要的侧向力时,汽车将产生侧滑,其标准化的总方差表达式为:

$$J_s = \max J_{si} = \int_0^h \left[\frac{F_{yi}(t)/F_{zi}(t)}{\hat{\mu}} \right]^2 dt, \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, 3, 4$ 分别表示左前、左后、右前、右后 4 个轮胎; $F_{yi}(t)$ 为车轮侧向力; $F_{zi}(t)$ 为车轮垂直载荷; $\hat{\mu}$ 为 $F_{yi}(t)/F_{zi}(t)$ 的标准门槛值。

2.4 综合客观评价指标

将上述各单项评价指标加权组合并取其加权平均值,建立一个考虑因素全面的表征汽车主动安全性的客观评价指标:

$$J = \sqrt{\frac{W_1 J_{e1}^2 + W_2 J_{e2}^2 + W_3 J_{i1}^2 + W_4 J_{i2}^2 + W_5 J_s^2}{W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5}}, \quad (6)$$

式中: W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 为加权值。为了调整权重系数, W_i 均取为 1,所有门槛值取文献[12]标准门槛值。

3 不同结构参数对商用车操纵稳定性的影响

商用车的操纵稳定性能是由各结构参数共同决定的,其中整车质量、轴距、轮距、质心位置是车体最重要的特性参数,钢板弹簧刚度是商用车悬架特性参数,这些结构参数与商用车的操纵稳定性息息相关。文献[11]研究了不同结构参数对操纵稳定性影响程度,笔者在此基础上以整车质量、轴距、轮距、后悬钢板弹簧刚度、质心高度及质心距前轴距离这 6 个结构参数作为试验的仿真变量,根据文献[11]将每个因素分为 3 种情况,分别为原车参数的 0.9 倍、1.0 倍和 1.1 倍,通过此方案得到 18 种不同参数的商用车,采用控制变量

法,结合客观评价指标定量考察此 6 个结构参数变化的对整车操纵稳定性的影响,具体参数变化如表 3 所示。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

仿真 倍数	整车 质量 m/kg	轴距 L_s/mm	后悬钢板 弹簧刚度 $K_t/$ ($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	质心 高度 H_g/mm	质心距 前轴距 离 $L_i/$ mm	轮距 B/mm
0.9	5 400	3 024	144	1 056	1 002	1 660
1.0	6 000	3 360	160	1 173	1 113	1 844
1.1	6 600	3 696	176	1 290	1 224	2 028

3.1 整车质量的影响

根据式(5)将各车轮上的垂向力和侧向力通过计算得到侧滑危险指标,最后根据上述 5 个指标计算得到综合客观评价指标如表 4 所示。通过表 4 可以看出,随着整车质量的增加,其各项指标均有所变大,表征车辆操纵稳定性变差,更易出现危险工况,因此在实际交通运输中应避免超载。

根据表 1 参数,仅改变仿真模型中商用车的整车质量,进行双移线试验,其他仿真参数与原始参数一致。通过试验得到的侧向偏移量、横摆角速度、侧向加速度、侧倾角与时间的关系曲线如图 3 所示。

从仿真曲线可以看出,整车质量的变化对轨道误差影响较小,但随着质量的变大,整车惯性变大,导致侧倾角变大,表明车辆出现侧翻危险的可能性随整车质量的增加而增加。

3.2 轴距的影响

根据表 1 参数,仅改变模型中商用车轴距,保持其他仿真试验参数与原始参数一致,进行双移线试验。通过试验得到的侧向偏移量、侧偏角速度、侧向加速度、侧倾角与时间的关系曲线分别如图 4 所示。对比分析商用车轴距对其各项操纵稳定性指标的影响。

从仿真曲线可以看出,轴距对各项操纵稳定性指标影响比较明显,随着轴距的增大,所有指标的峰值都有一定程度的减少。表明商用车操纵稳定性

表 4 不同整车质量下仿真结果

Table 4 The simulation results under different vehicle mass

整车质量/kg	轨道误差指标 J_{e1}	方向误差指标 J_{e2}	侧向加速度指标 J_{i1}	侧倾角指标 J_{i2}	侧滑指标 J_s	综合指标 J
5 400	3.924 338	1 454.93	4.831	2.326	7.958	650.681
6 000	4.026 982	1 468.68	4.871	3.303	8.362	656.832
6 600	4.177 237	1 488.59	4.936	4.598	8.896	665.739

随轴距的增大而提升。

将各车轮上的垂向力和侧向力通过计算得到

侧滑危险指标,各项指标以及客观综合评价指标具体数值如表 5 所示。从表 5 可以看出,随轴

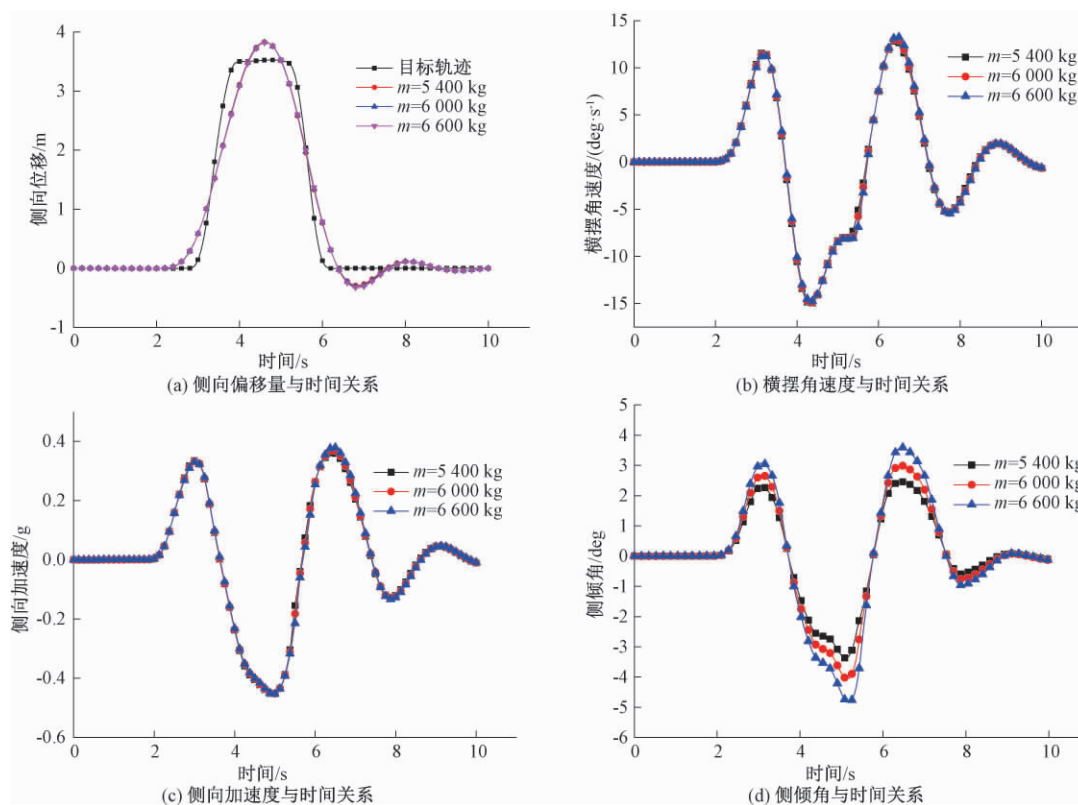


图3 整车质量改变下仿真曲线图

Figure 3 Simulation curves change with vehicle mass

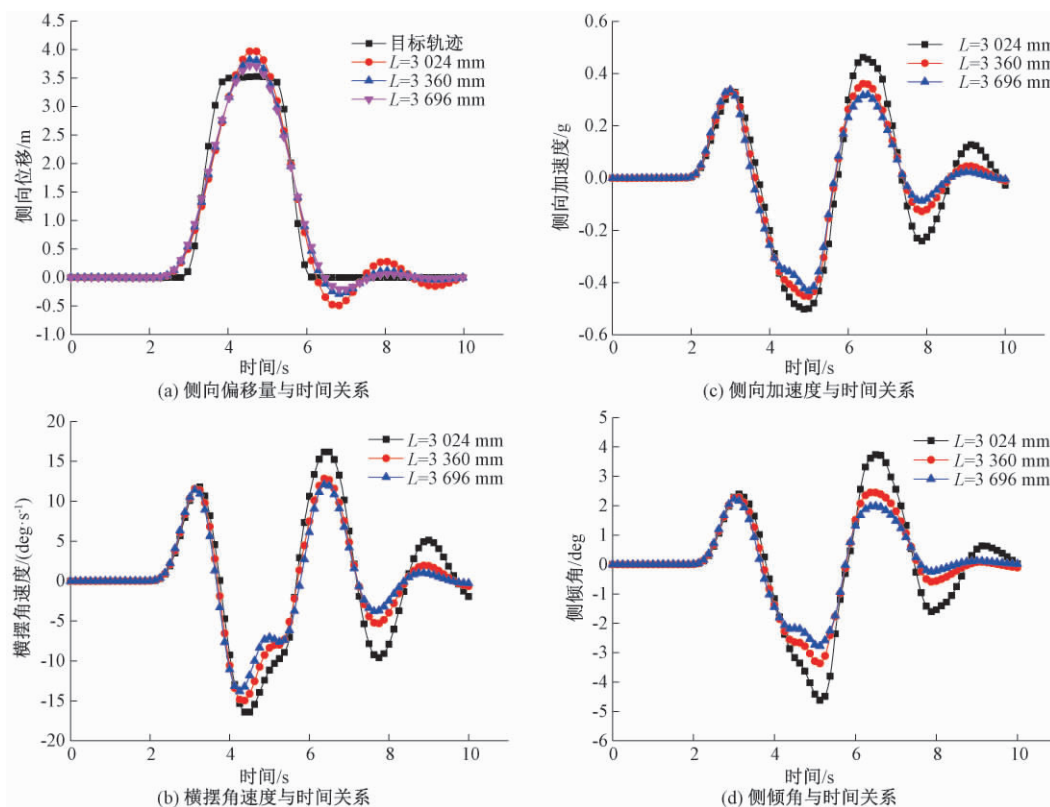


图4 轴距改变下仿真曲线图

Figure 4 Simulation curves change with vehicle wheelbase

表 5 不同轴距下仿真结果

Table 5 The simulation results under different vehicle wheelbase

轴距/mm	轨道误差指标 J_{e1}	方向误差指标 J_{e2}	侧向加速度指标 J_{a1}	侧倾角指标 J_{a2}	侧滑指标 J_s	综合指标 J
3 024	4.941 6	2 168.58	6.587 41	4.077 192	10.108 110	969.838
3 360	3.958 1	1 454.93	4.831 00	2.326 541	7.958 148	650.681
3 696	3.916 4	1 222.86	4.150 85	1.743 489	7.256 446	546.896

距的增大,各项指标都随之降低,尤其体现在轴距由 3 024 mm 增大到 3 360 mm 时最为明显,表明车辆轴距的减小会导致操纵稳定性变差,因此从整车操纵稳定性方面考虑,在满足设计要求的情况下,应尽量选取较大轴距。

3.3 后悬钢板弹簧刚度

根据表 1 改变模型中商用车的后悬钢板弹簧刚度,进行双移线试验,其他仿真参数与原始参数一致。通过试验得到的侧向偏移量、侧偏角速度、侧向加速度、侧倾角与时间的关系曲线如图 5 所示。对仿真结果曲线进行对比,分析商用车后悬钢板弹簧刚度对其操纵稳定性各项指标的影响。

分析图 5 仿真结果各参数变化可知,后悬钢板弹簧刚度的变化对 4 项指标影响较小,因此从图像上难以说明后悬钢板弹簧刚度的变化对操纵

稳定性的影响。

根据式(5)将各车轮上的垂向力和侧向力通过计算得到侧滑危险指标 J_s 。表 6 是根据汽车操纵稳定性综合客观评价指标计算不同装载质量下双移线试验的结果。从数值结果上可以看出,当商用车后悬钢板弹簧刚度 $K=160$ N/mm 时,其综合客观评价指标最小,因此,在商用车后悬钢板弹簧刚度设计时,应考虑一个最优设计值,过大或者过小都会影响其操纵稳定性。

对于表 3 另外 3 个结构参数:质心高度、质心距前轴距离及轮距,其仿真过程与整车质量、轴距以及后悬钢板弹簧刚度的仿真过程类似,不再赘述,仅在表 7 中给出最终仿真综合客观评价指标的数值,可从综合评价指标中得到质心高度、质心距前轴的距离及轮距的变化对整车操纵稳定性影响的变化趋势。

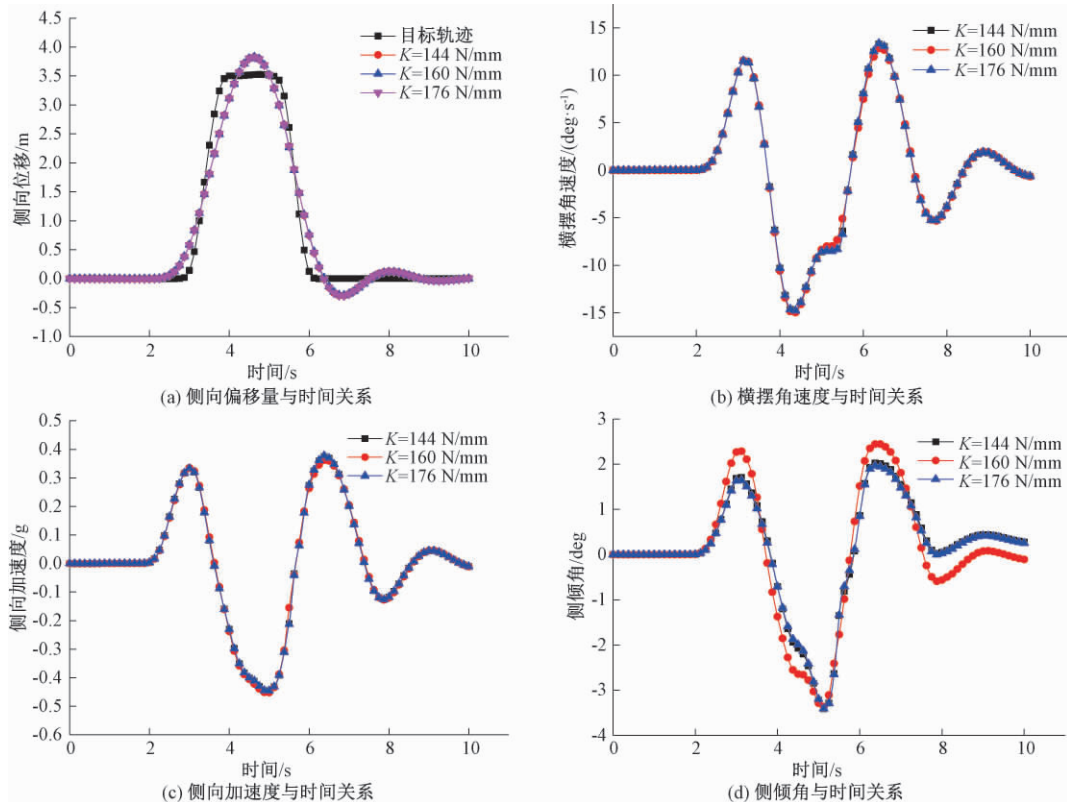


图 5 后悬钢板弹簧刚度改变的仿真曲线图

Figure 5 Simulation curves change with vehicle stiffness change of back suspension leaf spring

表 6 不同后悬钢板弹簧刚度下仿真结果

Table 6 The simulation results under different vehicle stiffness of back suspension leaf spring

后悬钢板弹簧 刚度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	轨道误差指标 J_{e1}	方向误差指标 J_{e2}	侧向加速度指标 J_{a1}	侧倾角指标 J_{i2}	侧滑指标 J_s	综合指标 J
144	3.837 27	1 480.48	4.835 8	1.733 9	8.080 5	662.107
160	3.932 06	1 454.93	4.831 0	2.326 5	7.958 1	650.681
176	3.833 60	1 483.60	4.842 6	1.657 5	8.089 9	663.502

4 蛛网图

为综合对比不同结构参数对横向稳定性的影响,笔者借助蜘蛛网图构建出结构参数对商用车操纵稳定性影响模型。蛛网图的基本原理是根据评价系统需求确定主要的评价指标,并将评价指标数据进行无量纲化处理,转化为

具有可比性的数值。仿真所得综合评价指标如表 7 所示。以 6 个结构参数仿真变量及综合客观评价指标 J 建立蛛网图模型如图 6 所示。分析表 7 中不同结构参数的变化可知,整车操纵稳定性随整车质量、质心高度的变大而变差,随轴距、质心距前轴的距离及轮距的变大而提升。

表 7 不同结构参数的综合评价指标

Table 7 Comprehensive evaluation index of different structural parameters

仿真参数 倍数	整车质量/ kg	轴距/ mm	后悬钢板弹簧 刚度/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	质心高度/ mm	质心距前轴 距离/mm	轮距/ mm
0.9	650.680 994 6	969.837 700 6	662.106 855 6	664.106 474 9	692.555 975 2	732.196 837 9
1.0	656.832 051 4	650.681 036 3	650.681 004 6	676.832 064 1	656.832 064 1	653.756 550 2
1.1	665.739 030 2	546.895 756 6	663.502 117 7	709.966 662 7	645.928 728 7	586.412 242 7

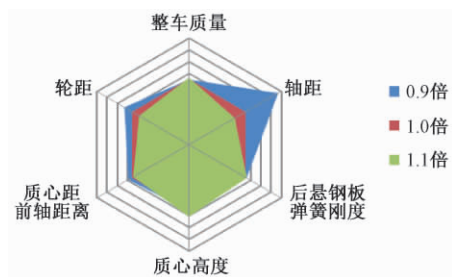


图 6 不同结构参数操纵稳定性的蛛网图

Figure 6 Spider chart with different structural parameters

从图 6 可以看出,轴距对商用车操纵稳定性的影响最明显,而另外 4 个参数的改变对其影响较小。具体来说,随着整车质量的增大,综合客观评价指标变差,商用车操纵稳定性降低,但这种变化并不明显;而随着轴距、质心距前轴距离和轮距的变大,综合客观评价指标变好,表明商用车操纵稳定性在提升。

5 结论

(1) 随着整车质量的变大,商用车操纵稳定性的各项指标变差,综合客观评价指标也变差,表明商用车的操纵稳定性降低。

(2) 随着整车轴距、质心距前轴距离和轮距的变长,商用车操纵稳定性的各项指标变好,综合

评价指数也变好,表明商用车操纵稳定性随轴距的增大而提升。

(3) 后悬钢板弹簧的刚度及质心高度的变化对整车操纵稳定性的影响不大。

(4) 在实际商用车设计阶段,上述变化关系为商用车参数的设计提供了部分数据上的参考依据。

参考文献:

- [1] 陈可际,过学迅,裴晓飞. 基于多工况匹配的商用车侧翻预警方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(20): 2822-2827.
- [2] JIN X J, YU Z T, YIN G D, et al. Improving vehicle handling stability based on combined AFS and DYC system via robust Takagi-Sugeno fuzzy control [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2018, 19(8): 2696-2707.
- [3] 郑睿. 某重型商用车平顺性和操纵稳定性优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [4] 孙勇, 郭魁元, 许志光. 商用车电子稳定性控制系统测试评价方法研究[J]. 汽车技术, 2018(4): 52-57.
- [5] 张召振, 许凯, 曾发林. 基于 Adams 的某重型商用车操纵稳定性优化研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2017, 42(2): 452-460.
- [6] HUANG F H, FU C Y, TANG X L, et al. Study on

- stability and handling characteristics and control of four-wheel-drive electric vehicles [J]. *Advances in mechanical engineering*, 2017, 9(12): 1 – 15.
- [7] 章雪华,石柏军,李岩. 基于 Trucksim 整车操纵稳定性仿真分析研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2017, 46(2): 30 – 34.
- [8] 张硕,余强,闫光辉,等. 商用车 EPS 助力控制策略的研究[J]. *汽车工程*, 2013, 35(9): 812 – 816.
- [9] 吴涛,焦静,范学琼,等. 基于 Trucksim 的整车动力性能仿真分析[J]. *汽车实用技术*, 2016(6): 63 – 65.
- [10] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车操纵稳定性试验方法: GB/T 6323—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. (这个不会查)
- [11] 崔丽楠. 重型载货汽车建模、仿真及总成特性对性能影响的分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011.

Research on Vehicle Handling Stability Affected Parameters Based on Trucksim

CHEN Jing¹, XU Yanhai^{1, 2}, ZHU Pengxing¹, LI Shuang¹, TANG Yunfei¹

(1. School of Transportation and Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Sichuan Key Laboratory of Automotive Control and Safety, Chengdu 610039, China)

Abstract: In order to improve the steering stability of commercial vehicles, a commercial vehicle simulation model and a double-shift closed-loop test simulation environment were established by Trucksim. The dynamic simulation experiments of the vehicle were carried out by changing the structural parameters of the vehicle. The influence of different structural parameters on the handling stability of the vehicle was analyzed in detail. Combined with the objective quantitative evaluation index of vehicle handling stability, the influence of commercial vehicle structural parameters on vehicle handling stability was quantitatively analyzed. The results showed that with the increase of the loading quality, the values of various hazard indicators and comprehensive objective evaluation indicators would become higher, indicating that the stability is worse. On the contrary, with the increase of the wheelbase, the indicators and comprehensive evaluation indicators would decrease, and the steering stability of commercial vehicles was getting better.

Key words: Trucksim; double lane change; vehicle handling stability; objective evaluation index

断续节理岩体的 TBM 滚刀破岩机理研究

翟淑芳, 曹世豪, 冯永, 高萌

(河南工业大学 土木建筑学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为了推广全断面隧道掘进机(TBM)在节理发育地层中的应用,研究断续节理地质条件下TBM滚刀的破岩过程、破岩模式及效率具有重要意义。采用一种新的无网格数值模拟方法即广义粒子动力学(GPD)法,研究断续节理倾角的变化对滚刀破岩模式及效率的影响。结果表明:对含单根断续节理的岩体,节理尖端越靠近加载面,同时越靠近滚刀加载位置时,节理对中央裂纹和破岩深度的抑制作用越大;断续节理倾角对破岩效率的影响不同于连续节理,滚刀切入率 $P_{75^\circ} < P_{0^\circ} < P_{90^\circ} < P_{30^\circ} < P_{60^\circ} < P_{45^\circ} < P_{15^\circ}$,即按照此顺序破岩难度逐渐减小。

关键词: 广义粒子动力学(GPD); TBM; 断续节理; 倾角

中图分类号: TU731.3 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.001

0 引言

近些年来,全断面隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)由于其开挖效率高、安全性好、对周围环境扰动小等优点已经被广泛应用于地下洞室的开挖中。TBM开挖过程中会遇到各种复杂的地质条件,如高地应力、节理发育、软弱复合地层、岩溶等。这些不良地质条件给TBM施工带来了很大困难,会造成开挖效率低、卡机、停工,甚至危及周围环境的人员安全及生命财产。

目前,许多专家学者针对节理发育这一不良地质因素对TBM滚刀破岩的影响进行了大量的实验和数值模拟研究。Gong等^[1]和Bejari等^[2]采用离散元法对节理发育程度和特征对TBM滚刀破岩过程和破岩效率的影响进行了研究;邹飞等^[3]、谭青等^[4]、张银霞等^[5]针对不同节理特征条件对隧道掘进破岩特征的影响进行试验和数值模拟研究。在研究节理特征对TBM破岩影响的过程中,连续节理的间距和倾角是热点,极少针对断续节理的几何特征对TBM破岩的影响进行研究。

近两年, Li等^[6]采用岩体相似材料,通过室内实验研究了单根断续节理模型在TBM刀头侵入情况下,不同的节理位置、倾角以及不同的节理

填充情况下,模型的破坏模式和破坏效率。杨圣奇等^[7]采用颗粒流模拟单滚刀作用下单根断续节理岩体的破岩过程,得到随着裂隙倾角的增大在裂隙尖端更容易萌生翼型裂纹,裂隙岩体比完整岩体更容易发生破坏的结果。从他们的研究成果发现,断续节理对TBM滚刀破岩过程的影响区别于连续节理。

笔者采用一种新的无网格数值模拟方法GPD^[8]研究TBM滚刀破岩机理。在以前的工作中,GPD法已成功应用于模拟连续节理对TBM滚刀破岩效果的影响^[9-10]。笔者运用GPD法研究断续节理的倾角对TBM滚刀破岩模式和破岩效率的影响。

1 GPD算法的基本理论

1.1 本构模型

通常情况下,岩石材料表现出脆性特性,为模拟滚刀作用下压碎区的形成和裂纹的起裂、扩展问题,笔者采用弹脆性本构关系,如图1所示。

笔者采用Hoek-Brown强度对损伤的开始和扩展进行判断。Hoek-Brown强度准则可以表述为^[11]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m\sigma_3\sigma_c + s\sigma_c^2)^{1/2} \quad (1)$$

收稿日期:2018-11-14; 修订日期:2019-03-25

基金项目:河南工业大学博士科研启动基金资助项目(2018BS005);河南工业大学科学研究基金青年支持计划(2018QNJH27);河南省高等学校重点科研项目(18A440011)

作者简介:翟淑芳(1989—),女,河南郑州人,河南工业大学讲师,博士,主要从事TBM刀具破岩机理研究,E-mail: zhaishufangcqu@126.com。

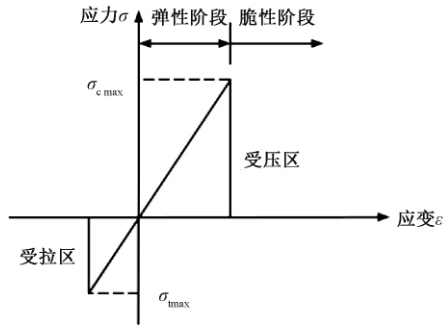


图1 线性弹脆性法则

Figure 1 Linear elastic brittle law

在本文模拟中采用的岩体为多矿物结晶的粗粒花岗岩,其岩体质量好、轻微风化,力学参数如表1所示。根据岩体质量和强度参数 m 和 s 之间的关系表^[12],本文中强度参数 m 、 s 分别取2.5、0.004。

表1 岩体的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock

力学参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 780
内摩擦角/($^{\circ}$)	30 $^{\circ}$
黏聚力/MPa	25
弹性模量/GPa	23
泊松比	0.19
单轴抗压强度/MPa	108

1.2 GPD 算法的程序化

图2给出了GPD算法实现程序化的流程图。



图2 GPD 程序流程

Figure 2 The flow chart of GPD program

2 建立模型

如图3所示,建立单根断续节理单滚刀破岩模型,模型尺寸为 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$,断续节理在程序中通过挖掉该处的粒子来实现。断续节理的中心点位于模型的对称轴上,且距离加载面的距离为40 mm,断续节理的倾角用 β 表示。节理长度为40 mm,节理倾角 β 取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 和 90° 。模型中忽略滚刀的切向滚动力和侧向

力,采用位移加载方式模拟滚刀的法向力,法向力与上边界接触宽度为15 mm。位移加载速度为 0.01 m/s ,属于拟静力加载方式。上边界为自由边界,左、右、下边界为固定位移边界。

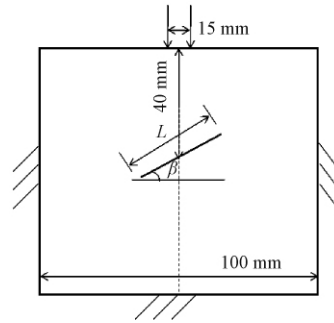


图3 单滚刀侵入断续节理岩体的模型

Figure 3 Numerical simulation model of the intrusion into intermittent jointed rock by one cutter

3 断续节理倾角对TBM滚刀破岩的影响

3.1 断续节理岩体的TBM滚刀破岩过程

图4(A)~(G)分别给出了不同节理倾角下,滚刀贯入度 P 为0.12 mm、0.42 mm、0.72 mm、1.02 mm所对应的破岩状态。图中粒子类型3代表破坏粒子(红色),粒子类型2代表非破坏粒子(蓝色),白色线条代表断续节理的位置。

由图4(A)~(G)可以看出,单滚刀侵入不同倾角的断续节理岩体时,破岩过程大致相同,可以分为3个阶段:①压碎区形成阶段,如图4(A)~(G)中的图(a);②裂纹区形成阶段,如图4(A)~(G)中的图(b);③断续节理处裂纹的起裂扩展阶段,如图4(A)~(G)中的图(c)和(d)。

如图4(A)~(G)中的图(a)所示,滚刀向岩体加载时,在滚刀的下方形成扇形压碎区。如图4(A)~(G)中的图(b)所示,在滚刀下方压碎区的两边可以看到不规则的锥形裂纹,这些裂纹形状像赫兹波,被称为赫兹裂纹^[12]。在压碎区的下方存在长度大于2 mm,并且扩展方向垂直向下的裂纹,称为中央裂纹^[13]。同时,在断续节理位置处有破坏点出现。如图4(A)~(G)中的图(c)和(d)所示,中央裂纹、赫兹裂纹及起裂于断续节理处的微裂纹均不断扩展。

应力的扩展是导致裂纹起裂和扩展的原因,图5给出了断续节理倾角 $\beta = 0^{\circ}$ 、滚刀贯入度 $P = 1.02 \text{ mm}$ 时,滚刀作用下最大主应力分布图,可以得到:①在压碎区的下方存在高应力区,且随着与加载点的距离的增大,应力逐渐减小;②中央裂纹、赫兹裂纹及断续节理尖端为拉应力;③断续

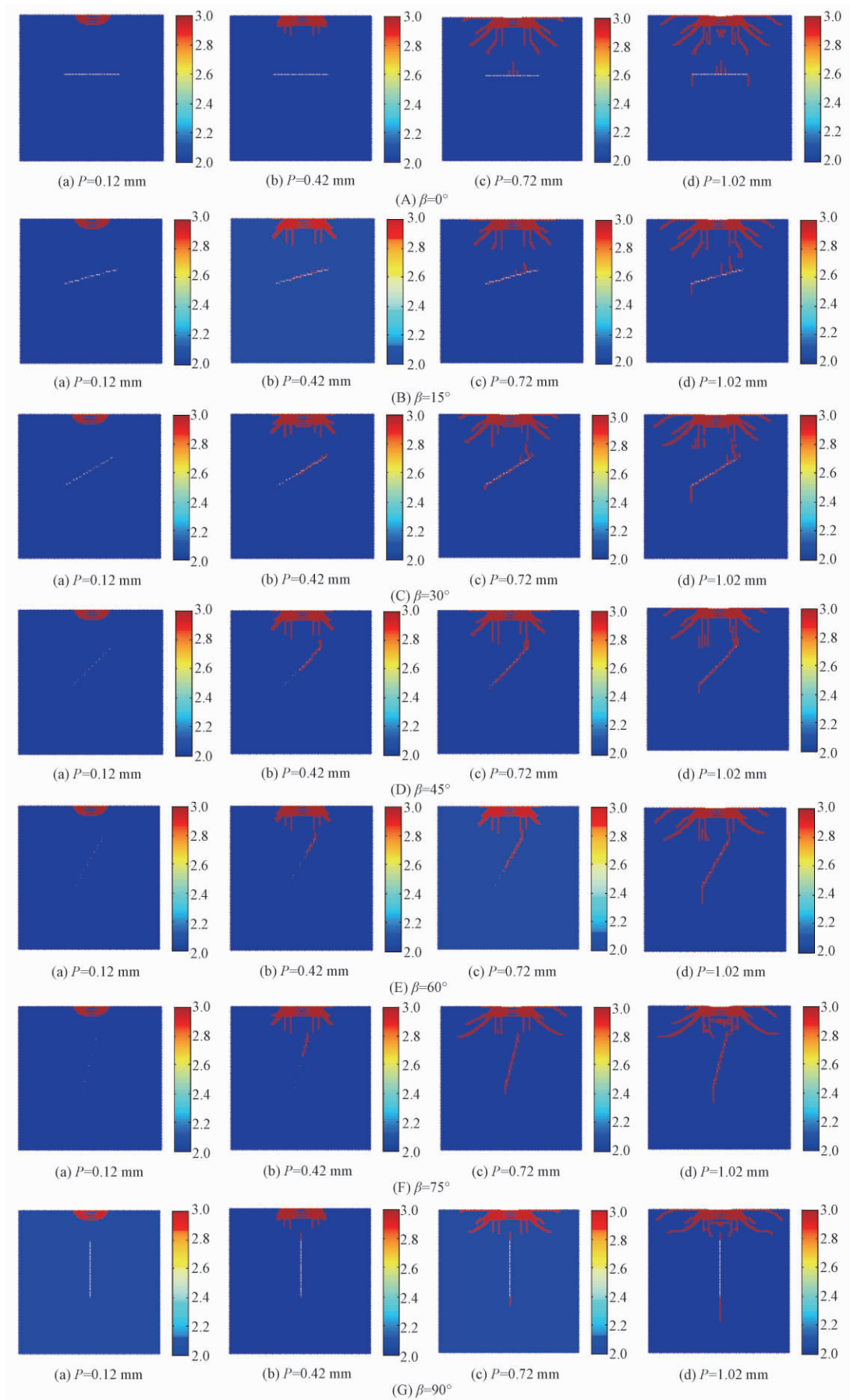


图4 不同断续节理倾角岩体的单滚刀破岩过程

Figure 4 Process of rock fragmentation in rock mass with different joint inclination angle

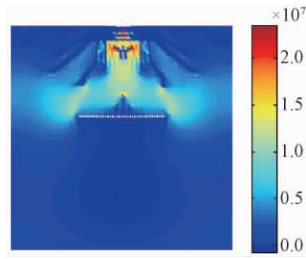


图5 滚刀作用下的最大主应力

Figure 5 Principal stress contour by one cutter

节理的存在对应力的传播有一定的阻挡作用,将应力的扩展限定在一定范围内,有利于滚刀下方岩体的破碎。

从图4(B)~(F)中的图(d)可以看出:由于模型的不对称性,同一节理倾角时,滚刀左右两侧的赫兹裂纹的扩展深度不相同。对比图4(A)~(G)中的图(d)可以看出:随着节理倾角的增加,赫兹裂纹的扩展深度有较大变化。从图4(A)~(G)可以看出:随着节理倾角 β 的增加,中央裂纹的扩展长度和扩展方向有较大差异。

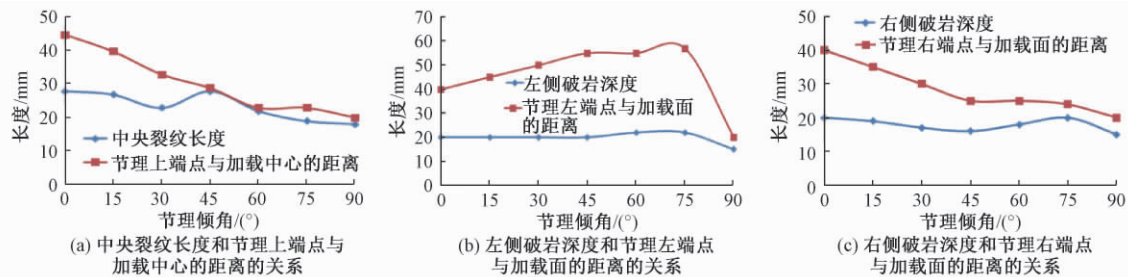


图6 断续节理两端点位置与TBM破岩参数的关系

Figure 6 Relation between the location of endpoints of intermittent joint with parameters of rock fragmentation

3.3 断续节理倾角对破岩效率的影响

图7和8显示了随着节理倾角的变化,滚刀破岩力、破岩面积和切入率的变化趋势。图中切入率 $P_\beta = A/\sigma_\beta$, σ_β 为岩石破碎所需的最小应力值, A 为潜在破岩面积。由图7可知,不同节理倾角时,破岩力出现较大跳动。当 $\beta = 15^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时,破岩

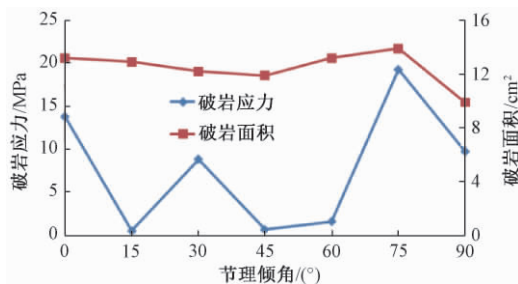


图7 节理倾角与破岩应力、破岩面积之间的关系

Figure 7 Relation between joint inclination angles and the chipping stress and area

3.2 断续节理倾角对裂纹扩展的影响

由图4可以看出,随着断续节理倾角 β 的增加,中央裂纹扩展方式和扩展长度均有变化。当 $\beta \leq 15^\circ$ 时,中央裂纹向下扩展一段后,改变扩展方向,沿“八”字形扩展,最终两中央主裂纹的水平距离等于断续节理水平宽度,但破岩完成时中央裂纹与断续节理未能连接;当 $30^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$ 时,中央裂纹向下扩展,最终右侧中央裂纹与断续节理上尖端连接;当 $\beta = 75^\circ$ 时,中央裂纹向下扩展一段后,停止扩展。随着倾角 β 的增加,赫兹裂纹的扩展角度基本不变,但其扩展深度却有明显变化,这直接表现为滚刀破岩深度的变化。

为了分析中央裂纹扩展长度和破岩深度的直接影响因素,图6显示了断续节理两端点的位置与中央裂纹长度和破岩深度的关系。随着节理倾角的增加,中央裂纹的扩展长度和节理上端点与加载中心点的距离具有相同的发展趋势;随着节理倾角的增加,左、右侧破岩深度和节理左、右端点与加载面的距离具有相同的发展趋势。

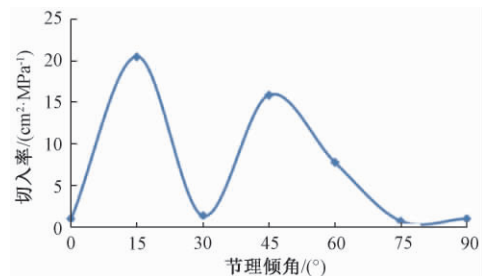


图8 节理倾角与破岩效率之间的关系

Figure 8 Relation between joint inclination angles and the efficiency of rock fragmentation

力较小,其数值范围为0.63~1.69 MPa;当 $\beta = 0^\circ, 30^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时,破岩力较大,变化范围为8.9~19.3 MPa;当 $\beta = 75^\circ$ 时,破岩力达到最大值19.3 MPa。破岩面积的变化趋势为 β 从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 时逐渐减小,从 $45^\circ \sim 75^\circ$ 时逐渐增加,90°时又明显减小。由图8可知滚刀切入率与节理倾角之间的关系。随着 β 的增加,切入率振动显著。当 $\beta = 0^\circ$ 、

30°、75°、90°时,切入率较小,数值在1附近波动;当 $\beta=0^\circ$ 、15°、45°、60°时,切入率较大,最大数值达到20。由此排出以下顺序: $P_{75^\circ} < P_{0^\circ} < P_{90^\circ} < P_{30^\circ} < P_{60^\circ} < P_{45^\circ} < P_{15^\circ}$,依照此顺序,破岩难度逐渐减小。这与连续节理岩体中,节理倾角对TBM破岩效率的影响截然不同。

4 结论

对含单根断续节理的岩体,中央裂纹的扩展长度和破岩深度的大小与断续节理两端点的位置密切相关。节理尖端越靠近加载面,同时越靠近滚刀加载位置时,节理对中央裂纹和破岩深度抑制作用越大。断续节理倾角对TBM滚刀破岩效率的影响不同于连续节理,滚刀切入率 $P_{75^\circ} < P_{0^\circ} < P_{90^\circ} < P_{30^\circ} < P_{60^\circ} < P_{45^\circ} < P_{15^\circ}$,即按照此顺序破岩难度逐渐减小。

参考文献:

- [1] GONG Q M, ZHAO J, JIAO Y Y. Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters [J]. Tunnelling and underground space technology, 2005, 20(2): 183–191.
- [2] BEJARI H, HAMIDI J K. Simultaneous effects of joint spacing and orientation on TBM cutting efficiency in jointed rock masses [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2013, 46(4): 897–907.
- [3] 邹飞,李海波,周青春,等. 岩石节理倾角和间距对隧道掘进机破岩特性影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1640–1646.
- [4] 谭青,朱逸,夏毅敏,等. 节理特征对TBM盘形滚刀破岩特性的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(10): 4040–4046.
- [5] 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.
- [6] LI K H, CAO P, Liu J. Experimental study of effects of joint on rock fragmentation mechanism by TBM cutters [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 711: 44–47.
- [7] 杨圣奇,黄彦华. TBM滚刀破岩过程及细观机理颗粒流模拟 [J]. 煤炭学报, 2015, 40(6): 1235–1244.
- [8] ZHOU X P, BI J, QIAN Q H. Numerical simulation of crack growth and coalescence in rock-like materials containing multiple pre-existing flaws [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2015, 48(3): 1097–1114.
- [9] ZHAI S F, ZHOU X P, BI J, et al. The effects of joints on rock fragmentation by TBM cutters using general particle dynamics [J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 57: 162–172.
- [10] 翟淑芳,周小平,毕靖. TBM滚刀破岩的广义粒子动力学数值模拟 [J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2699–2707.
- [11] HOEK E, BROWN E T. Empirical strength criterion for rock masses [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1980, 106(9): 1013–1035.
- [12] YIN L J, GONG Q M, MA H S, et al. Use of indentation tests to study the influence of confining stress on rock fragmentation by a TBM cutter [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2014, 72: 261–276.
- [13] PANG S S, GOLDSMITH W. Investigation of crack formation during loading of brittle rock [J]. Rock mechanics and rock engineering, 1990, 23(1): 53–63.

The Influence of Intermittent Joint on Rock Fragmentation by TBM Cutter

ZHAI Shufang, CAO Shihao, FENG Yong, GAO Meng

(College of civil engineering and architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to generalize the use of TBM in the unfavorable geologic bodies with joints, it is of great importance to study the process, patterns and efficiency of rock fragmentation by TBM cutter. A new meshfree numerical method, the general particle dynamics (GPD) was used to investigate the effects of inclination angle of intermittent joint on the pattern and efficiency of rock fragmentation. Results showed that for the rock with single intermittent joint, when the location of joint endpoints was more close to the loading surface and loading point, the median cracks and the depth of rock fragmentation were more obviously restrain. The effects of inclination angle of intermittent joint on the efficiency of rock fragmentation were different from that for continuous joint. Relationship between cutter cut rate and the inclination angle of joint could be expressed by $P_{75^\circ} < P_{0^\circ} < P_{90^\circ} < P_{30^\circ} < P_{60^\circ} < P_{45^\circ} < P_{15^\circ}$, which suggests indicated the decrease of the difficulty of rock fragmentation in turn.

Key words: general particle dynamics (GPD); TBM; intermittent joint; inclination an

钢桥面板顶板-U肋焊缝多轴疲劳效应评估

吉伯海, 蒋斐, 王益逊, 傅中秋

(河海大学 土木与交通学院 江苏 南京 210098)

摘要: 为了评估顶板-U肋焊缝多轴疲劳效应, 定义了主要应力分量为坐标轴向幅值最大的正应力。基于弹性力学对比了单、多轴疲劳应力, 提出了采用绝对值最大的主应力与主要应力分量的偏差值 δ 作为多轴疲劳评判依据。建立了钢桥面板节段模型和顶板-U肋细节子模型, 对细节处多轴疲劳变形和应力状态进行了评估。为了定量单、多轴疲劳寿命评估的差异, 定义了疲劳寿命比 R , 理论推导得 R - δ 关系, 并通过试验和有限元分析加以验证。研究结果表明: 单轴荷载下绝对值最大的主应力等于主要应力分量, 多轴荷载下两类应力存在偏差, 偏差越大, 多轴疲劳效应越显著; 对于顶板-U肋焊缝, 多轴疲劳效应随荷载中心线偏离焊缝位置越发显著, 横隔板处顶板-U肋焊缝的多轴应力状态更为明显; R 与 δ^3 成正比, 该关系为在单轴疲劳评估的基础上进行多轴疲劳寿命评估提供参考。

关键词: 多轴疲劳; 正交异性钢桥面板; 绝对值最大主应力; 顶板-U肋焊缝

中图分类号: U441.4 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.002

0 引言

正交异性钢桥面板在大跨径桥梁中得到了广泛的运用^[1]。在服役过程中, 桥梁的疲劳问题一直是困扰其发展的主要问题之一^[2-4]。循环荷载作用下, 顶板-U肋焊缝较易产生疲劳裂纹。该类裂纹维修和检测难度大, 影响桥面系的耐久性和桥梁安全运营。因此有必要对顶板-U肋焊缝的疲劳特性进行研究, 提出合理的疲劳寿命评估方法, 为该类细节的抗疲劳设计提供参考。

目前针对顶板-U肋焊缝细节, 国内外学者开展了大量的研究工作。其中疲劳寿命评估多采用基于名义应力或热点应力的 S - N 曲线, 并结合线性累积损伤理论的单轴疲劳评估方法。如Yan等^[5]对顶板-U肋局部截断试件进行了疲劳试验, 通过焊趾处的名义应力拟合 S - N 曲线, 对比分析了80%熔透焊缝与全熔透焊缝疲劳强度的差异; Yamada等^[6]采用1 mm法确定热点应力, 通过试验结果拟合了顶板-U肋细节的 S - N 曲线; 张呈奕等^[7]开展了顶板-U肋细节的弯曲疲劳试验, 基于名义应力和热点应力对不同钢材强度下的疲劳寿命进行了评估。吉伯海等^[8]根据实桥监测得到了

顶板-U肋焊趾处的名义应力, 结合BS5400规范中 S - N 曲线对该细节疲劳寿命进行了评估。实桥运营中, 车轮分布具有随机性, 考虑结构的非对称性, 顶板-U肋焊缝实际发生多轴疲劳。基于名义应力或热点应力的单轴评估法多采用垂直于焊缝方向的正应力作为疲劳评估的基准, 具有简单高效的特点, 但不能全面反映实桥焊缝处的多轴疲劳效应。因此, 分析顶板-U肋焊缝处的多轴疲劳效应, 定量给出该细节单、多轴疲劳评估的差异, 对多轴疲劳寿命的评估工作的开展具有重要意义。

为了评估顶板-U肋焊缝多轴疲劳效应, 基于弹性力学理论对比单、多轴疲劳应力, 笔者提出了合理的多轴疲劳评判依据。建立钢桥面板节段模型与细节子模型, 对细节处的多轴疲劳变形和应力进行了评估。通过多轴比例加载试验获取了多轴疲劳强度 S - N 曲线, 定义了应力幅偏差值 δ 与单多轴疲劳寿命比 R , 理论分析得 $R = A\delta^3$ 的相关关系, 定量评估了单、多轴疲劳评估的差异。

1 有限元模型与多轴疲劳评估准则

1.1 有限元模型

以某悬索桥正交异性钢桥面板为工程背景,

收稿日期:2019-05-20; 修订日期:2019-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478163)

作者简介:吉伯海(1966—),男,江苏扬州人,河海大学教授,博士,主要从事桥梁工程方面的研究,E-mail: hhhbj@163.com。

其顶板厚 12 mm, U 肋尺寸为 300 mm × 280 mm × 6 mm, U 肋间距为 600 mm, 横隔板厚 8 mm, 横隔板间距 3 200 mm。钢材采用 Q345qD, 顶板与 U 肋采用 80% 熔透焊缝连接。钢桥面板中顶板-U 肋焊缝细节分为两类, 分别为横隔板处细节和横隔板间细节。

采用 ABAQUS 分别建立总体节段模型与局部细节子模型。节段模型纵向包括 5 道横隔板, 横向包括 7 道 U 肋^[9]; 采用 C3D8R 六面体单元划分, 网格尺寸为 20 mm; 边界条件设为约束顶板, U 肋和铺装的所有平动自由度以及横隔板的所有平动加转动自由度。子模型横向位于节段模型中部, 横隔板间细节纵向位于 No. 2 号和 No. 3 号横隔板正中, 横隔板处细节纵向位于 No. 3 号横隔板正上方。横隔板间细节子模型横向取 300 mm, 纵向取 200 mm, 竖向取 342 mm。横隔板处细节子模型竖向取 258 mm。采用 C3D8R 六面体单元和 C3D10 四面体单元进行网格混合划分, 非焊缝区域采用 20 mm 六面体网格划分, 焊缝区域采用 1 mm 六面体网格细化, 过渡区域采用四面体网格。钢材弹性模量取 2.06×10^5 MPa, 铺装弹性模量为 1 000 MPa, 泊松比均取 0.3。有限元模型如图 1 所示。

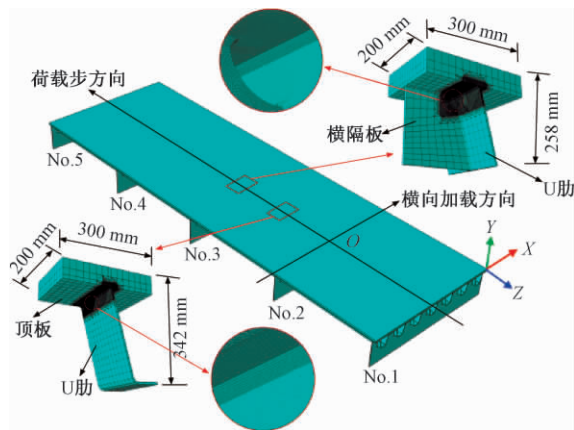


图 1 有限元模型

Figure 1 Finite element model

参考《公路钢结构桥梁设计规范》^[10], 取单侧双轮加载面积为 600 mm × 200 mm, 荷载集度为 0.5 MPa。考虑顶板-U 肋焊缝细节所处的位置, 以 No. 2 号横隔板中点为原点, 横桥向分为 11 种加载工况, 加载间距为 150 mm。在纵桥向上, 车轮从 No. 2 号横隔板移动至 No. 4 号横隔板, 加载间距取 200 mm, 共计 33 个荷载步。加载工况如图 2 所示。

1.2 多轴疲劳评估准则

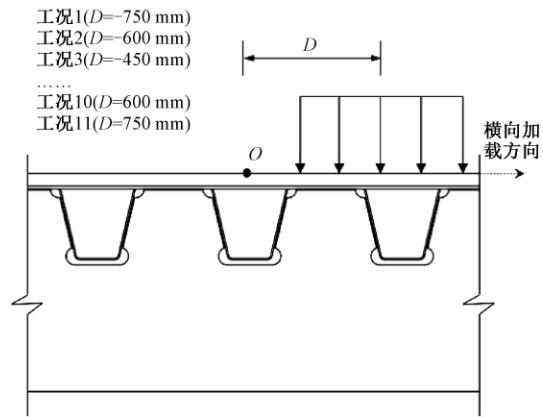


图 2 加载工况示意图

Figure 2 Schematic diagram of loading cases

对易损细节进行多轴疲劳效应评估之前, 需要提出一套合理可靠的评估准则。针对细节的疲劳研究常以某种坐标系为基准, 基准坐标系的设置一般使某坐标轴与实际裂纹大致垂直。定义沿坐标轴向的应力分量中幅值最大的正应力为主要应力分量, 例如以图 1 坐标系为基准, 顶板-U 肋焊缝处的主要应力分量为 σ_x 。一般情况下, 裂纹的扩展方向与主应力方向垂直^[11], 当主应力为主要应力分量时, 扩展方向与主要应力分量垂直。而多轴疲劳效应是引起主应力与主要应力分量不一致的主要原因之一。由此可知, 主应力及主要应力分量与疲劳开裂关系密切, 并且两者的偏差与多轴疲劳效应存在联系。因此考虑对比主要应力分量与主应力的量值以评估细节处的多轴疲劳效应。由于主应力类别中绝对值最大的主应力较能反映细节承受交变应力循环作用的实际情况, 故主应力采用绝对值最大的主应力。

钢板面板在疲劳开裂前处于弹性工作状态, 由弹性力学公式可知, 三维问题中某一点主应力求解公式为:

$$\begin{cases} \sigma^3 - \Theta_1 \sigma^2 + \Theta_2 \sigma - \Theta_3 = 0; \\ \Theta_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z; \\ \Theta_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2; \\ \Theta_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + \\ 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ 为主应力大小; $\Theta_1 \sim \Theta_3$ 为应力张量不变量。

绝对值最大的主应力与主要应力分量间的关系, 不仅包括两者量值的大小, 也包含两者方向间的关系。弹性力学中某一点主应力方向余弦的求

解公式为:

$$\begin{cases} (\sigma_x - \sigma_i) l_i + \tau_{yx} m_i + \tau_{zx} n_i = 0; \\ \tau_{xy} l_i + (\sigma_y - \sigma_i) m_i + \tau_{zy} n_i = 0; \\ \tau_{xz} l_i + \tau_{yz} m_i + (\sigma_z - \sigma_i) n_i = 0; \\ l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 = 1, \end{cases} \quad (2)$$

式中: l_i, m_i, n_i 为主应力 σ_i 的方向余弦, 其中 $i = 1 \sim 3$ 。

单轴荷载下的钢试件只承受单向正应力或单向切应力^[12]。取试件某一点微元, 绘制其应力状态如图3所示。

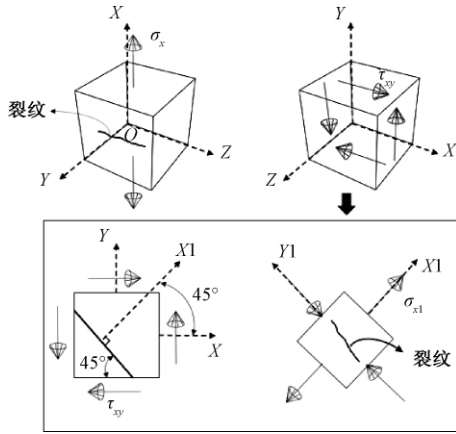


图3 应力状态

Figure 3 Stress state

对于只承受正应力的情况, 不妨设该正应力为 σ_x , 此时 σ_x 即为主要应力分量。将 $\sigma_x \neq 0$ 代入式(1), 得3个主应力分别为 $\sigma_x, 0, 0$, 此时绝对值最大的主应力大小等于 σ_x 。将 $\sigma_i = \sigma_x$ 代入式(2), 得绝对值最大的主应力对应的方向余弦为 $\pm 1, 0, 0$, 此时绝对值最大的主应力即为主要应力分量。

对于只承受切应力的情况, 即纯剪状态, 不妨设该切应力为 τ_{xy} 。此时主要应力分量应为基于坐标系的 σ_{x1} , 经坐标变换后得 σ_{x1} 的大小等于 τ_{xy} , 方向沿 $X1$ 轴。将 $\tau_{xy} \neq 0$ 代入式(1), 得3个主应力分别为 $\tau_{xy}, 0, -\tau_{xy}$, 此时绝对值最大的主应力大小等于 τ_{xy} 。将 $\sigma_i = \tau_{xy}$ 代入式(2), 得绝对值最大的主应力对应的方向余弦为 $\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0$ 和 $-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2}, 0$, 此时绝对值的最大主应力即为主要应力分量。

多轴荷载下的钢试件承受多向应力, 6个应力分量中至少有2个独立分量不为0, 最大主应力与主要应力分量不再相等。为此, 需要给出一个参数定量两种应力的偏差程度。一段应力时程

中应力幅 $\Delta\sigma$ 的最大值对疲劳损伤的贡献最大, 故采用应力幅最大值的比值量化两者的偏差, 且定义偏差值 δ :

$$\delta = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta\sigma_m}, \quad (3)$$

式中: $\Delta\sigma_n$ 为各级主要应力幅最大值; $\Delta\sigma_m$ 为各级绝对值最大的主应力幅最大值。由 δ 定义可知 δ 与1相差越大 σ_m 与 σ_x 的偏差程度越大, 当 $\delta = 1$ 时 σ_m 与 σ_x 的应力循环曲线重合, 对应于单轴疲劳。

综合上述分析结果可知, 单轴荷载下, 一点的绝对值最大的主应力即为主要应力分量。多轴荷载下, 一点的绝对值最大的主应力与主要应力分量存在偏差, 偏差越大, 多轴疲劳效应越显著。偏差程度与疲劳效应显著程度的关系在下文给出证明。

2 多轴疲劳变形分析与应力分析

2.1 变形分析

开裂前细节的疲劳分析主要基于弹性理论, 弹性理论中构件的宏观变形与细节处应力应变直接相关。从钢桥面板构造来看, 顶板受到U肋与横隔板的纵横向加劲, 该加劲分布是非均匀的, 因而钢桥面板的刚度分布不均匀且有突变。从整体来看, 在车轮荷载作用下, 钢桥面板发生纵横向挠曲。从局部区域来看, 考虑几何构造引起的刚度不足和突变以及车轮荷载局部作用特点, 部分区域将产生较大变形, 从而引起顶板-U肋焊缝细节较大的应力集中。

轮载作用下顶板-U肋焊缝细节的局部变形如图4所示。横隔板处细节由于横隔板的约束, 其变形小于横隔间细节。车轮直接作用在顶板上产生较大的弯曲效应, 顶板的变形以面外变形为主。以荷载位于细节正上方为例, 横

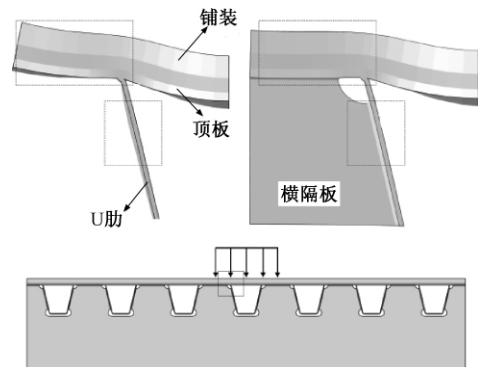


图4 局部变形示意图

Figure 4 Schematic diagram of local deformation

隔板间细节开裂截面的膜应力为 -1.8 MPa , 弯曲应力为 -136.6 MPa , 膜应力仅为弯曲应力的 1.3% 。横隔板处细节的膜应力为 -10.5 MPa , 弯曲应力为 -109.4 MPa , 膜应力为弯曲应力的 9.6% 。从膜应力的占比来看, 横隔板的约束减小了顶板的面外变形。

2.2 应力分析

应力状态分析是细节疲劳评估的基础。考虑横向加载工况下应力分布的相似性, 分别提取两类焊缝在工况 6、8、10 下的应力状态, 绘制成如图 5 所示的应力循环曲线。

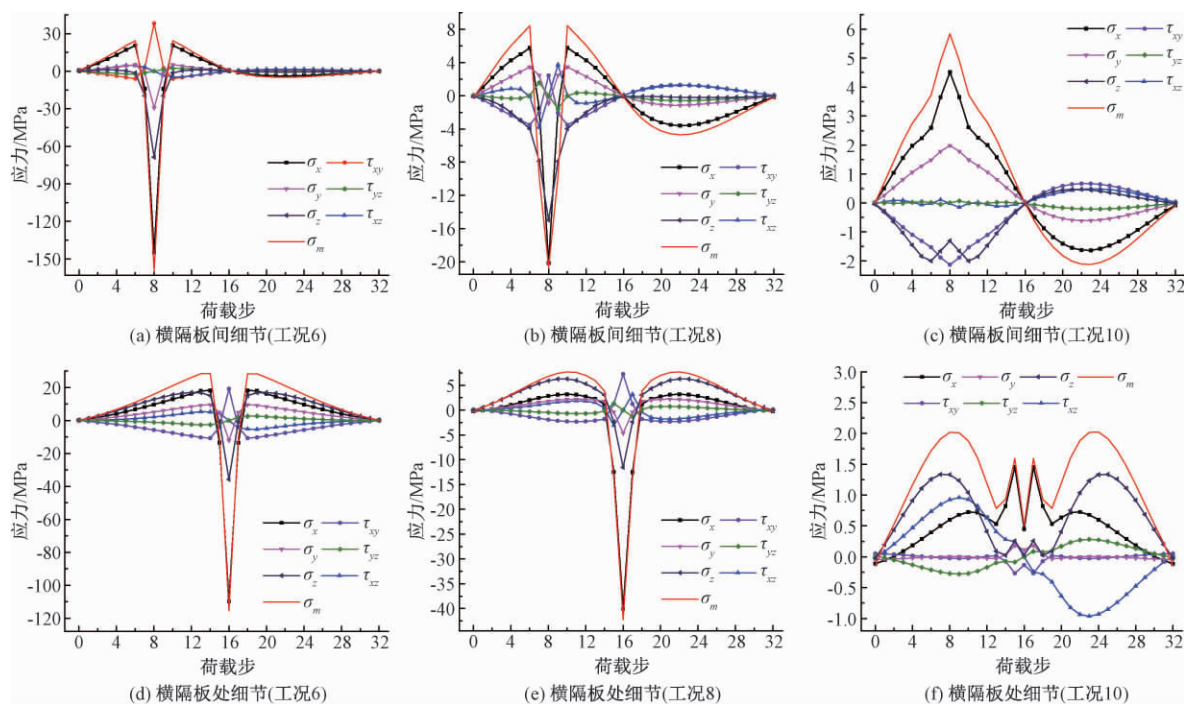


图5 焊趾应力循环曲线

Figure 5 Stress cycles of weld toe

由图 5 可知, 由于顶板-U 肋焊缝主要承受车轮弯曲荷载, 横桥向正应力 σ_x 变化最为明显, 应力水平远大于其他应力分量。 σ_x 对疲劳开裂的贡献最大, 实际裂纹扩展方向与 σ_x 接近垂直。其他应力分量的存在是引起扩展方向不垂直于 σ_x 的重要原因。其中纵桥向正应力 σ_z 的水平接近于 σ_x , 这与 U 肋筒支于横隔板承受纵桥向弯矩的受力形式一致。 σ_z 以压应力为主, 对 X 方向的裂纹张开具有促进作用。车轮的局部冲切使得切应力 τ_{xy} 的水平也较高。从开裂机理来看, 切应力是疲劳损伤的主要原因, τ_{xy} 对裂纹扩展的驱动作用亦不可忽略^[11]。对于横隔板间细节, 当车轮作用于细节正上方时, 正应力 σ_z 达到了 σ_x 的 47.5% , 切应力 τ_{xy} 达到了 σ_x 的 26.4% 。

图 5 中绝对值最大的主应力 σ_m 与正应力 σ_x 的循环曲线变化趋势基本一致, 且 σ_m 总体外包 σ_x 。应力幅偏差值 δ 的计算结果显示, 各工况下横隔板处细节 σ_m 与 σ_x 的偏差大于横隔板间细节。以图 5 中工况 10 为例, 横隔板处细节的应力幅偏

差值 $\delta = 0.72$, 横隔板间细节的 $\delta = 0.77$ 。这是由于横隔板造成顶板-U 肋焊缝局部约束条件发生改变, 进而导致多轴应力状态变得显著。随着车轮横向偏离细节距离 D 的增大, σ_m 与 σ_x 的偏差程度变大。以横隔板间细节为例, 当距离 $D = 0 \text{ mm}$ (工况 6), 应力幅偏差值 $\delta = 0.90$; 当 $D = 300 \text{ mm}$ (工况 8), $\delta = 0.89$; 当 $D = 600 \text{ mm}$ (工况 10), $\delta = 0.77$ 。该现象表明, 随着荷载中心线逐渐偏离细节, 顶板-U 肋焊缝处的多轴疲劳效应越发显著。

3 单、多轴疲劳寿命评估对比分析

3.1 S-N 曲线

如果能量化单、多轴疲劳寿命评估的差异, 采用单轴疲劳评估方法对细节的多轴疲劳寿命近似估量, 为实际工程提供简单可靠的参考, 将具有重要意义。2.2 节结果表明, 正应力 σ_x 变化显著且量值最大, 故实际工程中常采用 σ_x 与 Miner 损伤理论相结合, 并基于 S-N 曲线对顶板-U 肋焊缝进

行单轴疲劳评估。2.2 节结果还反映出正应力 σ_z 和切应力 τ_{xy} 对疲劳损伤具有贡献。同时 1.2 节中指出绝对值最大的主应力 σ_m 与正应力 σ_x 的偏差能反映细节的多轴疲劳效应,且主应力具有使裂纹突破裂尖阻滞作用继续扩展的作用。结合 σ_m 正负交替变化的特性,采用 σ_m 与 Miner 损伤理论相结合的方法对顶板-U 肋焊缝细节进行多轴疲劳评估。

为了得到基于绝对值最大的主应力的多轴疲劳强度,针对顶板-U 肋焊缝细节制作疲劳试件,开展多轴比例加载试验,得到不同主应力幅作用下的疲劳寿命,拟合 $\Delta\sigma_m-N$ 曲线。

参照文献[5]的试验,选取疲劳试件为顶板-U 肋焊缝细节截断足尺模型,共设计制作 6 个试件,编号 SJ1~SJ6。试件采用 Q345qD 钢,顶板尺寸为 600 mm×300 mm×12 mm,顶板与 U 肋采用熔透率为 80% 的单面坡口焊缝连接,通过振动疲劳试验机对试件进行弯扭加载,试件几何及加载如图 6 所示。通过改变悬臂长度 a 和偏心距 b 实现多轴比例加载, a 、 b 取值见表 1。采用名义应力法,在距离焊趾 10 mm 处布置应变花,如图 7 所示。参照文献[13],将裂纹深度达到顶板厚度 70% 作为试件破坏准则,整理各测点此时应力数据,得到绝对值最大的主应力幅与疲劳寿命,如表 2 所示。SJ5 由于应变花损坏,实测数据缺失,视为失效试件。

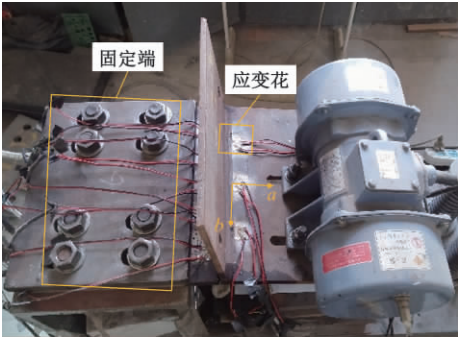


图 6 疲劳加载
Figure 6 Fatigue loading
表 1 试件加载参数

Table 1 Loading parameters for specimens mm		
试件编号	悬臂长度 a	偏心距 b
SJ1	175	40
SJ2	175	80
SJ3	225	40
SJ4	225	80
SJ5	275	40
SJ6	275	80

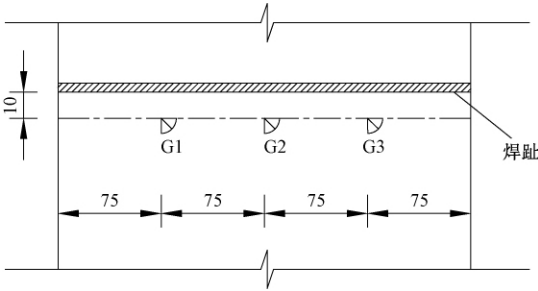


图 7 测点布置示意图(单位:mm)
Figure 7 Schematic diagram of measuring point arrangement (unit: mm)

将各试件的疲劳试验结果绘制于双对数坐标,线性拟合后得到基于绝对值最大的主应力的疲劳强度 $S-N$ 曲线,如图 8 所示。考虑 97.7% 的保证率,减去两个标准差,得到的曲线方程为:

$$\lg N = 11.8775 - 31\lg \Delta\sigma_m \quad (4)$$

表 2 试件疲劳试验结果

Table 2 Fatigue test results of specimens		
试件编号	应力幅 $\Delta\sigma_m$ /MPa	循环次数 N /万次
SJ1	68.11	236.39
SJ2	76.10	191.81
SJ3	93.34	105.38
SJ4	101.55	80.31
SJ6	85.00	120.61

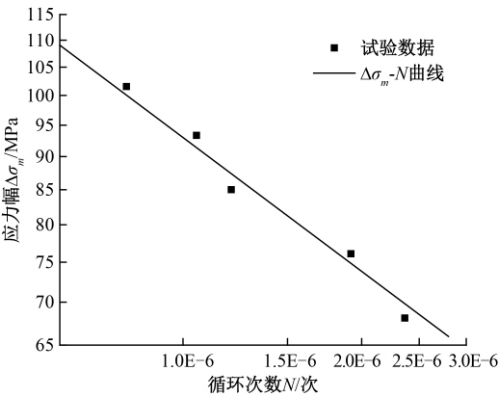


图 8 $\Delta\sigma_m-N$ 曲线
Figure 8 $\Delta\sigma_m-N$ curve

以循环 200 万次作为疲劳失效基准,得到基于绝对值最大的主应力的疲劳强度为 72.25 MPa。

3.2 寿命评估的差异

由数值模拟或实桥监测可得顶板-U 肋焊缝处的应力时程。经雨流计数后,可得各工况下各级应力幅及其循环次数。根据《公路钢结构桥梁设计规范》^[10] 确定顶板-U 肋焊缝细节的正应力幅疲劳强度曲线,并结合试验所得的绝对值最大的主应力幅疲劳强度曲线,按照 Miner 线性损伤

累积理论分别进行单、多轴疲劳评估,疲劳损伤度可通过式(5)得出。

$$\begin{cases} N_i = 2 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\Delta\sigma_f} \right)^3; \\ D = \sum \frac{n_i}{N_i}, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta\sigma_i$ 表示各级应力幅; $\Delta\sigma_f$ 为 200 万次对应的疲劳强度; n_i 为雨流计数得到的 $\Delta\sigma_i$ 的循环次数; N_i 为疲劳失效时 $\Delta\sigma_i$ 对应的循环次数。对于当前工程背景,单轴疲劳评估 $\Delta\sigma_f$ 取 70 MPa,多轴疲劳评估 $\Delta\sigma_f$ 取 72.25 MPa。

为了量化单、多轴疲劳评估的差异,提出寿命比 R :

$$R = \frac{N_m}{N_x} = \frac{\frac{1}{D_m}}{\frac{1}{D_x}} = \frac{D_x}{D_m}, \quad (6)$$

式中: N_m 为多轴疲劳评估所得寿命; N_x 为单轴疲劳评估所得寿命; D_m 为多轴疲劳评估对应的损伤度; D_x 为单轴疲劳评估对应的损伤度。由 R 定义可知 R 越接近 1,单、多轴疲劳评估的差异越小。

将疲劳强度和各级应力幅及其循环次数代入式(5),可得单、多轴疲劳评估的损伤度 D_x 与 D_m ,式(6)可进一步表示为:

$$\begin{cases} R = \frac{72.25^3}{70^3} \times \frac{n_{11}\Delta\sigma_{x1}^3 + \cdots + n_{1p}\Delta\sigma_x^3 + \cdots + n_{1p}\Delta\sigma_{xp}^3}{n_{21}\Delta\sigma_{m1}^3 + \cdots + n_{2k}\Delta\sigma_m^3 + n_{2q}\Delta\sigma_{mq}^3}, \\ \Delta\sigma_x = \max(\Delta\sigma_{xj} | j = 1 \sim p); \\ \Delta\sigma_m = \max(\Delta\sigma_{mk} | k = 1 \sim q), \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\Delta\sigma_{xj}$ 为第 j 级正应力幅; n_{1j} 为该级正应力幅对应的循环次数,其中 $j = 1 \sim p$; $\Delta\sigma_{mk}$ 为第 k 级绝对值最大的主应力幅; n_{2k} 为该级主应力幅对应的循环次数,其中 $k = 1 \sim q$ 。

对雨流计数结果进行分析,在筛除幅值较小的应力幅后,存在以下规律:①各级应力幅对应的循环次数相等;②正应力幅级数 p 与绝对值最大的主应力幅级数 q 相等;③各级应力幅中的最大值远大于其他应力幅。根据以上规律,将式(7)上下同除以 $\Delta\sigma_m^3$,寿命比 R 可进一步简化为:

$$R = A \left(\frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\sigma_m} \right)^3 = A\delta^3, \quad (8)$$

式中: δ 为 2.2 节定义的应力幅偏差值; A 为差异系数。

从式(8)可以看出,疲劳寿命比 R 与应力幅偏差值 δ 的三次方成正比,从而也论证了 1.2 节中

偏差程度越大,多轴疲劳效应越明显的论断。

3.3 差异系数

以当前工程背景为例,对差异系数 A 的确定给出示例,具体确定过程如下:①采用雨流法对有限元结果进行计数统计,得各工况下的应力幅及对应的循环次数;②将疲劳强度等相关参数代入式(5),得各工况下单、多轴疲劳损伤度;③分别按照式(3)和式(6)计算各工况下的应力幅偏差值 δ 和疲劳寿命比 R ;④以 δ 为横坐标, R 为纵坐标,将各工况的结果绘制于图 9;⑤利用函数 $R = A\delta^3$ 对图 9 中的散点进行拟合,从而得差异系数 A 的具体量值。

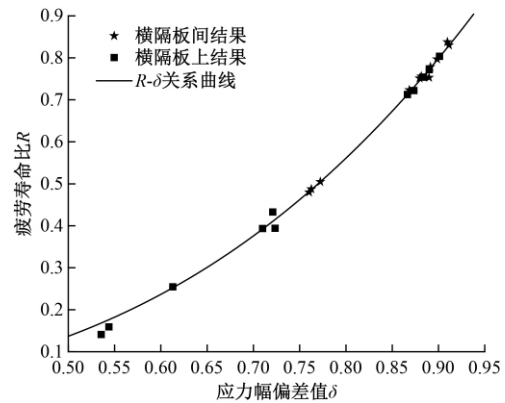


图 9 R - δ 关系曲线

Figure 9 R - δ relationship curve

由图 9 可知,曲线 $R = A\delta^3$ 拟合结果良好(可决系数为 0.997 5),由此说明 3.2 节的理论推导具有合理性。针对当前工程背景,拟合得 $A = 1.095 77$,疲劳寿命比 R 与应力幅偏差值 δ 的关系为:

$$R = 1.095 77\delta^3, \quad (9)$$

$A = 1.095 77$ 仅针对当前工程背景得出。若能对国内大桥采样,在细节位置选取和应力时程获取等过程中运用概率论与数理统计知识,最终给出差异系数 A 的分布规律,将对钢桥面板多轴疲劳评估工作的开展具有重要理论意义。

4 结论

(1) 在单轴荷载下,绝对值最大的主应力等于坐标轴向幅值最大的正应力。在多轴荷载下,绝对值最大的主应力与坐标轴向幅值最大的正应力存在偏差,偏差越大,多轴疲劳效应越显著。

(2) 对于顶板-U 肋焊缝,多轴疲劳效应随荷载中心线偏离焊缝位置越发显著,横隔板处顶板-U 肋焊缝的多轴应力状态更为明显。

(3) 定义了疲劳寿命比 R 与应力幅偏差值 δ ,理论推导得 R 与 δ^3 成正比,该关系为在单轴疲劳

评估的基础上进行多轴疲劳寿命评估提供参考。

参考文献:

- [1] 丁楠,邵旭东. 轻型组合桥面板的疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 74-81.
- [2] 黄祖慰,雷俊卿,桂成中,等. 斜拉桥正交异性钢桥面板疲劳试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(3): 1-12.
- [3] YAN F, CHEN W Z, LIN Z B. Prediction of fatigue life of welded details in cable-stayed orthotropic steel deck bridges[J]. Engineering structures, 2016, 127: 344-358.
- [4] 詹健,邵旭东,曲宛桐,等. 钢-STC 轻型组合桥面结构多参数分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(5): 73-81.
- [5] YA S, YAMADA K, ISHIKAWA T. Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of bridge engineering, 2011, 16(4): 492-499.
- [6] YAMADA K, SAMOL Y. Plate bending fatigue tests for root crack of trough rib of orthotropic steel deck[J]. Journal of structural engineering, A, 2008, 54A: 675-684.
- [7] 张呈奕,傅中秋,吉伯海,等. 钢材强度对钢桥面板焊缝疲劳强度的影响[J]. 工业建筑, 2017, 47(5): 12-16.
- [8] 吉伯海,程苗,傅中秋,等. 基于实测应变的钢桥面板疲劳寿命分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 422-426.
- [9] YA S, YAMADA K. Fatigue durability evaluation of trough to deck plate welded joint of orthotropic steel deck[J]. Structural engineering/earthquake engineering, 2008, 64(3): 603-616.
- [10] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢结构桥梁设计规范: JTGD64—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 10.
- [11] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials(second edition) [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [12] 尚德广,王德俊. 多轴疲劳强度[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] SAMOL Y, YAMADA K, ISHIKAWA T. Fatigue durability of trough rib to deck plate welded detail of some orthotropic steel decks[J]. Journal of structural engineering, A, 2010, 56A: 77-90.

Multiaxial Fatigue Evaluation of U-rib to Deck Welded Joint in Steel Bridge Deck

JI Bohai, JIANG Fei, WANG Yixun, FU Zhongqiu

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To evaluate the multiaxial fatigue of U-rib to deck welded joint, the main stress component was defined as the normal stress with maximum amplitude along coordinate axes. The stress state under uniaxial and multiaxial fatigue was compared based on elastic mechanics, and the deviation δ between the maximum absolute principle stress and the main stress component was proposed as the basis for evaluating the multiaxial fatigue. Then segment model of steel bridge deck and submodel of joint detail were established. The deformation and stress state of welded joint under multiaxial fatigue were evaluated. In order to quantify the difference between uniaxial and multiaxial fatigue life assessment, the fatigue life ratio R was defined, and the relationship between R and δ was deduced theoretically, which was verified by experiment and finite element analysis. The result showed that when it was under uniaxial load, the maximum absolute principal stress was equal to the main stress component. There was a deviation between the two kinds of stresses under multiaxial load and the greater the deviation, the more significant the multiaxial fatigue effect was. The effect of multiaxial fatigue became more significant when the load center deviated from the weld position, and the multiaxial stress state of welded joint located at the diaphragm was more obvious. R was proportional to δ^3 , which provided a reference for multiaxial fatigue life assessment based on uniaxial fatigue assessment.

Key words: multiaxial fatigue; orthotropic steel bridge deck; the maximum absolute principle stress; U-rib to deck welded joint

基于遗传算法优化的机械臂动态矩阵预测控制

赵庆岩, 黎杰, 吴顺, 涂海波, 汤奇荣

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 动态矩阵预测控制(dynamic matrix predictive control, DMC)作为线性系统过程控制的一种常用方法,其控制效果受其控制权矩阵等参数影响较大。针对DMC算法控制权参数矩阵离线调参问题,根据控制系统输入、输出参数设计适应度函数,提出了一种基于遗传算法优化的DMC方法,以单关节机械臂作为被控对象,设计了DMC控制系统来进行控制对象单位阶跃响应采样以及遗传算法离线调参,并用该控制系统以及遗传算法所得参数进行仿真验证。结果表明,通过遗传算法可快速、精准地获得具有较优输出效果的DMC算法控制权参数矩阵,为采用DMC进行机械臂控制提供了便利。

关键词: 动态矩阵预测控制; 控制权矩阵; 遗传算法; 离线调参

中图分类号: TP241.3 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.005

0 引言

机械臂的控制是机械臂研究领域中的一个重点方向,该问题是建立在机械臂运动学以及动力学研究基础上的,根据机械臂控制问题所给定输入的参数类型不同,机械臂控制方法又分为位置与轨迹控制、力或力矩控制、力/位置混合控制以及分解运动控制等多种类型^[1]。在这些控制方法的基础上,研究者们研究并提出了多种比较先进的控制方法,如自适应控制、变结构控制、预测控制以及智能控制等。

DMC是模型预测控制中的一个类别,该算法一般适用于线性的、有纯时延且开环渐进稳定的非最小相位系统,其对模型要求低并且控制综合效果好^[2-3]。该算法作为预测控制的一种常用算法,一般具有模型预测、在线滚动优化和误差反馈校正等基本环节。控制权矩阵是DMC算法控制器中对增量变化剧烈程度进行约束,限制过大的控制量变化的环节,其矩阵参数的取值对控制器收敛效果有很大的影响。在一般的过程控制中,控制对象的不同以及系统阶跃响应点的采样间隔不同,往往会造成控制权矩阵的取值不同。因此,在使用DMC算法进行机械臂控制时,需要采用调参方法并结合自适应控制理论设计算法得到适用

于特定被控对象的控制权矩阵。

进化控制系统源于生物的进化机制,一般的进化控制是建立在进化计算(主要是遗传算法)和反馈控制相结合的基础上的。遗传算法作为控制器参数的调节器方法,既可以用于作为机械臂实时控制过程中的在线参数调节器方法,也可以作为离线调整控制参数的方法。遗传算法作为一种智能优化方法,具有较强的通用性,适用于多目标求解问题^[4]。在本文中,该算法主要用于解决搜索问题。

目前,对DMC算法的研究主要集中在过程控制领域^[5-7]。由于DMC算法具有不需要精准模型的特点,所以其对复杂的机械臂模型控制中亦能取得较好的效果。虽然遗传算法的研究已经经历了相当长一段时间的发展,但针对不同的算法应用场景还有较灵活的变化^[8-9]。一般来说,DMC算法主要适用于线性系统的控制环节,但通过增加扰动向量的方法,也可以使DMC算法适用于一些非线性系统^[10]。

对于DMC算法的优化则主要集中在算法稳定性的层面^[11-13]。由于DMC算法中有许多作为预测权值而存在的参数以及由这些参数所组成的矩阵或者向量,这些参数对算法的鲁棒性和准确性等控制效果有着直接影响,因此这些

收稿日期:2019-09-23; 修订日期:2019-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873192); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(22120180114)

通信作者:汤奇荣(1982—),男,浙江杭州人,同济大学教授,博士,博士生导师,主要研究方向为群体机器人、机械臂多体动力学等, E-mail: qirong.tang@outlook.com。

参数的最优化取值一直是 DMC 算法设计重点之一。

1 动态矩阵预测控制

笔者使用动态矩阵控制作为机械臂的控制方法, 控制对象为单关节机械臂。作为机械臂的关节控制器, 对单个关节进行控制的 DMC 算法由预测模型、在线滚动优化和误差反馈校正等环节组成。

1.1 预测模型

动态矩阵预测控制是一种增量式的算法, 该算法一般先测定被控对象的单位阶跃响应, 并将此响应作为预测模型已知量。如图 1 所示, 以一定的采样周期, 在被控对象的单位响应中采样若干点, 这些点即组成被控对象单位阶跃响应的模型向量。

$$\mathbf{a} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_N]^T, \quad (1)$$

式中: \mathbf{a} 为模型参数向量; N 为采样数量。

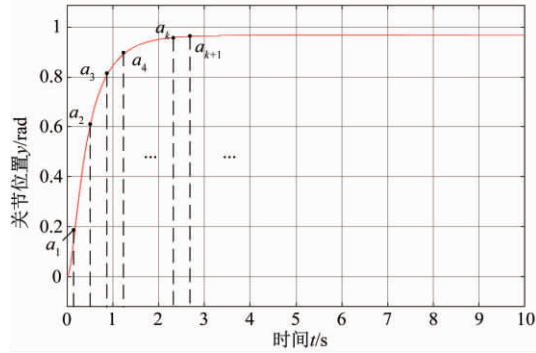


图 1 单位阶跃响应及预测模型参数采样

Figure 1 Unit step response and sampling of predictive model parameters

根据线性系统的可叠加性, 利用模型参数向量 \mathbf{a} 预测系统未来时刻的输出值。在已知外界有控制作用时, 假定当前时刻 $t = kT$, 从 t 时刻开始连续 M 个时刻的外界控制增量组成的向量由 $\Delta \mathbf{u}_M(k)$ 表示, 在 t 时刻对连续 N 个时刻的未来输出预测向量为:

$$\mathbf{y}_{MN}(k) = \begin{bmatrix} y_M(k+1|k) \\ y_M(k+2|k) \\ \dots \\ y_M(k+N|k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $y_M(k+N|k)$ 是在外界有控制作用时 kT 时刻对 $(k+N)T$ 时刻的未来输出预测量。与其对应的无外界控制增量时在 t 时刻对连续 N 个时刻的未来输出预测向量为:

$$\mathbf{y}_N(k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \dots \\ y(k+N|k) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $y(k+N|k)$ 是在外界无控制作用时 kT 时刻对 $(k+N)T$ 时刻的未来输出预测量。上述两个预测向量的关系可以表示为:

$$\mathbf{y}_{MN}(k) = \mathbf{y}_N(k) + \mathbf{A} \cdot \Delta \mathbf{u}_M(k), \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 为动态矩阵, 其元素为描述系统动态特性的阶跃响应系数, 其定义为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ a_2 & a_1 & 0 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{P-1} & a_{P-2} & \dots & a_{P-M+1} & a_{P-M} \\ a_P & a_{P-1} & \dots & a_{P-M+2} & a_{P-M+1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

1.2 滚动优化

优化问题的求解过程是指通过特定方法获得目标函数的最优解。滚动优化环节通过设定优化指标, 确定不同采样时刻的未来 M 个控制增量, 进而使未来 N 个时刻的预测输出接近期望输出。优化指标一般表示为最小二乘问题, 并可采用求导或者迭代的方法进行求解。该环节可用公式表示为:

$$J(k) = \|\mathbf{w}_N(k) - \mathbf{y}_{MN}(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{u}_M(k)\|_R^2, \quad (6)$$

式中: $J(k)$ 为优化的目标函数; $\mathbf{w}_N(k)$ 为未来 N 个时刻的期望输出值组成的向量; \mathbf{Q} 为输出值误差项向量的二范数的权矩阵, 被称为误差权矩阵, 一般为 q 维对角阵; \mathbf{R} 为外界控制量向量的二范数的权矩阵, 被称为控制权矩阵, 一般为 r 维对角阵。

进一步地, 优化函数对控制量向量取偏导并令其等于零向量, 可以得到最优控制增量序列为:

$$\Delta \mathbf{u}_M(k) = (\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{Q} (\mathbf{w}_N(k) - \mathbf{y}_N(k)). \quad (7)$$

1.3 反馈校正及预测更新

动态矩阵预测控制中的反馈来自于实际输出与预测输出之差, 得到模型预测误差为:

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{y}(k+1) - \mathbf{y}(k+1|k), \quad (8)$$

式中: $\mathbf{y}(k+1)$ 是第 $(k+1)$ 时刻的实际输出。

得到的误差用于对预测输出进行更新, 并计算矫正预测值向量, 该向量用于更新无控制增量下的预测输出向量, 并得到其 $k+1$ 时刻的取值。其计算公式为:

$$y_{\text{cor}}(k+1) = y_{MN}(k) + h \cdot e(k+1), \quad (9)$$

式中: h 为误差校正向量, 通过调整该矩阵的取值可在更新时增加系统的鲁棒性。

关于矫正预测值向量更新, 在无控制增量下的预测输出向量公式为:

$$y_N(k+1) = S \cdot y_{\text{cor}}(k+1), \quad (10)$$

式中: S 为移位矩阵, 其定义为:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

1.4 DMC 方法实现

笔者采用上述 DMC 算法作为机械臂的控制器。其中, 控制权矩阵对系统的动态响应有着显著的影响, 一般需要对其取值进行合理的设定, 并基于此设定进行控制方法设计。DMC 控制方法框架如图 2 所示。

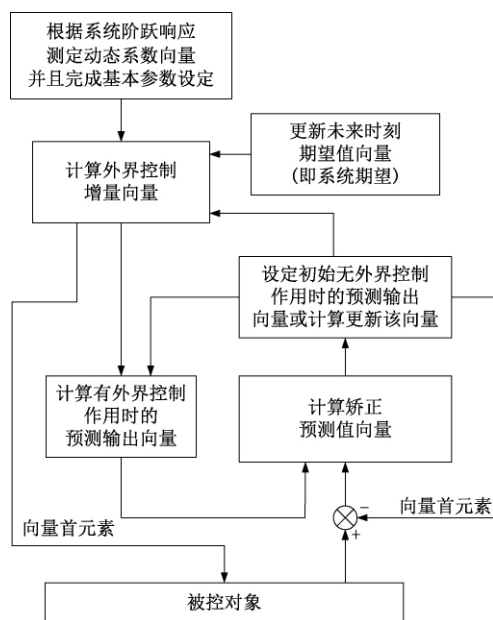


图 2 动态矩阵预测控制算法

Figure 2 Dynamic matrix predictive control algorithm

将 DMC 控制方法的几个环节串联起来并形成闭环回路, 通过采样测定动态系数向量之后, 计算得到动态矩阵。并且通过经验或者参数调节的算法设定误差权矩阵与控制权矩阵、误差校正向量的参数值, 进而完成 DMC 控制方法的参数设定。

在参数设定的基础上, 通过设定初始的无外界控制作用时的预测输出向量, 以及根据初始的系统期望值, 计算出最初的外界控制增量向量, 并将该向量的首元素作为被控对象的输

入控制值。此外, 计算得到有外界控制作用时的预测输出向量, 其后, 通过被控对象的实际输出与初始的无外界控制作用时的预测输出向量首元素的差值, 以及计算出的有外界控制作用时的预测输出向量, 求解得到矫正预测值向量, 再通过该向量对无外界控制作用时的预测输出向量进行更新。

在无外界控制作用时的预测输出向量与系统期望更新之后, 重新执行滚动优化、预测模型以及反馈矫正 3 个环节, 直至系统输出趋于稳定。

2 遗传算法

2.1 构建目标优化函数

在本文中, 根据控制系统输入量(机械臂关节理想转角)以及输出量(机械臂关节实际转角)之间的关系确定遗传算法的目标优化函数。当系统输出量可以较精确且迅速地跟踪系统输入量时, 则会获得较小的目标函数值, 从而按照优化函数所包含的优化规则实现优化过程。

在对机械臂进行控制时, 为使输出量精确且迅速地跟踪输入, 需要建立目标优化函数并使其成为二者差值的函数。规定 n 为全局跟踪时间内根据一定周期采样输入、输出点的个数, m_0 与 m_1 为局部(超调量较大部分)跟踪时间内根据一定周期采样输入、输出点的起始与结束时刻值, 则目标优化函数可以表示为:

$$J = 10 \sin \left(\sum_{i=1}^n |in(k) - out(k)| \cdot \frac{\pi}{n} + \frac{\pi}{4} + 10 \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(\sum_{i=m_0}^{m_1} out(k) - in(k) \right)^2 + 1} \right) \right), \quad (12)$$

式中: $in(k)$ 为第 k 个采样输入值; $out(k)$ 为第 k 个采样输出值。

2.2 遗传算法实现

遗传算法寻优的过程采用了概率化的方法, 该算法可以不根据确定的规则或者不需要固定的寻优函数参数进行计算, 通过设定的概率影响参数取值的改变, 该算法可以自动获取参数较优取值并且优化搜索空间, 做到自适应地调整搜索方向。其步骤流程如图 3 所示。

遗传算法重要环节的具体算法实现如下:

(1) 计算适应度与选择、复制。在本文所设计的遗传算法中, 本步骤以目标优化函数计算得

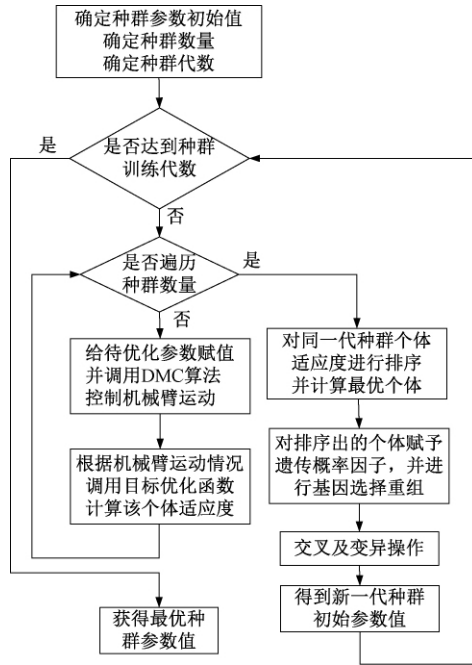


图 3 遗传算法流程

Figure 3 Process of genetic algorithms

到的评价价值作为输入,经过取倒数、求和、增加最优值适应度、排序等操作,将优化函数所返回的种群评价序列调整为有序的、评价价值较低的种群(即响应输出较优)所占比例较多的新序列,并将其复制给下一代种群。适应度值计算公式为:

$$f = 1/J, \quad (13)$$

式中: f 为适应度; J 为目标优化函数计算值。

(2) 二进制编码及变异操作。变异操作模拟生物进化过程中的基因突变方法,以小概率随机地改变染色体字符串某一位的值^[14]。笔者在对各个种群个体取值(保留小数点前 3 位)进行二进制编码的基础上,改变对任意基因所在位点采取固定变异概率值的操作模式。此种方法既可以保证种群个体变异的稳定性,又可以增加种群基因变异可能性,进而优化算法效果。

(3) 交叉操作。一般交叉操作针对被选择的个体,以某种交叉方式交换两个字符串相对应的基因,从而产生两个新的个体^[15]。此种字符串的交叉方法在十进制数值高位所对应的二进制字符串点位产生交叉时,会有可能造成种群个体较大程度的改变,因此,笔者采用一种改进的方法对交叉操作进行适当的方向引导。在笔者所用遗传算法中,同一种群两个相邻个体会通过加权相加的形式得到两个新的个体,其权值由交叉概率决定。通过交叉操作计算新的相邻种群个体取值公式为:

$$K_{\text{new}} = \begin{bmatrix} p & 1-p \\ 1-p & p \end{bmatrix} \cdot K, \quad (14)$$

式中: K 为一对相邻种群个体取值; p 为交叉概率。

3 算法验证

3.1 建立被控对象

在 MATLAB/SIMULINK 中,利用机器人开发工具箱 Robotics Toolbox 的库函数,并使用其中的 slaccel S-函数作为被控对象的传递函数,该函数可以在以关节转矩、关节转角与关节角速度为输入的情况下,计算出关节角加速度,进而求出下一时刻的关节角速度与关节转角。笔者以单关节机械臂作为被控对象,在使用 slaccel S-函数时,指定关节角的初始位置 $q=0$,并指定单关节机械臂模型,其 D-H 表参数 $[\theta, d, a, \delta] = [q, 0, 0, 1.5708]$,并在 slaccel S-函数中定义其为无摩擦模型。为使被控对象的响应更贴近实际状态,将计算获得的角速度通过 Coulomb friction 函数反馈回关节的力矩输入处,即相当于按照当前状态计算关节转动所受摩擦力并将其作为负反馈作用在输入力矩上。被控对象 SIMULINK 框图如图 4 所示。

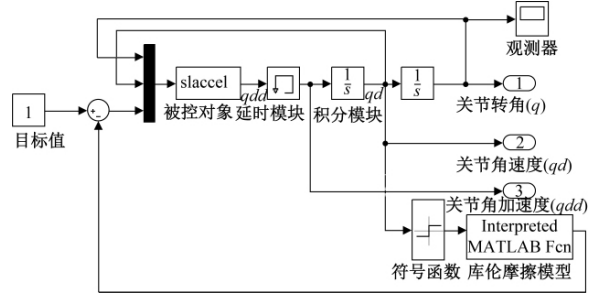


图 4 被控对象 SIMULINK 仿真示意图

Figure 4 SIMULINK simulation sketch of controlled object

3.2 仿真结果

仿真中首先测得被控对象单位阶跃响应并按照固定周期采样得到模型参数向量 a 。由于使用单关节机械臂模型的单位阶跃响应不收敛,故在采样被控对象的单位阶跃响应时,添加一个 PID 控制器作为中间环节,使整个系统的单位阶跃响应处于收敛状态。如此采样得到的模型参数向量 a 如表 1 所示。选取采样点个数为 30,选取采样间隔时间为仿真时间 $T=0.08$ 。

使用模型参数向量 a 作为已知参数,以 DMC 算法为基础,构造出系统的控制器,进一步地,使用遗传算法训练并得到最优控制权矩阵参数。DMC 算法各主要参数取值如表 2 所示。

表1 模型参数采样值

Table 1 Sampling values of model parameters

采样序列	单位阶跃响应采样值				
1~5	0.013 2	0.100 3	0.222 0	0.343 5	0.451 2
6~10	0.541 4	0.615 1	0.674 8	0.723 2	0.762 5
11~15	0.794 8	0.821 5	0.843 7	0.862 4	0.878 1
16~20	0.891 3	0.902 6	0.912 1	0.920 2	0.927 1
21~25	0.933 0	0.937 9	0.942 2	0.945 8	0.948 8
26~30	0.951 4	0.953 7	0.955 6	0.957 2	0.958 5

表2 DMC 算法各主要参数取值

Table 2 Value of major parameters of DMC

Q	R	h
30 阶单位对角阵	遗传算法待优化值组成的对角阵	元素均为 1 的 30×1 矩阵

在搭建 GA 算法优化 DMC 方法的控制系统框架以及确定各主要参数的取值之后,笔者设计了两个对比仿真实验以验证优化 DMC 方法的效果,实验设置如表 3 所示。

表3 实验设置

Table 3 Experiment setup

对比实验 1	对比实验 2
不同迭代代数遗传算法	使用优化后的 DMC 算法
优化 DMC 方法效果	与普通 PID 控制器算法控制
对比	被控对象的效果对比

在对比实验 1 中,根据本项目规模大小,分别选取遗传算法的迭代代数为 10、20、40 代,选取遗传算法种群数为 20,并通过离线调参的方法确定控制权矩阵的最优取值。使用第 10、20、40 代所得到的最优取值作为控制权矩阵的对角线参数,并且将遗传算法对种群的两个参数的优化区间分别设定为 $[100, 500]$ 以及 $[0, 1]$ 。在同种输入作用下,得到 3 组不同的控制权矩阵参数值,其取值分别为 $(379.640, 0.188)$ 、 $(383.371, 0.211)$ 、 $(308.224, 0.109)$, 3 组值分别对应迭代代数为 10、20、40 代的仿真情况,并且根据 3 组矩阵参数取值进行控制算法仿真,得到仿真输出曲线,并对其进行比较,经过比较发现迭代代数为 40 代的控制权矩阵参数值所对应的仿真结果的响应速度最快,并且稳定误差最小,但相应其超调量最大,而迭代代数为 10 代的控制权矩阵参数值所对应的仿真结果相反。综合考量可以发现,迭代代数为 20 代的控制权矩阵参数值所对应的仿真结果在 3 者之中为最优结果,仿真结果比较如图 5 所示。

此外,分析 3 组矩阵参数取值的情况可以发现,第 10、20 代两组参数取值比较接近,而 40 代参

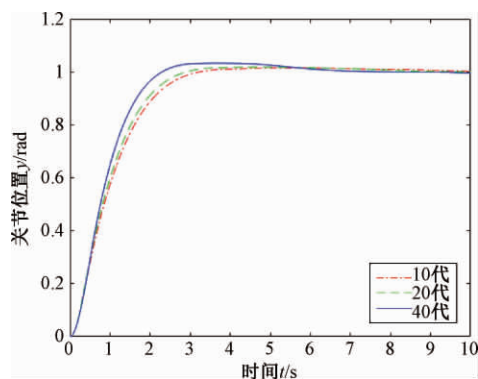


图5 不同迭代代数遗传算法所得结果对比

Figure 5 Comparison of results obtained by different population era of GA

数取值相对另外两组较远,故存在 3 组参数取值不都在同一局部取值域的可能。为验证优化效果,以 40 代矩阵参数取值为参考,选取 $(308.224, 0.900)$ 与 $(308.224, 0.120)$ 、 $(300, 0.109)$ 、 $(315, 0.109)$ 4 组矩阵参数取值做对比,对比发现 40 代矩阵参数取值为区域响应速度较快值,而其他 4 组取值的仿真响应速度较接近,寻优效果明显。但也同时表明,该方法较易陷入局部最优解,对比结果如图 6 所示。

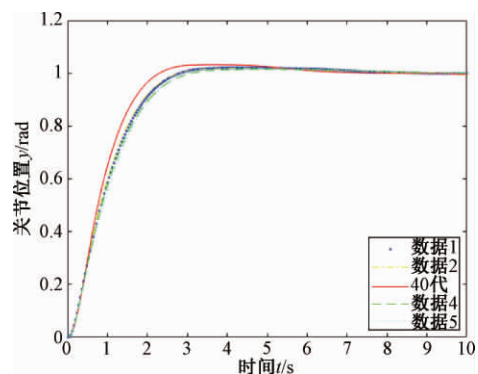


图6 优化效果验证

Figure 6 Validation of optimization effect

在对比实验 2 中,对比普通 PID 控制器得到的被控对象输出以及优化 DMC 算法得到的被控对象输出,可以发现 DMC 算法相比于所采用的一般 PID 控制器响应时间慢,且响应时间相对较快的 DMC 算法仿真结果具有相对明显的超调量。但使用 DMC 算法所得到的输出响应稳态误差在 0.5% 以内,远小于 PID 控制器控制时的稳态误差,对比结果如图 7 所示。

4 结论

笔者设计了遗传算法优化的 DMC 控制,并应用 Robotics Toolbox 实现了控制系统的仿真。仿真结果表明,通过遗传算法的离线调参,仿真系统可以较快(只通过数十代的迭代)地确定局部的 DMC

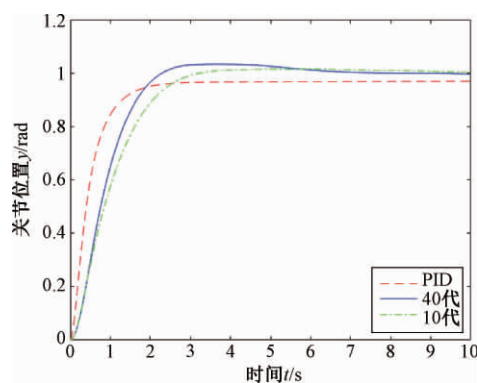


图7 优化 DMC 算法及普通 PID 算法效果对比

Figure 7 Comparison of results obtained by augmented DMC algorithm and normal PID algorithm

算法控制参数的近似最优值。经过离线调参之后的 DMC 算法控制性能较优,该算法虽然响应速度较慢,但通过遗传算法,在合理的局部取值域中寻找到的控制权矩阵参数值,可以在保证较快响应速度的基础上,产生较小的超调量及稳态误差。该算法不依赖于控制对象的准确模型,在控制参数选择得当时,可以取得较为理想的控制效果。

参考文献:

- [1] 蔡自兴,谢斌. 机器人学[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2015.
- [2] 杨丽华,赵文杰. 基于 MATLAB 的广义预测控制设计方法[J]. 仪器仪表用户,2012,19(2):82-84.
- [3] 袁宇鹏,胡杨,李军,等. 基于动态矩阵控制的自主移动机器人模型预测控制方法研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2018,30(4):111-117.
- [4] 穆瑞杰. 基于遗传算法的地铁车站引导标识布点探析[J]. 郑州大学学报(工学版),2018,39(1):77-81.
- [5] 惠晶,王存款,朱贺. 基于动态矩阵的 APF 预测控制策略研究[J]. 电力电子技术,2010,44(5):28-30.
- [6] 张奇智,张彬,张卫东. 随机延迟网络控制系统中的分段时戳动态矩阵控制[J]. 控制与决策,2005,20(8):873-877.
- [7] 戴连奎. SISO 动态矩阵控制的鲁棒稳定性条件[J]. 自动化学报,2001,27(3):367-370.
- [8] 吉林林. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用与软件,2004,21(2):69-73.
- [9] 甄文祥,王文田. 遗传算法及其应用[J]. 计算机应用研究,1994,11(5):9-10.
- [10] GROSSWINDHAGER S, VOIGT A, KOZEK M. Predictive control of district heating network using fuzzy DMC[J]. International journal of modelling identification and control,2012,19(2):241-246.
- [11] 罗刚,金炜东,李治. 动态矩阵控制参数的满意优化[J]. 信息与控制,1999,28(1):75-79.
- [12] 郭伟,姚少杰. 基于时域的 PID 动态矩阵控制算法改进[J]. 仪器仪表学报,2007,28(12):2174-2178.
- [13] 申涛,诸静. 多输入/多输出系统动态矩阵控制鲁棒稳定性[J]. 控制理论与应用,2005,22(3):445-448.
- [14] 白凤. 基于数据压缩处理算法的数据采集与监控系统研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2009.
- [15] 王文庆,杨楠. 基于改进遗传算法的 PID 参数整定研究[J]. 计算机与数学工程,2018,46(12):2603-2606,2610.

Dynamic Matrix Predictive Control of Manipulators Based on Genetic Algorithms

ZHAO Qingyan, LI Jie, WU Shun, TU Haibo, TANG Qirong

(System of School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Dynamic matrix predictive control (DMC) was a common method for process control of linear systems. The control effect of this method was greatly affected by the parameters of its control matrix. Aiming at the off-line parameters adjustment, an augmented DMC method was presented in this paper as well as fitness function based on input and output parameters of control system was designed. With a single-joint manipulator as the controlled object, a DMC control system was designed to sample the unit step response of the controlled object and the parameters of its control matrix were adjusted offline by genetic algorithm. Simulation verification was performed using the parameters of the system and the genetic algorithm then. The results showed that the parameters of control matrix of DMC algorithm with better output could be obtained quickly and accurately after optimized using genetic algorithm, which made convenience for using DMC for manipulator control.

Key words: dynamic matrix predictive control; control matrix; genetic algorithm; offline parameter adjustment

基于维度扰动的快速非支配排序遗传算法 II

张茂清¹, 李东洋¹, 胡 博¹, 汪 镭¹, 崔志华², 郭为安³

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 太原科技大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024; 3. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804)

摘 要: 快速非支配排序遗传算法 II (non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 是经典多目标优化算法, 然而, 其采用的锦标赛选择策略在选择交叉父代时会产生大量重复个体, 并进一步导致减少种群个体多样性, 降低算法性能。为解决此类问题, 提出了基于维度扰动的 NSGA-II。即通过在待交叉父代个体每个维度上引入扰动参数改变其值, 然后将扰动父代做正常交叉操作产生新后代, 以此避免了后代重复个体的产生。为验证算法的有效性, 采用 ZDT 测试集作为测试函数。与现有算法相比, 所提策略可有效地改善算法性能, 证明了所提策略的有效性。

关键词: NSGA-II; 多目标优化算法; 锦标赛选择; 维度扰动

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.001

0 引言

多目标优化问题是指目标函数数量为 2~3 个的优化问题^[1-3]。一般情况下, 多目标优化问题不同目标之间具有相互冲突的特点, 即一个目标性能增加会导致另外一个目标性能降低。为求解此类优化问题, 许多学者提出了有效的求解算法, 如 NSGA-II^[4]、SPEA2^[5]、PEASII^[6] 以及最近提出的 MOEAIGDNS^[7] 等。NSGA-II^[4] 是 Deb 等于 2002 年提出的算法。由于其在多目标优化问题上较优的求解性能引起了广大研究者关注, 并被应用到许多实际工程优化问题中。根据不同研究角度, 可将近些年对 NSGA-II 的研究做如下分类。

优化 NSGA-II 中支配关系, 进一步拓展算法求解问题范围。针对实际工程领域中复杂非线性多目标优化问题, 赖文星等^[8] 发现 NSGA-II 无法有效识别伪非支配解。为解决此类问题, 赖文星等^[8] 采用快速支配强度排序法构造非支配集, 引入基于方差的拥挤距离公式, 并通过自适应精英保留策略动态调整精英保留规模。为在理论上解决 NSGA-II 中 Pareto 支配在高维多目标优化问题上无法区分有效解的问题, Yang 等^[9] 提出利用基于网格的支配方法来区分不同个体, 并利用网格

产生待交叉父代个体。同样为解决此类问题, Zhang 等^[10] 则提出基于分解的进化算法, 即将多目标优化问题分解为多个单目标优化问题, 有效避免了多目标优化问题中支配关系, 提升了算法的收敛性能。

针对实际工程应用问题特点, 改善算法适用性。郝志宽等^[11] 针对车辆悬架系统中多目标优化问题特点, 提出引入精英保持策略, 去除重复个体, 减少变量重复性, 有效提高了算法的效率。面向特定区域部署的临近空间通信网络需要兼顾考虑资源分配、覆盖率及载荷功率等多个因素, 为了针对性优化此类复杂问题, 唐树祝等^[12] 将动态反向学习机制和差分局部变异算子引入 NSGA-II, 为网络实际部署提供了参考。为应对跨区域突发事件过程中受灾点服务差异化需求问题, 宋艳等^[13] 通过设计分段染色体编码方式改进 NSGA-II 算法, 提升运算效率, 并且有效地解决了多目标选址决策问题。

虽然 NSGA-II 在理论以及应用方面^[14] 已有广泛研究, 但其采用的锦标赛选择策略 (tournament selection) 会产生大量重复个体, 从而导致后代种群多样性受到影响。针对此类问题, 笔者设计具有维度扰动策略的 NSGA-II (non-dominated

收稿日期:2019-07-08; 修订日期:2019-10-16

基金项目:科技部科技冬奥项目(2018YFF0300505); 国家自然科学基金资助项目(71771176, 61503287, 61703279)

通信作者:汪镭(1970—), 男, 江苏无锡人, 同济大学教授, 博士生导师, 主要从事智能自动化理论与工程方面的研究, Email: wanglei@tongji.edu.cn。

sorting genetic algorithm II based on dimensionality perturbation, DPNSGA-II), 该算法通过采用对部分维度进行扰动的方法消除重复个体, 从而有效地提高了算法的整体性能。

1 基本概念以及锦标赛选择策略

1.1 基本概念

笔者考虑如下多目标优化问题^[15]:

$$f(\vec{x}) = \min [f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x})], (1)$$

式中: $f_i(\vec{x})$ 表示第 i 个目标函数 ($i = 1, 2, \dots, M$), $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_D) \in \mathbf{R}^D$ 为决策变量空间。

定义 1: 若变量 \vec{x} 目标函数为 $f(\vec{x}) = (f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_M(\vec{x}))^T$, 变量 \vec{x}' 目标函数为 $f(\vec{x}') = (f_1(\vec{x}'), f_2(\vec{x}'), \dots, f_M(\vec{x}'))^T$, 当且仅当对于 $\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}$ $f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{x}')$ 成立, 且存在 $k \in \{1, 2, \dots, M\}$, 使得 $f_k(\vec{x}) < f_k(\vec{x}')$ 严格成立, 则称 \vec{x} 支配 \vec{x}' , 记作: $\vec{x} < \vec{x}'$ 。

定义 2: 决策空间上所有 *pareto* 最优解构成的集合称为 *pareto* 最优解集 (*pareto set*)。

定义 3: *pareto* 最优解集在目标空间上对应点集称为 *pareto* 前沿面 (*pareto front*)。

1.2 锦标赛选择策略以及分析

NSGA-II^[4] 是多目标优化算法中经典的算法, 其涉及快速非支配排序、锦标赛选择策略 (tournament selection)、交叉算子、变异算子以及拥挤度距离等多种策略。NSGA-II 中种群个体间进化压力以及多样性保持策略主要依赖快速非支配排序以及拥挤度距离的方法。锦标赛选择策略是 NSGA-II 算法中用于选择待交叉父代个体的主要方法, 如图 1 所示。首先从种群中以等概率选择个体, 然后从所选个体中选择最优个体作为父代个体, 按照上述方法多次选择即可产生多个交叉父代。从上述过程可看出, 若个体 I_i 为种群中第一层非支配个体, 则其有很大概率在多次选择较优个体时被再次选中, 从而导致出现多个重复个体现象。

图 2 为运行 NSGA-II 算法时, 运用锦标赛选择策略单个个体每代最大重复次数统计, 图 3 为算法运行到 70 代时运用锦标赛选择策略所产生重复个体数量统计, 其中运行条件为种群个体数量为 100, 算法运行 80 代, 测试函数为 ZDT1 (请见实验部分)。从图 2 可以看出, 算法 NSGA-II 计

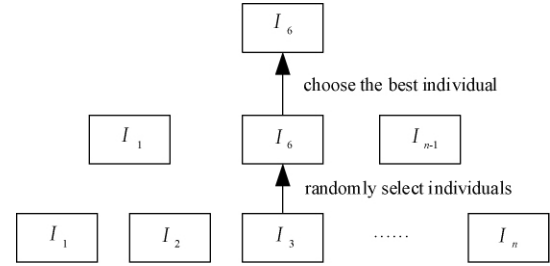


图 1 锦标赛选择策略说明

Figure 1 Illustration of tournament selection

算过程中每代都会出现每个个体 5 次的重复次数, 最大出现 10 次重复。从图 3 可看出, 就某一代重复个体而言, 较优个体出现 4 次, 甚至最高出现 10 次重复次数。若每个个体均按照上述数量重复, 则可导致后代个体多样性变差以及算法整体性能降低。

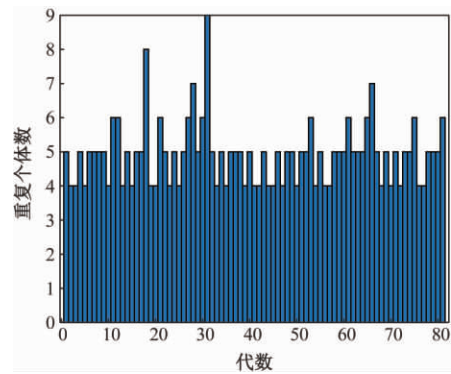


图 2 每代重复个体统计

Figure 2 Statistics of repeated individual per generation

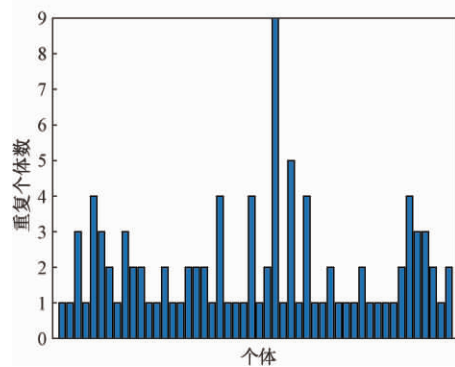


图 3 第 70 代重复个体数量统计

Figure 3 Statistics of repeated individuals at 70th generation

2 维度扰动策略

为解决个体重复问题, 笔者提出基于维度扰动策略的 NSGA-II。设 I_i 和 I_j 为锦标赛选择算法挑选出的待交叉父代, \otimes 为父代个体间的交叉操作。则 $I_i = (x_1, x_2, \dots, x_D)$ (D 为个体变量维度) 按照如下方式产生扰动个体 I'_i 第 i 维度:

$$x'_i = \text{normrnd}\left(x_i, r_i \cdot \lambda \cdot \frac{(x_{\text{upper}} - x_{\text{lower}})}{N}\right), \quad (2)$$

式中: $\text{normrnd}(\cdot)$ 表示以 x_i 为均值 $r_i \cdot \lambda \cdot \frac{(x_{\text{upper}} - x_{\text{lower}})}{N}$ 为方差的正态分布函数; r_i 为随机产生 0 或 1 随机数; λ 为参数, 可取值 $1.0\text{E}-02$ 、 $1.0\text{E}-03$ 、 $1.0\text{E}-04$ 、 $1.0\text{E}-05$, 后续实验将详细验证; x_{upper} 、 x_{lower} 分别为 x_i 取值上界和下界; N 为种群个体。则个体 I'_i 可表示为:

$$I'_i = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_D). \quad (3)$$

同理, 可得出个体 $I'_j = (x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_D)$, 则产生的后代个体可表示为:

$$I'_{\text{new}} = I'_i \otimes I'_j. \quad (4)$$

如图 4 所示为个体 I_i 第 i 维度 x_i 扰动示意图。从图 4 可以看出, 局部扰动可产生以 x_i 为期望 $r_i \lambda$ 为方差的正态分布随机数 x'_i 。当 r_i 为 0 时, 表示个体 I_i 第 i 维度 x_i 保持不变; 当 r_i 为 1 时, 表示个体 I_i 第 i 维度 x_i 按照上述方式产生扰动值 x'_i 。与标准锦标赛选择策略相比, 基于维度扰动策略可以有效减少重复个体数量, 同时可以扩大后代搜索范围, 增加了后代多样性。

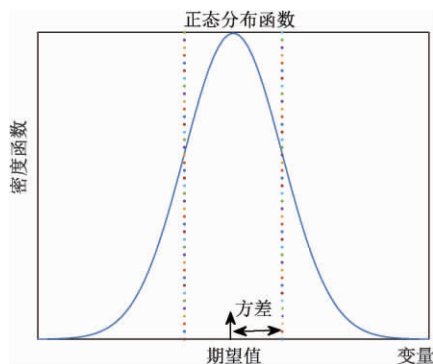


图 4 维度扰动示意图

Figure 4 Illustration of dimensionality perturbation

3 实验结果及分析

为验证笔者所提算法性能, 本部分实验为两小部分:

(1) 第一部分验证笔者所提算法参数 λ 取 $1.0\text{E}-02$ 、 $1.0\text{E}-03$ 、 $1.0\text{E}-04$ 、 $1.0\text{E}-05$ 对算法性能的影响;

(2) 第二部分将笔者所提基于维度扰动的 NSGA-II 与传统算法 SPEA2^[5]、PEASII^[6] 以及最近提出的算法 MOEAIGDNS^[7] 做对比。表 1 列出了上述不同算法运行所需参数。其中 pc 为交叉概率; pm 表示变异概率; D 为测试函数变量维度。 div 为每个目标分量个数。注意, 所有参数设置均按照原

始参考文献设置, 有兴趣读者请参阅文献 [5-7]。

表 1 算法参数说明

Table 1 Illustration of Parameters of different algorithms

算法	参数设置
NSGA-II	$pc = 1$ $pm = 1/D$
DPNSGA-II	$pc = 1$ $pm = 1/D$
SPEA2	$pc = 1$ $pm = 1/D$
MOEAIGDNS	$pc = 1$ $pm = 1/D$
PEASII	$div = 10$

(3) 展示种群多样性指标与个体进化代数之间的关系图, 并进一步分析验证本文前述维度扰动策略所起作用。

为了综合测试算法性能, 笔者采用 ZDT 测试函数集^[16] 如表 2 所示。ZDT 测试函数集由 Zitzler 和 Deb 在 2000 年提出, 这些函数具有凸、凹、连续、非连续和具有多重局部最优等特点, 评价指标采用 IGD^[17]。

实验所用计算机为 Inter Core i5-2400 3.10 GHz CPU, 6.00 GB 内存, Windows7 操作系统, 运行环境为 Matlab7.9。每个算法独立运行 20 次, 算法最大迭代 100 次, 种群个体为 50。

3.1 参数 λ 对算法影响

表 2 所示为不同 λ 取值对本文算法的影响, 其中每个取值为算法独立运行 20 次 IGD 均值。最后一行为 Friedman 检验结果 ranking 值(排序值), 值越小表示算法性能越优, Friedman 检验是对每个算法运行 20 次的 IGD 均值计算得出的, 最优值用黑体显示。对比算法的方式为首先通过比较不同算法在各个测试函数集上的 IGD 均值以及在整个测试函数上占优的总数, 然后进一步比较 Friedman 检验结果, 综合以上方法得出最优算法。

表 2 实验算法所求平均 IGD 对比

Table 2 Comparison of average IGD obtained by experimental algorithms

函数集	$\lambda = 1.0\text{E}-05$	$\lambda = 1.0\text{E}-04$	$\lambda = 1.0\text{E}-03$	$\lambda = 1.0\text{E}-02$
ZDT1	8.59E-01	7.48E-01	9.24E-01	9.26E-01
ZDT2	1.20E+00	1.44E+00	1.03E+00	1.20E+00
ZDT3	9.13E-01	6.51E-01	7.26E-01	1.03E+00
ZDT4	7.09E-01	7.77E-01	7.93E-01	8.60E-01
ZDT6	5.00E-01	4.79E-01	4.89E-01	3.52E-01
ranking 值	3.20	2.60	3.00	3.60

从表 2 可看出 $\lambda = 1.0\text{E}-04$ 时分别在 ZDT1、ZDT2、ZDT4 表现较优, 在 ZDT2 和 ZDT6 表现略差。从 Friedman 检验结果来看, $\lambda = 1.0\text{E}-04$ 时具有最小检验值。因此, 综合而言, 当 $\lambda = 1.0\text{E}-04$ 时本

文算法具有较优性能。下面实验将采用 $\lambda = 1.0E-04$ 作为算法 DPNSGA-II 参数。

3.2 与现有算法对比

表 3 列出了笔者所提算法与 NSGA-II、PEASII、SPEA2、MOEAIGDNS 对比结果,其中“均值”表示算法运行 20 次的 IGD 平均值,“方差”表示算法 20 次求解 IGD 结果“方差”。最后一行为 Friedman 检验结果 ranking 值,其由在每个测试函数上对每个算法运行 20 次的 IGD 均值计算得出。

从表 3 可以看出,与 NSGA-II 相比,笔者所提算法在 ZDT1、ZDT2、ZDT3、ZDT4 上均表现较优,说明笔者所提基于维度扰动的策略有效地改善了

算法性能。与其他算法相比,笔者所提算法在 ZDT3 上超过 SPEA2 性能。就 Friedman 测试结果而言,笔者所提算法具有较小 ranking 值,说明本文算法整体性能较优。

图 5 展示算法 DPNSGA-II、NSGA-II 以及真实前沿面在不同测试函数上的对比效果。从图 5 可以看出,在收敛性方面,算法 DPNSGA-II 与 NSGA-II 在 ZDT1 测试函数上有明显差距;在 ZDT2 上,算法 NSGA-II 所求结果均匀性稍差于 DPNSGA-II。在 ZDT3 和 ZDT6 测试函数上可明显看出,NSGA-II 算法在某些点上存在明显偏离真实 pareto 前沿面 (true pareto front) 的个体。在

表 3 不同算法获得的 IGD 值

Table 3 IGD results of Different algorithms

函数集	指标	DPNSGA-II	NSGA-II	PESAI	SPEA2	MOEAIGDNS
ZDT1	均值	7.47E-01	8.83E-01	1.65E+00	1.08E+00	1.70E+00
	方差	3.47E-01	3.78E-01	1.18E+00	8.21E-01	4.15E-01
ZDT2	均值	1.44E+00	4.15E+00	9.50E+00	4.84E+00	6.24E+00
	方差	4.57E-01	1.19E+00	5.64E+00	1.36E+00	1.31E+00
ZDT3	均值	6.51E-01	9.20E-01	1.11E+00	7.15E-01	1.30E+00
	方差	2.51E-01	6.03E-01	3.11E-01	3.62E-01	5.53E-01
ZDT4	均值	7.77E-01	7.87E-01	5.62E-01	7.05E-01	9.37E-01
	方差	3.39E-01	3.28E-01	2.29E-01	3.01E-01	3.44E-01
ZDT6	均值	4.79E-01	3.16E-01	1.24E-01	2.01E-01	8.28E-01
	方差	2.20E-01	1.21E-01	4.55E-02	8.23E-02	2.52E-01
ranking 值		2.20	2.60	3.00	2.40	4.80

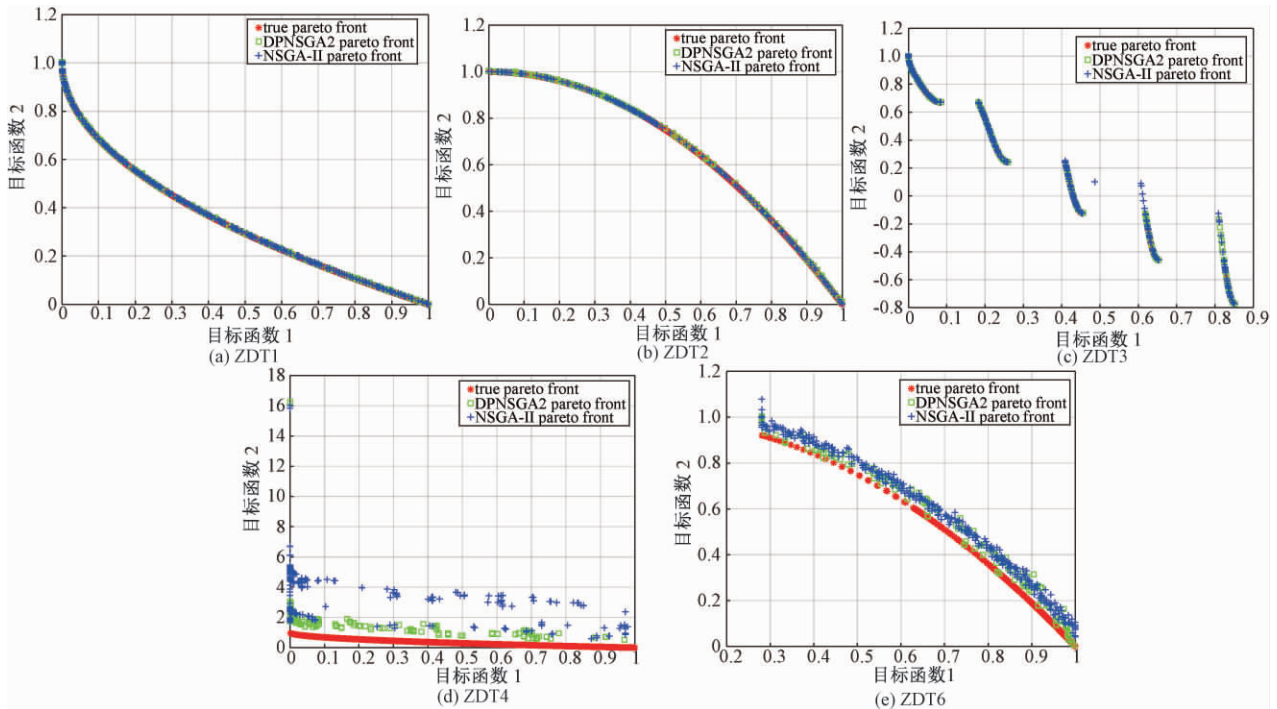


图 5 不同算法 pareto 前沿面对比

Figure 5 Comparison of different Pareto fronts

ZDT4 上的两个算法性能表现可以充分说明改进算法 DPNSGA-II 有效地改善了 NSGA-II 收敛性,提高了算法的整体性能。

3.3 种群多样性指标分析

图 6 展示了 DPNSGA-II 和 NSGA-II 算法在运行过程中种群多样性变化趋势,其中横坐标表示算法评价次数(即种群个体与算法运行代数的乘积,此方式相比于以代数更加精细反应种群多样性的变化),纵坐标表示多样性指标,所用测试函数为 ZDT1。

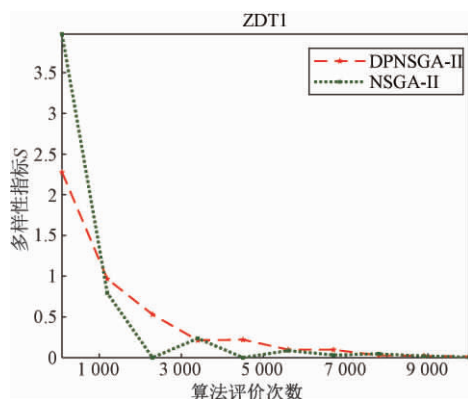


图 6 种群多样性随代数变化趋势说明

Figure 6 Illustration of the diversity of population with evolution of generation

根据第二部分介绍的扰动策略,该方法可以有效减少重复个体数量。从图 6 种群多样性变化趋势对比可以看出,笔者提出的 DPNSGA-II 算法在运行初期相对于 NSGA-II 多样性较差,其原因是在初始化种群时,种群个体间本身具有较大距离,且分布相对均匀,此时笔者所提维度扰动策略只能在个体附近产生扰动,并未产生明显效果。随着种群个体不断进化,在算法运行到 1 000 次评价时,DPNSGA-II 对应种群多样性明显优于 NSGA-II 对应种群性能,并一直保持到算法运行结束。在 1 000 次评价之后,个体不断逼近真实 Pareto 前沿面,同时,个体间距离不断缩小,此时维度扰动策略产生作用,使得种群多样性保持在一定程度,有利于种群向更优的方向进化。

基于以上讨论,综合比较而言,笔者所提算法 DPNSGA-II 通过降低算法重复个体的方式,有效改进了算法整体性能,证明笔者所提改进策略的有效性。

4 结论

锦标赛选择策略是 NSGA-II 用于选择产生后代的策略,由于其固有缺陷导致产生大量重复个

体。为了解决此问题,笔者提出了基于维度扰动的策略,即通过以当前父代位置为期望,融入方差参数的正态分布函数进行扰动,以此消除重复个体现象。通过实验数据可以说明,提出的基于维度扰动的策略可以有效地提升算法性能,达到了预期的效果。后期研究工作将专注于 NSGA-II 算法性能的进一步提升。

参考文献:

- [1] ZHANG M Q, WANG H, CUI Z H, et al. Hybrid multi-objective cuckoo search with dynamical local search [J]. Memetic computing, 2018, 10(2): 199-208.
- [2] CHENG R, JIN Y C, OLHOFFER M, et al. A reference vector guided evolutionary algorithm for many-objective optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2016, 20(5): 773-791.
- [3] ZHANG M Q, ZHU Z H, CUI Z. H, et al. NSGA-II with local perturbation [C] // 29th Chinese Control and Decision Conference. Chongqing: IEEE, 2017: 208-213.
- [4] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [5] ECKART Z, MARCO L, LOTHAR T. SPEA2: improving the strength Pareto evolutionary algorithm [J]. TIK-report 2001, 103: 95-100.
- [6] CORNE D W, JERRAM N R, KNOWLES J D, et al. PESA-II: region-based selection in evolutionary multi-objective optimization [C] // Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2001: 283-290.
- [7] TIAN Y, ZHANG X Y, CHENG R, et al. A multi-objective evolutionary algorithm based on an enhanced inverted generational distance metric [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver: IEEE, 2016: 5222-5229.
- [8] 赖文星, 邓忠民. 基于支配强度的 NSGA2 改进算法 [J]. 计算机科学, 2018, 45(6): 187-192.
- [9] YANG S X, LI M Q, LIU X H, et al. A grid-based evolutionary algorithm for many-objective optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2013, 17(5): 721-736.
- [10] ZHANG Q F, LI H. MOEA/D: a multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2007, 11

- (6): 712 – 731.
- [11] 郝志宽. 基于灵敏度分析及改进遗传算法的悬架优化和整车操纵稳定性分析 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- [12] 唐树祝, 游鹏, 闫大伟, 等. 基于改进 NSGA2 的临近空间通信网络优化设计 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14): 203 – 210.
- [13] 宋艳, 滕辰妹, 姜金贵. 基于改进 NSGA – II 算法的多级服务设施备用覆盖选址决策模型 [J]. 运筹与管理, 2019, 28(1): 71 – 78.
- [14] 李章晓, 宋微, 田野. 基于深度学习和进化计算的外汇预测与投资组合优化 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(1): 92 – 96.
- [15] YANG X S. Bat algorithm for multi-objective optimization [J]. Bio-inspired computation, 2012, 3(5): 267 – 274.
- [16] ZITZLER E, DEB K, THIELE L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results [J]. Evolutionary computation, 2000, 8(2): 173 – 195.
- [17] LI M Q, ZHENG J H. Spread assessment for evolutionary multi-objective optimization [C]//Proceedings of 5th International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Nantes: Springer, 2009: 216 – 230.

Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II Based on Dimensionality Perturbation

ZHANG Maoqing¹, LI Dongyang¹, HU Bo¹, WANG Lei¹, CUI Zhihua², GUO Weian³

(1. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Shanxi 030024, China; 3. Sino-Germany College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) was a classical multi-objective optimizer. However, the strategy of tournament selection employed in NSGA-II could produce a large amount of repeated individuals and further decrease the diversity of population, resulting in degrading the overall performance. To tackle this problem, this paper proposed NSGA-II based on Dimensionality Perturbation. Firstly, perturbation parameter was introduced, and then it was further used to modify each dimensionality of the parent individuals to do crossover operator. After that, the modified parent individuals did the crossover operator as usual to avoid generating the repeated offspring individuals. To verify the effectiveness of the proposed algorithm, ZDT test suit was employed as benchmark problems. Compared to the state-of-art algorithms, the proposed algorithm was capable of effectively improving the performance of NSGA-II, thus demonstrating the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: NSGA-II; multi-objective optimization algorithm; tournament selection; dimensionality perturbation

基于自适应主成分分析的化工过程在线监测

吕照民¹, 周 革², 苗 晨³

(1. 上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620; 2. 上海机电工程研究所, 上海 201109; 3. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘 要: 当主成分分析(principal component analysis, PCA)应用于过程监测时,不适当的成分选择方法会导致变异特征被分散或被淹没从而影响监测性能。针对这个问题提出了成分的自适应选择方法并用于过程监测,即自适应主成分分析(adaptive principal component analysis, APCA)。自适应主成分应用于过程监测时主要包括 3 个步骤:首先,在离线建模时基于载荷矩阵通过欧氏距离计算各个成分的相似性,并基于每个成分选出与其相似性较高的成分构成多个成分子空间;其次,在线监测时基于在线样本的各成分通过核密度估计计算各个成分的变异概率,选择出变异概率最高的成分作为特征成分;最后,挑选出与特征成分对应的成分子空间,并构造 T^2 统计量。通过数值仿真案例和田纳西伊斯曼(tennessee eastman, TE)过程证明了提出方法 APCA 的有效性。

关键词: 过程监测; 主成分分析; 子空间; 自适应

中图分类号: TP277

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.006

0 引言

在现代工业中,过程监测是一种被广泛采用的提高过程安全性和产品质量的技术。由于分布式控制系统(distributed control system, DCS)的广泛应用,大量的数据被采集,多元统计过程控制(multivariate statistical process control, MSPC)方法发展迅速^[1]。

PCA 作为最基本的 MSPC 方法,已有很多研究成果。然而,如何选择主成分并利用主成分信息进行监测仍然是一个开放的问题。主成分选择中使用最广泛的方法是累计方差贡献率法(cumulative percentage variance, CPV),选择具有较大方差的成分来构造主成分空间,剩余具有较小方差的成分构成残差空间^[2]。不过这种方法不是以过程监测为目的设计出来的,故障发生时表现出的变异性不一定体现在方差信息较大的主成分,在主成分空间和残差空间都有可能体现,这会引起变异特征信息分散,而且每个子空间内的大量正常信息可能淹没变异特征信息。

已经有许多研究人员专门为过程监测提出了

选择主成分的方法。Jiang 等^[3]提出了一种敏感 PCA(sensitive principal component analysis, SP-CA)方法,该方法直接检测每个主成分上 T^2 统计量的变化率,并在线选择 T^2 统计量变化率较大的主成分作为敏感主成分进行过程监测。Jiang 等^[4]提出了一种实时重组的 PCA 模型,通过核密度估计在线评估主成分的变异性,将具有故障检测的主成分集中到一个子空间进行监测。这两种方法客观地将大部分变异特征信息集中到一个子空间,不过只集中了变异性较大的主成分,忽略了变异性小的主成分,而部分变异性小的主成分也是有利的故障监测的。Jiang 等^[5]提出了一种数据驱动的多块 PCA 方法,该方法利用互信息(mutual information, MI)自动划分块,每个变量块通过支持向量数据描述(support vector data description, SVDD)监测,并将全部块中的结果集成在一起。Tong 等^[6]根据变量与主成分子空间和残差子空间的相关性或不相关性,将变量分成 4 个子空间,提出了一种 4 子空间贝叶斯(four-subspace construction and Bayesian inference, FSCB)监测方法。江伟等^[7]提出了一种基于混合分块 DMICA-

收稿日期:2018-12-30; 修订日期:2019-03-11

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(61703275);上海市青年科技英才扬帆计划(18YF1409200);上海工程技术大学人才计划项目——展翅计划。

作者简介:吕照民(1990—),男,内蒙古兴安盟人,上海工程技术大学讲师,博士,主要从事机器学习研究, E-mail: zhaomin_lv@sues.edu.cn。

PCA 的过程监控方法。该方法先利用已知的部分过程知识对变量初步分块, 再利用各分块变量之间改进的广义 Dice's 系数 (modified general dice's coefficient, MGDC) 进行进一步的分块。然后采用 DMICA-PCA 方法对每个子块进行建模, 通过加权方法求得总的联合指标进行监测。这些多块方法通常分解过程变量空间或成分空间, 以简化监测过程变量间的复杂度。

PCA 模型中载荷矩阵的向量体现了变量对主成分的影响, 将其定义为对应主成分的特征向量。如果对主成分有重要影响的过程变量发生变异, 相应的主成分也会具有变异特征, 因此, 具有相似特征向量的主成分具有相似的变异特征, 将它们集中在同一子空间中监测有利于减少变异特征的分散。而在离线状态下选择的主成分不能保证具有变异特征, 因此, 根据在线信息选择具有变异特征的主成分作为特征成分并与其具有相似变异特征的主成分集中监测可以提高监测效果^[8]。笔者提出一种在线自适应挑选主成分的方法即自适应主成分分析方法 (APCA)。首先利用载荷矩阵计算各成分与其余成分间特征向量的欧氏距离, 为每个成分选择出与其欧氏距离较小的成分构成该成分的成分子空间; 其次通过核密度估计计算出在线成分的变异概率, 挑选变异概率最高的主成分作为 CC; 最后利用 CC 对应的子空间进行监测。

1 基于 PCA 的过程监测

PCA 是应用最广泛的多变量过程监测算法。过程的数据矩阵表示为 $X \in \mathbf{R}^{n \times m}$ (n 为样本个数, m 为测量变量个数), 先对该数据矩阵进行归一化处理, 然后利用 PCA 方法建立模型, 可以表示为^[9]:

$$X = \tilde{T}\tilde{P}^T + \hat{T}\hat{P}^T = \tilde{T}\tilde{P}^T + E, \quad (1)$$

式中: \tilde{T} 、 \tilde{P} 为主成分得分和其载荷矩阵; \hat{T} 、 \hat{P} 为残差得分和其载荷矩阵; E 为 PCA 残差矩阵; \tilde{T} ($n \times k$) 中包含 k 个主成分个数, 选取主成分可采用累积方差贡献率法。通过对 X 的协方差矩阵进行特征值或者奇异值分解可以得到主成分得分、残差得分和相应的载荷矩阵, 即

$$\Sigma = X^T X / (n - 1); \quad (2)$$

$$\Sigma = [\tilde{P}\hat{P}]A[\tilde{P}\hat{P}]^T; \quad (3)$$

$$\tilde{T} = X\tilde{P}; \quad (4)$$

$$\hat{T} = X\hat{P}; \quad (5)$$

$$A = \text{diag } \lambda_i, \quad (6)$$

式中: λ_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 为协方差矩阵的 m 个特征值, 也就是主成分得分矩阵 \tilde{T} 和残差得分矩阵 \hat{T} 每列的方差。经过 PCA 分解之后, 原来的 m 维变量空间就被 k 维主成分空间和残差空间所代替。对于数据样本 x , 主成分空间的 T^2 统计量可以构造为:

$$T^2 = x^T \tilde{P} (\tilde{P}^T \tilde{P})^{-1} \tilde{P}^T x. \quad (7)$$

残差空间的 SPE 统计量被构造为:

$$e = x - x\tilde{P}\tilde{P}^T; \quad (8)$$

$$SPE = e^T e, \quad (9)$$

式中: e 是残差向量。

T^2 和 SPE 统计量的控制限为:

$$T_{lim}^2 = \frac{k(n-1)}{n-k} F_{k, (n-k), \alpha}; \quad (10)$$

$$SPE_{lim} = g\chi_{h, \alpha}^2; \quad (11)$$

$$g = \frac{v}{2a}; \quad (12)$$

$$h = \frac{2a^2}{v}, \quad (13)$$

式中: α 表示显著水平; a 和 v 分别表示样本 SPE 的均值和方差^[10]。

2 基于 APCA 的过程监测

具有相似特征向量的主成分有相似的变异特征, 应将其集中到一个子空间。基于 APCA 的过程监测以此建立多个成分子空间模型, 根据在线信息挑选变异概率最高的主成分作为 CC, 以 CC 对应的成分子空间作为 ACS (adaptive component space, ACS) 构造 T^2 统计量进行监测。本节对所提方法进行了详细描述。

2.1 APCA 方法

2.1.1 子空间模型

假设有历史正常数据 $X \in \mathbf{R}^{n \times m}$, 其中 n 是每个变量的样本数量, m 是过程变量的数量。对过程数据 X 进行归一化处理后, 利用奇异值分解得到主成分:

$$T = [t_1, t_2, \dots, t_m]。 \quad (14)$$

$P \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为载荷矩阵, 载荷矩阵 P 每一列都是载荷向量, 可以表示为:

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_m]。 \quad (15)$$

采用主成分载荷向量之间的欧氏距离 d 来度量相似程度;

$$d_{ij} = (p_i - p_j)^T (p_i - p_j); \quad (16)$$

$$\bar{d}_i = \frac{\sum_{j=1}^m d_{ij}}{m}, \quad (17)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m; d_{ij}$ 表示第 i 和第 j 个主成分的欧氏距离; \bar{d}_i 为第 i 个主成分与其余主成分的欧氏距离的平均值。子空间设计结果为:

如果 $d_{ij} \leq \bar{d}_i$,

$$\text{那么 } t_j \in A_i, p_j \in \bar{P}_i, \quad (18)$$

式中: t_j 为第 j 个成分; A_i 为第 i 个子空间; \bar{P}_i 为第 i 个子空间的载荷矩阵。

2.1.2 特征成分的选择

为选出具有变异特征的主成分,利用核密度估计每个主成分的变异概率,挑选变异概率最高的成分作为特征成分。具体如下:

对于在线数据样本 $x \in \mathbf{R}^{m \times 1}$, 进行归一化处理后,映射到主成分空间得到在线主成分得分 $\bar{T} \in \mathbf{R}^{m \times 1}$, 利用主成分 T 通过核密度估计可求出在线样本各个主成分概率密度 $\hat{f}(\bar{T}_i)$:

$$\hat{f}(\bar{T}_i) = \frac{1}{n} \frac{1}{h \sqrt{2\pi}} \sum_{j=1}^n \exp\left(-\frac{T_{ij} - \bar{T}_i}{2h^2}\right). \quad (19)$$

根据当前样本每一主成分对应的概率密度,计算第 i 个成分对应的变异概率 f_i 和主成分的变异概率 f :

$$f_i = [1 - \hat{f}(\bar{T}_i)] \times 100\%; \quad (20)$$

$$f = [f_1, f_2, \dots, f_m]. \quad (21)$$

选取变异概率最大的主成分作为特征成分 C_C :

$$\text{如果 } f_\alpha = \max(f_1, f_2, \dots, f_m),$$

$$\text{那么 } C_C = t_\alpha. \quad (22)$$

2.1.3 构造 T^2 统计量

在线信息的变异特征主要集中在 ACS 中,构造 T^2 统计量用于监测工业过程。特征成分对应的自适应子空间为 A_α , P_α 为自适应子空间 A_α 的载荷矩阵。 T^2 统计量构造如下:

$$T^2 = A_\alpha^T P_\alpha (\Lambda)^{-1} P_\alpha^T A_\alpha. \quad (23)$$

2.2 方法实现

离线建模:

(1) 得到正常运行观测数据 $X \in \mathbf{R}^{n \times m}$, 通过各变量的均值和方差对其进行归一化。

(2) 对归一化后的数据进行 PCA 分解。

(3) 利用载荷矩阵计算各成分间载荷向量的欧氏距离来表示各主成分间的相似程度。

(4) 为每个主成分挑选相似特征向量的主成分,并建立子空间模型。

在线监测:

(1) 使用训练数据的平均值和方差来归一化当前时间点数据,并将归一化后的当前数据映射到主成分空间。

(2) 通过核密度估计法计算每个主成分对应的概率密度,选概率密度小的成分为 CC。

(3) 挑选特征成分对应的子空间作为 ACS。

(4) 计算 ACS 的 T^2 统计量和 T^2 控制限。如果 T^2 统计量超出控制限,则表明当前数据发生故障,发出警报;否则当前数据正常,继续运行。

基于 APCA 的化工过程监测方法流程图如图 1 所示。

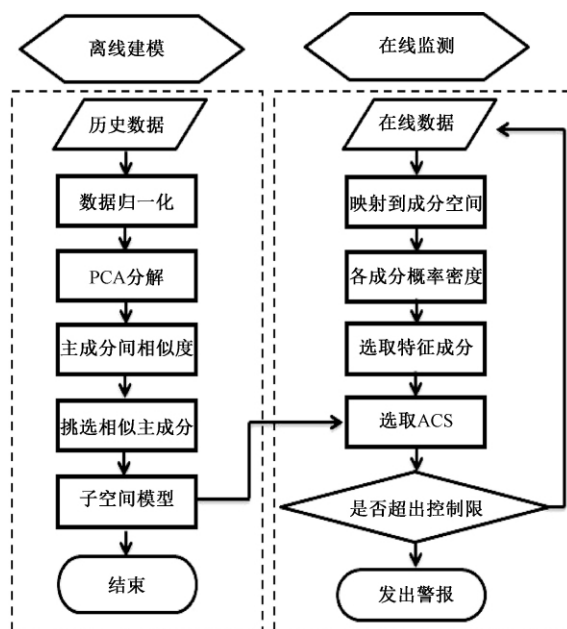


图1 APCA 过程监测流程图

Figure 1 APCA process monitoring flow chart

3 TE 仿真实验研究

TE 过程有 22 个过程变量和 12 个操作变量,还可以仿真模拟 21 种不同的故障类型^[11-12]。笔者选择其中的 33 个变量作为监测变量。为了性能评估,生成 21 个故障场景。每个故障场景有 960 个样本组成,故障场景中所有故障在 161 样本点引入^[13]。

分别利用 PCA 和 APCA 方法对 TE 过程的 21 种故障进行监测,计算漏报率,并与 SPCA 和 FSCB 进行比较,结果如表 1 所示,其中最小的漏报率已用黑体标出。其中,故障 1、2、4、6、7、8、12、13、14 中每种监控方法的检测率几乎相同,因为故障幅度非常大,以至于所有这些方法都可以检测到几乎 100% 的故障。而故障 3、9 和 15 监测难度太大,因此,这些故障在本研究中没有被考

虑。对于故障 5、10、16、19、20, 基于 APCA 的方法监测效果相对于其他方法有显著的提升。具体地, 故障 5、16、19 的详细监测效果分别在图 2、3、4 中给出。从图中可以看出, APCA 对这些故障有更高的灵敏度。

表 1 TE 过程 APCA、PCA、SPCA 和 FSCB 漏报率比较
Table 1 Comparison of missing alarm rates of APCA, PCA, SPCA and FSCB in TE process

编号	APCA	PCA	PCA	SPCA	FSCB
	T^2	T^2	SPE	T^2	BIC
1	0.001	0.007	0	0	0.002 5
2	0.008	0.017	0.01	0.006	0.018 7
3	0.806	0.937	0.966	0.734	—
4	0	0.688	0	0	0
5	0	0.722	0.755	0.578	0
6	0	0.006	0	0.004	0
7	0	0	0	0	0
8	0.012	0.026	0.058	0.011	0.021 2
9	0.811	0.947	0.973	0.748	—
10	0.078	0.543	0.585	0.343	0.186 2
11	0.133	0.518	0.233	0.095	0.280 0
12	0.001	0.015	0.065	0.003	0.002 5
13	0.033	0.057	0.047	0.040	0.052 5
14	0	0.005	0	0	0.001 2
15	0.717	0.915	0.940	0.671	—
16	0.040	0.700	0.583	0.406	0.135
17	0.025	0.200	0.043	0.023	0.056 2
18	0.087	0.101	0.097	0.074	0.102 5
19	0.07	0.855	0.765	0.495	0.168 7
20	0.087	0.575	0.435	0.193	0.196 2
21	0.353	0.593	0.466	0.336	0.527 5

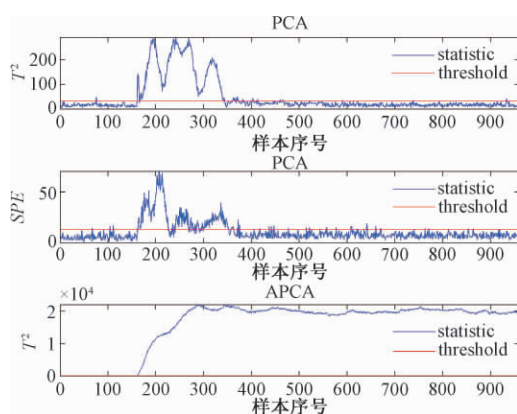


图 2 TE 过程中 PCA 和 APCA 对故障 5 的监测效果
Figure 2 Monitoring results of PCA and APCA for case 5 in TE process

4 结论

笔者提出一种在线自适应挑选主成分的过程监测方法——APCA。该方法离线建模时为每个

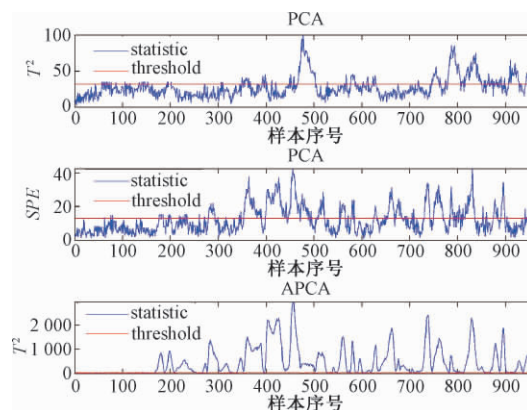


图 3 TE 过程 PCA 和 APCA 对故障 16 的监测效果
Figure 3 Monitoring results of PCA and APCA for case 16 in TE process

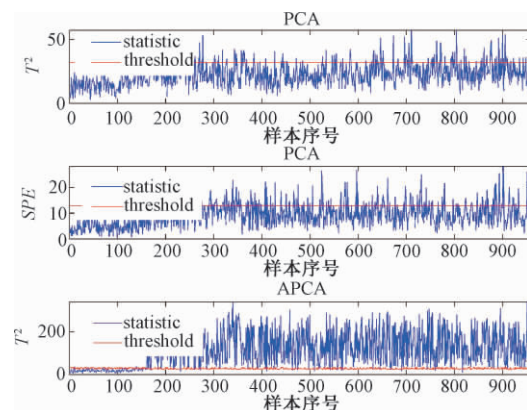


图 4 TE 过程 PCA 和 APCA 对故障 19 的监测效果
Figure 4 Monitoring effect of PCA and APCA on fault 19 in TE process

成分选出与其相似性较高的成分构成多个成分分子空间, 在线监测时实时选出变异概率最高的成分作为特征成分, 以特征成分对应的子空间进行监测。所提方法实时进行成分的自适应挑选, 降低了变异特征被分散和淹没的风险, 同时可以有效地集中有利于故障检测的变异特征。通过数值仿真案例和 TE 过程案例证明了 APCA 的漏报率较低, 具有较好的监测性能。未来的工作可以专注于开发一种确定主成分数量的策略, 并使所提出的方法适用于非线性和非高斯过程。

参考文献:

- [1] GE Z Q, SONG ZH, GAO F R. Review of recent research on data-based process monitoring[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2013, 52 (10): 3543–3562.
- [2] JACKSON J E. A user's guide to principal components [M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [3] JIANG Q C, YAN X F, ZHAO W X. Fault detection and diagnosis in chemical processes using sensitive

- principal component analysis [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2013, 52 (4): 1635 – 1644.
- [4] JIANG Q C, YAN X F. Just-in-time reorganized PCA integrated with SVDD for chemical process monitoring [J]. AIChE journal, 2014, 60(3): 949 – 965.
- [5] JIANG Q C, YAN X F. Plant-wide process monitoring based on mutual information-multiblock principal component analysis [J]. ISA transactions, 2014, 53(5): 1516 – 1527.
- [6] TONG C D, SONG Y, Yan YAN X F. Distributed statistical process monitoring based on four-subspace construction and bayesian inference [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2013, 52 (29): 9897 – 9907.
- [7] 江伟,王振雷,王昕. 基于混合分块 DMICA-PCA 的全流程过程监控方法 [J]. 化工学报, 2017, 68 (2): 759 – 766.
- [8] 吕照民. 基于数据驱动子空间设计的间歇过程监测 [D]. 上海: 华东理工大学 2017.
- [9] 葛志强. 复杂工况过程统计监测方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学 2009.
- [10] 葛志强, 宋热环. 基于 PICA 的过程监控方法 [J]. 化工学报 2008, 59(7): 1665 – 1670.
- [11] 童楚东, 蓝艇, 史旭华. 基于互信息的分散式动态 PCA 故障检测方法 [J]. 化工学报, 2016, 67(10): 4317 – 4323
- [12] 王振雷, 江伟, 王昕. 基于多块 MICA-PCA 的全流程过程监控方法 [J]. 控制与决策, 2018, 33(2): 269 – 274.
- [13] JIANG Q C, YAN X F. Plant-wide process monitoring based on mutual information-multiblock principal component analysis [J]. ISA transactions, 2014, 53(5): 1516 – 1527.

Online Monitoring of Chemical Process Based on Adaptive Principal Component Analysis

LYU Zhaomin¹, ZHOU Ge², MIAO Chen³

(1. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Electro-mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 3. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: When Principal Component Analysis (PCA) was applied to process monitoring, improper component selection method would cause variation characteristics to be dispersed or submerged, thus affecting monitoring performance. In order to solve this problem, An adaptive selection method of components called Adaptive Principal Component Analysis(APCA) was proposed and applied it to process monitoring. The application of adaptive principal components to process monitoring mainly included three steps. Firstly, the similarity of each component was caculated based on the load matrix through Euclidean distance during offline modeling, and components with high similarity to each component was selected to form multiple molecular spaces. Secondly, during on-line monitoring, the variation probability of each component was calculated by kernel density estimation based on each component of the on-line sample, and the component with the highest variation probability was selected as the characteristic component. Finally, the molecular space corresponding to CC was selected and statistics were constructed. The result of numerical simulation and Tennessee Eastman (TE) process proved the effectiveness of the proposed APCA.

Key words: process monitoring; principal component analysis; subspace; adaptive

基于进化计算的特征选择方法研究概述

王艳丽¹, 梁 静¹, 薛 冰², 岳彩通¹

(1. 郑州大学 电气工程学院 河南 郑州 450001; 2. 新西兰惠灵顿维多利亚大学 工程与计算机学院 新西兰 惠灵顿 6140)

摘 要: 特征选择是数据挖掘和机器学习中的一项重要任务,能够降低数据的维度,提高学习算法的性能。进化计算算法通过模拟自然界生物进化机制完成搜索问题的最优解决方案,近年来在特征选择问题中得到了广泛应用,并取得了一定的成功。首先介绍了特征选择的基本框架;然后从进化计算特征选择方法的搜索机制、子集评价策略和目标函数等方面进行了分析和总结;最后讨论了当前基于进化计算的特征选择方法面临的问题和挑战以及未来进一步的研究方向。

关键词: 分类; 进化计算; 特征选择

中图分类号: TP18

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.026

0 引言

随着大数据时代的到来,数据挖掘和机器学习成为研究热点,并受到了国内外研究人员的广泛关注。特征选择(feature selection, FS)是从一组初始特征中挑选出一些具有代表性的特征以降低特征空间维数的过程,是数据挖掘和机器学习的关键问题之一。对于数据挖掘和机器学习,一个好的学习样本是训练分类器的关键,样本中是否包含有不相关或冗余特征直接影响着分类器的性能。特征选择的目的是寻找解决问题所必须的、足够的最小特征子集。通过从原始特征集中剔除不相关和冗余特征以减少数据的维数,加速学习过程,简化学习模型和提高学习算法的性能^[1]。有效的特征选择方法是找到一个最优的特征子集的关键。

现实中的数据集通常由一组特征描述,这些特征包含许多信息,但也引入了冗余和噪声。随着数据维度的增加,搜索空间增大,选择最优特征子集变得尤为困难。比如对于一个有 n 个特征的数据集,特征子集的个数就有 2^n 个^[1]。随着问题复杂性的增加,许多领域数据的特征维度都在逐渐增加,特征选择变得更具挑战性。在大多数情

况下,穷举搜索给定数据集的最优特征子集几乎是不可能实现的。目前已有许多搜索技术应用于特征选择,如完全搜索、贪婪搜索、启发式搜索和随机搜索^[1-2]。现有的搜索技术在特征选择上取得了较大的成功,但大多数方法容易陷入局部最优,并且计算成本较高^[3]。因此,需要一种有效的全局搜索技术来更好地解决特征选择问题。

进化计算(evolutionary computation, EC)算法通过模拟自然界生物进化机制,在一些可行解组成的种群中,通过迭代进化寻求最优解。EC技术因其强大的全局搜索能力和潜力备受研究者的关注,近年来更是广泛应用于特征选择问题。然而,现有的文献对近些年EC在特征选择上的应用缺乏全面而系统的讨论。基于此,笔者对EC在特征选择上应用的相关文献进行了分析和总结,给感兴趣的研究人员提供一些参考。

1 特征选择的基本框架

特征选择是从数据集特征的所有组合组成的搜索空间中选择相关特征子集的过程^[2]。迄今为止,许多研究者从不同的角度对特征选择进行定义。Koller等^[4]从传统的角度定义,给定 n 个原始特征,特征选择的任务是从所有大小为 m 的

收稿日期:2019-08-11; 修订日期:2019-11-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61922072, 61876169; 61673404); 河南省高等学校重点科研项目(20B120002) 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目

通信作者: 梁静(1981—),女,河南郑州人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事进化计算理论与应用研究,
E-mail: liangjing@zzu.edu.cn。

特征子集中($m < n$)选择评价函数具有最佳适应度的一个特征子集。Narendra 等^[5]分别从提高预测精度和分布角度定义,在保证结果类分布与原始数据类分布尽可能相似的前提下,选择尽量少的特征,并且从所选择的特征中学习得到分类器的预测精度不会显著降低。Kira 等^[6]定义理想情况下,特征选择是寻找必要的、足以识别目标的最小特征子集。Dash 等^[1]定义,在满足不显著降低分类性能和改变分类分布的条件下,选择尽量小的特征子集。上述不同研究者定义特征选择的出发点不同,各有侧重点,但是目标都是寻找一个能够准确识别目标概念的最小特征子集。Dash 等^[1]给出了特征选择的一般过程,如图 1 所示。

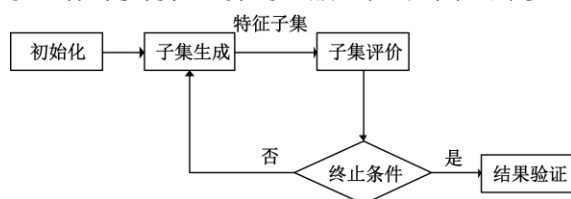


图 1 特征选择的基本框架

Figure 1 Basic framework of feature selection

从图 1 可以看出,在特征选择中,搜索机制和评价准则是影响最终特征子集质量的重要因素。

传统的特征选择方法可以分为:过滤式(filter)^[7]、封装式(wrapper)^[8]和嵌入式(embedded)^[9]。过滤式方法先对数据集进行特征选择,然后再训练学习器,一般直接采用所有训练数据的统计性能评估特征,速度快,但缺少学习算法的引导导致分类性能相对较低。封装式方法利用学习算法的训练精度作为特征子集的评价准则,偏差小,但是计算量大。嵌入式方法是将特征选择过程嵌入到学习过程中,特征选择过程和学习器训练过程同步进行,因此花费时间大幅减少,但不适合处理含有大量噪声特征的数据。集成(ensemble)^[10]是近几年发展起来的一种新的学习方法,应用于特征选择问题,目的是获取多个最优特征子集,并聚合基于多个最优特征子集的学习结果。

与传统方法相比,基于种群的 EC 算法能并行搜索多个解,利用计算机技术自动搜索解决方案,不需要问题领域先验知识。基于这些优点,EC 在特征选择上获得较大成功^[11]。EC 在特征选择上的应用研究始于 1990 年左右,但是自 2007 年以来,随着许多领域的特征数量逐渐增多,EC 技术以其强大的全局搜索能力而受到特征选择领域的广泛关注。如图 2 所示。

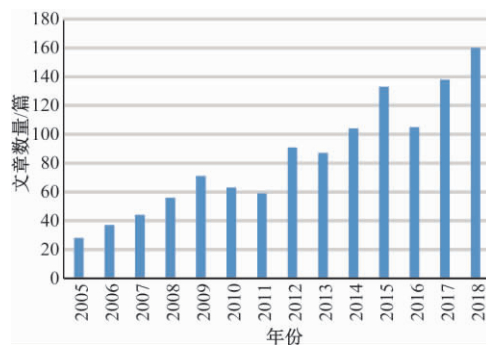


图 2 进化计算用于特征选择的论文数量

Figure 2 Number of papers on EC for feature selection

图 2 显示 EC 算法在特征选择上应用的论文数量(数据来源 Web of Science 2018.12),这表明自 2007 年以来,进化计算在特征选择上的应用呈整体增长趋势。笔者对进化计算在特征选择上的代表性研究工作进行讨论,并对进化计算在单目标、多目标特征选择上的研究工作分别进行详细的介绍。

2 基于进化计算的单目标特征选择

2.1 特征选择的目标和个体表达

特征选择的目的是通过从原始特征集中删除不相关和冗余的特征找到解决分类问题所必需和充分的最小特征子集。特征选择有两个主要目标:最大化分类性能和最小化选择特征的数量。

实际操作过程中,常用问题解的编码有连续和二进制两种表示方法,具体如下:连续表示指一个含有 n 个实数的向量,其中 n 是数据集中可用特征的个数或搜索空间的维数。每个个体 i 的位置向量值 x_{id} 与设定的阈值 θ 进行比较。如果 $x_{id} > \theta$,则特征 d 被选择;否则,特征 d 未被选择。每个个体采用二进制字符串“0”和“1”表示,“1”表示个体对应的特征被选择,“0”表示未被选择。

2.2 基于进化算法的特征选择

进化算法包括遗传算法(genetic algorithms, GA)、遗传规划(genetic programming, GP)、进化规划(evolution strategies, ES)和进化策略(evolution programming, EP)等。目前,遗传算法和遗传规划被广泛应用于特征选择中,以寻找最优特征子集。

2.2.1 遗传算法

GA 算法^[12]是模拟达尔文生物进化论的自然选择和自然界生物进化过程演化而来的随机搜索最优解的方法。Siedlecki 等^[13]采用 GAs 解决特

征选择问题,首次把 EC 技术应用到特征选择问题中。为了提高算法性能,研究者对 GAs 进行了许多不同的改进,主要集中在搜索机制、个体表达和评价机制等方面。

传统的 GAs 由于遗传算子简单,降低了种群的多样性。当搜索空间很大时,GAs 容易快速收敛而陷入局部最优。为了避免这一问题,Li 等^[14]提出一种多种群 GAs 的特征选择方法,即相邻种群通过共享两个个体来交换信息,以提高种群的搜索能力。此外,对每个种群中的最优个体进行局部搜索,进一步提高算法性能。但是该方法仅在特征维数小于 60 的数据上是有效的。Lin 等^[15]提出了一种新的基于 GAs 的特征选择方法,该方法首先利用先验知识对相似特征进行分组,并对同一组中的所有特征进行排序,然后采用 GAs 从每个组中搜索出最优特征子集。近年来,GAs 也被应用在分层特征空间中选择特征^[16]。该算法提出了两种新的变异算子处理分层空间中的冗余特征。最近基于 GA 的特征选择方法被广泛用于解决实际问题^[17-18]。

Hong 等^[19]提出一种二进制向量表示每个个体,首先二进制位预先定义的小数被转换为整数,表明对应的特征被选择与否。该算法有效地降低数千特征的高维数据集上 GA 搜索空间的维度。同时,在算法中引入“透明适应度共享”伸缩机制以避免 GA 在搜索过程中出现早熟。通过分界线的动态变化来增加其他个体的选择机会,并打散个体的分布以保持种群的多样性。Chen 等^[20]提出一种改进的二进制表示方法,该方法包括两部分:第一部分被转换为整数,表示被选择特征的数量;第二部分显示哪些特征被选择。该方法的缺点是需要预先定义特征的数量,但可能不是最佳大小。针对这一问题,Yahya 等^[21]开发了一种长度可变的表示方法,每一个个体只显示所选择的特征,并且不同的个体可能具有不同的长度,提出了一种新的遗传算子来处理长度可变表示问题。

OA Silva 等^[22]将分类精度和特征个数聚合成一个适应度函数。Winkler 等^[23]考虑特征个数、分类性能、分类特定精度以及利用所有初始特征的分类精度等提出了几个适应度函数。Sousa 等^[24]利用贝叶斯分类器接收工作特性曲线下面积作为适应度函数。

2.2.2 遗传规划

GP 算法^[25]是一种基于种群的进化计算算法,在特征选择中,GP 算法具有灵活的表示形式,

每个个体表示为一棵树,每棵树的所有叶节点都是原始特征,但只有一个叶节点特征被认定是选择的特征。

Sherrah 等^[26]首次将 GP 算法用于特征选择问题,该算法采用广义线性机作为分类器来评价所选特征的适应度。随后,Neshatian 等^[27]提出一种基于 GP 的封装式特征选择方法,采用改进的贝叶斯算法进行分类。该算法采用位掩码编码表示特征子集,算子集作为基本函数,利用 GP 将特征子集和算子集进行组合,获得最优特征子集。Hunt 等^[28]提出一种新的 GP 超启发式特征选择方法,开发两个去除和添加特征的函数算子。Viegas 等^[29]提出一种处理平衡和不平衡数据的策略,GP 算法中的每个内部节点表示一个集合算子,每个叶节点表示一个原始特征,每个树的输出是一组特征。结果显示,该算法在不降低分类性能的前提下,可以有效地减少生物数据集 98% 的特征。

进化算法应用于特征选择问题已有 30 多年的历史,并在数百个特征问题上显示出了较好的性能。然而对于数千特征的问题,进化算法的效果并不是很理想。因此,使用进化算法来处理这一问题,需要一种新的表示来减少搜索空间的维数。遗传算子的设计,如交叉和突变,提供了辨别好的特征组及组合或调整互补特征以找到最优特征子集的机会,但这是一项具有挑战性的任务。

2.3 基于群集智能的特征选择

群集智能算法是人们受自然规律或生物界规律的启发,模仿某些规律而设计的求解实际问题的一类算法,它将复杂任务交给群体中大量的个体合作完成,具有概念简单、实现方便的特点。基于这些优点,群集智能算法求解特征选择问题受到了国内外研究者的广泛关注^[11]。群智能算法包括蚁群优化 (ant colony optimization, ACO)、粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)、差分进化 (differential evolution, DE)、人工蜂群算法 (artificial bee colony, ABC) 等^[30]。

Xue 等^[31]在 PSO 搜索过程中设计了新的初始化策略模拟典型的前向和反向特征选择方法。结果表明,新的初始化策略显著提高 PSO 特征选择的性能。PSO 中开发新的个体表示用于特征选择的工作较少,研究者主要对典型表示进行微小的修改,同时用分类算法进行特征选择和参数优化,工作主要集中在对支持向量机核函数中的参数进行优化^[32-35]。PSO 中新的个体表示长度等于特征总数,主要有 3 种不同编码方式:连续编

码^[32]、二进制编码^[33]和二进制和连续编码的混合^[34-35]。PSO最初被提出用于连续优化,因此连续编码比其他两种编码方案具有更好的性能。

Vieira等^[33]提出新的PSO粒子表示方法,并同时进行了特征选择和SVM核参数优化。该方法中每个粒子对应一个初始特征或内核参数,表示长度等于特征个数和内核参数个数的和。结果显示,所提算法比其他二进制PSO特征选择算法具有更好的分类性能,选择的特征子集远小于GA算法。Lane等^[36]提出了采用PSO和统计聚类方法解决特征选择问题,将来自于相同簇的特征分配到一起,然后从每一簇中仅选择一个特征,该方法显著减少了所选特征的数量。随后,Lane等^[37]进一步采用高斯分布从每个簇中选择多个特征改进了算法,提高了分类性能。Nguyen等^[38]提出每一个个体的维度由期望的最大特征数目确定,该方法确定的个体维度远远小于典型解的代表维度,但是难点在于如何确定期望的特征数量。Tran等^[39]提出粒子长度可变表示,从而定义了较小的搜索空间,提高了PSO算法的性能。利用变长机制,PSO可以跳出局部最优,进一步缩小搜索空间。

早熟收敛是PSO面临的一个典型问题,容易使种群陷入局部最优。为了避免这一问题,Chuang等^[40]提出在有限次迭代中,最佳适应度值不变,将 g_{best} 置零的重置机制。随后,Tran等^[41]将 g_{best} 重置机制与 p_{best} 局部搜索结合,通过被改变的特征来计算适应度,加快局部搜索中的评价。Cheng等^[42]在所提的PSO算法中,去掉了 g_{best} 和 p_{best} ,以避免PSO的过早收敛。通过粒子之间的竞争,获胜者直接进入新的种群。失败者向获胜者学习,根据获胜者的位置更新它们的位置,然后进入新的种群。该算法被称为竞争群优化算法,适用于大规模优化问题。随后,Gu等^[43]将这种改进的PSO算法应用于特征选择问题。

适应度函数在PSO特征选择中起着重要的作用。对于过滤式方法,适应度函数通过使用不同的度量方法确定。而封装式方法,许多现有的工作使用分类性能作为适应度函数^[3,40],导致特征子集相对较大。然而,大多数适应度函数采用不同的方式将分类性能和特征数相结合组成为一个适应度函数^[34,44]。但是,如果没有先验知识,很难预先确定它们之间的最佳平衡。多目标特征选择可以同时优化这两个目标以获得一组折中解,从而有效地解决这一问题。

2008年以来DE一直被应用于解决特征选择问题。大部分工作主要集中在改进DE的搜索策略和表示方法。Khushaba等^[45]提出将DE用于搜索ACO得到的特征子集的最优解的混合特征选择方法。Ghosh等^[46]提出采用自适应DE算法用于生成特征子集。随后,Khushaba等^[47]将每个个体作为一个浮点数向量,并预先定义向量的长度,提出一种新的编码方案。此外,研究表明,DE在大规模优化方面也取得了成功^[48],但对于特征数量较多的高维问题,还面临一些困难。

Hancer等^[49]将基于相似性的进化搜索机制引入到现存的二进制ABC版本中,提出了新型二进制ABC算法用于特征选择问题。模因算法将基于种群的搜索和局部搜索结合,为封装式和过滤式方法提供好的机会。因此,在大多数模因特征选择方法中,封装式特征选择采用进化计算技术,过滤式特征选择采用局部搜索算法。

总之,群集智能算法在特征选择方面得到了迅速的发展。然而,作为一种种群优化方法,群集智能用于特征选择效率是有限的。开发新的PSO算法,特别是新的搜索机制、参数控制策略以及大规模特征选择的表示,仍然是一个有待解决的问题。

2.4 基于协同进化的特征选择

协同进化(cooperating coevolution,CC)是进化计算领域的一种技术,从分治策略发展而来,其思想是首先将复杂的问题划分成多个简单子问题,然后对每个子问题应用算法进行求解,最后将子问题的解合并得到原问题的解。协同进化策略可以嵌入到多种进化算法中,具有很好的鲁棒性,已成功应用到许多大规模的组合问题中^[50]。Derrac等^[51]提出一种基于3种群遗传算法的协同进化特征选择算法。算法将特征选择和实例选择同时放在一个过程中,减少了计算时间,对具有大量特征及噪声实例的数据集效果显著。随后,Derrac等^[52]进一步采用协同进化,对特征和实例进行数据降维,提出了一种最近邻分类特征选择和实例选择的进化模型。Ebrahimipour等^[53]提出一种新的基于全局搜索(利用分治策略)的特征选择方法。该方法利用协同进化概念,在特征维度上以随机方式垂直划分数据集,使用过滤式准则以二元引力搜索算法搜索解空间。

2.5 基于多模态的特征选择

在实际问题中,决策者希望得到多个全局或局部最优解,必要时可以在多个最优或次优解之

间快速切换以保证系统正常稳定运行^[54]。这类需要同时保留多个全局最优或局部最优解的问题属于多模态优化(multimodal optimization, MO)问题^[55]。如机器学习中的分类问题^[56]、特征选择问题^[57]等。

Kamyab等^[58]研究了多模态优化技术在特征选择问题中的应用效果。提出了基于动态适应度共享(dynamic fitness sharing, DFS)、局部最优粒子群算法(local best PSO)和GA_SN_CM等现有进化算法的二进制版本,用于从多个基准数据集中选择合适的特征。特征选择本质上是一个高维优化问题,需要一个具有较高探索能力的求解器。另一方面,如果可以为问题提供可选的最优解方案,则根据问题领域的成本和限制,实现阶段会变得更具有选择性。MO方法具有较强的探索能力和解的保存能力,能够在一次运行中找到多个合适的解。因此,MO方法可以被认为是寻找适合特征选择问题的特征子集的有力工具。

3 基于进化计算的多目标特征选择

在许多实际问题中,需要同时优化两个或两个以上相互冲突的目标,优化其中一个目标值,会导致其他目标值的恶化,这类问题被称为多目标优化问题^[59]。对于多目标优化问题,无法找到单个解使它的每个目标都达到最优。在这种情况下,进化算法能够帮助决策者找到多个目标之间最好的折中解集。

GA在实现多目标特征选择方面也得到了广泛的应用,但大多数都是基于非支配排序的GA II(NSGA-II)或其变体^[60-62]。Mukhopadhyay等^[60]利用NSGA-II和支持向量机(SVM)提出识别微小RNA标记物的多目标的特征选择方法。Vignolo等^[63]应用多目标遗传算法(MOGA)选择人脸识别中最相关的一组特征。通过对多个可行选择空间的探索,使特征子集的基数最小化,同时最大化特征子集的识别能力。结果显示,MOGA得到的解选择的特征较少,但精度与单目标GA相近。Neshatian等^[64]针对二分类问题,提出基于GP的多目标过滤式特征选择方法。与大多数只能测量单个特征与类标签相关性的过滤式方法不同,该算法能够发现特征子集和目标类别之间的隐藏关系,从而获得更好的分类性能。

近年来,DE也被应用于多目标特征选择^[65]中,并将非支配解排序应用到种群搜索中,研究者提出的多目标方法在分类性能和特征个数上都优

于单目标方法所获得的特征子集。Hancer等^[66]将ReliefF和FisherScore两个过滤式准则结合起来作为排序度量标准,归一化交互信息作为相关性度量标准,并将这两种度量方法视为两个相互冲突的目标。结果表明,该算法获得较小的特征子集,且分类精度高于使用所有特征。DE虽然成功应用于解决特征选择问题,然而与PSO相比,应用DE的特征选择算法文章仍然较少。此外,研究显示,DE在应用于高维问题时还面临一些困难^[67]。

Xue等^[68-69]首次将MOPSO应用于特征选择上,把分类性能和特征数量作为多目标优化问题的目标函数进行求解,并将连续和二进制PSO算法在多目标特征选择上的性能进行了对比。结果表明,MOPSO在特征选择问题上优于NSGA-II等。Xue等^[70]以最小化特征数量,最大化所选特征和类标签之间的相关性为目标,提出基于MOPSO的过滤式特征选择方法。结果显示,与单目标特征选择方法相比,该算法具有更高的分类性能。随后,Nguyen等^[71]通过引入插入、删除和交换局部搜索机制提出了基于改进多目标PSO算法的特征选择方法。该算法可以选择数量较少的特征,并获得很好的分类性能。

目前大多数的多目标特征选择算法采用基于帕累托(Pareto)支配的算法,这些算法通常集中在Pareto前沿的中心。针对这一问题,Paul等^[72]将类间距离和类内距离度量作为两个相互冲突的目标,利用模糊规则从最终的Pareto前沿提取单个解,提出一种MOEA/D过滤式特征选择算法。

在EC技术中,GA算法的多目标算法是最受欢迎的,但是这些工作只是简单地应用GA而不考虑特征选择的特点^[11],因此对GA进行多目标特征选择还需要进行深入的研究。

4 总结与展望

近年来,进化计算技术较为广泛地应用于特征选择并取得了较大的成功。特征选择也已成为EC的一个重要应用领域。通过归纳已有研究工作,将未来EC技术在特征选择上的研究问题归纳如下。

(1) 随着数据规模越来越大,许多领域的特征数量达到数千甚至数百万,增加了计算成本。然而,仅靠通过增加计算能力是无法解决的,这就需要先进的搜索机制。现有的基于进化计算的大规模特征选择方法大多采用两阶段方法,第一阶

段采用度量方法对单个特征进行相关性评价,然后根据相关性值对其进行排序。只有排名最靠前的(更好的)特征才会被用作第二阶段的输入,进一步从中选择特征。但是,第一阶段删除了排名较低的特征,并未考虑它们与其他特征的交互。为了解决这一问题,需要新的搜索算法和新的评价措施。

(2) 大多数特征选择方法由于涉及大量的评价,计算成本较高,是进化计算在特征选择上的一个关键问题。为了降低计算成本,需要高效搜索技术和快速评估措施。目前的方法中,评价过程占据了大部分的计算成本。因此,快速评价准则比搜索技术影响更大。进化计算的可并行性适合于网格计算、图形处理单元和云计算,可以用来加速评价过程。

(3) 特征选择本质上是组合优化问题,随着特征维数的增加会导致“维数灾难”,传统的穷举法容易陷入局部最优,因此需要一种强大的全局搜索技术。EC 算法是一种随机方法,使用不同的起始点可能产生不同的解,即使解的适应度值相同,也可能选择不同的个体特征。这就要求新的搜索机制应具有稳定性。然而,算法的稳定性不仅涉及适应度值的差异,还涉及所选特征的一致性。因此,提出新的高稳定性的搜索算法也是一项重要的任务。

(4) 评价指标构成的适应度函数,在很大程度上影响了计算时间、分类性能和搜索空间的分布,是特征选择的关键因素。封装式和过滤式的大部分计算时间都用在评估过程中。目前有一些快速评估方法,如交互信息,但它们都是单独评估特征,而不是一组特征。如果忽略特征之间的交互会导致特征子集具有冗余性并缺少互补特征,从而无法在大多数领域中实现最佳分类性能。特征交互是一项复杂且具有挑战性的任务,目前在这方面的的工作还很少。

(5) 大多数进化计算方法中,传统表示方法在特征选择问题上存在很大的搜索空间。一个好的表示方法可以减少搜索空间的大小,从而有助于设计新的搜索机制来提高搜索能力。目前的表示方法通常只反映是否选择了某个特性,而不显示特征之间的交互信息。如果表示能够反映特征组的选择或删除,则可以显著提高分类性能。

参考文献:

- [1] DASH M, LIU H. Feature selection for classification [J]. *Intelligent data analysis*, 1997, 1(1/2/3/4): 131–156.
- [2] LIU H, YU L. Toward integrating feature selection algorithms for classification and clustering [J]. *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, 2005, 17(4): 491–502.
- [3] LIU Y N, WANG G, CHEN H L, et al. An improved particle swarm optimization for feature selection [J]. *Journal of bionic engineering*, 2011, 8(2): 191–200.
- [4] KOLLER D, SAHAMI M. Toward optimal feature selection [C]//Thirteenth international conference on international conference on machine learning. Bari: Morgan Kaufmann Publishers, 1996: 284–292.
- [5] NARENDRA P M, FUKUNAGA K. A branch and bound algorithm for feature subset selection [J]. *IEEE transactions on computers*, 1977, 26(9): 917–922.
- [6] KIRA K, RENDELL L A. The feature selection problem: traditional methods and a new algorithm [C]//Tenth National Conference on Artificial Intelligence. San Jose: AAAI, 1992: 129–134.
- [7] LAZAR C, TAMINAU J, MEGANCK S, et al. A survey on filter techniques for feature selection in gene expression microarray analysis [J]. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics*, 2012, 9(4): 1106–1119.
- [8] ANG J C, MIRZAL A, HARON H, et al. Supervised, unsupervised and semi-supervised feature selection: a review on gene selection [J]. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics*, 2016, 13(5): 971–989.
- [9] CHANDRASHEKAR G, SAHIN F. A survey on feature selection methods [J]. *Computers and electrical engineering*, 2014, 40(1): 16–28.
- [10] 杨峻山, 周家锐, 朱泽轩, 等. 带约束小生境二进制粒子群优化的生物学数据集成特征选择 [J]. *信号处理*, 2016, 32(7): 757–763.
- [11] XUE B, ZHANG M J, BROWNE W N, et al. A survey on evolutionary computation approaches to feature selection [J]. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 2016, 20(4): 606–626.
- [12] HOLLAND J H. Genetic algorithms [J]. *Scientific american*, 1992, 267(1): 66–72.
- [13] SIEDLECKI W, SKLANSKY J. A note on genetic algorithms for large-scale feature selection [J]. *Pattern recognition letters*, 1989, 10(5): 335–347.
- [14] LI Y M, ZHANG S J, ZENG X P. Research of multi-population agent genetic algorithm for feature selection [J]. *Expert systems with applications*, 2009, 36(9):

[1] DASH M, LIU H. Feature selection for classification

- 11570 – 11581.
- [15] LIN F Y , LIANG D , YEH C C , et al. Novel feature selection methods to financial distress prediction [J]. *Expert systems with applications* , 2014 , 41 (5) : 2472 – 2483.
- [16] DA SILVA P N , PLASTINO A , FREITAS A A. A novel genetic algorithm for feature selection in hierarchical feature spaces [C]//*Proceedings of the 2018 SIAM International Conference on Data Mining*. SIAM , 2018: 738 – 746.
- [17] PAUL D , SU R , ROMAIN M , et al. Feature selection for outcome prediction in oesophageal cancer using genetic algorithm and random forest classifier [J]. *Computerized medical imaging and graphics* , 2017 , 60: 42 – 49.
- [18] JIANG S C , CHIN K-S , WANG L , et al. Modified genetic algorithm-based feature selection combined with pre-trained deep neural network for demand forecasting in outpatient department [J]. *Expert systems with applications* , 2017 , 82: 216 – 230.
- [19] HONG J H , CHO S B. Efficient huge-scale feature selection with speciated genetic algorithm [J]. *Pattern recognition letters* , 2006 , 27(2) : 143 – 150.
- [20] CHEN T C , HSIEH Y C , YOU P S , et al. Feature selection and classification by using grid computing based evolutionary approach for the microarray data [C]//*2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*. Chengdu: IEEE , 2010: 85 – 89.
- [21] YAHYA A A , OSMAN A , RAMLI A R , et al. Feature selection for high dimensional data: an evolutionary filter approach [J]. *Journal of computer science* , 2011 , 7(5) : 800 – 820.
- [22] OA SILVA S F , RIBEIRO M X , NETO J D E S , et al. Improving the ranking quality of medical image retrieval using a genetic feature selection method [J]. *Decision support systems* , 2011 , 51(4) : 810 – 820.
- [23] WINKLER S M , AFFENZELLER M , JACAK W , et al. Identification of cancer diagnosis estimation models using evolutionary algorithms: a case study for breast cancer , melanoma , and cancer in the respiratory system [C]// *Proceedings of the 13th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation*. Dublin: ACM , 2011: 503 – 510.
- [24] SOUSA P , CORTEZ P , VAZ R , et al. Email spam detection: a symbiotic feature selection approach fostered by evolutionary computation [J]. *International journal of information technology and decision making* , 2013 , 12(4) : 863 – 884.
- [25] KOZA J R. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection [M]. Cambridge , MA: MIT Press , 1992.
- [26] SHERRAH J , BOGNER R E , Bouzerdoum A. Automatic selection of features for classification using genetic programming [C]// 1996 Australian New Zealand and Conference on Intelligent Information Systems. Adelaide: IEEE , 1996: 284 – 287.
- [27] NESHATIAN K , ZHANG M J. Dimensionality reduction in face detection: a genetic programming approach [C]//*2009 24th International Conference Image and Vision Computing New Zealand*. Wellington: IEEE , 2009: 391 – 396.
- [28] HUNT R , NESHATIAN K , ZHANG M J. A genetic programming approach to hyper-heuristic feature selection [C]//*Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer , 2012: 320 – 330.
- [29] VIEGAS F , ROCHA L , GONÇALVES M , et al. A genetic programming approach for feature selection in highly dimensional skewed data [J]. *Neurocomputing* , 2018 , 273: 554 – 569.
- [30] NANDA S J , PANDA G. A survey on nature inspired metaheuristic algorithms for partitional clustering [J]. *Swarm and evolutionary computation* , 2014 , 16: 1 – 18.
- [31] XUE B , ZHANG M J , BROWNE W N. Particle swarm optimisation for feature selection in classification: novel initialisation and updating mechanisms [J]. *Applied soft computing* , 2014 , 18: 261 – 276.
- [32] LIN S W , YING K C , CHEN S C , et al. Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines [J]. *Expert systems with applications* , 2008 , 35(4) : 1817 – 1824.
- [33] VIEIRA S M , MENDONÇA L F , FARINHA G J , et al. Modified binary PSO for feature selection using SVM applied to mortality prediction of septic patients [J]. *Applied soft computing* , 2013 , 13(8) : 3494 – 3504.
- [34] HUANG C L , DUN J F. A distributed PSO-SVM hybrid system with feature selection and parameter optimization [J]. *Applied soft computing* , 2008 , 8(4) : 1381 – 1391.
- [35] BOUBEZOUL A , PARIS S. Application of global optimization methods to model and feature selection [J]. *Pattern recognition* , 2012 , 45(10) : 3676 – 3686.
- [36] LANE M C , XUE B , LIU I , et al. Particle swarm optimisation and statistical clustering for feature selection

- [C]// Australasian Joint Conference on Artificial Intelligence. Dunedin: Springer, 2013: 214 – 220.
- [37] LANE M C, XUE B, LIU I, et al. Gaussian based particle swarm optimisation and statistical clustering for feature selection[C]//European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization. Heidelberg: Springer, 2014: 133 – 144.
- [38] NGUYEN H B, XUE B, LIU I, et al. PSO and statistical clustering for feature selection: a new representation[C]// Proceedings of the 10th International Conference on Simulated Evolution and Learning. Dunedin: Springer, 2014: 569 – 581.
- [39] TRAN B, XUE B, ZHANG M J. Variable-length particle swarm optimisation for feature selection on high-dimensional classification [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2019, 23(3): 473 – 487.
- [40] CHUANG L Y, CHANG H W, TU C J, et al. Improved binary pso for feature selection using gene expression data[J]. Computational biology and chemistry, 2008, 32(1): 29 – 38.
- [41] TRAN B, XUE B, ZHANG M J. Improved pso for feature selection on high-dimensional datasets[C]//Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning. Verg Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 503 – 515.
- [42] CHENG R, JIN Y. A competitive swarm optimizer for large scale optimization[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2015, 45(2): 191 – 204.
- [43] GU S K, CHENG R, JIN Y C. Feature selection for high-dimensional classification using a competitive swarm optimizer[J]. Soft computing, 2018, 22(3): 811 – 822.
- [44] XUE B, ZHANG M J, BROWNE W N. New fitness functions in binary particle swarm optimisation for feature selection[C]//2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Brisbane: IEEE, 2012: 1 – 8.
- [45] KHUSHABA R N, AL-ANI A, ALSUKKER A, et al. A combined ant colony and differential evolution feature selection algorithm[C]//International Conference on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. Brussels: Springer, 2008: 1 – 12.
- [46] GHOSH A, DATTA A, GHOSH S. Self-adaptive differential evolution for feature selection in hyperspectral image data [J]. Applied soft computing, 2013, 13(4): 1969 – 1977.
- [47] KHUSHABA R N, AL-ANI A, AL-JUMAILY A. Feature subset selection using differential evolution and a statistical repair mechanism [J]. Expert systems with applications, 2011, 38(9): 11515 – 11526.
- [48] OMIDVAR M N, LI X D, MEI Y, et al. Cooperative co-evolution with differential grouping for large scale optimization [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2014, 18(3): 378 – 393.
- [49] HANCER E, XYE R, KARABOGA D, et al. A binary ABC algorithm based on advanced similarity scheme for feature selection [J]. Applied soft computing, 2015, 36: 334 – 348.
- [50] 梁静, 刘睿, 瞿博阳, 等. 进化算法在大规模优化问题中的应用综述 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2018, 39(3): 15 – 21.
- [51] DERRAC J, GARCÍA S, HERRERA F. A first study on the use of coevolutionary algorithms for instance and feature selection[C]//International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems. Heidelberg: Springer, 2009: 557 – 564.
- [52] DERRAC J, GARCÍA S, HERRERA F. Ifs-coco: instance and feature selection based on cooperative coevolution with nearest neighbor rule[J]. Pattern recognition, 2010, 43(6): 2082 – 2105.
- [53] EBRAHIMPOUR M K, NEZAMABADI-POUR H, EFTEKHARI M. CCFS: a cooperating coevolution technique for large scale feature selection on microarray datasets[J]. Computational biology and chemistry, 2018, 73: 171 – 178.
- [54] WANG D Z W, LIU H X, SZETO W Y. A novel discrete network design problem formulation and its global optimization solution algorithm [J]. Transportation research Part E: logistics and transportation review, 2015, 79: 213 – 230.
- [55] PREUSS M. Multimodal optimization by means of evolutionary algorithms [M]. Heidelberg: Springer, 2015.
- [56] WANG X P, TANG L X. A machine-learning based memetic algorithm for the multi-objective permutation flowshop scheduling problem[J]. Computers and operations research, 2017, 79: 60 – 77.
- [57] WANG X Y, YANG J, TENG X L, et al. Feature selection based on rough sets and particle swarm optimization [J]. Pattern recognition letters, 2007, 28(4): 459 – 471.
- [58] KAMYAB S, EFTEKHARI M. Feature selection using multimodal optimization techniques [J]. Neurocomputing, 2016, 171: 586 – 597.
- [59] KONAK A, COIT D W, SMITH A E. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial [J]. Reliability engineering and system safety, 2006, 91(9): 992 – 1007.
- [60] MUKHOPADHYAY A, MAULIK U. An SVM-

- wrapped multiobjective evolutionary feature selection approach for identifying cancer-MicroRNA markers [J]. IEEE transactions on NanoBioscience, 2013, 12 (4): 275 – 281.
- [61] SINGH U, SINGH S N. Optimal feature selection via NSGA-II for power quality disturbances classification [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2018, 14(7): 2994 – 3002.
- [62] ZHU Y Y, LIANG J W, CHEN J Y, et al. An improved NSGA-III algorithm for feature selection used in intrusion detection [J]. Knowledge-based systems, 2017, 116: 74 – 85.
- [63] VIGNOLO L D, MILONE D H, SCHARCANSKI J. Feature selection for face recognition based on multi-objective evolutionary wrappers [J]. Expert systems with applications, 2013, 40(13): 5077 – 5084.
- [64] NESHTATIAN K, ZHANG M J. Pareto front feature selection: using genetic programming to explore feature space [C]//Proceedings of the 11th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Montreal: ACM, 2009: 1027 – 1034.
- [65] XUE B, FU W L, ZHANG M J. Multi-objective feature selection in classification: a differential evolution approach [C] //Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning. Verlag Berlin, Heidelberg: Springer, 2014: 516 – 528.
- [66] HANCER E, XUE B, ZHANG M J. Differential evolution for filter feature selection based on information theory and feature ranking [J]. Knowledge-based systems, 2018, 140: 103 – 119.
- [67] AL-DUJAILI A, TANWEER M R, SURESH S. DE vs. PSO: a performance assessment for expensive problems [C]// 2015 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. Cape Town: IEEE, 2016: 1711 – 1718.
- [68] XUE B, ZHANG M J, BROWNE W N. Particle swarm optimization for feature selection in classification: a multi-objective approach [J]. IEEE transactions on cybern, 2013, 43(6): 1656 – 1671.
- [69] XUE B, ZHANG M J, BROWNE W N. Multi-objective particle swarm optimisation (psa) for feature selection [C]// Proceedings of the 14th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. Philadelphia: ACM, 2012: 81 – 88.
- [70] XUE B, CERVANTE L, SHANG L, et al. A multi-objective particle swarm optimisation for filter-based feature selection in classification problems [J]. Connection science, 2012, 24(2/3): 91 – 116.
- [71] NGUYEN H B, XUE B, LIU I, et al. New mechanism for archive maintenance in PSO-based multi-objective feature selection [J]. Soft computing 2016, 20 (10): 3927 – 3946.
- [72] PAUL S, DAS S. Simultaneous feature selection and weighting—An evolutionary multi-objective optimization approach [J]. Pattern recognition letters, 2015, 65 (C): 51 – 59.

Research on Evolutionary Computation for Feature Selection

WANG Yanli¹, LIANG Jing¹, XUE Bing², Yue Caitong¹

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. School of Engineering and Computer Science, Victoria University of Wellington, Wellington 6140, New Zealand)

Abstract: Feature selection was an important task in data mining and machine learning to reduce the dimensionality of the data and increase the performance of an algorithm. Evolutionary computing algorithms recently gained much attention and shown some success in feature selection problems in recent years by simulating the natural biological evolution mechanism to complete the optimal solution of the search problem. The basic framework of feature selection was introduced first. Then the search mechanism, subset evaluation strategy and objective number of feature selection methods based on evolutionary computation were analyzed and summarized. Finally, current issues and challenges were also discussed to identify promising areas for future research.

Key words: classification; evolutionary computation; feature selection

融合位置注意力机制和改进 BLSTM 的食品评论情感分析

李 勇,金庆雨,张青川

(北京工商大学 农产品质量安全追溯技术及应用国家工程实验室 北京 100048)

摘 要: 为了对食品评价的情感倾向进行更加精确的分类,在进行情感语义分析时,卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)方法在提取目标的结构特征方面具有一定的优势,可以提取到多种局部特征,循环神经网络(recurrent neural networks, RNN)具有记忆功能,在序列特征提取方面具有一定的优势,双向长短时记忆网络(bidirectional long short-term memory, BLSTM)在提取远距离依赖序列语义特征方面可以得到很好的效果。在 BLSTM 的基础上,又引入基于食品领域的语义角色标注与位置相结合的位置注意力机制,来实现距离相关的序列语义特征提取,利用 CNN 实现序列语义特征的情感语义分类,从而构造出了一种基于 BLSTM 和位置注意力机制的食品评论情感分析模型。实验结果表明,设计的模型在情感分类方面取得了很好的分类效果,与之前的情感分类模型进行比较,在准确率结果上有所提高。

关键词: 情感分析; 评论; 双向长短时记忆网络; 卷积神经网络; 位置注意力机制

中图分类号: TP391.1 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.006

0 引言

随着互联网的快速发展,社交网站和各大电商平台迅猛发展。互联网上的消费者用户在浏览、购买商品的同时,也倾向于发表自己的意见,对所购买的商品、店家的服务等进行评论和反馈^[1]。在线购物的消费者,他们在购物的过程中产生的浏览记录、购买记录和商品评论等数据,生成了数据量庞大的互联网信息。这些非结构化的互联网信息,包含了众多消费者对各类商品的观点和态度。商家可以根据这些商品评论信息制定销售战略,消费者也可以将这些评论数据作为参考,选择合适的商品。因此,对这些互联网信息进行分析 and 利用是十分必要的。随着互联网的普及,人们越来越倾向于在网上进行购物,用户评论数据信息规模不断地增大,仅仅依靠人工的方式进行处理已经变得不再现实,越来越多的学者利用自然语言处理技术对互联网信息进行情感分析,这一研究成为自然语言处理领域的一个研究

热点^[2]。

情感分析是对人们的观点评价进行情感的倾向性分析,对产品、服务或者事件进行挖掘和分析以及一系列推理和归纳的技术^[3]。在商品的评论中不是每个词都是包含情感信息成分的,或者并不能明显地表明评论者的态度,含有情感成分的词主要是形容词、动词和部分名词等,这些词是情感分析关注的重点。目前,情感分析的主要研究方法是基于机器学习的传统算法,基于机器学习的方法需要通过使用大量的人工标注数据的特征来确定给定文本的情感极性,这项工作非常费时费力^[4]。

随着深度学习、人工智能等相关技术的发展,深度神经网络技术成为了自然语言处理领域的关键技术,而且在文本情感分析中也得到了很好的应用,取得了不错的效果^[5]。笔者提出了一种基于长短时记忆网络与位置注意力机制融合并结合卷积神经网络的情感分类模型。该模型充分利用 BLSTM 的特性,挖掘评论文本的语义特征,并与

收稿日期:2019-06-16; 修订日期:2019-10-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0401205);北京市自然科学基金资助项目(4202014);北京市自然科学基金资助项目(4184084);教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(17YJCZH007);科技创新服务能力建设基金项目(19005857028);北京市教委科技类一般项目(SQKM201710011008)

作者简介:李勇(1979—),男,河北邢台人,北京工商大学讲师,博士,主要从事食品安全大数据研究, E-mail: liyong@btbu.edu.cn。

位置注意力机制相结合,通过 BLSTM 的训练获取评论中详细的特征信息,使用位置注意力机制计算,使情感相关的词语对整个评论起决定性的作用。最后通过 CNN 来进行特征的分类,从而提高了对食品评论信息情感分类的精度。实验结果也表明了该模型在情感分类方面得到了非常大的提高,获得了不错的分类效果。

1 相关工作

现有的情感分析方法主要由基于规则的情感分类方法、基于机器学习的情感分类方法向基于深度学习的情感分析方法的方向发展,分析结果的准确率也在不断地提高^[6]。

在进行情感分析时,采用基于规则的过程中需要有很多人工参与的工作,其中包括情感词典的构建和一些语言结构的归纳总结等。对这些内容进行分析时需要通过构建相关的情感词典和那些文本数据中包含的情感词进行对比来计算文本的情感倾向性。Kim 等^[7]在对话题评价对象进行情感分析时,使用了概率的方法对每个词赋予一定的情感强度,并根据这些情感词的强度来进行评估算分,最后通过把这些情感词的分数相加得出每个话题对象的情感倾向,取得了非常好的效果。王志涛等^[8]通过基于词典和规则集的中文微博情感分析方法,并根据其在微博中的特性,定义了不同语言层面的规则,将情感词典应用在从词到句子的不同文本中,进行了多粒度的情感计算,并在实验数据集上证明了该方法是可行的和有效的。

基于机器学习的情感分析方法通过输入大量的标注语料以及这些标注语料的情感标签,训练和这些语料相关的评论数据的情感分类器,然后通过这些训练好的分类器来预测新的文本数据的情感^[9]。情感分析的主要研究方法还是一些基于机器学习的传统算法,例如,信息熵、支持向量机、条件随机场等^[10]。这些机器学习的方法大体可以分为3类:有监督的机器学习、无监督的机器学习和半监督的机器学习^[11]。王新宇^[12]通过对旅游网络点评的情感倾向性进行分析,使用向量空间模型来表示评论,用情感词典对特征空间进行降维,通过 SVM 机器学习模型进行分类,最终得到了有效的分类结果。通过使用机器学习的方法来进行情感分析,最终的分类结果往往是由对特征对象的选取来决定的,特征对象的选取直接影响分类的效果,由于个体之间存在着很大的差

异性,通过人工选择特征有着很大的局限性和不确定性,难以真正发现和挖掘文本深层次的特征。

深度学习的过程实际上是在模拟人的神经元之间进行信息传递的过程^[13],深度学习是为了使得最终的模型可以像人一样进行数据的学习和分析,进而解释数据。目前主要应用在图像处理、声音识别和文本分析等领域。李阳辉等^[14]通过采用降噪自编码对文本数据进行无标记的特征学习来进行情感分类,并通过实验获得了比较好的结果。李章晓等^[15]将深度学习的技术应用到了金融领域,通过建立模型对外汇预测和投资组合优化进行实验,表明实验方法具有有效性。随着深度学习理论研究的逐渐深入,深度学习也应用到了情感分析方面,李杰等^[16]通过采用卷积神经网络对短文本评论信息进行了情感分类,得到了高准确率的分类结果。对比传统的机器学习方法,深度学习的优点主要在于训练效果好,以及不需要复杂的特征工程。

2 食品评论情感分析模型

笔者设计的情感分析模型如图1所示,其中 X 代表模型第1部分的输出。主要由两部分组成:①文本情感收集器;②情感信息分类器。

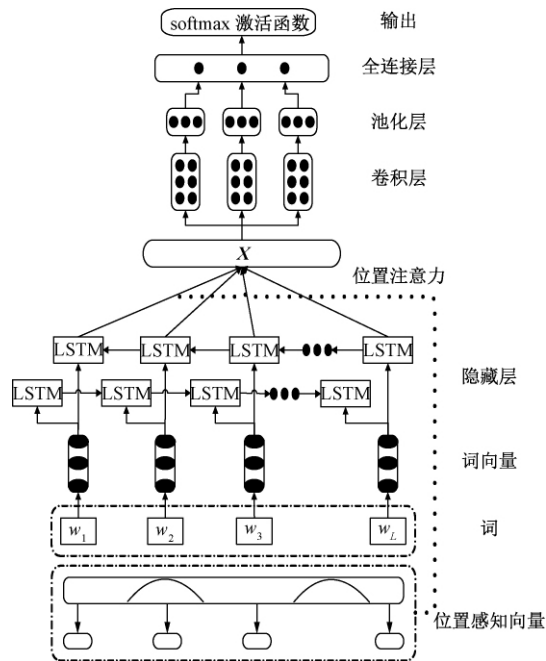


图1 情感分析模型结构

Figure 1 Sentiment analysis model structure

文本情感收集器是基于改进的 BLSTM 并融合位置注意力向量来对评论中的情感信息进行抽取。情感信息分类器是将文本情感收集器的输出作为输入,通过卷积神经网络来进一步进行情感

语义特征的分类。

2.1 文本情感收集器

此部分主要是对评论中的情感信息进行抽取,每条食品的评论信息由 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_L\}$ 来表示,其相应的词向量 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_L\}$ 。模型的输入是由食品评论句子的各个词组成,每个词转成对应的词向量。每一组词向量通过输入左右两个 LSTM 模型中进行训练,将左右两侧模型训练的结果进行合并,得到更为合理的信息矩阵,同时引入位置注意力机制,每个词都有自己对应的注意力参数,最终得到更为优化的情感信息。

2.2 LSTM 模型

由于 RNN 在处理长序列输入时还存在缺陷,如梯度消失的问题。为了解决这个问题,在 RNN 中加入更多的记忆单元来控制信息在不同时刻的流动,从而解决了梯度消失问题,模型的网络通过记忆单元更新各个节点信息,从而可以学习文本序列中那些需要进行远距离依赖的特性,提高模型的准确率。

将评论语料中的每个句子转为向量表示,将词向量作为模型的一个输入序列 $v = \{v_1, v_2, \dots, v_L\}$,LSTM 计算隐藏向量序列 $h = [h_1, h_2, \dots, h_L]$ 和输出矩阵序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_L]$ 。LSTM 模型引入记忆单元进行信息之间的传递,LSTM 中的这些记忆单元帮助它解决避免梯度消失的问题,适合学习长期依赖的上下文语义。与传统的 RNN 相比,LSTM 增加了输入门、遗忘门和输出门。笔者采用 LSTM 模型,将上一个细胞状态同时引入到输入门、遗忘门以及新信息的计算当中^[17],以下为 LSTM 的计算过程:

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}; w_t] + b_i); \quad (1)$$

$$f_t = \sigma(W_f[h_{t-1}; w_t] + b_f); \quad (2)$$

$$o_t = \sigma(W_o[h_{t-1}; w_t] + b_o); \quad (3)$$

$$g_t = \tanh(W_c[h_{t-1}; w_t] + b_c); \quad (4)$$

$$c_t = i_t \odot g_t + f_t \odot c_{t-1}; \quad (5)$$

$$h_t = o_t \odot \tanh(c_t); \quad (6)$$

式中: i 为输入门; f 为遗忘门; o 为输出门; b 为偏执; W 为对应权重。

通常一个标准的 LSTM 只从一个方向对序列进行编码。然而两个 LSTM 也可以堆叠起来作为双向使用编码器,称为双向 LSTM,笔者采用此种方式进行模型的设计。通过两层相反方向流处理数据兼顾了历史信息和未来信息,一层从左到右的顺序,另一层从右到左的顺序,最终将两层输出作为一个整体,作为 BLSTM 隐藏层的输出。为了

突出情感词在句子中的作用,笔者加入了位置注意力机制,将 BLSTM 的输出进行了微调。

2.3 位置感知注意力机制

随着深度学习的不断发展,基于注意力机制的神经网络模型越来越多地应用到自然语言处理领域、图像识别领域、语音识别领域等不同的研究内容当中。注意力机制最早是在视觉图像领域提出来的,Bahdanau 等^[18]将这种注意力机制应用在机器翻译任务上,并将翻译任务和对齐工作同时进行,这些应用逐渐扩展到各种自然语言处理(natural language processing, NLP)任务中。

笔者提出了一个位置感知的注意力机制,首先利用语义角色标注的自然语言处理技术对评论进行处理,将句子分割成不同的句子成分,将每个句子成分与情感词库进行相似度的比对,当句子成分中的词与情感词库的词相似度大于 0.85 时,确定该句子成分中的词为情感分析的核心词。在一个句子成分中,起着关键作用的核心词对周边词的影响程度会随着距离的变化而变化。因核心词对其周边词的影响程度是不同的,笔者通过使用高斯核函数来模拟基于位置感知的影响传播:

$$Kernel(u) = \exp\left(\frac{-u^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

式中: u 代表核心词与句子成分中当前词的距离; σ 是一个约束传播范围的参数; $Kernel(u)$ 表示基于内核距离为 u 所得到的相应的影响。

$$K(i, \mu) : N(Kernel(u), \sigma'), \quad (8)$$

式中: $K(i, \mu)$ 表示第 i 个维度上的核心词在对距离为 u 的词的影响; N 是具有 $Kernel(u)$ 值的期望值和标准差 σ' 的正态密度。

$$x_i = k_i h_i. \quad (9)$$

2.4 情感信息分类器

在以上工作完成后,将商品的评论信息嵌入到矩阵 X 中,由于每条评论信息中总会有或多或少的噪音,为了得到精确的数据信息,笔者设计了情感信息分类器,此部分是由 3 个并列的过滤器组成,每一个过滤器独自抽取矩阵 X 中的情感信息,最后将每部分进行结合得到输出结果,经过进一步的特征提取获得最终的分类类别。

2.5 卷积神经网络

卷积神经网络广泛应用在图像识别和文本分类领域。它是文本分类使用最多的深度学习网络结构,其底层由卷积层、池化层交替组成,顶端使用全连接层来完成具体的任务。

本文中卷积层是由 3 种窗口大小不同的卷积

核组成,用来进行提取数据内部的语义特征。通过最大池化层提取其中的主要特征,在最后一层通过全连接层完成情感极性正向情感或者负向情感的映射。卷积核 $w \in \mathbf{R}^{n \times k}$,卷积的窗口大小为 n 输出特征为:

$$s_i = f(w_i \cdot x_i + b_i) \quad (10)$$

在本实验中考考虑到收敛速度的问题,采用 relu 函数作为激活函数进行非线性操作,得到的 s_i 代表通过卷积获得的局部特征,最终得到特征向量集合 S 。通过以上卷积过程所有的输出特征都是独立计算的,对于每一个过滤器来说,采用 max-pooling 方式来降低特征向量的大小:

$$m_i = \max S \quad (11)$$

模型的最后一部分是输出层。笔者设计了3个过滤器在全连接层的输出:

$$y = \beta_1 m^1 + \beta_2 m^2 + \beta_3 m^3 \quad (12)$$

最后,将全连接层的输出 y 输入到 softmax 函数中,将输出转换为概率进行分类:

$$p_i = \frac{e^{y_i}}{\sum_{k=1}^n e^{y_k}} \quad (13)$$

3 对比实验与结果分析

3.1 数据集

在京东商城食品类别的用户评论数据集上评估笔者设计的方法。将整个数据集划分为训练集、测试集。其中的训练数据有80 000条,测试数据有20 000条。数据如表1所示。

表1 实验数据

Table 1 The experimental data

数据类别	数据量/条
精选肉类	50 000
新鲜水果	20 000
休闲食品	30 000

3.2 实验参数设置

实验参数的调整对实验结果的影响很大,通过比较,最终选取了以下参数:在BLSTM中,词向量的维度为200,层数为2,学习率为0.001,drop-out的值为0.5,设置epoch为50。在CNN中,词向量的维度为200,窗口分别为2、3、4,激活函数为 relu 函数。

3.3 实验评价指标

采用准确率 P 和召回率 R 来评价实验分类结果的好坏,准确率表示预测类的样本中有多少是预测正确的;召回率表示真实标签为测试类的

有多少是被预测正确的,具体公式如下:

$$P = \frac{C}{O} \quad (14)$$

$$R = \frac{C}{L} \quad (15)$$

式中: C 表示模型返回测试类预测正确的数量; O 表示模型返回的总数量; L 表示测试类的总数量。使用 F_1 测度来评价准确率和召回率:

$$F_1 = \frac{2 \cdot P \cdot R}{P + R} \quad (16)$$

3.4 实验结果与分析

笔者对比了以下几组实验,如表2所示。

表2 对比实验结果

Table 2 The results of the contrast experiments

模型	准确率	召回率	F_1 测度
CNN	0.784 7	0.761 5	0.772 9
Att-CNN	0.805 1	0.793 8	0.799 4
BLSTM	0.846 2	0.835 4	0.840 8
Att-BLSTM	0.852 7	0.843 5	0.848 1
本文模型	0.869 4	0.854 2	0.861 7

从实验结果可以发现,笔者提出的模型方法的准确率要比其他几种基准方法都要高。

在精选肉类中有这样一条评论“什么精品好肉,一塌糊涂,腥的一踏糊涂,直接处理掉了”。这条评论在其他的几种方法都归类为了积极的评价,只有本文的模型归类为消极评价。这充分体现了本文模型的一个优点。对于情感词库中没有的词,通过相似度计算将“一塌糊涂”及包含一个错字的“一踏糊涂”归为了消极情感的词,通过位置注意力机制对其向量进行调整从而准确地将此评论归为消极评论,提高了情感分类的准确率。

4 结论

笔者在传统BLSTM模型的基础上,通过将食品领域相关情感词的位置感知引入注意力机制,突出了情感信息在评论中的情感语义极性,融合CNN来实现情感语义特征分类,从而提出了一种面向情感信息抽取和情感语义分类的食品评论情感分析方法。对比实验的结果表明,笔者提出的方法是可行的和有效的,通过对评论情感信息抽取部分进行组合提取可以获取句子中更多的语义特征,从而提高了情感分类的精度。

参考文献:

- [1] 任远远,王卫平. 中文网络评论的产品特征提取及情感倾向判定[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(11):

- 22-27.
- [2] MANKE S N, SHIVALE N. A review on: opinion mining and sentiment analysis based on natural language processing[J]. International journal of computer applications, 2015, 109(4): 29-32.
- [3] 李晨, 朱世伟, 魏墨济, 等. 基于词典与规则的新闻文本情感倾向性分析[J]. 山东科学, 2017, 30(1): 115-121.
- [4] 杜昌顺, 黄磊. 分段卷积神经网络在文本情感分析中的应用[J]. 计算机工程与科学, 2017, 39(1): 173-179.
- [5] 陈珂, 梁斌, 柯文德, 等. 基于多通道卷积神经网络的中文微博情感分析[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(5): 945-957.
- [6] 郭利敏. 基于卷积神经网络的文献自动分类研究[J]. 图书与情报, 2017(6): 96-103.
- [7] KIM S M, HOVY E. Extracting opinions, opinion holders, and topics expressed in online news media text [C]//Proceedings of the Workshop on Sentiment and Subjectivity in Text - SST 06, July 22, 2006. Morristown: Association for Computational Linguistics, 2006: 1-8.
- [8] 王志涛, 於志文, 郭斌, 等. 基于词典和规则集的中文微博情感分析[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(8): 218-225.
- [9] 邢长征, 李珊. 文本情感分析的深度学习方法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(8): 102-106.
- [10] 刘智鹏, 何中市, 何伟东, 等. 基于深度学习的商品评价情感分析与研究[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(5): 921-927.
- [11] 陶宏曜, 梁栋屹. 基于卷积神经网络的职位描述文本分类方法[J]. 软件, 2017, 38(6): 30-34.
- [12] 王新宇. 基于情感词典与机器学习的旅游网络评价情感分析研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(4): 578-582, 766.
- [13] 焦李成, 杨淑媛, 刘芳, 等. 神经网络七十年: 回顾与展望[J]. 计算机学报, 2016, 39(8): 1697-1716.
- [14] 李阳辉, 谢明, 易阳. 基于深度学习的社交网络平台细粒度情感分析[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(3): 743-747.
- [15] 李章晓, 宋微, 田野. 基于深度学习和进化计算的外汇预测与投资组合优化[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(1): 92-96.
- [16] 李杰, 李欢. 基于深度学习的短文本评论产品特征提取及情感分类研究[J]. 情报理论与实践, 2018, 41(2): 143-148.
- [17] 梁军, 柴玉梅, 原慧斌, 等. 基于极性转移和 LSTM 递归网络的情感分析[J]. 中文信息学报, 2015, 29(5): 152-159.
- [18] BAHDANAU D, CHO K, BENGIO Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate[J]. Computer and language, 2014(9): 1-15.

Improved BLSTM Food Review Sentiment Analysis with Positional Attention Mechanisms

LI Yong, JIN Qingyu, ZHANG Qingchuan

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

Abstract: In order to more accurately classify the emotional tendency of food reviews. In the case of emotional semantic analysis, CNN had certain advantages in extracting the structural features of the target, and could extract a variety of local features. With memory function, RNN had certain advantages in sequence feature extraction. Bidirectional Long Short-Term Memory (BLSTM) could achieve good results in extracting remote-dependent sequence semantic features. Based on BLSTM, this paper introduced a positional attention mechanism based on the combination of semantic role labeling and location in the food field. The distance-related sequence semantic feature extraction was realized, and the sentiment semantic classification of sequence semantic features was realized by CNN, and a food comment sentiment analysis model based on BLSTM and positional attention mechanism was constructed. Experimental results showed that the model designed could achieve good results in emotional classification, and an improved accuracy rate compared with the previous sentiment classification model.

Key words: sentiment analysis; review; blstm; CNN; positional attention mechanisms

基于小波包变换和支持向量机的故障选线方法

高金峰¹, 秦瑜瑞¹, 殷红德²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网平顶山供电公司, 河南 平顶山 467000)

摘 要: 配电网发生单相接地故障时, 故障线路与正常线路的零序电流非工频分量差异明显。针对在高阻接地时以模极大值的极性为判据导致选线成功率不高的问题, 给出了一种零序电流非工频分量和支撑向量机相结合的选线方法。该方法通过小波包变换分解各线路零序电流, 按能量最大原则选取特征频带, 将不同线路在特征频带上的能量与模极大值作为特征向量, 以故障线路标号为分类目标, 把故障选线转化为多分类问题, 使用支撑向量机预测故障线路; 通过大量仿真得到训练样本, 利用 K 折交叉验证和网格搜索对支撑向量机进行参数寻优。测试集上的结果表明, 该方法准确、可靠。在不同接地距离、接地电阻、故障初始相角下均能正确选线。

关键词: 故障选线; 小波包变换; 多分类; 支撑向量机

中图分类号: TU582.1

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.003

0 引言

配电网中发生单相接地故障的概率较高, 准确地选出故障线路, 对提高配电网运行安全性、稳定性具有重要意义。近年的故障选线方法主要有利用注入信号选线^[1]、利用稳态量选线^[2]和利用暂态量^[3-4]选线。其中, 利用注入信号的方法向发生故障的配电网注入功率或方波进行故障选线, 信号发生器设计复杂, 并难以应用于高电压等级的场景。利用稳态量选线的主要问题是当中性点非直接接地系统发生单相接地故障时, 稳态量幅值较小。尤其在消弧线圈采取过补偿方式接地时, 利用稳态量难以区分故障线路与正常线路。而故障后的暂态分量幅值较大, 易于检测, 蕴含着丰富的时频信息, 可通过时频分析方法提取其故障特征, 以此区分正常线路和故障线路。

已有大量研究利用暂态量进行故障选线。文献[5-7]利用暂态电流相关系数进行选线, 但相关系数阈值难以确定; 文献[8]基于衰减直流分量解决过零点选线困难的问题, 但未考虑对暂态电流起主导作用的高频分量; 文献[9-11]用小波变换分析故障前后的暂态电气量, 提取高频特征, 通过对比各线路零序电流在特征频带上的能

量、模极大值进行故障选线, 但当线路末端发生高阻接地故障时, 故障线路的能量和模极大值与正常线路差异较小, 没有明显的数量关系, 不易进行对比。近年来, 支撑向量机被广泛应用于多分类问题, 若以故障线路作为分类目标, 把配电网故障选线视为多分类问题, 利用支撑向量机对故障特征进行分类, 探究各线路故障特征量的内部关系, 而不以模极大值的极性和大小作为判据, 具有重要意义。与此同时, 在智能电网的建设过程中, 随着 RPMS、WAMS 系统被大量使用, 在运行过程中记录了充足的故障信息, 为电网故障选线的暂态信息量提供了充足的数据来源^[12], 使支撑向量机运用到配电网故障诊断领域成为可能。

笔者通过 Matlab/Simulink 搭建 4 条出线配电网系统, 进行大量仿真, 分析不同工况下发生单相接地故障时各线路的零序电流, 给出了一种“特征提取+支撑向量机”的选线方法。采用小波包变换提取各线路零序电流在特征频带上的能量和模极大值, 作为故障特征向量, 线路标号作为分类目标, 将故障选线转化为多分类问题。对此进行大量仿真得到训练集和测试集, 以 K 折交叉验证和网格搜索相结合的方式对支撑向量机进行参数寻优, 以获得最优参数, 并在测试集上对选线

收稿日期: 2019-06-28; 修订日期: 2019-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51307152); 河南省科技攻关项目(182102210004)

作者简介: 高金峰(1963—)男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事非线性理论研究, E-mail: jfgao@zhu.edu.cn.

效果进行分析。

1 故障电流仿真分析

在 Matlab/Simulink 上搭建 4 条出线配电网仿真模型, 线路正序参数取 $R_1 = 0.132 \Omega/\text{km}$ 、 $X_1 = 0.132 \text{ mH}/\text{km}$ 、 $C_1 = 9.78 \text{ nF}/\text{km}$ 。零序参数 $R_0 = 0.3886 \Omega/\text{km}$ 、 $X_0 = 4.126 \text{ mH}/\text{km}$ 、 $C_0 = 7.758 \text{ nF}/\text{km}$, 消弧线圈采取过补偿方式。其拓扑结构如图 1 所示。

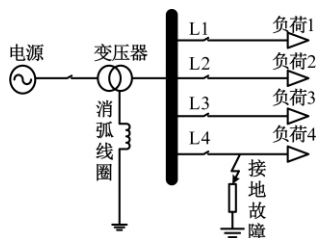


图 1 配电网结构

Figure 1 Distribution network structure

为模拟真实配电网各个线路长短不一的情况, 4 条出线长度分别取 15、20、30、40 km。由于故障初始时刻暂态分量的频率在 0.3 ~ 3 kHz, 为满足奈奎斯特采样频率, 仿真过程中采样频率取 6 400 Hz。以线路 4 为故障线路, 设置故障发生在距母线 20 km 处, 接地电阻分别为 1、500、1 000 Ω , 故障线路与正常线路零序电流对比如图 2 ~ 4 所示。

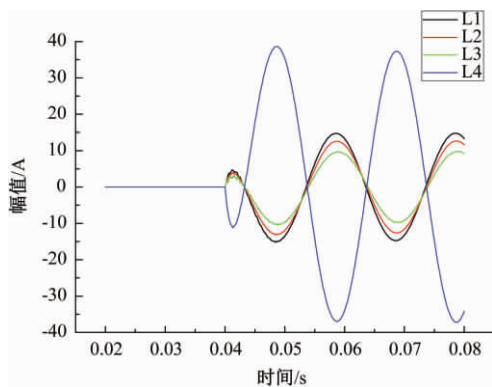


图 2 $R_g = 1 \Omega$ 时各线路零序电流

Figure 2 Zero sequence currents with $R_g = 1 \Omega$

由图 2 ~ 4 可以看出: 各线路零序电流在发生单相接地故障后会突然增大; 故障线路零序电流与正常线路零序电流极性相反且幅值较大; 高阻接地时, 零序电流震荡加剧, 幅值变小。

2 小波包变换与特征提取

2.1 小波包变换原理

小波变换为一种多尺度时频分析方法, 具

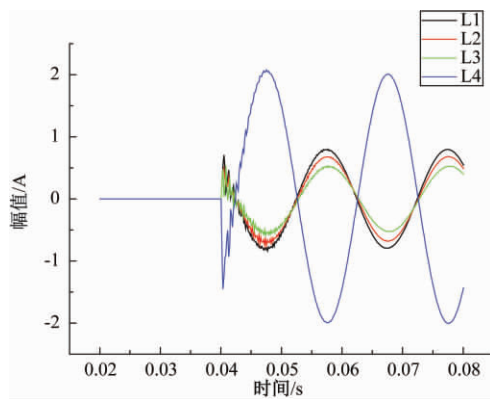


图 3 $R_g = 500 \Omega$ 时各线路零序电流

Figure 3 Zero sequence currents with $R_g = 500 \Omega$

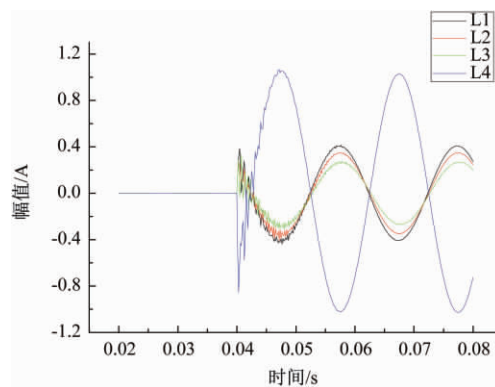


图 4 $R_g = 1000 \Omega$ 时各线路零序电流

Figure 4 Zero sequence currents with $R_g = 1000 \Omega$

有良好的时频局部化分析能力, 适用于暂态零序电流的特征提取^[10]。离散小波变换的过程可类比将信号通过一组高通滤波器和低通滤波器, 经过高通滤波器得到高频分量 $D1$, 经过低通滤波器获得低频分量 $A1$, 高频分量和低频分量各占原始信号频带的一半。传统小波变换对第一层分解后得到的 $A1$ 进行再一次分解得到下一层低频分量和高频分量; 小波包变换对 $A1$ 和 $D1$ 都进行下一层分解, 将原始信号划分到更多频带。传统小波变换和小波包变换的分解树如图 5 和图 6 所示。

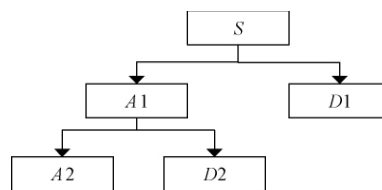


图 5 小波变换树

Figure 5 Wavelet transform tree

相比小波变换, 小波包变换可更精细地分解原始信号, 笔者采用小波包变换对零序电流进行分析。

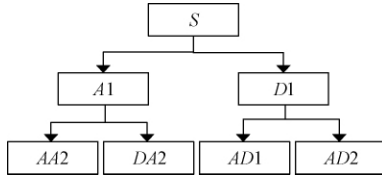


图6 小波包变换树

Figure 6 Wavelet packet transform tree

2.2 特征提取

对于配电网发生接地故障后各出线的零序电流,选用“db10”小波进行 j 层小波包变换,在第 j 层分解中,每个出线的零序电流可得到 2^j 组不同的频率分量,通过下式计算各频率分量的能量:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n (\omega_k^j(i))^2, \quad (1)$$

式中: ω_k^j 为在第 j 层第 k 个频率分量, j 为小波包分解层数, k 为零序电流在第 j 层分解后各频率分量编号($k=0, 2, \dots, 2^j-1$)。

将任一出线零序电流进行4层小波包分解,在4层分解后,每个线路的零序电流可得到16组频率分量,按式(1)计算各分量能量,得到该出线零序电流第4层分解后在各频带上的能量:

$$P = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n],$$

则该4条出线配电网系统的能量矩阵可表示为:

$$S = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix}.$$

该矩阵维数为 4×16 ,每行元素代表同一出线在不同频带下的能量,每列元素代表4条出线在各对应频带下的能量,基于能量最大原则^[13],并对其进行改进:除工频量所在频带,选取列元素之和最大列所对应的频带为特征频带,以此表示4条出线配电网系统的能量特征,记为:

$$E = [e_1, e_2, e_3, e_4].$$

零序电流在故障时刻存在突变点。经小波变换后,在特征频带上的模极大值与原信号的突变点之间存在对应关系,模极大值大小代表信号突变的强弱程度,极性代表信号的突变方向。4条出线配电网系统的模极大值向量为:

$$M = [m_1, m_2, m_3, m_4],$$

式中: m_1, m_2, m_3, m_4 代表各线路零序电流在特征频带上的模极大值。根据基于小波变换故障选线的理论,由于故障线路暂态零序电流与正常线路

方向相反,其模极大值应与其他各线路模极大值极性相反^[14],通过对比 M 中各元素极性,找出正负号与其余元素相反的元素,该元素代表的线路即为故障线路。但在线路末端发生高阻接地时,易出现故障线路模极大值极性与正常线路相同的情况,该判据失效。

采用上述仿真模型,设置线路4末端发生高阻接地故障,故障距离取距母线31.2 km,接地电阻为1 250 Ω 。选取各线路故障前一个周期及故障后两个周期的零序电流,利用“db10”小波包对其进行4层分解,并在特征频带上经过重构,把模极大值标出后如图7所示。

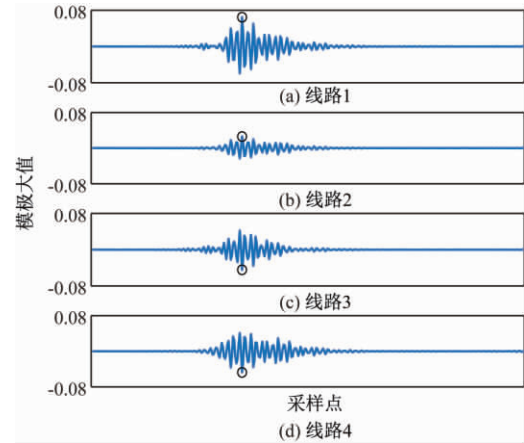


图7 特征频带上的模极大值

Figure 7 Modulus maximum in characteristic frequency band

根据小波奇异性检测理论,故障线路零序电流模极大值应与正常线路相反^[13],以此作为选出故障线路的依据。而线路1至线路4在特征频带上的模极大值依次为0.064 7、0.026 0、-0.044 3、-0.047 5,该判据在线路末端发生高阻接地时失效。因此,笔者引入支持向量机,通过挖掘数据内部特征,对各线路在特征频带上的能量和模极大值组成的样本进行分类。

3 多分类SVM及参数寻优

3.1 SVM与多分类问题

支持向量机(support vector machine, SVM)被广泛地应用于回归、分类、异常点检测等领域。SVM通过构造最优分类平面,将不同样本类别分开。

在图8中,实线为最优分类面,最优平面不仅能将不同类别的样本分隔,还要分类间隔最大,即使得样本中离最优分类面最近的点,距最优分类面的距离最大,这些点被称为支持向量。

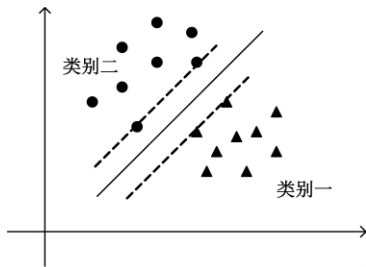


图8 最优分类面

Figure 8 Optimal classification surface

设样本 (x^i, y^i) , $i = 1, 2, \dots, m$, $y^i \in \{-1, +1\}$, x^i 为特征向量, y^i 为类别标号, 分类面决策方程可表示为:

$$f(x) = \omega^T x + b. \quad (2)$$

利用该超平面区分不同类别的样本: 当 $\omega^T x + b < 0$ 将样本归为 -1 类; 当 $\omega^T x + b > 0$ 将样本归为 $+1$ 类。

对于给定的训练集, 目标为找到对应的 ω 和 b , 使支持向量距分类平面的距离能够最远。将目标函数进行凸优化, 结合约束条件, 可将该问题转化为如下带有约束条件的最优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\omega, b} \quad & \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \sum_{i=1}^m \xi_i; \\ \text{s. t.} \quad & y^i \cdot (\omega^T x + b) \geq 1 - \xi_i, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: C 为惩罚系数; ξ 为松弛因子, 用于减小难以分类的样本带来的影响, 防止过拟合。

对式(3)的约束化模型构建拉格朗日函数, 引入拉格朗日乘子 a_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 得:

$$L(\omega, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 - \sum_{i=1}^m a_i [y^i \cdot (\omega^T x^i + b) - 1]. \quad (4)$$

通过求解该对偶问题, 得到最优的拉格朗日乘子 a^* 和参数 b^* , 并引入核函数, 得到分类器的最终决策方程为:

$$f(x) = \omega^T x + b = \sum_{i=1}^m a_i^* y^i K(x^i, x) + b^*. \quad (5)$$

常见的核函数有高斯核函数和线性核函数。

原始 SVM 算法是根据二分类问题设计的, 而 4 条出线配电网故障选线问题, 具有 4 个分类目标, 属于多分类问题, 因此需将该问题转化为 SVM 适用二分类问题。利用“一对一”方法可将多元分类转换为多个 SVM 二元分类问题。“一对一”方法对具有 N 类不同标签的训练集进行两两匹配, 得出所有可能的分类器, 共 C_N^2 种, 待训练完毕, 对未知样本分类时, 则能得到 C_N^2 个预测结果, 在多个分类器的预测结果中进行投票, 得到多分类 SVM 的最终分类目标。

3.2 参数寻优

对于采用高斯核函数的 SVM, 惩罚系数 C 和高斯核函数参数 γ 直接影响 SVM 的性能, 可采用网格搜索 (grid search, GS) 寻优^[14], 将不同取值的 C 和 γ 两两组合, 构成参数空间, 遍历所有的组合来寻找最优参数。通常 GS 会和 K 折交叉验证 (K -CV) 协作进行, 在每个 C 和 γ 的组合下, K -CV 将原始训练样本划分为 K 个子集, 在每次验证时, 选取其中一个子集作为测试集, 其余 $K-1$ 个子集作为训练集, 由此可进行 K 组不同的训练过程, 将每次训练过程的平均准确率作为该 C 和 γ 组合下的性能指标。对比不同组合下的性能, 选择准确率最高的一组参数为最优参数。线性 SVM 不采用高斯核函数, 仅对惩罚系数 C 构造搜索空间, 同样结合 K -CV, 在每一个惩罚系数 C 下, 以交叉验证得到的平均准确率作为评价指标。

笔者对高斯核函数 SVM 参数 C 和 γ 构成的二维空间和线性核函数 SVM 的参数 C 构成的一维空间都进行寻优, 以选择分类效果最好的核函数及参数。

4 选线方法构建流程

小波包变换结合 SVM 选线步骤如下:

(1) 以零序电流突然增大的时刻为故障点, 记录故障点前一个周期和后两个周期的零序电流。

(2) 改变故障参数, 得到不同故障工况下的各线路零序电流, 利用小波包从中提取特征频带能量和模极大值以及故障线路标号作为训练集。

(3) 利用 K -CV 和训练集对 SVM 寻优, 得到最优参数下的 SVM。

(4) 将测试样本输入 SVM 分类器, 验证选线效果。

5 算例分析

5.1 样本获取

笔者从幅值和极性两个角度出发, 利用小波包变换提取故障后配电网系统各线路在特征频带上的能量和模极大值构成特征向量。并采用上文所述仿真模型, 通过改变故障参数获取数据集。以线路 1 为例, 改变其接地电阻, 依次取 1、10、100、200、500、800、1 000 Ω 共 7 种接地电阻阻值; 故障初始角取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 共 7 种不同的角度; 设 D = 故障点距母线距离/线路总长, D 取 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 等 5 种不同的值。

则线路 1 发生单相接地故障时, 可获得 $7 \times 7 \times 5 = 245$ 组样本。笔者所搭建模型共有 4 条出线, 对每条出线依次设置故障, 可得到 $4 \times 7 \times 7 \times 5 = 980$ 组样本。样本格式为 (x^i, y^i) , $i = 1, 2, \dots, 980$ 。其中 $x^i = [E^i, M^i]$, 代表在第 i 个样本中设置的故障参数下 4 条出线系统的能量特征和模极大值; $y_i \in \{1, 2, 3, 4\}$, 代表第 i 个样本中的故障线路。按照上述获取样本的流程, 在原有 980 组样本的基础上, 针对高阻接地故障, 创建 400 组样本, 加入原有样本, 构成训练集, 共计 1 380 组。

5.2 双空间参数寻优

笔者以 Scikit-learn 0.20 为平台, 构造高斯核函数 SVM 二维参数空间、线性核函数一维参数空间, 结合 K 折交叉验证进行双空间参数寻优。流程如下:

(1) 定义高斯核函数 SVM 和线性核函数 SVM 模型, 并设置“一对一”分类方式, 选取交叉验证折数, 取 $K = 10$ 。

(2) 设置两类 SVM 的搜索空间, 对于高斯核函数 SVM 的 C 和 γ , 按 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^5$ 指数增长型方式取值, 并进行两两组合, 构造网格; 对于线性核函数 SVM, 只需对 C 设置搜索范围, 取 $1 \sim 1\,500$ 的线性空间。

(3) 统计各参数组合下 10 折交叉验证准确率, 以此为标准确定最优参数。

在双空间中, 不同参数对应的准确度如图 9 和图 10 所示。

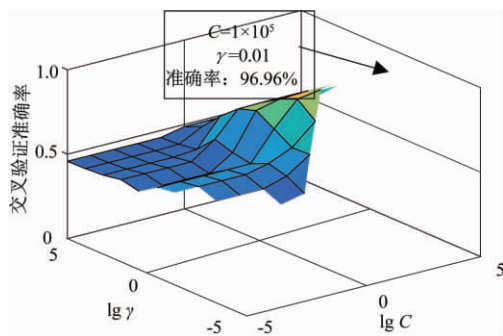


图 9 二维空间寻优

Figure 9 Optimization in 2-D space

采用高斯核函数的二维 (C, γ) 空间内, 在最优参数组合下, 交叉验证后的准确率达到 96.96%, 对应参数: $C = 1 \times 10^5$, $\gamma = 0.01$; 线性核函数的一维 (C) 空间内, 在最优惩罚系数下, 交叉验证后的准确率达到 99.06%, 对应参数: $C = 1\,348$ 。对于发生在不同故障参数下单相接地故障时的各线路零序电流, 小波包变换所提

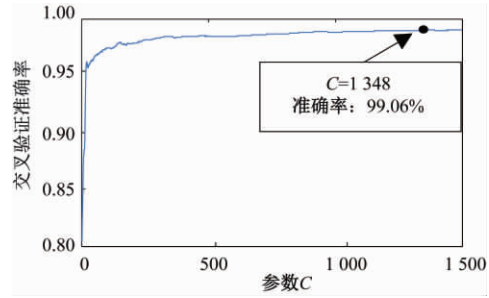


图 10 一维空间寻优

Figure 10 Optimization in 1-D space

取的零序电流暂态特征具有较好的线性可分性质, 不需映射至高维空间。因此线性 SVM 在以此类暂态特征为对象时, 寻优过程中表现出较高的准确率。同时, 在最优参数组合下, 虽然高斯核函数 SVM 的准确率略低于线性 SVM, 但高斯核函数 SVM 在面对线性不可分数据时性能更优, 例如变压器故障诊断、负荷预测等, 且在文中的故障选线问题中也有较高的准确率, 因此高斯核函数 SVM 仍具有被广泛地应用于电气领域的潜力。

5.3 批量测试

按照 5.1 节的故障参数设置方法, 接地电阻依次取 5、50、300、700、1 100 Ω 共 5 种接地电阻阻值; 故障初始角取 10° 、 40° 、 70° 等 3 种不同的角度; D 取 0.2、0.4、0.6、0.8 等 4 种不同的值。4 条出线依次设置故障并进行小波包变换。共得到 $4 \times 5 \times 3 \times 4 = 240$ 组样本测试集。采用惩罚系数为 1 348 的线性核函数支持向量机 (SVM)、朴素贝叶斯 (NB)、决策树 (DT)、随机森林 (RF) 4 种分类器。以 Scikit-learn 0.20 为平台, 基于上述训练集训练后, 在该测试集上的准确率如图 11 所示。

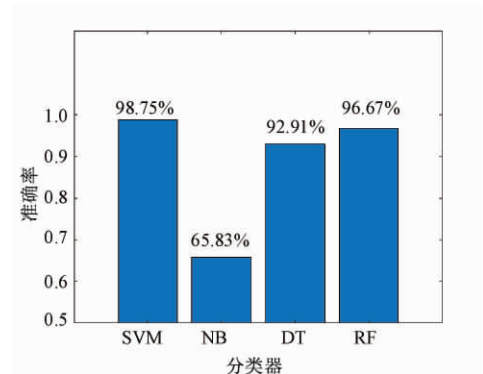


图 11 各分类器准确率

Figure 11 Accuracy of each classifier

由图 11 可看出, 在该测试集上, 经过改进网格寻优的 SVM 准确率大于其余几种分类器。

5.4 随机测试

由于在实际工程中,接地故障发生位置、初始相角、接地电阻阻值均有一定的随机性,使用随机函数产生多个区间为(0,1)的随机数,并用不同随机数与线路总长、 90° 、 $1\ 200\ \Omega$ 相乘,以

此模拟随机故障。将随机接地电阻 R_g 、故障点距母线距离 L 初始相角 α 及预测结果总结如表 1 所示。

表 1 随机测试结果

Table 1 Results of random test

线路	R_g/Ω	L/km	α	e_1	e_2	e_3	e_4	m_1	m_2	m_3	m_4	输出
L1	786.88	14.35	37.95°	0.056	0.012	0.005	0.003	-0.046	0.021	0.014	0.011	1
	1 120.79	2.13	86.35°	0.929	0.211	0.075	0.052	0.280	-0.135	-0.079	-0.065	1
L2	332.30	13.57	58.99°	0.152	0.668	0.057	0.035	0.093	-0.189	0.055	0.042	2
	988.15	7.84	2.86°	0.132	0.578	0.047	0.031	0.106	-0.221	0.063	0.052	2
L3	224.25	20.84	39.48°	0.144	0.101	0.789	0.035	0.069	0.058	-0.162	0.036	3
	775.57	1.03	71.57°	0.363	0.237	1.907	0.082	-0.168	-0.136	0.384	-0.078	3
L4	1 151.69	28.37	58.95°	0.005	0.004	0.002	0.033	0.017	0.014	0.010	-0.041	4
	268.57	27.19	44.85°	0.074	0.052	0.029	0.455	-0.052	0.044	0.034	-0.129	4

表 1 中最后一列代表分类器输出的结果,可以看出,在随机故障中,SVM 得到了正确的分类结果。

5.5 高阻接地测试

针对线路末端发生高阻接地时,以小波模极大值为判据导致选线失效的问题,模拟高阻接地故障,提取特征向量后输入经寻优后的 SVM 分类器,将 SVM 分类器输出和各线路模极大值总结如表 2 所示。

表 2 分类器输出和模极大值

Table 2 Outputs of classifier and maximum modulus

线路	L/km	R_g/Ω	m_1	m_2	m_3	m_4	输出
L2	15.6	1 150	0.021	0.082	-0.025	-0.037	2
L2	17.2	1 250	0.059	-0.034	-0.023	-0.068	2
L3	23.4	1 250	0.075	0.035	0.033	-0.092	3
L4	31.2	1 250	0.058	0.024	-0.032	-0.050	4

由表 2 可看出,依据模极大值的极性,无法正确地进行故障选线。而经过训练的 SVM 可识别出故障线路。

6 结论

(1) 配电网发生单相高阻接地故障后,若故障特征不明显,则无法依据各线路模极大值极性进行故障选线,而经训练后的 SVM 可识别出故障线路。

(2) 对于不同故障工况下经小波包变换提取的故障暂态特征,线性核函数 SVM 和高斯核函数 SVM 在惩罚系数较大时取得了较高的准确率,且高于其余经典机器学习分类器,但相比高斯核函

数 SVM,线性核函数 SVM 能更准确地依据暂态特征进行故障选线。

(3) 将故障选线转化为多分类问题具有可行性。实际工程中,可依据历史故障数据创建数据集,将支持向量机运用在故障选线领域,提高配电网自动化的程度。

参考文献:

- [1] 高志鹏,张慧芬,孙旭娜.注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(13):139-145.
- [2] 徐鹏,王钢,李海锋,等.基于环流量的同杆四回输电线路故障选线[J].电力系统保护与控制,2011,39(3):78-83.
- [3] 陈奎,陈博博.基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(24):66-73.
- [4] 魏臻珠,蒋建东,陈帆,等.小电流接地系统故障选线的暂态零序电流变化率方法[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(1):106-108.
- [5] 高杰,程启明,程尹曼,等.基于量子遗传双稳态系统的配电网故障选线方法[J].电力自动化设备,2018,38(5):164-170.
- [6] 邵翔,郭谋发,游林旭.基于改进 DTW 的接地故障波形互相关度聚类选线方法[J].电力自动化设备,2018,38(11):63-71.
- [7] 汤涛,黄纯,江亚群,等.基于高低频段暂态信号相关分析的谐振接地故障选线方法[J].电力系统自动化,2016,40(16):105-111.
- [8] 宋金钊,李永丽,石峥,等.一种新的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(6):9-15.

- [9] 黄景光,刘会家,胡汉梅,等. 行波小波系数极大值极性法接地故障选线研究[J]. 高电压技术,2006,32(8):100-104.
- [10] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等. 基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):70-75.
- [11] 刘渝根,王建南,马晋佩,等. 结合小波包变换和 5 次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J]. 高电压技术,2015,41(5):1519-1525.
- [12] 王守鹏,赵冬梅. 电网故障诊断的研究综述与前景展望[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):164-175.
- [13] 王耀南,霍百林,王辉,等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):54-58.
- [14] 逯鹏,牛新,刘素杰,等. 运动准备电位单次检测技术研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2018,39(4):70-74.

Fault Line Selection Based on Wavelet Packet Transform and Support Vector Machine

GAO Jinfeng¹, QIN Yurui¹, YIN Hongde²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Pingdingshan Power Supply Company, State Grid Company, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: When single-phase grounding fault occurred in distribution network, the non-power frequency components of zero-sequence current between fault line and normal line were obviously different. In order to solve the problem that the success rate of line selection is not high when the modulus maxima polarity was used as criterion in high resistance grounding, a method of line selection based on zero sequence current non-power frequency component and support vector machine was presented in this paper. This method decomposed the zero sequence current of each line by wavelet packet transform, and chose the characteristic frequency band according to the principle of maximum energy. It took the energy and modulus maxima of different lines in the characteristic frequency band as the characteristic vector, and took the fault line label as the classification target, transformed the fault line selection into multi-classification, and used support vector machine to predict the fault line. A large number of training samples were obtained through simulation. K-fold cross-validation and grid search were used to optimize the parameters of support vector machine. The results on the test dataset showed that the method was accurate and reliable. The correct line selection could be achieved at different grounding distances, grounding resistances and initial phase angles of faults.

Key words: fault line selection; wavelet packet transform; multi-classification; support vector machine

融合差分进化和 Taylor 级数的超宽带定位解算方法

张勇¹, 高光辉¹, 郭一楠¹, 巩敦卫¹, 杨建建²

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院 北京 100083)

摘要: 为提高定位解算方法的鲁棒性和定位精度, 提出一种融合差分进化算法和 Taylor 级数迭代的新超宽带定位解算方法。以定位误差作为优化目标, 采用差分进化算法对目标点实现全局定位, 进而以差分进化算法获得的最优定位点作为初始值, 采用 Taylor 级数迭代算法对定位点进行局部寻优, 获得更加精准的目标定位。针对煤矿掘进巷道这一复杂室内场景, 采用所提方法实现掘进支护移动支架的超宽带定位解算, 实验结果表明, 所提方法比已有定位解算方法具有更高的定位解算精度。

关键词: 超宽带; 室内定位; Taylor 级数迭代算法; 差分进化算法; 掘进支护移动支架

中图分类号: TP732

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.013

0 引言

随着智能物联网的快速发展, 需要对部署在室内的众多设备或人员定位, 且定位精度要求也日益提高^[1]。然而, 现有定位方法主要依托无线信号, 受复杂室内环境、障碍物和噪声影响严重, 定位精度存在误差。

常用的室内定位方法主要包括红外线定位、超声波定位、蓝牙定位、射频识别定位、激光定位和超宽带定位^[2]等。其中, 红外线定位易受障碍物干扰, 且通信距离较短^[3]; 超声波定位受室内环境中存在的多径效应影响大, 且定位距离较短^[4]; 蓝牙定位对室内噪声敏感, 且定位误差较大、定位距离短^[5]; 射频识别定位速度快、安全性强, 但是定位距离短、系统兼容性差^[6]; 超宽带定位采用带宽大于 500 MHz 的纳秒级脉冲信号, 穿透性强、时间分辨率高、定位精度高, 信号在传输过程中抗干扰能力强^[1]。然而, 采用超宽带实现目标位置标定, 是根据测定距离, 基于一组非线性定位方程组, 通过最小二乘法(least square method, LS)^[7]、直接法^[8]或 Taylor 级数迭代算法^[9-10]进行方程求解获得。其中, 采用最小二乘法和直接法进行方程求解, 获得的定位精度较差; Taylor 级数迭代算法的求解精度高, 但是对初始值具有较强的依赖性, 可能出现目标定位偏离实际值且不收敛的情况。

基于此, 笔者针对超宽带室内定位方法, 提出一种融合差分进化算法和 Taylor 级数迭代算法的新型定位解算方法。该算法以定位误差作为优化目标, 采用差分进化算法对目标点实现全局定位, 然后以差分进化算法获得的最优定位点作为初始值, 采用 Taylor 级数迭代算法对定位点进行局部寻优。通过这种定位解算方法克服传统 Taylor 级数迭代算法对初始值的依赖性, 从而获得高精度的目标定位。进而将所提方法用于煤矿掘进巷道这一复杂室内场景下, 掘进支护移动支架的超宽带定位解算。

1 超宽带定位原理

超宽带技术不是利用传统的载波来传输数据, 而是通过发送和接收具有纳秒及纳秒以下的极窄脉冲来传输数据, 从而具有 GHz 量级的带宽^[2]。美国联邦通信委员会对超宽带的定义为:

$$\frac{f_H - f_L}{f_C} \geq 20\% \text{ 或 } f_H - f_L \geq 500 \text{ MHz}, \quad (1)$$

式中: f_H 和 f_L 分别为相对于峰值功率下降 10 dB 时对应的高频和低频值; f_C 为载波的中心频率。

采用超宽带定位方法对目标点进行位置标定时, 通常相对于目标点设置多个基站, 如图 1 所示。通过 K 个基站依次对目标点进行超宽带测距, 进而依据测距信息, 构建定位方程组, 解算获得目标点位置坐标。

收稿日期: 2019-03-12; 修订日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573361, 61773384, 61876185)

通信作者: 郭一楠(1975—), 女, 山西太原人, 中国矿业大学教授, 博士, 研究方向为智能优化算法、机器人技术、网络控制系统等, E-mail: nanfly@126.com。

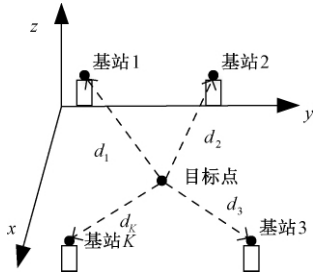


图1 超宽带定位原理

Figure 1 Positioning principle of ultra-wideband

超宽带定位通常采用基于接收信号强度、基于信号到达角度和基于信号到达时间^[11]。相比而言,采用到达时间测距方法具有较高的测距精度,但是单向测距需要基站和目标点之间时钟严格同步,这一要求很难保证,而采用双向测距不需要时钟同步,有效提高了测距精度^[12]。

基于双向测距的接收信号时间法原理如图2所示。针对第 i ($i=1, 2, \dots, K$)个基站,目标点在 T_{i0} 时刻发送含有时间标记信息的数据包给基站 i ,基站 i 收到此数据包,并延时时间 $T_{i\text{delay}}$ 后,回送一个信号给目标点,目标点根据接收到的信号来确定传播时间。假设 T_i 为信号在目标点和基站 i 之间传输所用时间, T_{i0} 为信号从目标点发出的时刻, T_{i1} 为目标点收到返回信号的時刻, c 为光速,则目标点和基站 i 之间的测定距离为:

$$d_i = T_i c; \quad (2)$$

$$T_i = \frac{1}{2} [(T_{i1} - T_{i0}) - T_{i\text{delay}}] \quad (3)$$

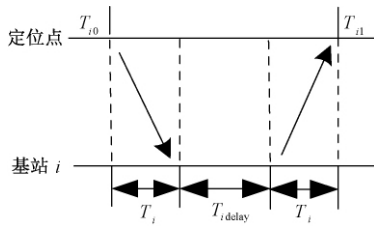


图2 基于双向测距的接收信号时间法原理

Figure 2 Principle of received signal time method based on two-way ranging

假设第 i 个基站的坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,目标点坐标为 (x_s, y_s, z_s) ,则根据所有基站与目标点之间的到达时间构建超宽带定位解算模型为:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_s - x_1)^2 + (y_s - y_1)^2 + (z_s - z_1)^2}; \\ d_2 = \sqrt{(x_s - x_2)^2 + (y_s - y_2)^2 + (z_s - z_2)^2}; \\ \vdots \\ d_K = \sqrt{(x_s - x_K)^2 + (y_s - y_K)^2 + (z_s - z_K)^2}. \end{cases} \quad (4)$$

解算上述定位方程组,就可以获得目标点位置,记为 (x_s^*, y_s^*, z_s^*) 。

2 融合差分进化和 Taylor 级数的定位解算方法

Taylor 级数迭代算法求解超宽带定位方程组可以获得精确的定位结果,但是该算法对初始值具有较强的依赖性。选取不当的初始值,可能导致获得的目标位置偏离实际值较远,甚至不收敛的情况。基于此,研究人员提出直接法^[11]、LS 算法^[12]用于选取 Taylor 级数迭代算法的初始值。但是,LS 算法中逆矩阵的求解耗时,且定位精度不高。基于此,笔者引入差分进化算法这一基于群体的高效启发式全局优化算法,对目标点实现全局定位,将获得的最优定位点作为 Taylor 级数迭代算法初始值进行局部寻优,从而获得高精度的目标定位。

2.1 基于差分进化算法的全局定位

差分进化算法(differential Evolution, DE)由 Rainer Storn 和 Kenneth Price 于 1997 年提出,是一种基于种群的启发式进化优化方法^[13]。DE 算法结构较简单且易于实现,调控参数少,时间复杂度低。为提高 DE 算法的搜索能力,目前已有一些改进,如 JADE^[14]、SHADE^[15]算法等,相比于 DE 算法, JADE、SHADE 算法整体上具有较快的收敛速度和收敛精度,同时表现出较好的稳定性。

以目标点位置坐标 (x_s, y_s, z_s) 作为差分进化个体,且个体中各个变量满足 $x_s \in [x_{s\min}, x_{s\max}]$, $y_s \in [y_{s\min}, y_{s\max}]$, $z_s \in [z_{s\min}, z_{s\max}]$ 。记第 i 个超宽带基站到目标点的测量距离为 d_i ,则超宽带定位解算模型转化为如下单目标优化问题:

$$f(x_s, y_s, z_s) = \min \left(\sum_{i=1}^K \left| \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2 + (z_s - z_i)^2} - d_i \right| \right) \quad (5)$$

采用 DE 算法实现超宽带定位方程解算,具体算法流程如下。

Step1: 初始化种群,设种群规模为 N ,初始化种群中的每个解记为 $x_i(0)$, $i=1, 2, \dots, N$ 。

Step2: 评价种群中每个个体的适应值。

Step3: 在第 t 次迭代中,对第 i 个个体进行变异操作,从种群中随机选择 3 个个体 $x_{p1}(t)$ 、 $x_{p2}(t)$ 、 $x_{p3}(t)$,且 $p1 \neq p2 \neq p3 \neq i$,记为:

$$\hat{x}_i(t) = x_{p1}(t) + F(x_{p2}(t) - x_{p3}(t)), \quad (6)$$

式中: $F \in [0, 2]$ 为加权因子。

Step4: 对于 $\hat{x}_i(t)$ 将其与 $x_i(t)$ 进行交叉,生成的交叉后个体为:

$$x_{ij}(t) = \begin{cases} \hat{x}_{ij}(t), & \text{rand}(0, 1) \leq CR \text{ 或 } j = j_{\text{rand}}; \\ x_{ij}(t), & \text{其他}, \end{cases}$$

(7)

式中: $CR \in [0, 1]$ 是交叉概率; $j = 1, 2, \dots, M$; j_{rand} 为随机整数 $j_{\text{rand}} \in [1, M]$, M 为个体的变量维数。

Step5: 比较 $\bar{x}_i(t)$ 与 $x_i(t)$ 的适应值, 满足以下条件的个体, 被选择进入下一代,

$$x_i(t+1) = \begin{cases} \bar{x}_i(t), & f(\bar{x}_i(t)) < f(x_i(t)); \\ x_i(t), & \text{其他。} \end{cases} \quad (8)$$

Step6: 判断是否达到最大进化代数, 若是, 则终止进化, 将得到最优个体作为目标点位置输出; 若否, 则跳转到 Step2。

2.2 基于 Taylor 级数迭代算法的局部定位

Taylor 级数迭代算法是一种递归算法。它基于定位初始值, 通过反复迭代, 获得目标点的最优坐标^[10]。假设目标点的真实坐标为 (x_s, y_s, z_s) , 位置初始值为 (x_{s0}, y_{s0}, z_{s0}) , 真实目标点坐标与解算后目标点坐标满足以下关系:

$$\begin{cases} x_s = x_{s0} + \Delta x; \\ y_s = y_{s0} + \Delta y; \\ z_s = z_{s0} + \Delta z. \end{cases} \quad (9)$$

在初始坐标 (x_{s0}, y_{s0}, z_{s0}) 处, 对超宽带定位方程组进行 Taylor 级数展开, 并忽略二阶以上分量:

$$\Delta = (A^T A)^{-1} A^T B, \quad (10)$$

式中:

A

$$= \begin{pmatrix} \frac{x_{s0} - x_1}{\sqrt{(x_{s0} - x_1)^2 + (y_{s0} - y_1)^2 + (z_{s0} - z_1)^2}} \\ \frac{y_{s0} - y_1}{\sqrt{(x_{s0} - x_1)^2 + (y_{s0} - y_1)^2 + (z_{s0} - z_1)^2}} \\ \frac{z_{s0} - z_1}{\sqrt{(x_{s0} - x_1)^2 + (y_{s0} - y_1)^2 + (z_{s0} - z_1)^2}} \\ \frac{x_{s0} - x_2}{\sqrt{(x_{s0} - x_2)^2 + (y_{s0} - y_2)^2 + (z_{s0} - z_2)^2}} \\ \frac{y_{s0} - y_2}{\sqrt{(x_{s0} - x_2)^2 + (y_{s0} - y_2)^2 + (z_{s0} - z_2)^2}} \\ \frac{z_{s0} - z_2}{\sqrt{(x_{s0} - x_2)^2 + (y_{s0} - y_2)^2 + (z_{s0} - z_2)^2}} \\ \vdots \\ \frac{x_{s0} - x_K}{\sqrt{(x_{s0} - x_K)^2 + (y_{s0} - y_K)^2 + (z_{s0} - z_K)^2}} \\ \frac{y_{s0} - y_K}{\sqrt{(x_{s0} - x_K)^2 + (y_{s0} - y_K)^2 + (z_{s0} - z_K)^2}} \\ \frac{z_{s0} - z_K}{\sqrt{(x_{s0} - x_K)^2 + (y_{s0} - y_K)^2 + (z_{s0} - z_K)^2}} \end{pmatrix};$$

$B =$

$$\begin{pmatrix} d_1 - \sqrt{(x_{s0} - x_1)^2 + (y_{s0} - y_1)^2 + (z_{s0} - z_1)^2} \\ d_2 - \sqrt{(x_{s0} - x_2)^2 + (y_{s0} - y_2)^2 + (z_{s0} - z_2)^2} \\ \vdots \\ d_K - \sqrt{(x_{s0} - x_K)^2 + (y_{s0} - y_K)^2 + (z_{s0} - z_K)^2} \end{pmatrix}.$$

根据定位误差, 修正解算后的目标点坐标, 重复迭代上述过程, 直到满足 $|\Delta x| + |\Delta y| + |\Delta z| \leq \varepsilon$ 或达到最大迭代代数, 最终获得的目标点位置坐标为 (x_s^*, y_s^*, z_s^*) , 其中 ε 为预先设定的误差阈值。

基于 DE 算法和 Taylor 级数迭代算法的室内超宽带定位解算方法的步骤如下。

Step1: 目标点依次向各个基站发起一次测距, 根据公式(2)和(3), 计算每次测量的距离值, 对每一个基站进行 1 000 次测距, 取其平均值作为目标点与这个基站的距离, 记为 d_1, d_2, \dots, d_k 。

Step2: 根据目标点与各个基站之间的距离, 列出定位方程解算模型。

Step3: 以公式(5)作为适应度函数, 采用 DE 算法求取目标点的最优位置坐标 (x_{s0}, y_{s0}, z_{s0}) , 作为 Taylor 级数迭代的初始值。

Step4: 将 (x_{s0}, y_{s0}, z_{s0}) 代入 A 和 B , 依据公式(10)进行迭代计算, 直到满足 $|\Delta x| + |\Delta y| + |\Delta z| \leq \varepsilon$ 。

Step5: 若条件成立, 则把 (x_{s0}, y_{s0}, z_{s0}) 作为最优目标点定位输出; 若不成立, 则计算公式(9), 并返回 Step4。

3 实验分析与结果说明

为充分验证所提定位解算方法的合理性和有效性, 将所提方法用于煤矿掘进巷道这一复杂室内场景, 对掘进支护移动支架进行超宽带定位解算。

3.1 测试环境和参数设置

假设巷道为矩形, 宽 4.2 m、高 3.9 m、长 100 m。采用 4 个基站进行定位, 且 4 个基站的坐标分别为 $(0, 0, 0)$ 、 $(2, 4, 0)$ 、 $(-2, 4, 0)$ 、 $(0, 0, 3.8)$ 。每隔 10 m, 掘进支护支架上的目标点依次对 4 个基站进行超宽带测距, 一般测距误差服从均值为 0、标准差为 2 cm 的正态分布^[12]。在上述定位环境下, 目标点对每个基站进行 1 000 次测距, 取其均值作为距离估计值。

DE 算法中个体的搜索范围取决于巷道尺寸, 即 $x_s \in [-2.1, 2.1]$, $y_s \in [10, 100]$, $z_s \in [0, 3.9]$ 。选取种群规模为 30, 最大迭代次数为

100, Taylor 级数迭代算法中的误差阈值 $\varepsilon = 0.01$ 。

假设第 k 次运行后得到的解算目标点坐标为 $(x_{sk}^*, y_{sk}^*, z_{sk}^*)$, 真实定位点坐标为 (x_s, y_s, z_s) , L 为运行次数, 则定义平均定位误差为:

$$E = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sqrt{(x_{sk}^* - x_s)^2 + (y_{sk}^* - y_s)^2 + (z_{sk}^* - z_s)^2} \quad (11)$$

3.2 所提定位解算方法对参数敏感性分析

笔者结合已有文献分析 DE 算法参数对解算结果的影响。文献[16]设置加权因子 $F = 0.5$, 交叉概率 $CR = 0.9$ 或 $CR = 0.1$; 文献[17]设置加权因子 $F = 0.5$, 交叉概率 $CR = 0.5$; 文献[18]设置加权因子 $F = 0.9$, 交叉概率 $CR = 0.9$; 文献[19]设置加权因子 $F = 1.0$, 交叉概率 $CR = 0.9$ 。面向不同测量距离, 分别采用以上 DE 算法参数, 进行 500 次独立运行后的定位误差均值如图 3 和图 4 所示。

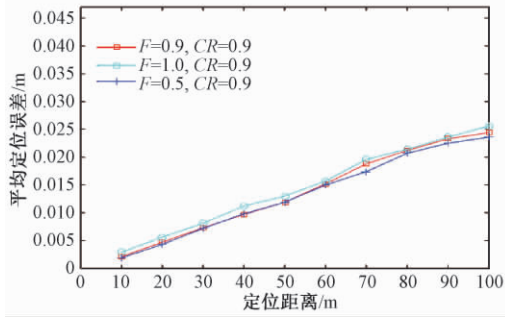


图 3 不同加权因子时定位解算方法的平均定位误差

Figure 3 Average positioning error of positioning solution method with different weighting factors

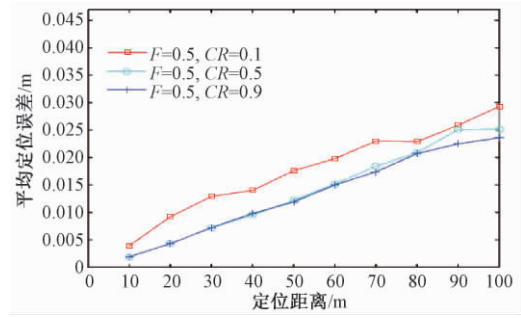


图 4 不同交叉概率时定位解算方法的平均定位误差

Figure 4 Average positioning error of positioning solution method with different crossover probabilities

对比图 3 可知: 加权因子对于定位解算方法的影响较小。其中, 定位解算方法在加权因子 $F = 0.5$ 时, 取得较好的效果, 在 $F = 1$ 和 $F = 0.9$ 时的平均定位误差稍大于 $F = 0.5$ 时的平均定位误差, 但是差别不明显。对比图 4 可知: 交叉概率对于定位解算方法的影响较大。其中, 定位解算方法在交叉概率 $CR = 0.1$ 时, 平均定位误差明显大于 $CR = 0.5$ 和 $CR = 0.9$ 时的平均定位误差; 在 $CR = 0.9$ 时的平均定位误差稍小于 $CR = 0.5$ 时的平均定位误差。在以下实验中, 设置加权因子 $F = 0.5$ 和交叉概率 $CR = 0.9$ 。

3.3 不同定位解算方法性能对比分析

分别用 LS 算法^[9]、直接法^[10]、直接-Taylor 算法^[11]、LS-Taylor 算法^[12]和笔者提出的 DE-Taylor 算法, 实现对掘进支护移动支架超宽带定位方程组的解算。面向不同测量距离, 进行 500 次独立运行后的定位误差均值和方差如表 1 所示; 相应的定位误差均值和 boxplot 图, 如图 5 和图 6 所示。

表 1 噪声环境下 5 种解算方法的平均定位误差和方差

Table 1 Average positioning error of five solution methods in noisy environment

距离/m	LS	直接法	LS-Taylor	直接-Taylor	DE-Taylor
10	0.003 2 ± 2.35E-6	0.003 1 ± 2.34E-6	0.002 4 ± 1.36E-6	0.002 3 ± 1.21E-6	0.002 0 ± 9.86E-7
20	0.006 3 ± 1.11E-5	0.006 2 ± 6.97E-6	0.004 9 ± 6.03E-6	0.005 2 ± 4.96E-6	0.004 2 ± 4.54E-6
30	0.008 9 ± 1.72E-5	0.009 9 ± 1.96E-5	0.007 4 ± 1.35E-5	0.008 1 ± 1.52E-5	0.006 5 ± 1.00E-5
40	0.013 5 ± 4.15E-5	0.013 6 ± 3.59E-5	0.010 5 ± 2.86E-5	0.010 9 ± 2.41E-5	0.009 4 ± 2.73E-5
50	0.0160 ± 5.26E-5	0.016 6 ± 5.98E-5	0.013 2 ± 4.45E-5	0.012 9 ± 3.92E-5	0.011 6 ± 3.27E-5
60	0.020 6 ± 6.54E-5	0.020 3 ± 8.85E-5	0.016 4 ± 6.15E-5	0.016 3 ± 6.07E-5	0.014 2 ± 6.00E-5
70	0.022 9 ± 9.32E-5	0.022 6 ± 9.44E-5	0.018 9 ± 8.55E-5	0.019 0 ± 8.19E-5	0.017 1 ± 7.90E-5
80	0.027 1 ± 1.59E-4	0.027 2 ± 1.46E-4	0.022 1 ± 1.28E-4	0.022 1 ± 1.43E-4	0.020 4 ± 1.02E-4
90	0.032 1 ± 2.20E-4	0.030 8 ± 2.00E-4	0.025 2 ± 2.04E-4	0.025 1 ± 1.56E-4	0.023 0 ± 1.36E-4
100	0.035 1 ± 2.70E-4	0.035 4 ± 2.29E-4	0.028 4 ± 1.92E-4	0.028 8 ± 1.89E-4	0.024 5 ± 1.83E-4

对比 5 种算法的平均定位误差, 可知: 随着目标点距离基站位置的增加, 无论何种算法, 其定位误差都逐渐变大, 且呈线性增加。在相同的定位距离下, LS 算法和直接法作为全局定位方法, 具

有相对较大的定位误差。在融合 Taylor 级数迭代这一局部定位算法后, 上述算法的定位精度显著提高。采用 DE 算法作为全局定位方法后, 笔者所提出的 DE-Taylor 定位解算方法具有最好的定

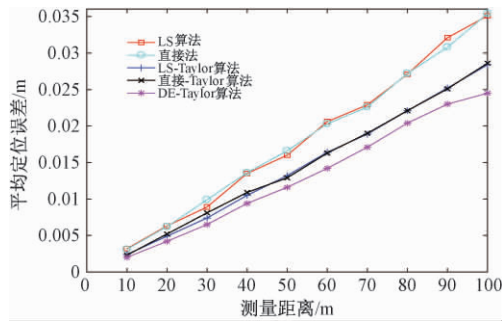


图5 5种算法的平均定位误差

Figure 5 Average positioning error of five algorithms 位精度。

图6为5种算法的定位误差分布图,由图6可知:在相同的定位距离下,LS算法和直接法的误差分布较分散,定位误差均值比较大。融合Taylor级数迭代算法后3种算法的定位误差分布较紧密,定位误差均值有一定程度的减小,其中DE-Taylor算法的定位误差分布最紧密且具有最小的定位误差均值。由表1可以看出:DE-Taylor算法的平均定位误差和方差都最小(表1加黑部分)。

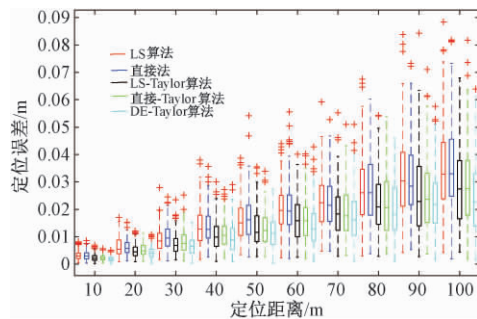


图6 5种算法定位误差分布图

Figure 6 Positioning error boxplot diagram of five algorithms

4 结论

用于室内设备或人员定位的超宽带定位方法,其传统的定位模型解算采用Taylor级数迭代算法,对初始值存在较强依赖性。基于此,笔者提出一种融合差分进化算法和Taylor级数迭代的新型超宽带定位解算方法,通过差分进化算法获得的全局最优值作为Taylor级数迭代的初始值,实现更准确的目标定位。针对煤矿掘进巷道这一复杂室内场景,采用所提方法实现掘进支护移动支架的超宽带定位解算,实验结果表明,所提方法比LS算法、直接法、LS-Taylor算法和直接-Taylor算法具有更高的定位精度和更强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 张忠娟. 基于UWB的室内定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [2] 林传分. 基于超宽带的室内定位算法研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [3] 张春香. 基于RFID技术的室内定位系统的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- [4] 李冰. 超声波室内定位导航装置的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [5] 王益健. 蓝牙室内定位关键技术的研究与实现[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [6] 石雪军, 纪志成. 基于射频识别的室内定位系统算法研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(6): 1294-1300.
- [7] 李晨阳. 基于相位的无源超高频射频识别定位研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [8] 魏培, 姜平, 贺晶晶, 等. 基于内三角形质心算法的超宽带室内定位[J]. 计算机应用, 2017, 37(1): 289-293.
- [9] CHEHRI A, FORTIER P, TARDIF P M. UWB-based sensor networks for localization in mining environments [J]. Ad hoc networks, 2009, 7(5): 987-1000.
- [10] YU K G, MONTILLET J P, RABBACHIN A, et al. UWB location and tracking for wireless embedded networks [J]. Signal processing, 2006, 86(9): 2153-2171.
- [11] 蒋文美, 王玫. 一种基于TOA的UWB直接-Taylor复合定位算法[J]. 桂林电子工业学院学报, 2006, 26(1): 1-5.
- [12] TALOM F T, DENIS B, KEIGNART J, et al. Uwb positioning experiment in a typical snowy environment [C]// 2007 4th Workshop on Positioning, Navigation and Communication. Hannover: IEEE, 2007: 65-70.
- [13] 杨洲, 汪云甲, 陈国良, 等. 超宽带室内高精度定位技术研究[J]. 导航定位学报, 2014, 2(4): 31-35.
- [14] 熊海良. 超宽带无线通信与定位关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学通信工程学院, 2011.
- [15] 梁久祯. 无线定位系统[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [16] 符世琛, 李一鸣, 成龙, 等. 几何布局对掘进机位姿检测精度的影响分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(5): 46-49.
- [17] 朱晓东, 刘冲, 郭雅默. 基于烟花算法与差分进化算法的模糊分类系统设计[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(6): 47-51.
- [18] 廖雄鹰, 李俊, 罗阳坤, 等. 基于自适应变异算子的差分进化算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(6): 128-134.

计及功率预测误差的主动配电网运行方式优化

王克文, 刘 凯, 刘艳红

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 在主动配电网的运行方式优化中, 节点功率数据通常来自功率预测, 存在预测误差及相应的分布特性, 从而可以采用概率表达进行描述。计及功率预测误差的分布特征, 以综合运行费用均值为目标函数, 节点功率平衡方程为等式约束, 节点电压和支路功率等变量的运行范围构成不等式约束, 建立主动配电网运行方式的概率优化模型。通过分析优化算式的特点, 采用二阶潮流表达的概率描述, 在随机变量的均值计算中计及方差修正, 提高均值计算的准确度。在优化模型求解中, 依据变量的实际特点, 对离散变量和连续变量采用不同的处理方式, 应用信赖域管理技术处理连续变量。通过 118 节点算例的计算分析, 说明所述算法的可行性和实用性。

关键词: 主动配电网; 二阶项修正; 概率潮流; 信赖域; 约束条件

中图分类号: TM72 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.008

0 引言

分布式发电与配电网发展的迫切需求催生了主动配电网(ADN)^[1]的概念。主动性指的是ADN具备主动管理能力, 能够对网络的各类资源进行协调控制和主动管理。与传统配电网相比, 主动配电网在满足安全运行要求的前提下, 可以尽量减少运行成本^[2]。

在功率表达中考虑概率特性, 已有不少的研究成果^[3-10]。文献[3]基于 Monte Carlo 模拟技术提出了一种能够准确计及任意分布的光伏功率和负荷相关性的概率潮流计算方法。此方法避免了烦琐的公式推导, 并且在样本合理、数量足够的前提下, 蒙特卡洛法可达到较高的精度, 但相应的计算量会随着样本数的增大而增大^[4]。随机响应面法^[5]的基本原理是在已知输入随机变量概率分布的基础上, 将输出响应表达为关于已知参数的混沌多项式, 通过少量采样确定多项式中的待定系数, 进而得到所估计的输出响应的概率分布。以随机响应面为代表的多项式混沌展开方法^[6]在概率分析中受到广泛关注。文献[7]介绍一种基于点估计和 Gram-Charlier 展开的概率潮流实用算法, 无须知道输入随机变量的概率密度

函数。点估计法是一种逼近技术, 利用输入随机变量的统计信息来逼近输出随机变量的统计信息。在计算时, 无须知道输入与输出之间具体的函数关系表达式。

现有 ADN 的优化研究中, 建立了考虑经济性、风险性等优化模型, 用概率潮流实现风险指标的计算, 并在优化算式求解上采用了各种求解方法^[8-10]。文献[9]建立了运行成本与越限风险最小的多目标日前优化调度模型, 计及各种 ADN 调度手段, 用“理想点”法处理多目标模型, 以和搜索算法为求解工具, 并基于半不变量法随机潮流实现越限风险指标的计算。文献[9]考虑了时序性和随机性, 对光伏发电和负荷建立分时段多状态模型, 以高于置信水平的年费用最小为上层规划目标函数, 光伏电源和电容器安装位置和容量为上层优化变量, 以高于置信水平的运行年费用最小为下层规划目标函数, 每个时段光伏发电无功出力 and 电容器投切状态为下层优化变量, 建立嵌入机会约束规划的二层规划模型。文献[10]建立基于三相潮流的辐射状配电网多时段有功-无功协调动态优化模型, 采用混合整数二阶锥规划算法进行求解。

笔者基于已得到的功率预测误差的分布特

收稿日期:2018-10-26; 修订日期:2019-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473265)

作者简介:王克文(1964—), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统稳定与控制研究, E-mail: kw-wang@zzu.edu.cn。

性,采用解析表达的方式求解。尽管考虑到预测误差与时序的随机扰动不一致,但在处理方法上类似。由于功率预测误差的分布特性会对随机变量的均值产生影响,因此在求解过程中,通过方差修正来提高均值计算的准确度。在优化模型求解中,依据量的实际特点,对离散变量和连续变量采用了不同的处理方式。

基于上述分析,笔者计及功率预测误差的分布特征,以综合运行费用的均值为目标函数,节点功率平衡方程、节点电压和支路功率等变量的运行范围构成约束条件,建立主动配电网运行方式的概率优化模型,并在随机变量的均值表达中计及方差的修正。对离散变量和连续变量进行分类处理。

1 算法的选择

虽然本文的均值表达计及了功率预测误差的分布特性,但是此处的均值表达与概率潮流中的均值表达在表达式上基本一致。因此,在处理方法上也可以选择蒙特卡洛法、随机响应面法等。但基于以下两个因素:

(1) 如果对协方差采用计及高阶项表达,结果更为准确,但计算量急剧增加;阶数越高,贡献量也越小。结合本文均值表达的用途,对均值表达保留到二阶,对方差保留到一阶。

(2) 如果蒙特卡洛法在本文中即用在概率潮流表达中,也用到优化计算中,则对每一种样本都有一个优化结果,这会使目标函数的优化复杂化。

因此,笔者采用了计及方差修正的均值表达。

2 计及方差修正的均值表达

2.1 随机变量均值运算

对于常数 a 和随机变量 x, y , 有均值运算^[12]:

$$\overline{a} = a; \quad (1)$$

$$\overline{ax} = a\overline{x}; \quad (2)$$

$$\overline{x+y} = \overline{x} + \overline{y}; \quad (3)$$

$$\overline{xy} = \overline{x}\overline{y} + C_{xy}, \quad (4)$$

其中,协方差^[6] C_{xy} 为:

$$C_{xy} = (\overline{x - \overline{x}})(\overline{y - \overline{y}}). \quad (5)$$

式(4)中,随机变量乘积的均值等于均值的乘积加协方差,形成计及二阶协方差修正的均值表达。

2.2 方差对均值的修正

配电网优化中,存在多种功率表达,例如节点注入功率表达、支路功率表达等。以潮流计算中的节点功率为例进行说明。

直角坐标下节点 i 的潮流方程式^[12] 为:

$$P_i = \sum_{j \in i} (G_{ij}e_i e_j - B_{ij}e_i f_j + G_{ij}f_i f_j + B_{ij}e_i e_j); \quad (6)$$

$$Q_i = \sum_{j \in i} (G_{ij}f_i e_j - B_{ij}f_i f_j - G_{ij}e_i f_j - B_{ij}e_i e_j), \quad (7)$$

式中: P_i 和 Q_i 为节点 i 的注入有功和无功功率。

直角坐标下,节点功率是节点电压的二次函数。因此,可将潮流方程(6)、(7)写成通式:

$$Y = f(X) = g(X_1 X_1, \dots, X_i X_i, \dots, X_{2N} X_{2N}), \quad (8)$$

式中:列向量 Y 由 PQ 点的有功和无功功率构成;列向量 X 由节点电压的实部和虚部构成。

将式(8)在均值 \overline{X} 处按照泰勒级数展开,并考虑到二阶项和零阶项有相同的形式,得到:

$$Y = f(\overline{X}) + J_{\overline{X}} \Delta X + f(\Delta X), \quad (9)$$

式中: $\Delta X = X - \overline{X}$; $J_{\overline{X}}$ 为雅克比矩阵。

由于式(6)~(8)中的最高阶为二阶,所以式(9)为完整表达式。

参照式(4)、(6)~(8), Y 的均值可表示成:

$$\begin{aligned} \overline{Y} = \overline{f(X)} &= g(\overline{X_1 X_1}, \dots, \overline{X_i X_i}, \dots, \overline{X_{2N} X_{2N}}) = \\ &= g(\overline{X_1} \overline{X_1} + C_{\overline{X_1 X_1}}, \dots, \overline{X_i} \overline{X_i} + C_{\overline{X_i X_i}}, \dots, \\ &\quad \overline{X_{2N}} \overline{X_{2N}} + C_{\overline{X_{2N} X_{2N}}}). \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)中计及协方差的影响,也是完整表达。

由偏差表达式:

$$\Delta Y = J_X \Delta X, \quad (11)$$

得到电压的协方差为:

$$C_X = J_X^{-1} C_Y (J_X^{-1})^T. \quad (12)$$

概率潮流计算的迭代算式为:

$$\begin{cases} \Delta \overline{Y} = \overline{Y_0} - \overline{Y} = -J_{\overline{X}} \Delta \overline{X}; \\ C_X = J_X^{-1} C_Y (J_X^{-1})^T. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)第1式中的均值计算采用式(10)的完整表达,第2式中的协方差 C_X 为线性化表达。如果对协方差采用计及高阶项表达,结果更为准确,但计算量急剧增加,阶数越高,贡献量也越小。计算量和精确度之间的折中处理,笔者采用了均值完整表达,计算量增加不多,用来保证目标函数计算的相对准确;在协方差计算中仅采用线性化处理。

计算概率潮流时,采用均值、方差的交替迭代方式,几次均值迭代加一次方差迭代。配电网优化中,各种功率表达均采用类似处理方式。

3 约束条件的概率表达

在约束条件中考虑预测误差的分布特性,约

束条件变为概率约束。

假设 t 时刻第 i 节点的电压概率分布如图 1 所示。 $h(V_{i,t})$ 为 t 时刻 i 节点的电压概率密度函数; 1.05、0.95 分别为节点电压标幺值允许范围的上、下限; 阴影区域代表电压越限概率。

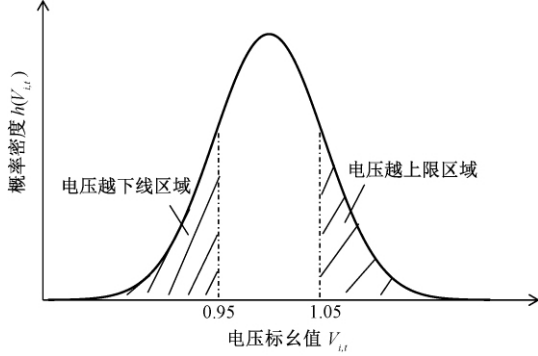


图 1 节点电压越界区域

Figure 1 Node voltage across boundaries

在只考虑均值和方差的情况下, 节点电压 $V_{i,t}$ 的概率密度为:

$$h(V_{i,t}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{V_{i,t}}} \exp\left[-\frac{(V_{i,t} - \bar{V}_{i,t})^2}{2\sigma_{V_{i,t}}^2}\right]. \quad (14)$$

则节点电压越界风险 $K_{V_{i,t}}$ 为:

$$K_{V_{i,t}} = \int_{-\infty}^{0.95} h(V_{i,t}) dV_{i,t} + \int_{1.05}^{+\infty} h(V_{i,t}) dV_{i,t}. \quad (15)$$

实际计算中, 将 $V_{i,t}$ 分布转化为 0-1 分布, 用插值法从累积概率分布表中快速查取式 (15) 等号右边的第一项和第二项, 得到 $K(V_{i,t})$ 。

满足要求的电压分布范围为 $[\bar{V}_{i,t} - 3\sigma_{V_{i,t}}, \bar{V}_{i,t} + 3\sigma_{V_{i,t}}]$ 。节点电压分布范围的上界应小于 1.05, 下界大于 0.95。约束表达式为:

$$\begin{cases} V_{\min} \leq \bar{V}_{i,t} - 3\sigma_{V_{i,t}}; \\ \bar{V}_{i,t} + 3\sigma_{V_{i,t}} \leq V_{\max}. \end{cases} \quad (16)$$

4 基于信赖域管理技术的优化模型

近年来, 混合整数二阶锥优化^[13-14] (mixed integer second-order cone programming, MISCOP) 求解技术愈见成熟。文献[10]构建了主动配电网的三相无功优化模型, 并应用 MISCOP 技术进行求解, 验证了该方法的可行性, 上述文献中利用二阶锥优化技术处理连续变量, 利用分支定界和割平面方法处理其他变量。因此, 笔者尝试利用信赖域管理技术构建优化模型。算例验证了笔者所提模型的有效性。

信赖域管理技术^[15] 主要应用于求解非线性的全局优化问题。该管理技术将复杂非线性设计空间分割成一系列子空间(信赖域)。

4.1 目标函数

参照文献[8-9], 笔者考虑了以下 9 种因素: 向上级电网净购电成本、向 DG 购电成本、网损成本、削减 DG 有功出力的赔偿成本、对可中断负荷控制成本、ESS 调节成本、变压器分接头调节成本、并联电容器调节成本和电压。

假定用 t 代表时刻, ΔT 代表时段, N_t 代表总时段数, P 代表有功功率, M 代表费用系数, ΔN 代表变压器分接头档位和电容器投切状态变化次数。

$M_{\text{comp}} = 1.5 M_{\text{loss}}$, M_{grit} , $M_{\text{CL}, i} = 0.8 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $M_{\text{ESS}, i} = 0.05 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

$$\begin{aligned} \min \bar{F} = & \sum_{t=1}^{N_{\text{TN}}} \{M_{\text{grit}, t} \bar{P}_{\text{grit}, t} \Delta T + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} (M_{\text{DG}, i} \bar{P}_{\text{DG}, i, t}) \Delta T + \\ & M_{\text{loss}, t} \bar{P}_{\text{loss}, t} \Delta T + \sum_{i=1}^{N_{\text{DG}}} [M_{\text{comp}} M_{\text{DG}, i} (\bar{P}_{\text{DG}, i, \max} - \bar{P}_{\text{DG}, i, t})] \Delta T + \\ & \sum_{i=1}^{N_{\text{CL}}} (M_{\text{CL}, i} (\bar{P}_{\text{CL}, i, \max} - \bar{P}_{\text{CL}, i, t}) \Delta T + \sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}} (M_{\text{ESS}, i} \bar{P}_{\text{ESS}, i, t}) \Delta T + \\ & \sum_{i=1}^{N_{\text{tap}}} (M_{\text{tap}} \Delta N_{\text{tap}, i}) + \sum_{i=1}^{N_{\text{C}}} (M_{\text{C}} \Delta N_{\text{C}, i}) \}. \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) 右侧累加项中各项依次为: 向上级电网净购电成本、向 DG 购电平均成本、网损平均成本、削减 DG 有功出力的平均赔偿成本、对可中断负荷控制平均成本、ESS 平均调节成本、变压器分接头调节成本、并联电容器调节成本, 变量下标与此对应。

由于考虑了功率预测误差的统计特性, 因此式 (17) 中的各量都是计及二阶项修正后的均值, 从而保证了目标函数的准确性。

优化控制变量包括离散变量和连续变量。

离散变量: 变压器档位、并联电容器投切状态。

连续变量: 可控光伏发电 (PV), 风电 (WT) 的有功、无功出力, 其他可控分布式电源 (例如沼气发电厂 BG、垃圾电厂 RI) 的有功、无功出力, 储能设备 (ESS) 的有功、无功功率, 可控负荷 (CL) 的调节功率, SVC 的无功出力。连续变量可表达为节点电压向量 X 的显函数。

4.2 等式约束

(1) 概率潮流约束。

$$\begin{cases} P_{i,t} + jQ_{i,t} = \bar{P}_{i,t} + j\bar{Q}_{i,t}; \\ C_X = J_X^{-1} C_Y (J_X^{-1})^T, \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{i,t} + jQ_{i,t}$ 为第 i 点的功率。

(2) 储能设备容量约束。

$$W_{\text{ESS}, i, t} = W_{\text{ESS}, i, t-1} - \bar{P}_{\text{ESS}, i, t-1} \eta \Delta T, \quad (19)$$

式中: W 表示电量; P 为有功; η 为充放电效率, 本文取 93.81%^[16]。近似用功率的均值计算储能设备的储电量。

4.3 不等式约束

(1) 储能设备的荷电状态上下限。

$$\overline{W}_{ESS\ i\ min} \leq \overline{W}_{ESS\ i\ t} \leq \overline{W}_{ESS\ i\ max} \quad (20)$$

由于式(20)是均值约束, 因此其上下限取额定容量的 60% 和 40%^[8]。

(2) 节点电压、功率约束。

为简化计算过程, 将节点电压、支路功率、储能设备充放电功率、风光分布式电源的有功无功、SVC 的无功、可控负荷的调节功率的约束写成通用表达式:

$$\begin{cases} \overline{Z}_{i\ t} \leq \overline{Z}_{i\ t} - 3\sigma_{Z_{i\ t}}; \\ \overline{Z}_{i\ t} + 3\sigma_{Z_{i\ t}} \leq \overline{Z}_{i\ t} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\overline{Z}_{i\ t}$ 可以是节点电压、支路功率、储能设备充放电功率、风光分布式电源的有功无功、SVC 的无功、可控负荷的调节功率的值; $\overline{Z}_{i\ t}$ 、 $\sigma_{Z_{i\ t}}$ 分别为第 i 节点第 t 时刻的均值和标准差。

(3) 并联电容器组数约束。

$$0 \leq N_{c\ i\ t} \leq N_{c\ i\ max} \quad (22)$$

式中: $N_{c\ i\ t}$ 为节点 i 处所安装的电容器组数; $N_{c\ i\ max}$ 为节点 i 安装的最大电容器组数。

(4) 可调分接头档位数约束。

$$0 \leq N_{tap\ i\ t} \leq N_{tap\ i\ max} \quad (23)$$

式中: $N_{tap\ i\ t}$ 为第 i 个变压器的档位数; $N_{tap\ i\ max}$ 为第 i 个变压器的档位的最大值。

4.4 信赖域管理技术基本思想

对于连续变量, 均值计算中都计及协方差的修正, 而协方差又可以表达成节点电压的函数。因此, 直接利用节点电压的协方差进行二阶项修正。

对目标和约束构建信赖域模型。于是将优化问题转化为下面的形式:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } D(X), \\ & \text{subjected to } m_i(X) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, p; \\ & \quad n_j(X) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, q, \\ & \max [X_l, X_l^{(k)}] \leq X \leq \min [X_u^{(k)}, X_u], \\ & X \in [X_1, X_2, \dots, X_n], \end{aligned}$$

其中, $D(X)$ 、 $m(X)$ 、 $n(X)$ 分别表示设计目标函数、不等式和等式约束函数模型; X_l 、 X_u 分别表示设计变量的上下界; $X_l^{(k)}$ 、 $X_u^{(k)}$ 分别表示设计变量在第 k 个信赖域上的上下界。

设当前点 X_k 在约束条件内, 则它的邻域可以

定义为 $\Omega_k = \{X \in \mathbf{R}^n \mid \|X - X_k\| \leq r\}$, 其中 r 称为信赖域半径。

目标函数在极值点附近近似一个二次函数, 因此对于有约束条件问题, 利用二次逼近构造如下信赖域子问题:

$$\begin{cases} \min q^{(k)}(s) = D(X_k) + \nabla D_k^T s + (s^T B_k s)/2; \\ \|s\|_2 \leq r, \end{cases} \quad (24)$$

式中: $s = X - X_k$; ∇D_k 为目标函数 $D(X)$ 在当前迭代点 X_k 处的梯度; B_k 是 $D(X)$ 在 X_k 处 Hesse 的近似矩阵。

设 s_k 是信赖域子问题的解, 目标函数 $D(X)$ 在第 k 步的实际下降量:

$$Ared_k = D(X_k) - D(X_k + s_k) \quad (25)$$

二次模型 $q^{(k)}(s)$ 的下降量:

$$Pred_k = q^{(k)}(0) - q^{(k)}(s_k) \quad (26)$$

定义比值:

$$\rho^{(k)} = Ared_k / Pred_k \quad (27)$$

它衡量了二次模型与目标函数的逼近程度, $\rho^{(k)}$ 越接近于 1, 表明接近程度越好。因此, 我们也用这个量来确定下次迭代的信赖域半径, 并把 $\rho^{(k)}$ 称为信赖度。

5 算例分析

5.1 算例系统

以 IEEE 118 节点系统为算例, 在系统上增加主变和分布式电源、可调负荷。按所述算法, 使用 Fortran 6.5 编写程序进行计算。

图 2 中分为工业负荷和生活负荷。

工业负荷为线路(150, 66)所联的馈线 2。该馈线上, 节点 85 所接的光电功率为 1.2 MW, 出力可调; 其余节点所接的光电功率均为 0.2 MW, 不可调; 节点 72 所接的 SVC 容量为 0.2 MVar; 节点 77 所接的垃圾发电厂的额定功率为 2 MW; 节点 75 所接的电动汽车日平均负荷均为 0.6 MW; 节点 85 所接的储能设备额定容量均为 1 MW·h, 最大充放电功率 0.45 MW, 荷电下限 19%, 荷电上限 89%, 荷电初值 40%。

生活负荷为线路(1, 2)所联的馈线 1 和线路(150, 105)所联的馈线 3。两条馈线上节点 27、54、121 所接的出力可调的光电和风电功率与节点 85 处的一致; 出力不可调的风电和光电功率为 0.2 MW; 节点 121、54、27 所接的储能设备额定容量与节点 85 处的一样; 节点 52 所接的 SVC 容量与节点 72 处的一样; 节点 113 所接的沼气发电厂

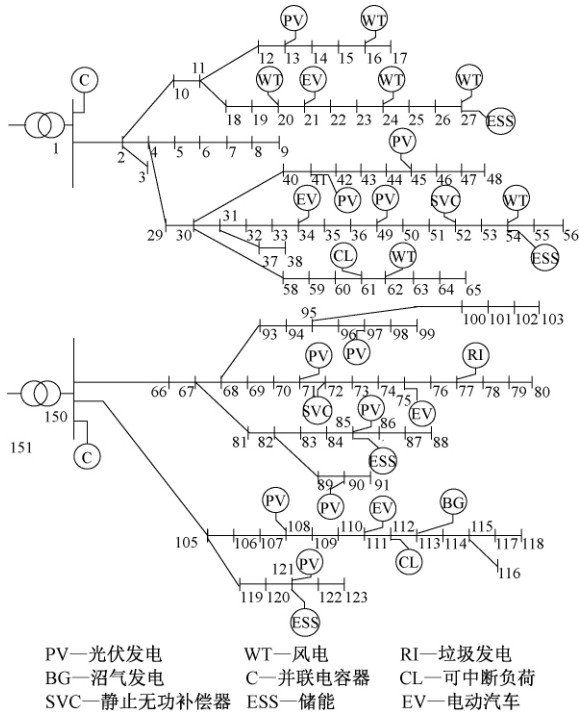


图 2 10 kV 配电网

Figure 2 10 kV distribution network

的额定功率为 2 MW; 节点 61、112 的可调负荷功率分别为 $0.55 + j0.35 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 、 $0.49 + j0.42 \text{ MV} \cdot \text{A}$; 节点 21、33、75、111 的电动汽车日平均负荷均为 0.5 MW。根据预测负荷曲线预测出标准差, 表 1 为风电各时刻的初始标准差。图 3 为风电和光电标准化日运行曲线; 图 4 为电动汽车标准化日运行曲线。

表 1 风电初始标准差

Table 1 Wind power initial standard deviation

时段 序号	标准差	时段 序号	标准差	时段 序号	标准差	时段 序号	标准差
1	0.008 5	7	0.009 1	13	0.020 6	19	0.023 6
2	0.006 9	8	0.010 2	14	0.018 5	20	0.018 5
3	0.007 5	9	0.011 3	15	0.023 6	21	0.013 6
4	0.010 5	10	0.014 6	16	0.026 5	22	0.012 5
5	0.011 3	11	0.016 4	17	0.031 5	23	0.014 5
6	0.009 3	12	0.017 5	18	0.027 6	24	0.016 5

以下价格的选取参考文献 [11], 风电上网电价取 0.60 元/(kW·h), 光伏上网电价取 1.00 元/(kW·h), 微型燃气轮机的发电成本为 0.66 元/(kW·h)。主动配电网与上级电网间的电能交易采用峰谷平电价制, 1~7 时段 0.49 元, 8~17、23~24 时段 0.74 元, 18~22 时段 0.98 元。离散变量调节成本系数取 $K_{\text{lap}} = 20$ 元/档, $K_c = 2$ 元/次^[17-18]。

5.2 主动配电网运行方式优化

以日前 24 h 进行优化, 时间间隔 ΔT 为 1 h。

5.2.1 电容器投切状态和变压器分接头档位调整

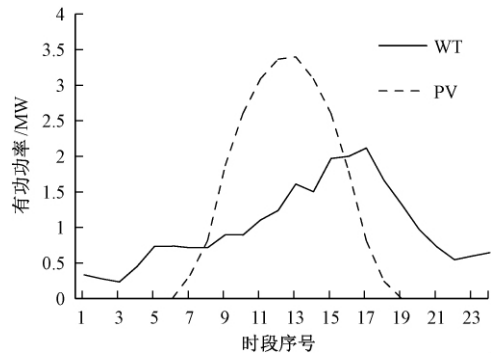


图 3 风电和光电标准化日运行曲线

Figure 3 Wind power and photoelectric standardization daily operation curve

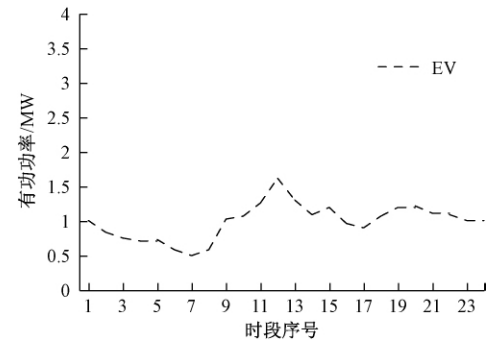


图 4 电动汽车标准化日运行曲线

Figure 4 Standardized daily operation curve of electric vehicle

由于算例中只有两个电容器组和两台变压器 (参数为 $0.0345 + j0.794 \Omega$, 额定电压和分接头为 $110 \pm 8 \times 0.012 5/11 \text{ kV}$, 初始运行档位 7), 在变压器分接头初始运行档位的基础上取 3~11 档作为可选档位。电容器组投切状态及变压器分接头可调档位见表 2 和表 3, 因此优化过程中采用了更为实用的枚举法来确定电容器组的投切状态和变压器分接头的选取。

表 2 电容器投切状态

Table 2 Capacitor switching state

电容器	电容器投切状态
C1	0 1
C2	0 1

表 3 变压器分接头可选档位

Table 3 Transformer tap optional gear

变压器	变压器分接头档位
T1	3 4 5 6 7 8 9 10 11
T2	3 4 5 6 7 8 9 10 11

利用枚举法得到优化后电容器投切状态和变压器分接头档位, 其中 C1 处于全切除状态。图 5 为电容器 C2 的投切状态, 图 6 为 T2 变压器分接

头档位变化状态。

从图 5 可以看出,C2 在第 9 时段开始投切。这是由于 C2 连接的馈线处有生活负荷和工业负荷,该电容器在高负荷时投切,但为满足线路低压要求在低负荷时处于切除状态,选取电容器组投切状态和变压器分接头档位后再进行连续变量的优化。

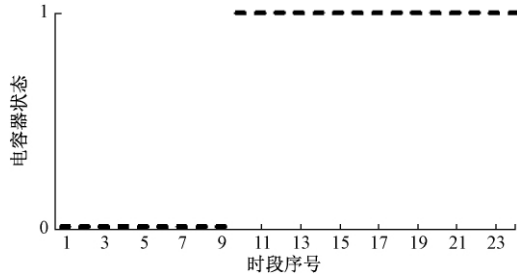


图 5 电容器 C2 投切状态

Figure 5 Capacitor C2 dropping state

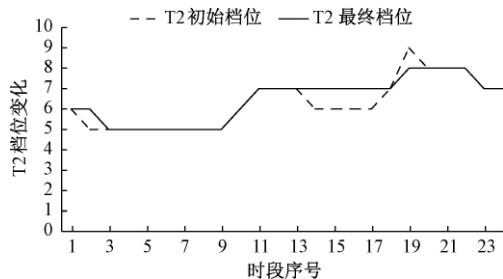


图 6 T2 档位变化

Figure 6 T2 change

5.2.2 约束条件概率分析

在约束条件中考虑预测误差的分布特性,使约束条件变为概率表达的形式,可以使约束边界值更加合理。在满足 4.1 节中约束条件下得到优化结果。优化结果表明,节点电压和支路功率都满足各自的约束条件。由于线路容量充裕,配电网中暂无功率越界风险。

以节点 13 为例,图 7 为节点 13 在第 12 时段合格的电压分布范围。图中阴影区域为该点在第 12 时段合格的电压分布区域,其中上边界值大于 0.95,下边界值小于 1.05,满足约束条件。

结合图 2,节点 13 处接有光伏发电但未接储能设备。由于光伏发电的随机性,会引起电压越界风险。图 8 为节点 13 在 24 h 内的电压均值曲线和电压均值对应的标准差。由图 8 可以看出,节点 13 的电压值满足约束条件。

5.2.3 计及二阶修正的目标函数优化结果

表 4 列出优化前后指标情况。其中第 1 列为式(18)中的目标函数,优化时采用。第 2 列为式

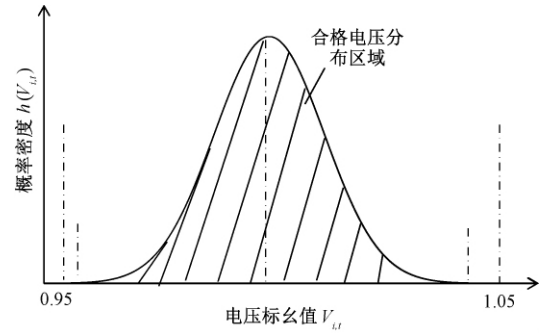


图 7 合格的电压分布

Figure 7 Qualified voltage distribution

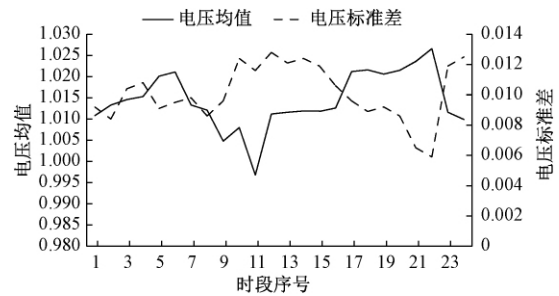


图 8 节点 13 的电压均值和标准差

Figure 8 Voltage mean of 13 node and standard deviation

(18) 中的经济指标,即配电网的运行成本,供比较。优化前的目标函数大于经济指标,说明有电压越界。优化后二者接近,基本满足电压要求。通过优化,一天减少运行成本 0.70 万元,其中网损下降 0.37 MW·h。

表 4 优化前后指标

Table 4 Indices before and after optimization

目标函数	优化前			优化后		
	经济 指标 /万元	网损 /(MW·h)	目标 函数	经济 指标 /万元	网损 /(MW·h)	目标 函数
1	394.44	31.56	11.16	34.93	30.86	10.79

表 5 列出计及二阶修正的各时段指标优化前后指标情况。例如第 9~12 时段,优化前后,目标函数值存在偏差,优化后目标函数中的各个量均满足各自的约束条件,运行成本下降。

综上,笔者所提算法是在满足约束条件的基础上进行的优化,并且在进行连续变量优化前先对变压器分切头和电容器进行了合理的优化。因此,所提算法能较好地满足工程实用计算。

表5 各时段指标

Table 5 Indices of all time intervals

时段 序号	优化前 目标函数值	优化后 目标函数值
1	36.26	0.58
2	0.64	0.60
3	52.16	0.56
4	0.61	0.59
5	20.20	0.63
6	0.62	0.62
7	0.69	0.67
8	1.06	1.00
9	11.18	1.31
10	169.89	1.35
11	288.19	1.46
12	357.96	1.63
13	1.63	1.63
14	2.34	1.55
15	1.57	1.57
16	23.46	1.40
17	25.88	1.34
18	23.64	1.83
19	196.89	2.11
20	17.96	2.96
21	3.20	3.03
22	6.48	4.16
23	150.86	1.28
24	1.07	1.07

6 结论

笔者计及功率预测误差的分布特征,以综合运行费用的均值为目标函数,节点功率平衡方程、节点电压和支路功率等变量的运行范围构成约束条件,建立主动配电网运行方式的概率优化模型。通过分析优化算式的特点,采用二阶潮流表达的概率描述,在随机变量的均值计算中计及方差修正,提高均值计算的准确度。依据变量的实际特点,对离散变量和连续变量采用不同的处理方式,应用信赖域管理技术处理连续变量。

通过118节点配电系统进行仿真分析,不计及方差影响的功率均值比计及功率预测误差的分布特性的功率均值偏小,进而考虑分布特性的优化结果会更接近实际。与传统的分支定界、割平面等方法相比,笔者采用的迭代方式计算量小,利于实际应用,并且可与二阶锥优化方法达到相同的优化效果。

参考文献:

- [1] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
- [2] 杨卓,王利利,杨博,等. 不同类型供电区域间典型供电模式过渡方案研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(3):54-57.
- [3] 任洲洋,颜伟,项波,等. 考虑光伏和负荷相关性的概率潮流计算[J]. 电工技术学报,2015,30(24):181-187.
- [4] 方斯顿,程浩忠,徐国栋,等. 基于 Nataf 变换和准蒙特卡洛模拟的随机潮流方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):38-44.
- [5] 鲍海波,韦化. 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):77-85.
- [6] 何琨,徐潇源,严正,等. 基于稀疏多项式混沌展开的孤岛微电网概率潮流计算[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):67-75.
- [7] 艾小猛,文劲宇,吴桐,等. 基于点估计和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):16-22.
- [8] 符杨,廖剑波,李振坤,等. 考虑越限风险的主动配电网日前优化调度及运行[J]. 中国电机工程学报,2017,37(21):6328-6338.
- [9] 张璐,唐巍,丛鹏伟,等. 含光伏发电的配电网有功无功资源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5525-5533.
- [10] 刘一兵,吴文传,张伯明,等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2575-2583.
- [11] 盛骤,谢式千,潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
- [12] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [13] ALIZADEH F, GOLDFARB D. Second-order cone programming[J]. Mathematical programming, 2003, 95(1):3-51.
- [14] BEN-TAL A, NEMIROVSKI A. On polyhedral approximations of the second-order cone[J]. Mathematics of operations research, 2001, 26(2):193-205.
- [15] 陈国栋. 基于代理模型的多目标优化方法及其在车身设计中的应用[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [16] 王成山,于波,肖峻,等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
- [17] 周晓娟,王奎英,张将. 基于辅助函数思想的城市高压电网无功优化[J]. 郑州大学学报(工学版),2014,35(4):79-82.
- [18] 张红斌,王克文. 采用模块化求解的主动配电网优化运行[J]. 郑州大学学报(工学版),2019,40(1):24-31.

Optimization of Run Mode of Active Distribution Network with Power Prediction Error

WANG Kewen, LIU Kai, LIU Yanhong

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

Abstract: In terms of the active distribution of the power grid, the node power data was usually derived from the power prediction, with the forecast error and the distribution characteristics, and it could be described by probability expression. A distribution characteristic of the power prediction error was taken into account, and the mean of expenses as the objective function, and the node power balance equation constituted the equation constraint, and the operating range of nodal voltage, branch power and other variables constituted the inequality constraint, so a probabilistic optimization model of active distribution network operation mode was established. By analyzing the characteristics of the optimization formula, the probability description of second-order power flow was adopted to calculate and correct the variance in the mean calculation of random variables, so as to improve the accuracy of the mean calculation. In the optimization model solution, according to the actual characteristics of variables, discrete variables and continuous variables were treated in different ways, and trust domain management techniques were applied to handle continuous variables. The calculation and analysis in the 118-bus example showed that the proposed algorithm was feasible and practical.

Key words: active distribution network; second order correction; probability power flow; trust region; constraint condition

(上接第 74 页)

[19] ZHANG J Q, SANDERSON A C. JADE: adaptive differential evolution with optional external archive [J].

IEEE Transactions on evolutionary computation, 2009, 13(5): 945–958.

Ultra-wideband Positioning Solution Method Based on Differential Evolution and Taylor Series

ZHANG Yong¹, GAO Guanghui¹, GUO Yinan¹, GONG Dunwei¹, YANG Jianjian²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To improve the robustness and positioning accuracy of the positioning solution method, a novel ultra-wideband localization solution method based on differential evolution algorithm and Taylor series iteration was proposed. Taking the positioning error as the optimization target, the differential evolution algorithm was used to achieve the global position of the target point. Furthermore, the optimal positioning point obtained by the differential evolution algorithm was used as the initial value, and the Taylor series iterative algorithm was used to locally optimize the positioning point to obtain more precise target positioning. Aiming at the complex indoor scene of coal mine roadway, the proposed method was used to realize the UWB positioning calculation of the excavation support mobile bracket. The experimental results showed that the proposed method has higher positioning resolution accuracy than the existing positioning solution method.

Key words: ultra-wideband; indoor positioning; Taylor series iterative algorithm; differential evolution algorithm; tunneling support mobile bracket

文章编号:1671-6833(2020)01-0083-08

融合交通心理学的车辆群组运动仿真研究综述

王 华¹, 何晓宇¹, 徐静², 徐明亮³, 霍二福⁴, 李冠峰⁵, 金保华¹

(1. 郑州轻工业大学 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 图书馆, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001; 4. 河南省化工研究所有限公司, 河南 郑州 450052; 5. 中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 河南 郑州 450015)

摘 要: 车辆群组运动仿真是群体仿真技术的重要组成部分。将驾驶员性格、体力、认知等交通心理学因素融入车辆群组运动仿真中, 对增强仿真的真实性具有重要的作用。对融合交通心理学的车辆群组运动仿真涉及技术进行综述介绍。首先对交通心理学的相关研究工作做了详细的分析; 然后在总结现有车辆群组运动仿真技术的基础上, 对融合交通心理学的车辆群组运动仿真方法展开了详尽的分析; 最后结合融合交通心理学的车辆群组运动仿真方法中存在的不足, 提出了目前该研究中一些可以继续深入探讨的问题。

关键词: 交通心理学; 车辆群组运动仿真; 认知加工

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2020.01.007

0 引言

车辆是城市交通场景的重要组成部分。车辆群组运动仿真致力于对交通场景中每一时刻每一辆车的运动位置和状态进行精确计算, 从而突破时间和空间的限制, 实现各种环境下任意复杂、任意尺度车辆运动的模拟和推演^[1-2]。车辆群组运动仿真技术对智能驾驶、交通优化、影视游戏等领域的发展具有极其重要的意义。

车辆群组运动仿真中, 车辆可以被抽象认为是“驾驶员-车辆”组成的智能体单元。车辆的运动可以看作是由驾驶员驾驶的智能体单元的运动。驾驶员在复杂动态环境中结合实时环境状态、车辆物理属性、自身的生理/认知属性等产生驾驶决策, 从而操纵车辆, 使其能够安全平稳地行驶。将驾驶员性格、体力、认知等交通心理学因素融入车辆群组运动仿真中, 构建可呈现不同心理作用影响下的车辆群组运动仿真方法, 实现丰富多样和具有“生命力”的真实感车辆群组运动行为演绎, 有望从根本上提升车辆运动仿真的真实性和可靠性。

近年来, 计算机图形学领域的学者已经对车辆群组运动建模技术展开了大量的研究, 并取得了显著的研究成果。目前国内外已有不少研究机构对车辆群组运动仿真技术展开了研究并积累了丰富的研究成果。如北卡莱罗纳大学建模与仿真实验室、普渡大学、浙江大学、大连理工大学、吉林大学、东南大学、中国科学院计算技术研究所、郑州大学等。

笔者对融合交通心理学车辆群组运动仿真相关技术做综述介绍, 提出了目前该研究中一些可以继续深入探讨的问题, 以期对本领域研究人员有所裨益。

1 交通心理学研究

目前交通心理学主要从驾驶员人格、生理、认知等方面对车辆群组运动仿真中驾驶员的行为决策机制展开研究。

1.1 驾驶员人格心理

人格是指个体在行为上的内部倾向, 它表现为个体适应环境时在能力、情绪、需求、动机、兴趣、态度、价值观、气质、性格等方面的整合, 是具

收稿日期: 2019-08-05; 修订日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61602425, 61472370, 61602421, 61672469, 61602420, 61502433); 河南省科技攻关项目(182102311071)

作者简介: 王华(1982—), 女, 河南新乡人, 郑州轻工业大学讲师, 博士, 主要研究方向为虚拟现实, E-mail: wanghua@zzuli.edu.cn。

有动力一致性和连续性的自我特征^[3-4]。

驾驶员人格心理学主要研究驾驶员性格、动机、个体差异等对驾驶行为的影响^[5-11]。Fine等^[12]验证了艾森克人格理论的假设,即外向性驾驶员比内向性驾驶员更容易产生交通事故和违章行为。Ge等^[13]研究了愤怒与危险驾驶行为之间的关系,并且指出,在消极认知、消极情绪驾驶、攻击性驾驶中其表现尤为明显。Schwebel等^[14]探讨了寻求刺激、责任心、愤怒等3种人格特质在危险驾驶行为中的作用。Dahlen等^[15]研究了在攻击性和风险性驾驶中,感觉寻求、冲动、无聊倾向等对驾驶情绪的影响。Zhang等^[16]对驾驶愤怒与5种驾驶结果(攻击性驾驶、危险驾驶、驾驶失误、近距离脱险和事故)之间的关系进行研究。Iliescu等^[17]调查了危险驾驶在年龄、性别、专业驾驶方面的差异,以及危险驾驶与驾驶里程和交通违章行为之间的关系等。

1.2 驾驶员生理心理

生理心理学以大脑为中心研究心理现象的生理机制,主要是对行为和心理的神经价值研究。

驾驶员生理心理学主要研究分析驾驶员生理信号和行为关系^[18-21]。Christopoulos等^[22]利用深度神经网络结构,提出了一种利用滑动相关系数监督驾驶员疏忽行为的新方法。Naurois等^[23]利用人工神经网络模型检测驾驶员睡意程度和适度睡眠所需的时长。Patel等^[24]研究发现驾驶员心率变化可用来量化驾驶员的困倦程度,并基于此设计了一种基于神经网络的智能算法来检测驾驶员是否处于疲劳状态。Chai等^[25]提出了一种基于脑电图的驾驶员疲劳分级方法(疲劳状态与警戒状态),该方法可有效用于驾驶员疲劳状态的识别。Fraadeblanar等^[26]研究了年龄与车祸风险之间的关系。

1.3 驾驶员认知心理

认知心理学采用信息加工的观点研究构建人类接收、贮存和运用信息的计算机模型^[27-28]。其主要包括视觉、知觉、记忆等认知过程的建模^[29-30]。根据研究对象的不同,现有主流的认知方法可分为个体认知方法和分布式认知方法^[31]。

个体认知方法从认知主体出发,用符号化语言或者神经网络的思想来解释人脑内部对环境信息的认知过程,其主要思想是将人比喻成计算机,把人脑处理信息的过程看作是计算机对外界信息加工的过程,通过定义一些确定的参数来分析信息加工系统的经济性原则。随着

认知场景和任务越来越复杂,John等^[32]提出的ACT-R模型,从认知基础理论出发,用不可分的认知操作元素和相应的构成框架对人类的认知行为进行建模。Fu等^[33]提出的PMJ模型将人类的认知过程归纳为感知、记忆和判断3个阶段,并给出了认知加工的多条通路和一系列认知加工策略。个体认知方法从认知主体出发,对人类依据自身能力实现的认知过程进行了详细建模,是其他认知理论的基础。

分布式认知方法不再局限于认知主体,而是从更广的角度研究分析认知加工机制,是综合考虑认知主体和认知环境(周围环境、工具、情境等)的系统化的分析^[31]。其充分考虑驾驶员认知活动本身的复杂性以及认知环境的复杂性,认为认知并不仅仅是对其内部表征的加工,而且是内部表征与外部表征共同作用的结果。当然,分布式认知理论中个体认知仍然处于核心地位。驾驶员在处理复杂信息时,不可能脱离外部环境信息的支持。分布式认知理论被认为是更符合人类认知特征的一种理论^[34]。分布式认知理论的上述特性,使得在分布式认知建模中,不仅需要对认知主体的认知过程进行建模,还需要对主体所处环境等进行建模^[31],并将建模结果进行充分融合,从而获得更准确合理的认知结果。

现有针对驾驶员行为决策的认知心理学研究工作主要从个体认知角度出发,研究分析视觉、知觉、注意、记忆等对驾驶员认知过程的影响^[35-39]。在视觉方面,Campbell等^[40]认为,人的视觉系统具有频率适应性,不同人对频率通道的划分有差异,驾驶经验不同的驾驶员感知得到的环境信息量存在差异。Sowden等^[41]认为驾驶员的视觉信息来源于视觉空间频率通道与视野图像信息适应性交互调谐后的结果。Strayer等^[42]通过实验分析了开车过程中的外界干扰对认知的影响,指出车内引入语音系统会造成司机的注意力分散。Reimer等^[43]分析了认知需求与驾驶员对车辆周围环境感知能力之间的关系。Wood等^[44]指出驾驶员在感知环境信息时,更容易根据前期路况记忆做出习惯性行为而导致错误的决策。Patten等^[45]对认知负荷和驾驶员经验之间的关系展开了研究,研究结果表明,经验丰富的驾驶员更能有效地捕获周围环境信息并做出正确的驾驶决策。Anstey等^[46]研究了认知功能和驾驶员年龄的关系,结果表明,驾驶员年龄和其认知能力呈反比关系。

1.4 小结

目前心理学领域已有大量的研究成果可以借鉴,但这些成果一般都是通过性向测试来分析驾驶员的生理、性格等特征,很少有基于上述特征的驾驶员行为决策的计算模型。

认知心理学领域以心理学研究成果为基础,研究构建驾驶员认知过程的计算机模型。这些模型大都从个体认知理论出发,采用一系列复杂的处理模块来模拟驾驶员产生和组织智能行为的过程,计算效率比较低,主要用于单个智能体的运动控制,不适合应用于车辆群组运动仿真中。此外,这些模型一般并不对认知主体所处环境等建模。

2 车辆群组运动仿真技术

目前主流的车辆群组运动仿真方面的工作大体可以分为模型驱动的方法、数据驱动的方法、混合驱动的方法,如图1所示。

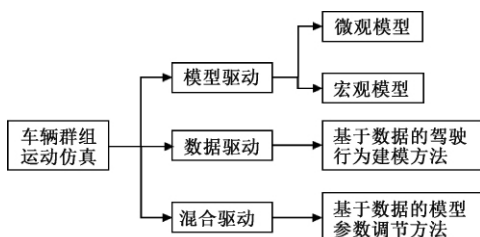


图1 仿真方法分类

Figure 1 Classification of simulation methods

2.1 模型驱动的方法

模型驱动的方法通过构建描述车辆群组运动的数学模型实现对车辆运动的模拟。根据对车辆个体描述细致程度的不同,模型驱动的车辆群组运动仿真方法主要分为宏观方法和微观方法。

宏观方法将车流看作连续的介质,以线路上车流的密度、速度等宏观量来刻画车流的运动。经典的各向异性模型^[47-49]和格子流模型^[50-51]等都属于宏观模型。

微观方法以单个车辆为研究单元,描述车辆之间相互作用的时空行为,主要包括基于连续动力学的方法^[52-54]、基于社会力学的方法^[55-61]、基于元胞自动机的方法^[62]等。Shen等^[63]提出了改进的IDM模型,通过区分畅通时车辆加速行为和接近前车时车辆减速行为的不同,实现了不同场景下车辆运动行为的建模。Dorado等^[60]将IDM模型用于自动构建的三维城市交通场景模拟中。Wang等^[64]将一体化的换道模型和IDM模型相结合,实现了各种复杂路口下的车辆运动模拟。Best等^[65]提出了一种支持动态策略设置以及融

合交通约束的无人车自动导航技术。Xu等^[59]提出了一种雾天车辆运动模拟方法。Wang等^[61]通过引入影子车辆的概念,实现了各种异常交通场景下的车辆群组运动模拟。如图2所示为微观模型驱动下的一些仿真效果图^[59 61 63 65]。



图2 仿真效果图

Figure 2 Some snapshots of simulation results

模型驱动的方法主要采用数学或者物理模型对车辆群组运动建模,可以从原理上实现群组运动的有效模拟,能够充分解决“为什么”的问题。但是模型一般都做了过多简化和理想的假设处理,相关行为特征的控制参数选取和设置大多基于主观经验,缺乏真实数据支撑。

2.2 数据驱动的方法

数据驱动的方法通过对现实世界中存在的大量真实交通数据进行学习,提取样本或实例数据的特征,从而训练出智能、符合真实驾驶行为的模型,据此实现对车辆群组运动的建模。Chao等^[66]借助理合合成技术将输入的离散轨迹数据用于车辆运动重建。Chen等^[67]将视频数据和传感器数据相结合,采用深度学习技术实现了车辆驾驶行为的模拟。Bi等^[68]基于已有的换道数据集,采用机器学习算法对车辆换道过程进行建模,从而生成了自然逼真的车辆换道行为。Sewall等^[69]基于传感器数据并采用滤波算法实现了对路网内的车辆运动行为的重建。Yang等^[70]给出了一种基于真实轨迹数据的交通流重建技术。

数据驱动的方法由于基于真实数据的自然优势,可以充分挖掘出环境和驾驶行为决策之间的关联信息,充分解决了“是什么”的问题,但是受所使用数据规模的限制,难以完整刻画真实车辆群组运动行为,这使得仿真敏感度非常低,鲁棒性很差。

2.3 混合驱动的方法

混合驱动的方法将模型驱动方法中构建的数学模型和数据驱动方法采集得到的数据相结合,将样本数据集用于模型参数的调节和校验,从而

模拟出更为真实的群组运动效果。Wilkie 等^[71]采用卡尔曼滤波技术将传感器采集的数据用于车辆运动行为模拟的参数校正中,并取得了不错的仿真效果。Chao 等^[72]提出了一种具有记忆功能的 IDM 模型,模型根据输入的车辆轨迹数据,采用自适应遗传算法对模型参数进行离线学习,从而驱动模型重构车流运动。Lu 等^[73]通过训练学习 IDM 模型中参数取值,实现了简单的个性化车辆运动模拟。

混合驱动的方法充分利用已有数据与刻画车辆群组运动的计算模型相结合,一定程度上来说,具有从根本上提升仿真效果的真实感和可信度。

3 融合交通心理学的车辆群组运动仿真

融合交通心理学的车辆群组运动仿真致力于将上述第 1 节相关内容融入第 2 节的车辆群组运动仿真技术中,从而实现复杂环境中驾驶员心理决策各异性影响下的车辆运动建模。

根据是否对驾驶员自身心理认知加工机制建立数学模型,融合交通心理学的车辆群组运动仿真方法可以分为非认知加工机制方法和认知加工机制方法两种。

3.1 非认知加工机制方法

非认知加工机制方法指的是不单独对驾驶员自身心理认知过程建立数学模型,而是通过调整现有车辆运动仿真模型参数,改造现有车辆运动仿真模型或者使用完全数据学习等方法来实现驾驶员多样性心理特征影响下的车辆运动模拟。

在调整现有车辆运动仿真模型参数方面, Lu 等^[73]通过训练计算 IDM 模型参数的取值,实现了较为真实的个性化车辆运动模拟效果。Xu 等^[74]采用变化的安全车间距来模拟车辆运动仿真中的攻击型驾驶行为和保守型驾驶行为。

在改造现有车辆运动仿真模型方面, Lu 等^[75]给出了一种避免事故的全局速度差模型,考虑了靠近前车时心理力和生理力对当前车辆加速度的影响。Leutzbach 等^[76]采用不同阈值和期望距离,给出了一种基于驾驶员心理-生理因素的车辆跟驰模型。

完全数据学习方法指的是完全依靠海量数据的训练学习来实现个性化车辆运动的模拟。例如, Chen 等^[67]基于视频数据和三维点云数据,实现了多样化的驾驶行为模拟; Possaniespinosa 等^[77]通过收集大量驾驶行为和性格特征数据,实现了可信的虚拟驾驶行为模拟。

非认知加工机制方法的计算效率与不考虑交通心理学的车辆群组运动仿真方法的计算效率相当。因此,上述方法被广泛应用于个性化车辆群组运动仿真中。该方法也是现有主流交通仿真软件实现多样性车辆运动仿真所采用的方法。

3.2 认知加工机制方法

基于认知加工机制的方法致力于将交通心理学的研究成果应用于车辆运动仿真中。该类方法的基本思路是首先对驾驶员的认知过程构建可计算的模型,然后将模型计算结果和车辆群组运动仿真方法相结合,实现融合交通心理学的车辆运动模拟。例如,采用本文第 1.3 部分提到的 ACT-R 模型、PMJ 模型^[33](如图 3 所示)等对驾驶员的场景认知过程建立模型,建模过程中可以考虑驾驶员性格、生理等因素。车辆结合自身运动学、动力学属性,周围环境的状况,综合得出相应的运动行为决策。

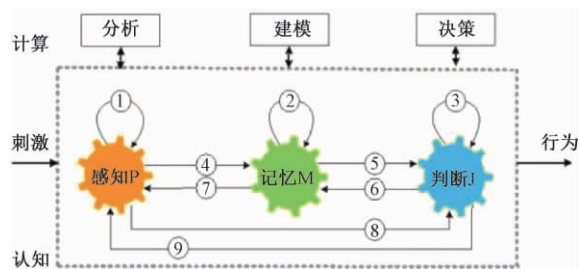


图 3 PMJ 模型示意图

Figure 3 The framework of PMJ model

该类方法需要采用一系列的处理模块来模拟驾驶员产生和组织智能行为的过程,因此具有较高的计算复杂度。该类方法主要用于单个智能车的控制,用于群组运动仿真时在效率方面存在瓶颈。

4 总结与展望

车辆群组运动仿真模拟需要综合融合心理学等社会科学的理论与方法和信息科学在虚拟现实、计算机图形学、机器学习、人工智能等活跃领域的前沿技术。融合交通心理学的车辆群组运动仿真可实现不同心理作用影响的车辆群组运动行为建模。该技术目前仍然存在不少难点和挑战,有待进一步深入研究。

(1) 极端交通样本数据的生成。异常事故、恶劣天气等极端交通场景数据匮乏。完全模型驱动的车辆运动仿真技术又很难实现个性化、多样化的车辆运动行为模拟。在虚拟环境中构建极端交通场景并实现该场景内的车辆群组运动仿真可

为无人驾驶提供大量廉价的极端交通样本数据集。该项研究具有重要的现实意义。

(2) 人脑认知过程的可计算模型构建。构建融入心理机制的可计算框架,归纳出合理的数学模型,从而量化各种心理因素对驾驶员行为的影响,形成刻画复杂心理机制的驾驶员大脑认知计算模型,实现高层心理特征向低层运动行为控制的映射。构建心理机制计算模型模拟驾驶员决策行为的自主演进过程是实现融合交通心理学的车辆群组运动模拟需要重点解决的问题。针对该问题的研究目前处于起步阶段,有待进一步的研究。

(3) 基于分布式认知理论的驾驶员认知-决策建模。分布式认知理论认为,驾驶员的行为决策是由其认知能力决定的,并且认知过程不仅局限于认知主体,而是从更广的角度研究认知加工机制,是综合考虑认知主体和认知环境(周围环境、工具、情境等)的系统化分析^[78]。采用分布式认知理论对驾驶员的认知过程进行建模,并将其与车辆群组运动建模相耦合有待进一步研究。

5 结语

融合交通心理学的车辆运动模拟可精确模拟复杂环境下的各异性车辆运动行为。笔者围绕融合交通心理学的车辆群组运动仿真技术,对车辆群组运动仿真的技术及涉及驾驶员心理和行为的研究进行了展开介绍,提出了目前该领域的问题和难点。这些难点的攻克有望从根本上提升车辆群组运动仿真的真实感和可靠性,从而进一步推动车辆群组运动仿真研究的快速发展。

参考文献:

- [1] 王华,徐明亮,毛天露,等. 三维汽车群组动画仿真研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(2): 211-220.
- [2] XU M L, JIANG H, JIN X G, et al. Crowd simulation and its applications: recent advances[J]. Journal of computer science and technology, 2014, 29(5): 799-811.
- [3] 刘同辉. 中体而西用,返本以开新: 中西人格心理学思想之比较研究[D]. 上海: 上海华东师范大学, 2006.
- [4] 罗晓明. 大思想: 人格本位[M]. 上海: 上海文化出版社, 2006.
- [5] LAGARDE E, CHASTANG J F, GUEGUEN A, et al. Emotional stress and traffic accidents: the impact of separation and divorce[J]. Epidemiology, 2004, 15(6): 762-766.
- [6] SIMON F, CORBETT C. Road traffic offending, stress, age, and accident history among male and female drivers[J]. Ergonomics, 1996, 39(5): 757-780.
- [7] ROWDEN P, MATTHEWS G, WATSON B, et al. The relative impact of work-related stress, life stress and driving environment stress on driving outcomes[J]. Accident analysis & prevention, 2011, 43(4): 1332-1340.
- [8] ULLEBERG P, RUNDMO T. Personality, attitudes and risk perception as predictors of risky driving behaviour among young drivers[J]. Safety science, 2003, 41(5): 427-443.
- [9] BENFIELD J A, SZLEMKO W J, BELL P A. Driver personality and anthropomorphic attributions of vehicle personality relate to reported aggressive driving tendencies[J]. Personality and individual differences, 2007, 42(2): 247-258.
- [10] ARNETT J. Drunk driving, sensation seeking, and egocentrism among adolescents[J]. Personality and individual differences, 1990, 11(6): 541-546.
- [11] MACHIN M A, SANKEY K S. Relationships between young drivers' personality characteristics, risk perceptions, and driving behavior[J]. Accident analysis & prevention, 2008, 40(2): 541-547.
- [12] FINE B J. Introversion-extraversion and motor vehicle driver behavior[J]. Perceptual and motor skills, 1963, 16(1): 95-100.
- [13] GE Y, QU W N, JIANG C H, et al. The effect of stress and personality on dangerous driving behavior among Chinese drivers[J]. Accident analysis & prevention, 2014, 73: 34-40.
- [14] SCHWEBEL D C, SEVERSON J, BALL K K, et al. Individual difference factors in risky driving: The roles of anger/hostility, conscientiousness, and sensation-seeking[J]. Accident analysis & prevention, 2006, 38(4): 801-810.
- [15] DAHLEN E R, MARTIN R C, RAGAN K, et al. Driving anger, sensation seeking, impulsiveness, and boredom proneness in the prediction of unsafe driving[J]. Accident analysis & prevention, 2005, 37(2): 341-348.
- [16] ZHANG T R, CHAN A H S. The association between driving anger and driving outcomes: A meta-analysis of evidence from the past twenty years[J]. Accident analysis & prevention, 2016, 90: 50-62.
- [17] ILIESCU D, SÂRBESCU P. The relationship of dangerous driving with traffic offenses: A study on an a-

- dapted measure of dangerous driving[J]. Accident analysis & prevention, 2013, 51: 33–41.
- [18] TSUCHIDA A, BHUIYAN M S, OGURI K. Estimation of drivers' drowsiness level using a neural network based 'error correcting output coding' method[C]//13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Portugal: IEEE, 2010: 1887–1892.
- [19] JO J, LEE S J, PARK K R, et al. Detecting driver drowsiness using feature-level fusion and user-specific classification[J]. Expert systems with applications, 2014, 41(4): 1139–1152.
- [20] YING Y, JING S, WEI Z. The monitoring method of driver's fatigue based on neural network[C]//2007 International conference on mechatronics and automation. Harbin: IEEE, 2007: 3555–3559.
- [21] THOUFICH S R G, ANAND N V, RAJAGANAPATHI S, et al. Distracted driver detection using convolutional neural network[J]. International journal of advance research, ideas and innovations in technology, 2018, 4(2): 1017–1020.
- [22] CHRISTOPOULOS S, KANARACHOS S, CHRONEOS A, et al. Learning driver braking behavior using smartphones, neural networks and the sliding correlation coefficient: road anomaly case study[J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(1): 65–74.
- [23] JACOBÉ DE NAUROIS C, BOURDIN C, STRATULAT A, et al. Detection and prediction of driver drowsiness using artificial neural network models[J]. Accident analysis & prevention, 2019, 126: 95–104.
- [24] PATEL M, LAL S K L, KAVANAGH D, et al. Applying neural network analysis on heart rate variability data to assess driver fatigue[J]. Expert systems with applications, 2011, 38(6): 7235–7242.
- [25] CHAI R, NAIK G R, NGUYEN T N, et al. Driver fatigue classification with independent component by entropy rate bound minimization analysis in an EEG-based system[J]. IEEE journal of biomedical and health informatics, 2017, 21(3): 715–724.
- [26] FRAADE-BLANAR L A, EBEL B E, LARSON E B, et al. Cognitive decline and older driver crash risk[J]. Journal of the american geriatrics society, 2018, 66(6): 1075–1081.
- [27] 刘烨, 汪亚珉, 卞玉龙, 等. 面向智能时代的人机合作心理模型[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(4): 361.
- [28] 范俊君, 田丰, 杜一, 等. 智能时代人机交互的一些思考[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(4): 361–375.
- [29] 崔丽娟. 心理学是什么[J]. 科学中国人, 2003(10): 62–63.
- [30] 周志华, 曹存根. 神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [31] MICHAELIAN K, SUTTON J. Distributed cognition and memory research: History and current directions[J]. Review of philosophy and psychology, 2013, 4(1): 1–24.
- [32] ANDERSON J R, BOTHELL D, BYRNE M D, et al. An integrated theory of the mind[J]. Psychological review, 2004, 111(4): 1036–1060.
- [33] FU X L, CAI L H, LIU Y, et al. A computational cognition model of perception, memory, and judgment[J]. Science in china series f: information sciences, 2014, 57(3): 1–15.
- [34] 周国梅, 傅小兰. 分布式认知: 一种新的认知观点[J]. 心理科学进展, 2002, 10(2): 147–153.
- [35] SALVUCCI D D. Modeling driver behavior in a cognitive architecture[J]. Human factors, 2006, 48(2): 362–380.
- [36] LIANG Y L, REYES M L, LEE J D. Real-time detection of driver cognitive distraction using support vector machines[J]. IEEE Transactions on intelligent transportation systems, 2007, 8(2): 340–350.
- [37] HARBLUK J L, NOY Y I, EIZENMAN M. The impact of cognitive distraction on driver visual behaviour and vehicle control[R]. [s.l.: s. n.], 2002, 73–75.
- [38] LIANG Y L, LEE J D. A hybrid bayesian network approach to detect driver cognitive distraction[J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2014, 38: 146–155.
- [39] RAPOPORT M J, NAGLIE G, WEEGAR K, et al. The relationship between cognitive performance, perceptions of driving comfort and abilities, and self-reported driving restrictions among healthy older drivers[J]. Accident analysis & prevention, 2013, 61: 288–295.
- [40] CAMPBELL F W, ROBSON J G. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings[J]. The journal of physiology, 1968, 197(3): 551–566.
- [41] SOWDEN P T, SCHYNS P G. Channel surfing in the visual brain[J]. Trends in cognitive sciences, 2006, 10(12): 538–545.
- [42] STRAYER D L, COOPER J M, TURRILL J, et al. Measuring cognitive distraction in the automobile[EB/OL]. (2012–11–12) [2018–11–04]. <https://trid.trb.org/view/1252566>.
- [43] REIMER B, MEHLER B, WANG Y, et al. A field

- study on the impact of variations in short-term memory demands on drivers' visual attention and driving performance across three age groups [J]. *Human factors*, 2012, 54(3): 454–468.
- [44] WOOD W, RÜNGER D. Psychology of habit [J]. *Annual review of psychology*, 2016, 67(1): 289–314.
- [45] PATTEN C J D, KIRCHER A, ÖSTLUND J, et al. Driver experience and cognitive workload in different traffic environments [J]. *Accident analysis & prevention*, 2006, 38(5): 887–894.
- [46] ANSTEY K J, WOOD J. Chronological age and age-related cognitive deficits are associated with an increase in multiple types of driving errors in late life [J]. *Neuropsychology*, 2011, 25(5): 613–621.
- [47] AW A, RASCLE M. Resurrection of “second order” models of traffic flow [J]. *SIAM journal on applied mathematics*, 2000, 60(3): 916–938.
- [48] ZHANG H M. A non-equilibrium traffic model devoid of gas-like behavior [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2002, 36(3): 275–290.
- [49] JIANG R, WU Q S, ZHU Z J. A new continuum model for traffic flow and numerical tests [J]. *Transportation research part B: methodological*, 2002, 36(5): 405–419.
- [50] GE H X, DAI S Q, XUE Y, et al. Stabilization analysis and modified Korteweg – de Vries equation in a cooperative driving system [J]. *Physical review e*, 2005, 71(6): 066119.
- [51] PENG G H, CAI X H, LIU C Q, et al. A new lattice model of traffic flow with the consideration of the driver's forecast effects [J]. *Physics letters A*, 2011, 375(22): 2153–2157.
- [52] WANG H, MAO T L, WANG Z Q. Modeling interactions in continuum traffic [C]//*Proceedings of the IEEE Virtual Reality. Minneapolis: IEEE*, 2014: 123–124.
- [53] SEWALL J, WILKIE D, MERRELL P, et al. Continuum traffic simulation [J]. *Computer graphics forum*, 2010, 29(2): 439–448.
- [54] TREUILLE A, COOPER S, POPOVIC Z. Continuum crowds [J]. *ACM transactions on graphics*, 2006, 25(3): 1160–1168.
- [55] HELBING D, FARKAS I J, VICSEK T. Simulating dynamical features of escape panic [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 487–490.
- [56] XU M L, WU Y P, LV P, et al. MiSFM: On combination of mutual information and social force model towards simulating crowd evacuation [J]. *Neurocomputing*, 2015, 168: 529–537.
- [57] SEWALL J, WILKIE D, LIN M C. Interactive hybrid simulation of large-scale traffic [J]. *ACM transactions on graphics*, 2011, 30(6): 135.
- [58] CHAO Q W, DENG Z G, JIN X G. Vehicle-pedestrian interaction for mixed traffic simulation [J]. *Computer animation and virtual worlds*, 2015, 26(3/4): 405–412.
- [59] XU M L, WANG H, CHU S L, et al. Traffic simulation and visual verification in smog [J]. *ACM transactions on intelligent systems and technology*, 2019, 10(1): 1–17.
- [60] GARCIA-DORADO I, ALIAGA D G, UKKUSURI S V. Designing large-scale interactive traffic animations for urban modeling [J]. *Computer graphics forum*, 2014, 33(2): 411–420.
- [61] WANG H, XU M L, ZHU F B, et al. Shadow traffic: a unified model for abnormal traffic behavior simulation [J]. *Computers & graphics*, 2018, 70: 235–241.
- [62] ZHAO D L, YANG L Z, LI J. Exit dynamics of occupant evacuation in an emergency [J]. *Physica A-statistical mechanics and its applications*, 2006, 363(2): 501–511.
- [63] SHEN J J, JIN X G. Detailed traffic animation for urban road networks [J]. *Graphical models*, 2012, 74(5): 265–282.
- [64] WANG H, MAO T L, KANG X C, et al. An all-in-one efficient lane-changing model for virtual traffic [J]. *Computer animation and Virtual worlds*, 2014, 25(3/4): 383–391.
- [65] BEST A, NARANG S, BARBER D, et al. AutonoVi: Autonomous vehicle planning with dynamic maneuvers and traffic constraints [J]. *Proceedings of IEEE/RSJ international intelligent robots and systems*. 2017: 2629–2636.
- [66] CHAO Q W, DENG Z G, REN J P, et al. Realistic data-driven traffic flow animation using texture synthesis [J]. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2018, 24(2): 1167–1178.
- [67] CHEN Y P, WANG J K, LI J, et al. LiDAR-Video driving dataset: learning driving policies effectively [C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City: IEEE, 2018: 5870–5878.
- [68] BI H, MAO T L, WANG Z Q, et al. A data-driven model for lane-changing in traffic simulation [C]//*Proceedings of the Symposium on Computer Animation*. Busan: Eurographics Association, 2016: 149–158.
- [69] SEWALL J, VAN DEN BERG J, LIN M C, et al. Virtualized traffic: reconstructing traffic flows from dis-

- crete spatiotemporal data[J]. IEEE transactions on visualization and computer graphics , 2011 , 17(1) : 26 – 37.
- [70] YANG X , SU W , DENG J , et al. Real traffic data-driven animation simulation [C]// Proceedings of the Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry. Kobe: ACM , 2015: 93 – 99.
- [71] WILKIE D , SEWALL J , LIN M. Flow reconstruction for data-driven traffic animation[J]. ACM transactions on graphics , 2013 , 32(4) : 89.
- [72] CHAO Q W , SHEN J J , JIN X G. Video-based personalized traffic learning [J]. Graphical models , 2013 , 75(6) : 305 – 317.
- [73] LU X Q , WANG Z H , XU M L , et al. A personality model for animating heterogeneous traffic behaviors [J]. Computer animation and virtual worlds , 2014 , 25(3 – 4) : 361 – 371.
- [74] XU W , YAO W , ZHAO H J , et al. A vehicle model for micro-traffic simulation in dynamic urban scenarios [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE , 2011: 2267 – 2274.
- [75] LU X Q , CHEN W Z , XU M L , et al. AA-FVDM: An accident-avoidance full velocity difference model for animating realistic street-level traffic in rural scenes [J]. Computer animation and virtual worlds , 2014 , 25(1) : 83 – 97.
- [76] LEUTZBACH W. Introduction to the theory of traffic flow [M]. Berlin: Springer-Verlag , 1988.
- [77] POSSANI-ESPINOSA A , GUTIERREZ-GARCIA J O , VARGAS GORDILLO I. Determining personality traits of racing game players using the open racing car simulator: toward believable virtual drivers [J]. Computer animation and virtual worlds , 2017 , 28(2) : e1722.
- [78] HOLLAN J , HUTCHINS E , KIRSH D. Distributed cognition: toward a new foundation for human-computer interaction research [J]. ACM transactions on computer-human interaction , 2000 , 7(2) : 174 – 196.

Survey of Psychology Based Traffic Simulation

WANG Hua¹ , HE Xiaoyu¹ , XU Jing² , XU Mingliang³ , HUO Erfu⁴ , LI Guanfeng⁵ , JIN Baohua¹

(1. School of Computer and Communication Engineering , Zhengzhou University of Light Industry , Zhengzhou 450001 , China; 2. Zhengzhou University Library , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China; 3. School of Information Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China; 4. Henan Chemical Industry Research Institute Company , Zhengzhou 450052 , China; 5. Seventh Thirteen Institute of China Ship Building Industry Corporation , Zhengzhou 450015 , China)

Abstract: Traffic simulation was an important part of crowd simulations. It was a key point to model drivers' psychological cognitive decision-making processes to realize a realistic traffic simulation. This paper provided a survey of traffic simulation based on traffic psychology. A detailed description of the traffic psychology and traffic simulation was presented. The traffic simulation based on traffic psychology introduced the principles , advantages and drawbacks were examined. Finally , some open research areas and possible future directions were pointed out.

Key words: traffic psychology; traffic simulation; cognitive processing

水射流工艺对渗碳钢圆棒表层改性影响的研究

马泳涛¹, 安乐乐², 张伦敦¹, 赵乐川¹

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 河南省资源与材料工业技术研究院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 研究了后混合水射流喷丸对 18CrNiMo7-6 齿轮渗碳钢圆棒试样的表层改性工艺, 在满足试样圆周面水射流喷丸全覆盖的条件下, 采用单因素试验分别研究了圆棒试样转速、喷嘴移动速度、高压水射流泵压力和处理次数对试样材料的表面形貌、表面粗糙度、表层残余应力和硬度的影响, 并分别运用超景深三维显微镜、三维表面形貌测量仪、X 射线残余应力分析仪及 HV-1000 显微硬度计等仪器对上述结果进行测量。试验结果表明: 后混合水射流喷丸时弹丸和水会对试样表层产生一定的冲蚀和磨损, 改变试样表面形貌, 试样表面粗糙度、表层残余应力和硬度随着试样转速和喷嘴移动速度的增加而减小, 随着泵压力和冲击次数的增加而增大; 当试样转速 $n = 100 \text{ r/min}$, 喷嘴移动速度 $v = 50 \text{ mm/min}$, 泵压力 $P = 300 \text{ MPa}$, 处理次数 $N = 1$ 时残余应力最大值约为 -1176.25 MPa , 硬度最大值为 64 HRC, 比原始试样提升了 6.7%。

关键词: 后混合水射流; 18CrNiMo7-6; 圆柱试样; 表层改性; 残余应力

中图分类号: TH142.2

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2019.04.018

0 引言

当前, 零件表面改性的主要任务是在表层形成具有一定深度层的残余应力^[1]。在产生残余应力的方法中, 存在几个难题: 一是对于硬度较高的表面处理起来较为困难; 二是对于复杂、狭窄部位的处理较为困难, 尤其是对于齿轮根部等需要引入较大残余应力的部位; 三是引入残余应力的值离材料的期望性能仍有一定的差距。传统处理方式如抛丸、气动喷丸等^[2], 丸粒速度在 100 m/s 以下, 限制了喷丸的能量密度, 影响喷丸效果。而采用接触式滚压方式处理过程中需要较大的反作用力, 这对压头的材料有较高的要求, 且在某些部位, 压头无法直接有效接触。对于齿轮等零件, 需要齿面具有较高的硬度及优良的残余应力分布, 这就需要发展新的表面改性工艺, 以实现硬态表面残余应力的有效引入。

而水射流方法在当前不失为一种较为理想的非接触处理方法。水射流强化分为以纯水为介质的水喷强化和添加磨料的水喷丸强化(分为前混

合和后混合)。水喷强化表层改性技术依靠纯水流的冲击使零件表面发生塑性变形, 从而改变材料表层力学性能^[3]。水喷丸强化具有纯水喷丸和传统气动喷丸的特点, 通过把混合丸粒的高压水射流喷射到试样材料表面上, 使材料表层呈现出理想的组织结构和残余应力分布, 从而达到提高材料疲劳强度的目的^[4]。

Arola 在大气环境下发现高压水喷丸强化能够给工业纯钛和 Ti6Al4V 钛合金表面引入较大的残余压应力, 但是产生的残余应力的深度比较小^[5]。Arola 等采用后混合水射流喷丸强化技术对 AISI304 和 Ti6Al4V 进行强化, 发现水喷丸强化后材料残余压应力的分布与喷射压力和弹丸尺寸有关^[6]; 上述研究均以平面试样为对象, 未能充分考虑试样几何特点对改性效果的影响, 而且采用的材料硬度离齿轮等零件的要求有一定差距。笔者采用后混合水射流喷丸强化方式, 研究其对圆棒试样表层改性的效果。为了接近实际工况, 选择采用经过渗碳热处理并表面磨削后的齿轮钢 18CrNiMo7-6 的硬态表面材料作为研究对象^[7-8]。

收稿日期:2019-02-11; 修订日期:2019-05-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1804254)

作者简介:马泳涛(1975—),男,河南郑州人,郑州大学讲师,博士,研究方向为抗疲劳制造,E-mail:myt_ma@126.com。

1 试验方案

1.1 试验材料与仪器

试验材料为 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢,化学成分(质量分数)如表 1 所示。所有试样经渗碳热处理后进行统一的磨削处理。

高压水射流发生装置由南京大地三轴悬臂水刀切割数控机床 DWJ1525-FC 改装而成,系统最大输出压力为 400 MPa,最大流量为 3.7 L/min,喷嘴最大移动速度为 10 m/min。采用 Bruker nano Inc 三维表面形貌测量系统 NPFLEX 测定试样的表面粗糙度 Ra 值,测量时选取沿轴线方向长条状扫描,拼接面积为 2 mm×0.6 mm。采

表 1 18CrNiMo7-6 渗碳合金钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 18CrNiMo7-6 carburized alloy steel

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Fe
0.15 ~ 0.21	0.4	0.50 ~ 0.90	≤0.035	≤0.035	1.50 ~ 1.80	1.40 ~ 1.70	0.25 ~ 0.35	其余

1.2 试验方法

采用单因素法进行试验,分别研究了试样旋转速度、喷嘴移动速度、泵压力和处理次数对试样表层改性的影响,试验参数和试验方案如表 2 和表 3 所示。其中丸粒流速根据测量每次试验前后丸粒的质量差,计算出单位时间内用量。靶距即喷嘴距试样表面的距离根据前期试验结果来看,在一定范围内对试样改性效果影响不大^[8],所以取定值,不再对其进行研究。

表 2 试验参数

Table 2 Test parameters

参数及单位	数值
喷嘴内径 D/mm	1.5
丸粒流速 g/s	9 ~ 11
喷射角度 $\alpha/(^\circ)$	90
靶距 H/mm	10

表 3 试验方案

Table 3 Test plan

试样 编号	试样旋转速度 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	喷嘴移动速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	泵压力 P/MPa	处理次数 N
1	0	0	0	0
2	100	150	300	1
3	200	300	300	1
4	300	450	300	1
5	100	50	300	1
6	100	100	300	1
7	100	150	100	1
8	100	150	200	1
9	100	150	300	2
10	100	150	300	3

用基恩士超景深三维显微系统 VHX-2000E 拍摄试样表面二维形貌,选择放大倍数为 500X。采用 HV-1000 型显微硬度计测定试样的显微硬度,每个试样面测 5 个点,以其均值作为该面的显微硬度测量值。残余应力的测量设备采用加拿大 Proto 高速大功率 X 射线残余应力分析仪,测量时管电压参数 30 kV,管电流为 25 mA,采用 Cr 靶辐射,Fe(211) 衍射,每个面测 3 个点,取其均值。采用电化学腐蚀方法对试样进行逐步剥层,每次剥层深度 20 μm 左右,剥层深度通过千分表测量,剥层至 200 μm 深度时误差在 10 μm 左右,从而进行显微硬度及残余应力沿层深方向的测量。

如图 1 所示,试验过程中将供丸装置与水刀进砂口相连,在供丸装置中放入适量的弹丸(弹丸直径 $d=0.2\text{ mm}$,材质为 410 不锈钢),利用高压水射流喷射时在混砂室内产生的卷吸作用及弹丸自身重量使弹丸连续进入混砂室与高速水混合,获取动能,并通过喷嘴形成高速弹丸射流喷射到试样表面。水射流喷嘴轴线与圆棒试样轴线垂直相交,并沿着试样轴线移动,试样由输出轴端的弹性夹头夹持,在一定的转速范围内转动,从而保证射流覆盖整个圆柱面。

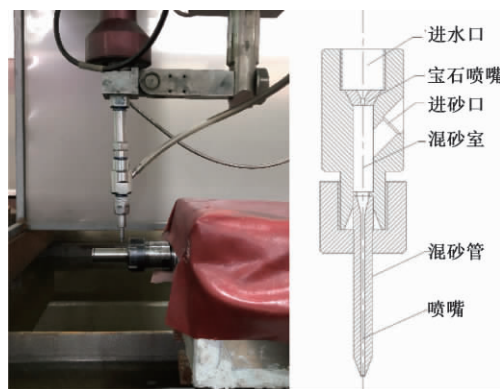


图 1 水射流改性方式及喷嘴结构

Figure 1 Water jet modification method and nozzle structure

当试样转速一定,喷嘴移动速度过快会形成如图 2 所示试样表面未完全被射流覆盖的情况。由于射流强化时靶距较小,为 10 mm,射流在初始段^[9-10]内冲击试样, a 的值约等于喷嘴直径 D ,为 1.5 mm。由此得出水射流对试样圆柱面的覆盖率为水射流强化面积与待强化圆柱

面积的比值,即:

$$C = \frac{S_2}{S_1} = \frac{av_1t}{2\pi rL} = \frac{an}{v}, \quad (1)$$

式中: S_2 为水射流强化面积; S_1 为试样待强化圆柱面表面积; v_1 为试样表面线速度 $v_1 = 2\pi nr$; t 为强化时长; n 为试样旋转速度; r 为试样半径; L 为试样长度; v 为喷嘴移动速度。当 $C = 1$ 即 $v/n = a$ 时, 试样表面可以被全覆盖。

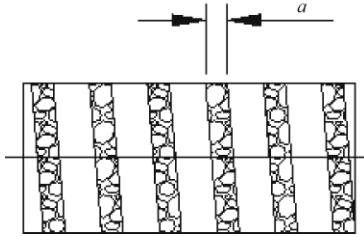


图2 喷头移动速度过快时试样表面示意图

Figure 2 Schematic diagram of the sample surface when the nozzle moves too fast

2 试验结果与分析

2.1 表面形貌与粗糙度

图3所示为改性前后试样表面形貌,(a)~(j)分别对应试样1~10。图4所示为试样粗糙度柱状图。试样1为原始试样,试样2~10处理方式如表3所示。对比试样2、3、4,在试样表面强化覆盖率为100%的条件下,试样旋转速度 n 越大,喷嘴沿试样轴线移动速度 v_1 同比增大,此时试样表面线速度 v 远大于 v_1 ,这使得试样表面粗糙度随着转速的增大而减小,如图4中试样2、3、4所示。当试样旋转速度一定,试样表面粗糙度随着喷嘴移动速度的增大而减小,如图4中试样5、6、2所示;但由于试样2、6、5表面强化覆盖率逐渐增大,由图3也可看出,试样表面磨削痕迹越来越少,因此粗糙度也逐渐增大。图3中试样7、8、2是不同泵压力下水射流强化的表面,压力越大,试样表面磨削痕迹越少,冲蚀越严重,粗糙度越大。图3中试样2、9、10是不同强化处理次数下的试样表面,随着处理次数增加,试样表面冲蚀愈加重,粗糙度越大。

2.2 残余应力

图5是试样表层改性前后的残余应力沿深度变化的曲线,图中残余应力均是沿深度增加先急剧增大后缓慢减小,呈勺子状,且表层残余应力场深度达到200 μm 以上。

如图5(a)试样强化后表层残余应力值随着试样旋转速度的增加而减小,残余应力最大值在距表

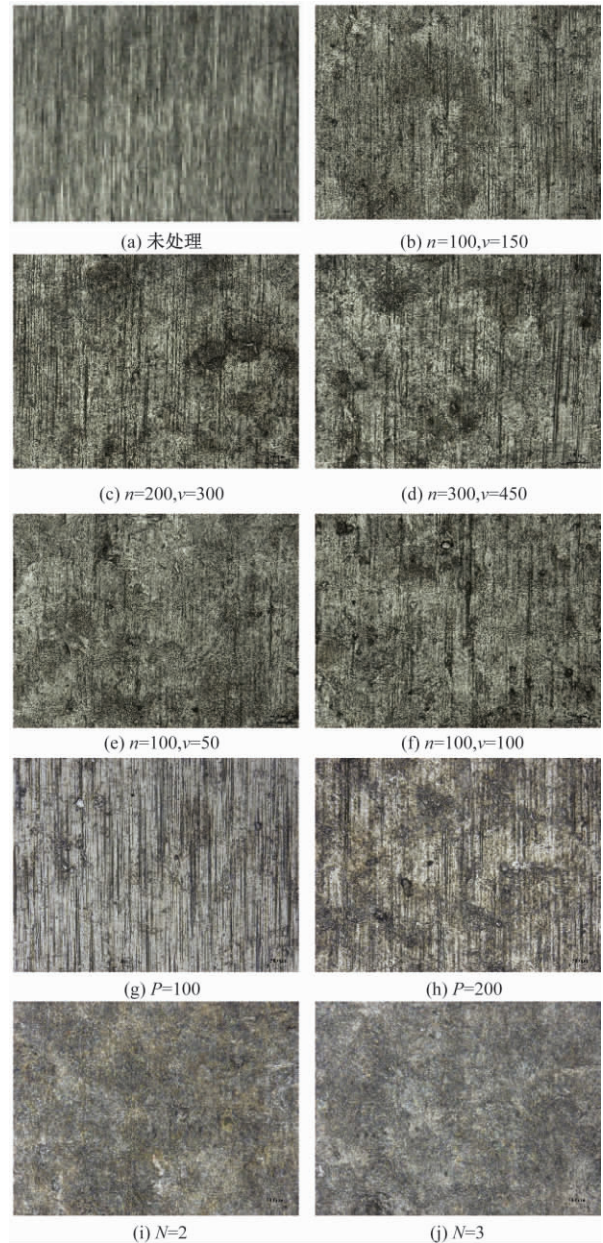


图3 试样改性前后表面形貌

Figure 3 Surface morphology before and after modification of sample

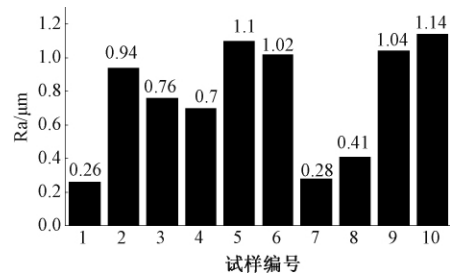


图4 试样表面粗糙度

Figure 4 Sample surface roughness

面40 μm 左右,在试样转速 $n = 100, 200, 300$ r/min时分别达到-1 013.13、-938.56、-734.38 MPa。

如图5(b)残余应力场深度随着喷嘴移动速

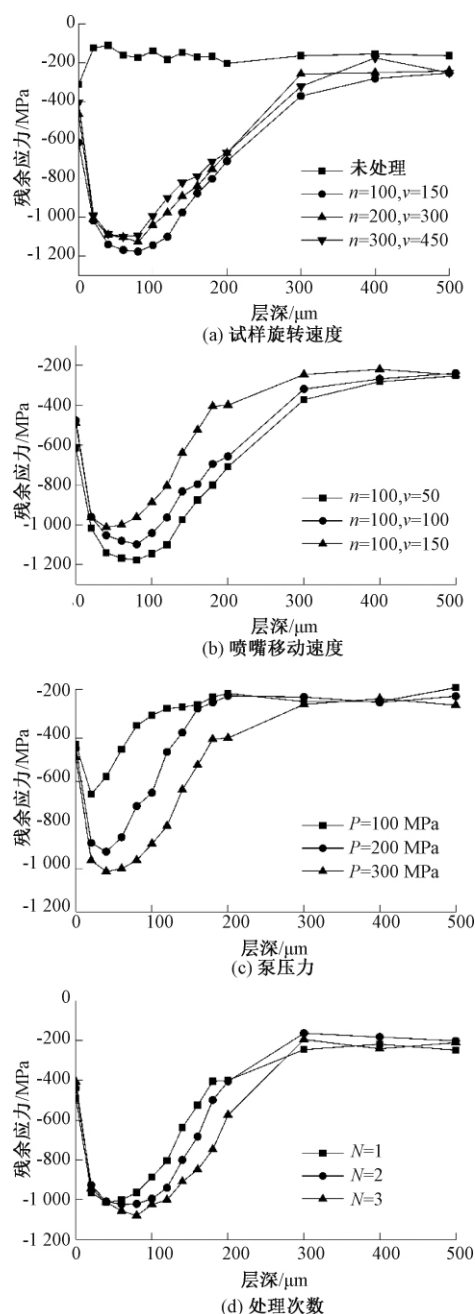


图5 残余应力沿试样层深的变化

Figure 5 The residual stress changes along the depth of the sample layer

度的增大逐渐减小,残余应力最大值分别在喷嘴移动速度 $v = 50, 100 \text{ mm/min}$ 时达到 -1176.25 、 -1098.31 MPa ,且距表面的深度达到 $80 \mu\text{m}$ 左右。

如图 5(c) 残余应力场深度随着压力的降低大幅下降,在压力 $P = 200 \text{ MPa}$ 时,残余应力的最大值在 $40 \mu\text{m}$ 左右达到 -923.35 MPa , $P = 100 \text{ MPa}$ 时残余应力的最大值在 $20 \mu\text{m}$ 左右达到 -657.95 MPa 。

如图 5(d) 后混合水射流处理 2 次以上时使

得残余应力场的深度略有加深,残余应力最大值的深度在处理次数 $N = 2, 3$ 时分别增大至 $60, 80 \mu\text{m}$ 左右,达到 $-1023.35, -1079.33 \text{ MPa}$; 尽管增加幅度较小,但是其达到最大值后残余应力数值减小的趋势较为缓慢。综上,试验条件 $n = 100 \text{ mm/min}$, $v = 50 \text{ mm/min}$, $P = 300 \text{ MPa}$, $N = 1$, 即试验编号 5 时,试样表层产生残余应力的效果最好。

2.3 显微硬度

试样表层改性前后的硬度沿深度变化的曲线,其硬度值随各因素变化趋势与残余应力相同,硬度场深度也都在 $200 \mu\text{m}$ 以上。在图 6(a)、(b)、(c) 中可以看出,在距表面深度 $500 \mu\text{m}$ 内原始试样的表层硬度值在 60 HRC 左右,改性后试样表层硬度较原始试样增加较大,但硬度最大值均出现在距表面 $40 \mu\text{m}$ 左右。

图 6(a) 中试样表层硬度最大值在试样转速 $n = 100, 200, 300 \text{ r/min}$ 时分别达到 $64.0, 63.3, 62.4 \text{ HRC}$,喷嘴移动速度分别减小为 $100, 50 \text{ mm/min}$ 时,如图 6(b) 试样表层硬度最大值达到 $64.6, 65.2 \text{ HRC}$,而当泵压力减小为 $200, 100 \text{ MPa}$ 时,如图 6(c) 试样表层硬度最大值减小为 $62.8, 62.2 \text{ HRC}$,图 6(d) 中硬度最大值在处理次数 $N = 2, 3$ 时分别达到 $64.2, 64.5 \text{ HRC}$,但是其距表面深度增加到 $60 \mu\text{m}$ 左右,且下降趋势相对较缓。综上,在试样编号 5 的试验条件下,改性后试样表层硬度更好。

2.4 分析与讨论

如图 5(a) 和图 6(a) 所示,在满足圆柱试样表面 100% 强化覆盖的条件下,试样强化后的改性效果受试样转速的影响较大。这是因为试样转速增大会使得喷嘴相对试样表面移动速度非常大。在水喷丸冲击能力不变的情况下,高转速下单位时间内试样表层受到的冲击能量远远小于低转速,因此试样转速越低,表层的改性效果越好。

同样的,转速相同时,喷嘴移动速度的变化也会影响试样表层单位时间内受到的冲击能量。但是,移动速度的变化引起的喷嘴相对试样表面移动速度变化幅度较小,因此试样表层残余应力和硬度的增加幅度较小,如图 5(b) 和图 6(b) 所示。

根据泵的使用压力强度特性,随着泵压力的增加,体积流量增加^[10-11]。加压后水与丸粒混合前的速度^[10]:

$$v_w = \eta \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}}, \quad (2)$$

式中: P 为泵压力; ρ_w 为高压水的密度。由于高速水和管壁摩擦以及流体的压缩等引起的压力损失,从而降低速度系数 η 。在固体颗粒和空气的混合加速期间,高速水射流能量的 30% 至 70% 被消散^[11]。消散的能量包括高速水对混砂室的摩擦和冲击、与空气的混合等,这些能量取决于施加的压力大小。随着水射流速度的增加,能量转移效率几乎呈线性增加,但同时能量消散也逐渐增加,这使得在中等水射流速度下有最佳能量转换^[10]。因此,单纯的增加后混合水射流的泵压力并不能线性地增加试样表层的改性效果。为了提

高能量的利用率,可以考虑采用前混合水射流强化方式。

后混合水射流对试样表层改性,在强冲击载荷作用下,材料会发生较大的塑性变形,冲击能量所做的功大多数转变为塑性能,只有极小部分消耗于弹性能。停止后,由于冲击区周围材料的反作用,将在冲击区中产生压应力^[12]。后混合水射流的每次处理,新的冲击能量均会影响试样表层已有的残余应力场和硬度场,从而使得试样表层残余应力场和硬度场随着处理次数的增加而加深,试样表面粗糙度增大。

3 结论

通过单因素试验研究了后混合水射流喷丸对 18CrNiMo7-6 齿轮渗碳钢圆棒试样的表层改性工艺,得出以下结论:

(1) 在保证后混合水射流对圆柱试样表面的全覆盖条件下,试样表层的残余应力和硬度随着试样转速增加而降低,随着喷嘴移动速度的减小而增大,而试样表面粗糙度与之相反,转速最大 $n = 100 \text{ r/min}$ 移动速度最小 $v = 50 \text{ mm/min}$ 时,粗糙度、残余应力和硬度达到最大值,分别为 $1.1 \mu\text{m}$ 、 -1176.25 MPa 、 64HRC 。

(2) 随着泵压力的增加,后混合水射流的速度增加,试样表面粗糙度、表层残余应力和硬度也随之增加。但相应的消散的能量也随之增加,导致试样表层的改性效果不能随着压力的增加而线性增加。

(3) 后混合水射流对试样表面的多次处理能够加深试样表层的残余应力场和硬度场,其中残余应力最大值在 $N = 2, 3$ 时较 1 次处理分别增加 1.01% 、 6.53% ,达到 -1023.35 、 -1079.33 MPa ;同时也使得试样表面粗糙度增加,但增加较少。

参考文献:

- [1] 熊健民,毛为民,余天庆. 残余应力对疲劳裂纹扩展的影响[J]. 湖北工学院学报, 1996, 11(4): 7-11.
- [2] 何声馨,刘坤坤,王锐,等. 喷丸表面的最佳粗糙度参数与材料硬度的关系[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(1): 83-86.
- [3] VOSOUGH M, SVENNINGSSON I. Influence of high pressure water-jet-assisted machining on surface residual stresses on the work-piece of Ti-6AL-4V alloy [C]// Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering. Bellingham: SPIE, 2005,

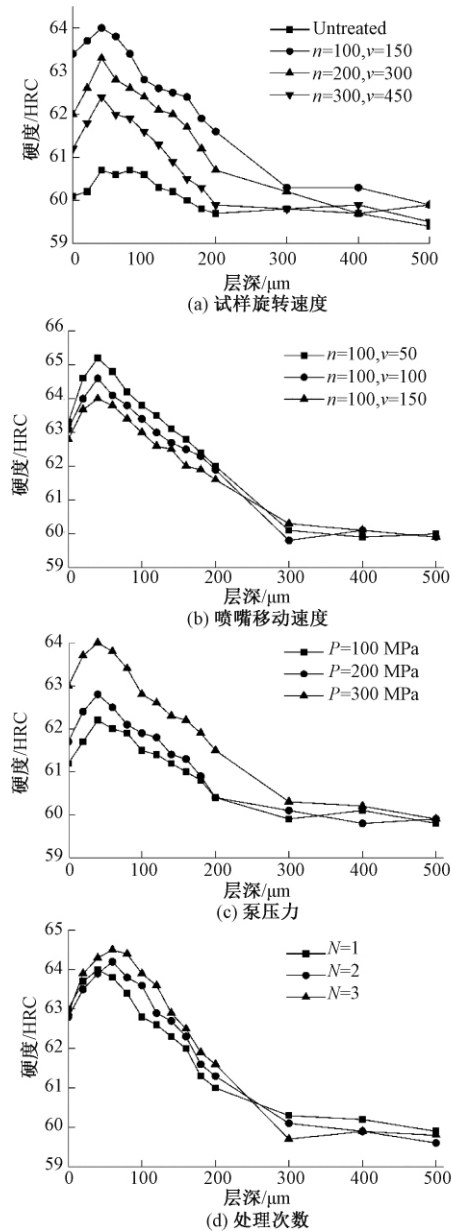


图6 硬度沿试样层深的变化

Figure 6 The hardness changes along the depth of the sample layer

- 5852: 127 – 133.
- [4] 邹雄 梁益龙 吴泽丽,等. 磨料水射流喷丸对渗碳 GDL-1 钢表面完整性及疲劳性能的影响[J]. 中国表面工程 2017, 30(2): 41 – 47.
- [5] AROLA D, MCCAIG M L, KUNAPORN S, et al. Waterjet and abrasive waterjet surface treatment of titanium: a comparison of surface texture and residual stress[J]. Wear, 2001, 249(10/11): 943 – 950.
- [6] AROLA D, ALADE A E, WEBER W. Improving fatigue strength of metals using abrasive waterjet peening[J]. Machining science & technology, 2006, 10(2): 197 – 218.
- [7] 戴如勇, 于中奇, 刘忠伟, 等. 渗碳淬火 18CrNiMo7-6 钢的表面喷丸强化及表征[J]. 机械工程材料, 2013, 37(5): 100 – 102.
- [8] 吴政协, 马泳涛, 龚军振, 等. 后混合水射流喷丸工艺对 18CrNiMo7-6 渗碳钢表面性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 147 – 152.
- [9] 章文峰, 卢义玉, 汤积仁. 磨料射流喷嘴外流场磨料速度模型及分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S2): 576 – 584.
- [10] MANU R, BABU N R. An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials[J]. Wear, 2009, 266(11/12): 1091 – 1097.
- [11] MOMBER A W. Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high-speed waterjet: an impact-force study[J]. Experimental thermal & fluid science, 2001, 25(1/2): 31 – 41.
- [12] 孔德军, 周朝政, 吴永忠. 304 不锈钢激光冲击处理后的残余应力产生机理[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 736 – 740.

Study on the Influence of Water Jet Modification Process on Carburized Steel Round Bars

MA Yongtao¹, AN Lele², ZHANG Lundun¹, ZHAO Lechuan¹

(1. School of Mechanical Engineering; 2. Henan Province Industrial Technology Research Institute of Resources and Materials, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The surface modification process of 18CrNiMo7-6 gear carburized steel round bar samples by post-mixed water jet peening was studied. In the condition of satisfying the full coverage of water jet blasting on the circumferential surface of the sample, the single factor experiment was used to study the effect of sample rotation speed, nozzle moving speed, high pressure water jet pump pressure and number of treatments on the surface topography, surface roughness, surface residual stress and hardness of the sample material. The super depth of field three-dimensional microscope, three-dimensional surface topography, X-ray residual stress analyzer, HV-1000 microhardness tester and so on was used to measure the above results. The experimental results showed that after the post-mixed water jet, the projectile and water would bring certain erosion and wear on the surface of the sample, and the surface morphology of the sample will be changed. The surface roughness, surface residual stress and hardness of the sample decreased with the increase of the sample rotation speed and the nozzle movement speed, and increased with the increase of the pump pressure and the number of treatments; when the sample rotation speed $n = 100$ r/min, the nozzle movement speed $v = 50$ mm/min, the pump pressure $P = 300$ MPa, the number of treatments $N = 1$, the maximum residual stress was about -1176.25 MPa, and the maximum hardness was 64HRC, which is 6.7% higher than the original sample.

Key words: post-mixed water jet peening; 18CrNiMo7-6; round bar sample; surface modification; residual stress

本刊被下列数据库及文摘收录:

- 美国《化学文摘》(CA)
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ)
- 英国《科学文摘》(SA)
- 美国《数学评论》(MR)
- 美国《剑桥科学文摘》(CSA)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- 《中国学术期刊(网络版)》(CAJ-N)
- 《中国学术期刊(光盘版)》(CAJ-CD)
- 《中国科技论文统计源》
- 《中文科技期刊数据库》(CSTJ)
- 《中国期刊网》
- 《中国学术期刊网络出版总库》(CAJD)
- 《中国科技论文与引文数据库》(CSTPCD)
- 《万方数据系统》
- 《中国学术期刊综合评价数据库》
- 《中国学术期刊文摘》
- 《中国机械工程文摘》
- 《中国数学文摘》
- 《中国化学化工文摘》
- 《中国力学文摘》
- 《中国物理文摘》
- 《电子科技文摘》
- 《国家科技期刊开放平台》
- 《超星期刊域出版平台》

郑州大学学报(工学版)
Zhengzhou Daxue Xuebao (Gongxueban)

双月刊 (1980年创刊)

第41卷 第1期 总第169期 2020年1月10日

Journal of Zhengzhou University
(Engineering Science)

Bimonthly (Started in 1980)

Vol.41 No.1 Sum No.169 Jan. 10, 2020

主管单位 河南省教育厅
主办单位 郑州大学
出版单位 《郑州大学学报》编辑部
电子信箱 gxb@zzu.edu.cn
地 址 河南省郑州市科学大道100号(450001)
电 话 (0371)67781276 67781277
主 编 李燕燕
副 主 编 向 颀
印刷单位 山西同方知网印刷有限公司
发行范围 国内外公开发行
征 订 处 全国各地邮政局
发行单位 河南省邮政发行局

Administrated by The Education Department
of Henan Province
Sponsored by Zhengzhou University
Edited & Published by Editorial Board of Journal of
Zhengzhou University
E-mail gxb@zzu.edu.cn
Address No.100 Science Avenue, Zhengzhou 450001, China
Telephone (0371)67781276 67781277
Chief Editor LI Yanyan
Executive Chief Editor XIANG Sa
Printed by Shanxi Tongfang Knowledge Network Printing Co., Ltd
Distributed by Publishing Trading Corporation,
P.O.B.782, Beijing 100011, China

中国标准刊号: ISSN 1671-6833
CN 41-1339/T

定价: 20.00元

邮发代号: 36-232