

# 基于中压开关柜相电流异常点数据的故障预警方法

张 锴<sup>1</sup> 曹张保<sup>2</sup> 姜静飞<sup>1</sup>

(1. 苏州市轨道交通集团有限公司运营一分公司, 215100, 苏州; 2. 上海玖道信息科技股份有限公司杭州分公司, 310012, 杭州//第一作者, 工程师)

**摘 要** 通过分析地铁供电系统中同一站点的中压开关柜相电流日常规律性特点, 利用机器学习方法生成标准曲线。使用  $3\sigma$  准则筛选出粗大误差的异常点值, 并根据异常点出现周期性情况进行分类利用。以苏州轨道交通 4 号线为实例验证, 对过去多个周期时段内异常点值出现的频次、设备异常点值数据出现时间范围, 从时空斑图上进行比对, 研究归纳出异常点值的时空特性。最后, 提出基于中压开关柜相电流异常点值的故障预警方法和故障知识库更新策略, 从而实现异常情况及时把控, 提高供电设备智能化运维系统的鲁棒性。

**关键词** 地铁供电系统; 中压开关柜; 相电流; 异常点; 故障预警方案

**中图分类号** U231+.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.045

## Fault Early Warning Method Based on Abnormal Point Data of Medium Voltage Switchgear Phase Current

ZHANG Kai, CAO Zhangbao, JIANG Jingfei

**Abstract** By analyzing the daily regularity characteristics of medium voltage switchgear phase current at the same station in metro power supply system, a standard curve is generated by machine learning method. The  $3\sigma$  criterion is used to filter out the abnormal point values with gross errors, and the abnormal points are classified and utilized according to the periodic occurrence conditions. Taking Suzhou Metro Line 4 as the example for practical verification, the frequency of abnormal point value occurrence and the time range of equipment abnormal point value occurrence in the past multiple cycles are compared from spatiotemporal patterns, and the spatial-temporal characteristics of the abnormal point values are studied and summarized. Finally, a fault early warning method based on the abnormal point value of medium voltage switchgear phase current and an update strategy of fault knowledge base are proposed, so as to realize the timely control of abnormal situation and to improve the robustness of the intelligent operation and maintenance system of power supply equipment.

**Key words** metro power supply system; medium voltage switchgear; phase current; abnormal point; fault early warning scheme

**First-author's address** No. 1 Operation Branch of Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215100, Suzhou, China

在地铁供电系统中, 中压开关柜起着非常重要的作用。它直接控制牵引电能和动力照明设备的供应, 是保障牵引用电及照明用电安全的关键设备<sup>[1]</sup>。如何根据中压开关柜的负荷情况进行预测性维修或状态修, 是当前研究的热点课题。状态修的核心就是对设备及其运行状态进行综合评估, 然后制定个性化的维修策略。近年来, 国内外学者对电气设备状态评估进行了各种研究。对于电力变压器而言, 目前提出的评估方法有模糊聚类法<sup>[2]</sup>、支持向量机<sup>[3]</sup>和神经网络方法<sup>[4]</sup>等, 其在工程实践中均得到了很好的应用。其中, 利用机器学习的 K-Means 方法对地铁供电系统中压开关柜相电流标准曲线进行仿真, 能够描述地铁供电系统的负荷状态<sup>[5]</sup>。

为了避免电流畸变对设备带来的损坏, 需要对电流异常点值进行研究, 并探索牵引供电系统中, 异常点值数据的发生条件和工况。通过对历史异常数据进行归纳总结和对当前异常数据进行实时监测, 从而实现对异常点值数据的动态管控, 辅助制定设备检修策略<sup>[6-9]</sup>。本文首先使用  $3\sigma$  准则对基于标准曲线的异常点进行筛选并分类, 并通过对历史数据分析, 最后提出对异常点的故障预警方案和故障知识库更新策略, 从而提高设备状态评估精确性, 以实现状态修和提高检修效率<sup>[10-17]</sup>。

## 1 相电流异常点值获取及更新

### 1.1 异常点值获取

文献[5]指出, 中压开关柜相电流的标准曲线

以 14 d 为 1 个周期,通过移动平均法使曲线变得平滑,采用均值-方差方法可发现异常电流。中压开关柜相电流标准曲线的时间和电流值  $I$  构造方法如表 1 所示。

表 1 中压开关柜相电流标准曲线构造方法  
Tab.1 Construction method of medium voltage switchgear phase current standard curve

时刻	第 1 天	第 2 天	...	第 13 天	第 14 天
00:00	$I_{01}$	$I_{02}$	...	$I_{013}$	$I_{014}$
00:05	$I_{11}$	$I_{12}$	...	$I_{113}$	$I_{114}$
00:10	$I_{21}$	$I_{22}$	...	$I_{213}$	$I_{214}$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
23:50	$I_{2861}$	$I_{2862}$	...	$I_{28613}$	$I_{28614}$
23:55	$I_{2871}$	$I_{2872}$	...	$I_{28713}$	$I_{28714}$

注: $I_{2871}$  表示第 1 天第 288 个时刻的电流值。其余类推。

在对周期内不同日期下的同一时刻数据进行处理后,得到 1 条标准曲线,用以表达中压开关柜相电流在不同时段的变化趋势。

根据周期内确定的标准曲线,可对每个独立站点进行标准曲线绘制,并基于该标准曲线获取超高异常点值,对异常点值构造时空斑图。具体分为 3 个步骤。

1) 步骤 1 绘制独立的中压开关柜相电流的标准曲线,标准曲线构造电流值  $F_{t,n}$  的计算式为:

$$F_{t,n} = w_1 I_{t,1} + w_2 I_{t,2} + \cdots + w_n I_{t,n} \quad (1)$$

式中:

$w_n$ ——周期内每日权重;

$I_{t,n}$ ——时刻点对应的实际电流值;

$t$ ——天数( $t=1,2,\cdots,14$ );

$n$ ——1 d 内测量电流值次数( $n=0,1,\cdots,287$ )。

将  $F_{t,n}$  进行连接构造最新的标准曲线。

2) 步骤 2 计算每个时刻点对应标准曲线的粗大异常相电流实时数据。根据  $3\sigma$  准则,对相电流的实际数据超出( $\mu \pm 3\sigma$ )范围的数据(其中: $\mu$  为均值; $\sigma$  为标准差),定义为值得关注的粗大异常相电流数据。针对上述标准曲线周期内的数据可以计算出  $\mu, \sigma$ :

$$\mu_{t,n} = F_{t,n} \quad (2)$$

$$\sigma_{t,n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{14} (I_{t,n} - \mu_{t,n})^2}{14}} \quad (3)$$

3) 步骤 3 根据历史数据与实时异常数据进行

类比分析,获取异常数据的发生频次、时段等信息(见表 2)。

表 2 中压开关柜相电流异常数据统计

Tab.2 Statistics of medium voltage switchgear phase current abnormal data

时刻	第 1 天	第 2 天	...	第 13 天	第 14 天
00:00	×	×	...	×	×
00:05	√	×	...	√	×
00:10	×	√	...	√	√
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
23:50	×	×	...	×	√
23:55	×	×	...	×	×

注:×表示未出现超高异常数据;√表示出现超高异常数据。

通过  $3\sigma$  准则获取的粗大异常数据,在统计分析基础上,利用大数据分析手段,对设备状态进行评估。

## 1.2 异常点分类

对每个站点中压开关柜相电流异常点的情况进行分类,描述 1 个周期内异常点的情况:

$$S = \{S_1, S_2, \cdots, S_{14}\} \quad (4)$$

式中:

$S$ ——1 个周期内异常点发生的次数;

$S_1, \cdots, S_{14}$ ——14 d 周期内各天的异常点发生次数。

异常点首现表达为:

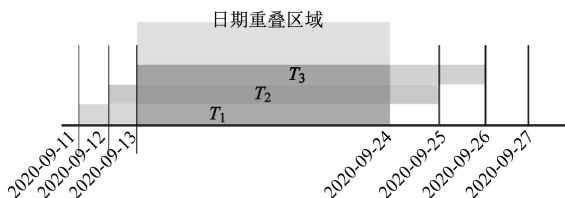
$$S > 0 \ \& \ \{S_1, S_2, \cdots, S_{13}\} = 0 \quad (5)$$

其余异常点情况为: $S > 0$ 。

首次出现的异常点,能反映异常数据的突发性,大概率具备偶然性,可能对设备带来重大损害,在本文方法中,赋予更大权重。

## 1.3 异常点更新

连续的数据处理采用迭代方式。以 2020-09-25、2020-09-26、2020-09-27 连续 3 d 的中压开关柜相电流标准曲线为例,其中参与标准曲线计算的日期交集为 2020-09-13—2020-09-24。日期重叠说明情况如图 1 所示。



注: $T_1$  为第 1 个周期; $T_2$  为第 2 个周期; $T_3$  为第 3 个周期。

图 1 日期重叠说明

Fig.1 Date overlap description

虽有日期交集,但标准曲线每日都会重新绘制,且最近日期赋予权重较大。随着日期更迭,标准曲线迭代,异常点值会重新生成,完成数据更新,甚至出现上个周期  $T_1$  是异常点的点值在新的周期  $T_3$  内变成非异常点的情况。

异常点值更新的过程,首次出现的异常点数据可能表示该设备运行处于非健康状况。这对设备状态评估和检修策略制定具有更高的价值。

## 2 异常点应用场景研究

### 2.1 模型应用研究

地铁供电系统中,常见的中压开关柜包含 35 kV 整流变开关柜、35 kV 电力变开关柜、进线开关柜和出线开关柜。这 4 种开关柜都可以绘制标准曲线,并进行异常点分析,进而对开关柜进行评估。

进线开关柜为负荷侧的总开关柜,该开关柜所联接的是主变与低压侧负荷输出,担负着整段母线负荷。以苏州轨道交通 4 号线吴江人民广场站进线开关柜为例,对其异常点值进行应用研究。在 2020-09-25 得到 1 条 35 kV 进线柜的标准曲线,其覆盖日期为 2020-09-11—2020-09-24。所生成的标准曲线如图 2 所示。

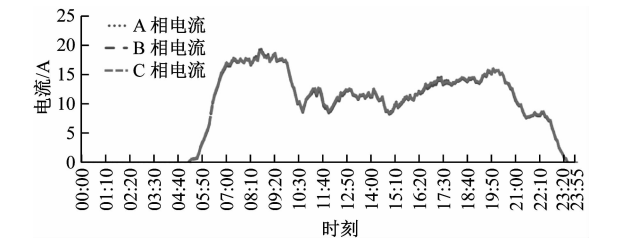


图2 开关柜相电流标准曲线图

Fig. 2 Standard curve chart of voltage switchgear phase current

根据生成的标准曲线,得到该周期内 A、B、C 三相电流出现异常点值情况,如表 3 所示。

从表 3 中可得出结论:

- 1) 苏州轨道交通 4 号线吴江人民广场站中压开关柜相电流标准曲线周期内发生的异常数据仅 17 条 min 级数据,没有发生异常点。验证了  $3\sigma$  准则对于实际异常情况验证的可靠性与可用性。
- 2) 即使数据发生大波动, $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  相电流近似相等。超高异常数据发生时,三相电流不平衡度依然控制在允许值范围内。验证了模型对设备状态修提供的安全性。
- 3) 本案例中 2020-09-19T15:05 出现了  $I_A$ 、 $I_B$

表3 异常相电流数据

Tab. 3 Abnormal phase current data

时刻	$L_A$	$L_B$	$L_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$
2020-09-13T13:35	11.66	11.51	11.68	49.23	49.00	49.23
2020-09-13T22:45	5.20	5.10	5.23	13.95	13.71	13.95
2020-09-13T22:55	3.75	3.68	3.78	11.19	11.19	11.49
2020-09-14T05:35	0.90	0.81	0.93	9.49	9.49	9.73
2020-09-14T08:55	18.24	18.12	17.90	48.47	48.23	45.71
2020-09-14T11:10	12.31	12.18	12.65	38.74	38.74	38.74
2020-09-14T14:30	11.29	11.08	11.26	41.96	41.96	42.20
2020-09-15T08:35	19.30	19.12	18.88	50.23	50.23	50.46
2020-09-16T08:00	17.68	17.50	17.56	53.22	52.98	53.22
2020-09-17T08:55	18.24	18.12	17.90	49.00	49.00	48.70
2020-09-17T09:35	17.75	17.52	17.68	47.71	47.47	47.71
2020-09-17T22:55	3.75	3.68	3.78	8.97	8.73	8.73
2020-09-18T11:10	12.31	12.18	12.65	37.74	37.74	37.74
2020-09-19T15:05	9.92	9.56	9.74	35.99	35.69	
2020-09-19T22:45	5.20	5.10	5.23	19.99	19.69	19.99
2020-09-23T14:30	11.29	11.08	11.26	46.48	46.24	46.71
2020-09-24T22:55	3.75	3.68	3.78	10.73	10.73	10.96

注: $L_A$ 、 $L_B$ 、 $L_C$  为 A、B、C 三相电流构成的标准曲线数值; $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$  为周期内实际发生的异常相电流数据。

异常数据,但  $I_C$  并未出现异常数据。即同一时刻会出现 A、B、C 三相中任一相电流有超高异常数据的情况,其余相并未出现超高异常数据。这种情况发生后,后续状态恢复正常,表明了系统设备的抗扰动能力,也验证了模型的鲁棒性。

### 2.2 时空斑图分析研究

地铁运行具有日常规律性与季节规律性,探究异常点值发生的时间及频次尤为重要。异常电流数据的时空斑图也能反应轨道交通运行的实际情况。对异常点值进行频次分析,能够总结异常点发生规律,以苏州轨道交通 4 号线吴江人民广场站 2020-03-09—2020-10-09 的数据进行分析,异常点值时空斑图如图 3 所示。

通过对异常点时空斑图分析研究,得知:

- 1) 图 3 a) 中,异常点值在高负荷状态下,即列车正常运行载客时段(05:00—21:00),相电流异常点值要远大于非高负荷状态。
- 2) 图 3 b) 中,异常点在正常运行载客时段并未出现高频次异常点,而在 22:00—23:30 的时段内,异常点发生频次较高;这是一个有趣的现象,很可能反映列车进入车辆段时间不规律带来的异常点值增加。

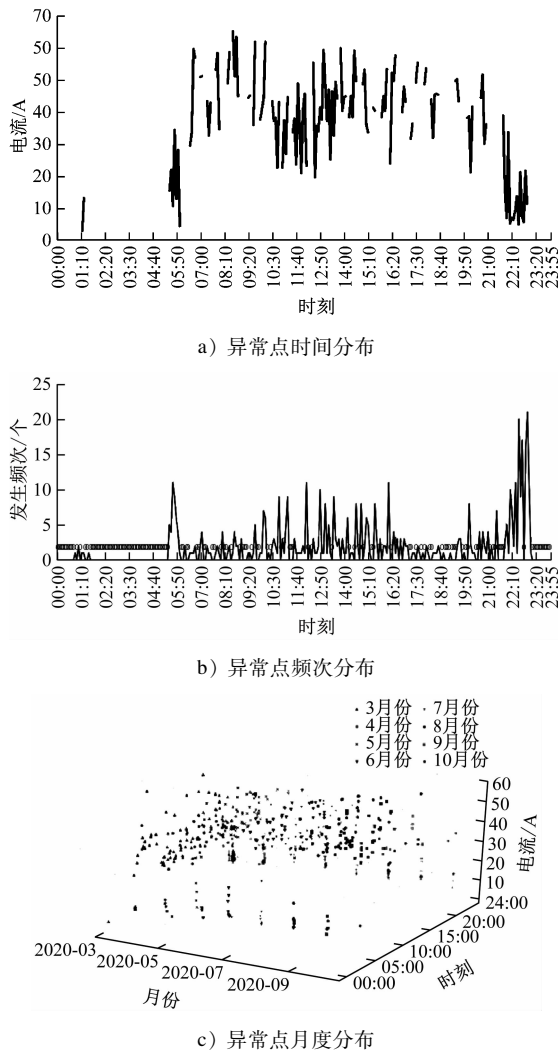


图3 开关柜相电流异常点时空斑图

Fig. 3 Spatiotemporal patterns of abnormal points

3) 图3 c)中,2020年3月份的异常点密度要大于其他月份,很可能是由于疫情期间,特殊社会活动现象导致地铁供电运维数据呈现较大差异。

时空斑图分析研究是将异常点放到不同时间和空间维度去探讨异常关注模型应用的合理性与正确性。通过对实际数据时空斑图分析研究,可以发现异常点关注模型的应用与实际情况能较好贴合,利于对设备进行状态评估。

### 3 故障预警

#### 3.1 基于异常点的故障预警方法

基于异常点数据进行预警,就是综合时空斑图的分析结果,对异常点值进行的综合利用。根据异常点值时空斑图,可以实现对非高频次发生时段的异常点值和首次出现的异常点值进行单点预警。

综合频率与首次出现的异常情形,能够及时对突发情况进行预警,方便运维人员进行重点关注。通过对异常点值的精细化处理和对预警方式进行级别设定,可以从数据层面上反映告警信息在业务上的严重等级。

中压开关柜相电流超高异常点的预警告警判定流程如图4所示。

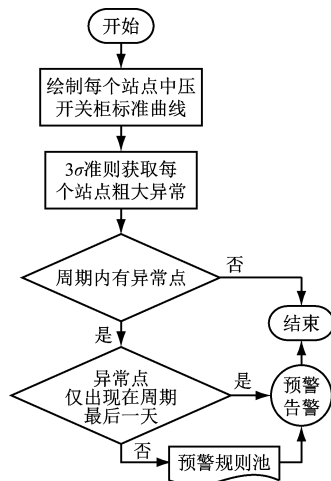


图4 中压开关柜相电流超高异常点的预警告警判定流程

Fig. 4 Process of early warning and alarming of abnormal high points of medium voltage switchgear phase current

图4中,预警告警判定流程可以根据具体需要对周期内异常点发生情况进行设定,如设定周期内发生异常点的数量阈值告警及异常点的阈值触发告警等。根据预警流程内容触发预警告警,提醒运维工作人员及时采取行动。

异常值预警的内容,不仅包含了电流畸变的情形,同时也包含了三相电流不平衡的情况,甚至还反映了线路短路的情形。通过监控相电流异常值,能够实现对突发情况的及时了解并采取相应动作,以保护地铁供电设备。

每个站点的超高异常点触发相应规则进行预警告警,运维人员可以根据异常优先级及时高效地对设备制定检修计划。

#### 3.2 更新故障知识库

故障知识库能够根据故障特点,及时提供解决方案,给运维人员带来工作便利。在设备采购中,中压开关柜型号通常比较一致,因此可以对同种型号做共性处理。针对异常点引起的预警告警以及引发维修排查的故障,需要及时记录,并完成上传和更新故障预警规则池,以保证运维人员能够

更精准管控设备,实现设备的动态运维管理。故障知识库建立流程图如图5所示。

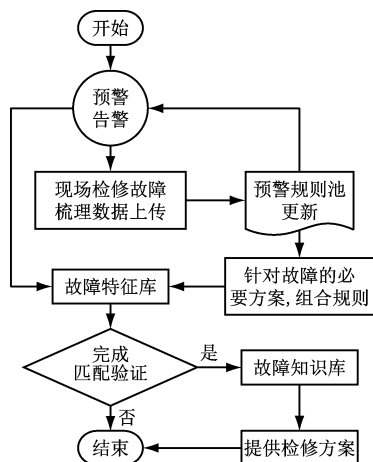


图5 更新故障知识库流程

Fig. 5 Process of updating fault knowledge base

根据故障发生特点及人工上传故障数据内容,动态调整预警池规则,并将规则组合成故障特征库的特征值。当预警内容满足故障特征库匹配内容时,则将故障知识库已有方案推送给运维人员。

## 4 结语

本文从中压开关柜相电流超高异常点出发,根据异常点出现情况特点,对异常点数据进行分类,并结合长周期数据进行时空斑图分析,提出了基于异常点的故障预警方法以及更新故障知识库的方法。工作人员可以根据主动设定的关注优先级对重点设备或者突发事件进行及时关注,并根据符合故障特征库匹配的内容引出故障知识库的检修方案。

通过发现超高异常点能很好地实现对设备的宏观管控,基于异常点的预警方法能够很好地起到事前反馈控制作用,但是由于地铁实际运行中有多维因素带来设备扰动,异常点预警告警方法中也会有较多无效预警。因此增强事前反馈能力,丰富故障知识库,继续深入挖掘标准曲线系列工作,能带来更好的智能化运维。

## 参考文献

[1] 吴晗,李时莹,亓彦珣,等. 基于综合赋权与WRSR的高压开关柜状态评估方法研究[J]. 高压电器, 2020(2):6.  
WU Han, LI Shiyang, QI Yanxun, et al. State evaluation method of high-voltage switchgear based on comprehensive weighting and WRSR[J]. High Voltage Apparatus, 2020(2):6.

[2] 孙才新,郭俊峰,廖瑞金,等. 变压器油中溶解气体分析中的模糊模式多层聚类故障诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001(2):5.  
SUN Caixin, GUO Junfeng, LIAO Ruijin, et al. Study on fault diagnose method of transformer DGA with fuzzy model hiberarchy classification[J]. Proceedings of the CSEE, 2001(2):5.  
[3] 董明,孟源源,徐长响,等. 基于支持向量机及油中溶解气体分析的大型电力变压器故障诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003(7):88.  
DONG Ming, MENG Yuanyuan, XU Changxiang, et al. Fault diagnosis model for power transformer based on support vector machine and dissolved gas analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003(7):88.  
[4] GUARDADO J L, NAREDO J L, IEEE, et al. A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis[J]. IEEE Power Engineering Review, 2007(7):71.  
[5] 陈亮,曹张保. 地铁供电系统中压开关柜电流分析理论和方法[J]. 现代城市轨道交通, 2021(1):6.  
CHEN Liang, CAO Zhangbao. Current analysis theory and method of medium voltage switchgear in metro power supply system[J]. Modern Urban Rail Transit, 2021(1):6.  
[6] 梁文焯. 供电可靠性约束下的智能变电站主设备检修策略分析[J]. 现代科学仪器, 2019(3):4.  
LIANG Wenzhuo. Research on multi-expression face recognition based on SIFT algorithm[J]. Modern Scientific Instruments, 2019(3):4.  
[7] 罗凤章,张天宇,王成山,等. 基于多状态马尔科夫链的配电设备状态检修策略优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020(9):10.  
LUO Fengzhang, ZHANG Tianyu, WANG Chengshan, et al. Research on optimization method of condition based maintenance strategy for distribution system equipment based on the multi state Markov Chain[J]. Proceedings of the CSEE, 2020(9):10.  
[8] 朱太云,陈忠,杨为,等. 电网设备差异化状态检修新模式研究[J]. 高压电器, 2020(1):236.  
ZHU Taiyun, CHEN Zhong, YANG Wei, et al. Study on the new mode of differential state maintenance of power grid equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2020(1):236.  
[9] 梁翔,秦丽文,李春华,等. 基于风险评估的配电设备状态检修决策方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019(1):6.  
LIANG Shuo, QIN Liwen, LI Chunhua, et al. Condition-based maintenance decision-making method for distribution equipment based on risk assessment[J]. Proceedings of CSU-EPSCA, 2019(1):6.  
[10] 李黎,张登,谢龙君,等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2013(24):152.  
LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Proceedings of CSEE, 2013

- (24):152.
- [11] 高云霞,王立天. 地铁供电系统电流选跳保护及方案优化[J]. 现代城市轨道交通,2011(4):1.  
GAO Yunxia, WANG Litian. Application and scheme of current selection trip protection in metro power supply system[J]. Modern Urban Rail Transit, 2011(4):1.
- [12] 谭贵生,曹生现,赵波,等. 基于关联规则与变权重系数的变压器状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制,2020(1):8.  
TAN Guisheng, CAO Shengxian, ZHAO Bo, et al. An assessment of power transformers based on association rules and variable weight coefficients[J]. Power System Protection and Control, 2020(1):8.
- [13] 周福林,李群湛,刘炜,等. 城市轨道交通供电系统仿真软件开发研究[J]. 城市轨道交通研究,2007(5):25.  
ZHOU Fulin, LI Qunzhan, LIU Wei, et al. Simulation software in subway power supply system[J]. Urban Mass Transit, 2007(5):25.
- [14] 吴宗武,江和,傅培村,等. 中压开关柜状态监测装置设计[J]. 电工电气,2014(4):12.  
WU Zongwu, JIANG He, FU Peicun, et al. Monitoring device design for medium-voltage switchgear state[J]. Electronics Electric, 2014(4):12.
- [15] 李美,王小华,苏海博,等. 中压开关柜状态在线监测装置电磁兼容性能研究[J]. 高压电器,2011(4):69.  
LI Mei, WANG Xiaohua, SU Haibo, et al. Research of electromagnetic compatibility of condition on-line monitoring device for medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2011(4):69.
- [16] 李琦. 地铁网络化后备保护装置设计与实现[D]. 成都:西南交通大学,2016.  
LI Qi. Backup protection device design and implementation for subway network[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [17] 苏鸾鸣. 中压开关柜异性主母线动稳定分析[J]. 中国新技术新产品,2020(20):89.  
SU Luanming. Dynamic stability analysis of heterosexual main busbars of medium voltage switchgear[J]. New Technology & New Products of China, 2020(20):89.

(收稿日期:2021-12-15)

## (上接第206页)

- CHEN Xu, ZHAO Jianfei, LI Yi. Research on pneumatic braking system sliding of metro vehicle[J]. Railway Technical Innovation, 2019(5):37.
- [2] 黄晔. 成都地铁3号线电客车制动系统防滑异常故障分析[J]. 铁道机车车辆,2019(2):96.  
HUANG Ye. Analysis of antiskid anomaly failure of the electric-vehicle brake system in Chengdu Metro Line 3[J]. Railway Locomotive & Car, 2019(2):96.
- [3] 郭强,车超,赵扬宇,等. 城市轨道交通车辆防滑性能评估标准浅析[J]. 现代城市轨道交通,2018(5):13.  
GUO Qiang, CHE Chao, ZHAO Yangyu, et al. Analysis of assessment standards for transit vehicle slide protection performance[J]. Modern Urban Rail Transit, 2018(5):13.
- [4] 崔虎山,陈磊,刘中华,等. 地铁车辆制动防滑控制故障分析[J]. 城市轨道交通研究,2019(4):15.  
CUI Hushan, CHEN Lei, LIU Zhonghua, et al. Analysis of anti-slip control fault in metro braking system[J]. Urban Mass Transit, 2019(4):15.
- [5] 王宗明,左建勇,吴萌岭. 城市轨道交通车辆防滑系统故障分析与仿真[J]. 城市轨道交通研究,2014(1):26.  
WANG Zongming, ZUO Jianyong, WU Mengling. Fault analysis of anti-skid in metro vehicle and simulation[J]. Urban Mass Transit, 2014(1):26.
- [6] 周浩. 地铁车辆电空混合制动控制[J]. 铁道机车与动车,2019(2):32.  
ZHOU Hao. Electro-pneumatic hybrid braking control of metro vehicle[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2019(2):32.
- [7] 张兴宝,陈永彪,胡立本,等. 西安地铁2号线车辆轮对频繁发生擦伤的原因分析及对策探讨[J]. 铁道机车车辆,2014(5):55.  
ZHANG Xingbao, CHEN Yongbiao, HU Liben, et al. Cause analysis and countermeasures of frequency scrapes of vehicle wheels for Xi'an Metro Line 2[J]. Railway Locomotive & Car, 2014(5):55.
- [8] 牟文博. 西安地铁2号线电动客车轮对踏面擦伤原因探究[J]. 铁道车辆,2016(1):41.  
MU Wenbo. Inquiry on causes to scratch on wheelset treads of electric passenger cars for Xi'an Metro No. 2 Line[J]. Rolling Stock, 2016(1):41.
- [9] 韦苏来,徐红星. 减少市域列车滑行风险的措施分析与研究[J]. 铁道机车车辆,2019(增刊1):18.  
WEI Sulai, XU Hongxing. Analysis and research on the measures of reducing urban train slide risk[J]. Railway Locomotive & Car, 2019(S1):18.
- [10] 韦苏来,王仁庆. 地铁车辆下坡制动黏着利用方案的测定与实践[J]. 铁道车辆,2019(6):25.  
WEI Sulai, WANG Renqing. Measurement and practice of the adhesion utility scheme for downhill braking of metro vehicles[J]. Rolling Stock, 2019(6):25.

(收稿日期:2020-03-04)