

多源异构数据实时主动处理技术在城市轨道交通供电智能运维中的应用研究

何小兵¹ 陈学锋² 陈俊² 周朝辉²

(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, 200050, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 基于复合事件多源异构数据的实时主动处理技术研究, 探讨了轨道交通供电智能运维的多源异构数据和复合事件的关联关系, 设计开发了技术处理框架与感知数据智能网关软件程序。通过逻辑处理和时序处理, 实现了从多维度定量表述设备的健康状态。在此基础上, 通过试点站实例应用发现, 基于复合事件多源异构数据的实时主动处理技术方法实用可靠, 可以有效实现供电设备状态、环境参数的全覆盖。该技术通过感知预警和动态监测, 提高了问题发现和故障处置效率, 有效提升了轨道交通供电系统的安全冗余度。

关键词 城市轨道交通; 供电系统; 智能运维; 多源异构数据

中图分类号 U231.8

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.004

Research on Application of Multi-source Heterogeneous Data Real-time Active Processing Technology in Urban Rail Transit Power Supply Smart Operation and Maintenance

HE Xiaobing, CHEN Xuefeng, CHEN Jun, ZHOU Chaohui

Abstract Real-time active processing technology based on compound event multi-source heterogeneous data, the correlation between multi-source heterogeneous data and compound event in rail transit power supply smart operation and maintenance is discussed. The technical processing framework and a perceptive data intelligent gateway software program are designed and developed. The health status of equipment can be quantitatively expressed in multiple dimensions through logical and sequential processing. On this basis, through pilot station application, real-time active processing technology in compound event multi-source heterogeneous data is found to be practical and reliable, and it could effectively achieve the full coverage in the status and environmental parameters of power supply equipment. Through perceptual early warning and dynamic monitoring, the

efficiency of problem discovery and fault handling is improved, and the safety redundancy of rail transit power supply system is effectively improved.

Key words urban rail transit; power supply system; intelligent operation and maintenance; multi-source heterogeneous data

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

伴随城市轨道交通网络化建设规模的日益扩大, 为提高生产安全和作业效率、提高设备可靠性, 全国各地的城市轨道交通运营单位都在致力于智能化运维的应用探索和研究。基于设备在线监测技术和大数据分析技术构建的智能运维系统, 已然成为今后城市轨道交通生产运维模式变革的重要趋势。

城市轨道交通超大规模网络化供电系统智能运维建设的关键在于, 建立集设备实时感知预警、设备全寿命管理、生产业务流程管控、专家分析系统于一体的供电智能运维系统^[1], 实现从传统的依靠人力、物力叠加式维护模式向数字化、网络化、智能化运维模式的转变, 能够有效解决“能源、业务、数据”多流合一及“管、用、修”业务融合的系统管控难题, 促进对设备、资源和业务的动态监测、优化配置、精准调度和协同运转, 推动供电运维技术与管理模式的创新, 确保轨道交通供电质量和安全。

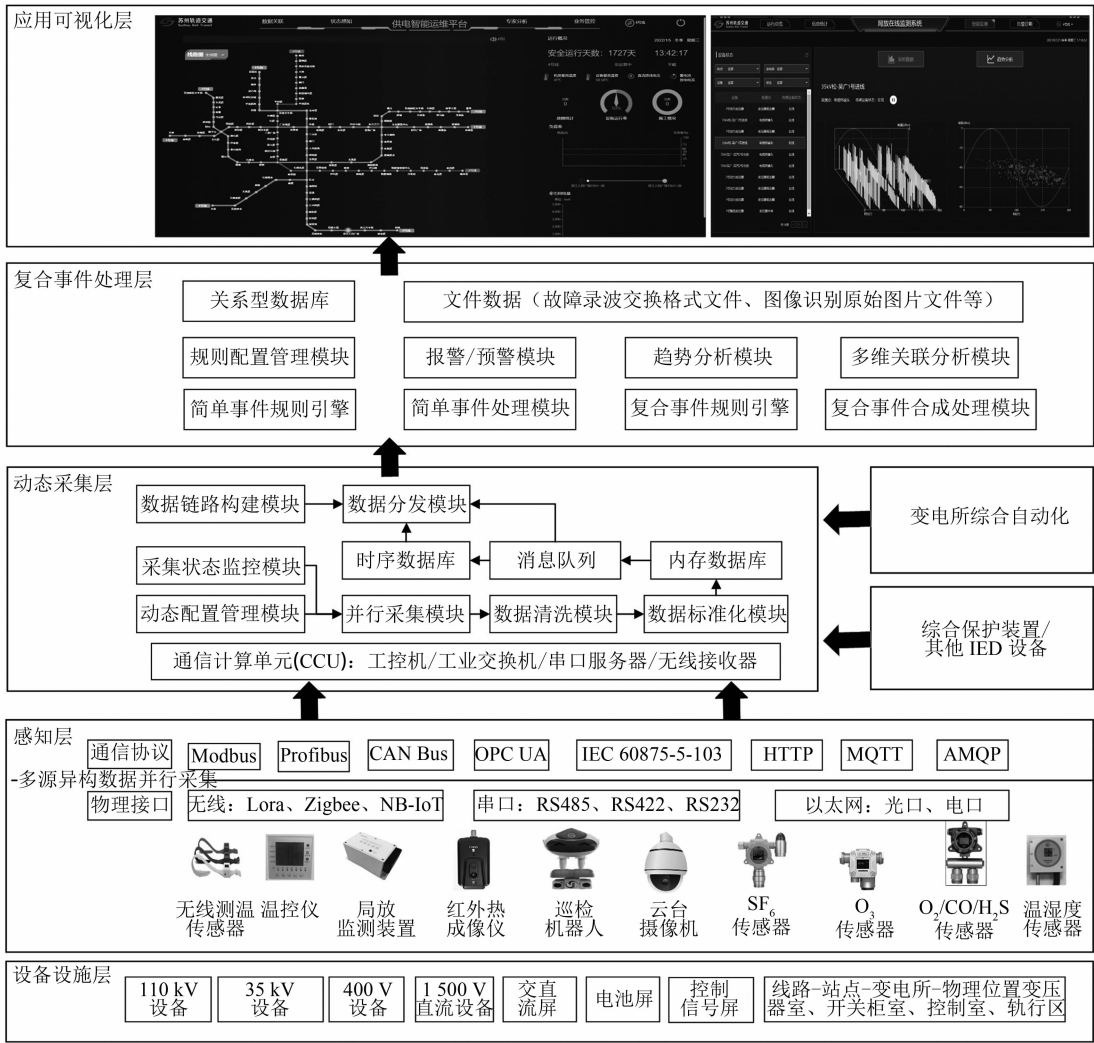
设备实时感知预警是通过运用应激式自适应采集、控制、预处理、多协议转换、数据重构等边缘计算技术, 综合应用多种监测传感装置, 采集设备运行状态数据并根据预置规则报警和分析预警。多传感装置的并行数据采集客观形成了多源异构数据以及关联复杂事件, 亟需一种有效的方法实现边缘计算处理。在多源异构数据处理方面, 文献[2]提出了一种基于 FPGA(现场可编程门阵列)的多源异构数据并行可配置采集方法; 文献[3]针对牵引

变压器利用多源异构数据进行故障诊断平台的设计和 应用;文献[4]基于电力物联网多源异构数据研究了变电站智能健康评估的方法。以上研究采用的方法在指定场景得到了有效应用,但面向城市轨道交通供电智能运维的全场景应用,上述方法对大量多源异构数据采集后的复杂事件分析处理深度不足。

针对上述问题,本文提出了一种基于多源异构数据和复杂事件的实时主动处理技术,并探讨了该技术在 实际供电智能运维场景的应用情况,可为轨道交通供电智能运维平台的建设提供借鉴。

1 复合事件多源异构数据主动处理的系统架构和系统分层

城市轨道交通供电智能运维的多源异构数据并行采集和复合事件主动处理技术架构设计包含 5 个层次:设备设施层、感知层、动态采集层、复合事件处理层和应用可视化层。采集接入点包括设备间隔层智能电子设备(如综合保护装置)、各类传感装置,以及变电所综合自动化系统遥信、遥测、遥脉数据等。多源异构数据并行采集和复合事件处理技术架构如图 1 所示。



注: IED——智能电子设备。

图 1 多源异构数据并行采集和复合事件处理技术架构

Fig. 1 Technical architecture of multi-source heterogeneous data parallel collection and compound event processing

文献[5]定义了 CPS(信息物理系统)的 5C 技术体系架构:智能连接、智能分析、智能网络、智能认知和智能配置与执行。根据 CPS 理论,设备设施

层是运维对象的实体空间(或物理空间),在其基础上构建的智能运维系统,属于赛博空间(或信息空间),感知层是连接两者的接口。在本文应用研究

中,感知层包含了巡检机器人、红外测温、无线测温、局放监测、温控仪、环境温湿度、臭氧浓度、六氟化硫(SF₆)气体浓度等传感装置。

本文设计的动态采集层对应 CPS 5C 中的智能连接层,包括动态配置管理模块、并行采集模块、采集状态监控模块、数据清洗模块、数据标准化模块、数据链路构建模块和数据分发模块。其中:数据清洗模块负责数据质量校验;数据标准化模块负责内部分类编码、属性编码等的统一;数据分发模块负责数据进入下一步业务逻辑处理过程的数据分发。数据存储设计方面,高频实时数据存储于内存数据库,用于实时数据显示;按照既定频率采集的数据首先缓存于消息队列,然后再存储于时序数据库。

复合事件处理层对应 CPS 5C 中的智能分析层,包括规则配置管理模块、简单事件规则引擎、简单事件处理模块、复合事件规则引擎、复合事件合成处理模块、报警/预警模块、趋势分析模块和多维关联分析模块,分析数据存储于关系型数据库和文件系统。应用可视化层是人机界面,实现数据的业务可视化展示。

复合事件多源异构数据处理技术的应用方法如下:首先,在启动时加载数据采集和预处理策略,并加载报警规则,进入待机状态;其次,基于采集数据进行规则运算,完成单一事件处理;然后,按照规则进行复合事件的合成处理,生成报警、预警或分析结果;最后,根据报警和预警信息,动态调整为故障状态下的采集策略并跟踪故障处理状态,待故障关闭且取消报警后,恢复常规采集策略。多源异构数据并行采集和复合事件主动处理过程设计如图 2 所示。

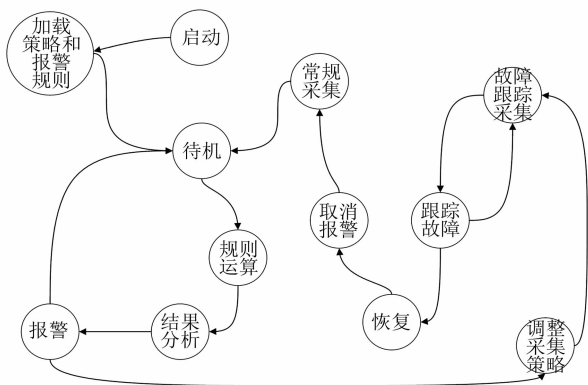


图2 多源异构数据并行采集和复合事件处理状态机

2 城市轨道交通供电智能运维的多源异构数据构成

城市轨道交通供电系统由外部电源、主变电所、中压供电网络、牵引供电系统、动力照明供电系统、电力监控系统、杂散电流防护系统、防雷和接地系统等部分组成,本文的应用研究对象是正线站的牵引/降压混合变电所。

城市轨道交通供电智能运维系统在充分利用传统电力监控系统数据的基础上,需加强对供电设备本体及运行环境的智能巡检和在线监测,实现对设备健康状态的实时感知预警。主流的监测方法包括智能巡检机器人^[6]、红外在线监测^[7]、局放在线监测^[8]、断路器机械特性监测^[9]等。感知层传感装置主要包括巡检机器人、云台摄像机、红外热像仪、无线测温传感器、局放监测传感器、臭氧传感器、六氟化硫(SF_6)传感器、温湿度传感器等。感知层多源异构数据如表1所示。

表 1 多源异构数据
Tab. 1 Multi-source heterogeneous data

感知设备/装置名称	分类	物理接口	通信协议	用途
巡检机器人	设备感知	电口/光口	HTTP Modbus	开关柜智能巡检;表计读数、开关位置、状态指示等
摄像机	设备感知	电口	HTTP Socket	设备远程巡视
红外热像仪	设备感知	电口/光口	HTTP Socket	测量设备表面温度;开关柜、变压器、蓄电池、电缆等
无线测温传感器	设备感知	无线	Lora Modbus	测量设备表面温度;开关柜、变压器、蓄电池、电缆等
局放特高频传感装置	设备感知	电口	IEC 61850 Modbus	监测开关柜、变压器、电缆的局部放电状态
局放高频电流传感装置	设备感知	电口	IEC 61850 Modbus	监测开关柜、变压器、电缆的局部放电状态
局放超声传感装置	设备感知	电口	IEC 61850 Modbus	监测开关柜、变压器、电缆的局部放电状态
综合保护装置	设备感知	电口	IEC 61850 Modbus	采集故障录波文件等数据
SCADA 系统	设备感知	电口/光口	Modbus TCP	采集电力监控数据
温控仪	设备感知	串口	Modbus RTU	测量变压器内部三相绕组、铁芯温度
温湿度传感器	环境感知	串口	Modbus RTU	监测环境温度、环境湿度
臭氧传感器	环境感知	串口	Modbus RTU	监测环境臭氧浓度
六氟化硫传感器	环境感知	串口	Modbus RTU	监测环境六氟化硫气体浓度
氧气浓度传感器	环境感知	串口	Modbus RTU	监测环境氧气浓度
一氧化碳传感器	环境感知	串口	Modbus RTU	监测环境一氧化碳气体浓度

注: SCADA 为数据采集与监控。

3 复合事件多源异构数据处理技术的核心构成

牵引/降压混合变电所内的主要设备包括整流变压器、动力变压器、35 kV 开关柜、1 500 V 直流开关柜、400 V 开关柜等,本文主要以变压器和 35 kV 开关柜为例开展多源处理分析,并探讨有限空间环境监测的多源处理和基于复合事件的联动处理,研究结果有助于明晰复合事件多源异构数据处理技术的核心构成。

3.1 变压器状态的多源处理

针对整流变压器和动力变压器,采用局放监测、红外测温、温控仪测温、臭氧浓度监测和环境温湿度监测等多维度监测,可综合判定变压器设备的健康状态。变压器设备健康状态判定指标如表 2 所示。

表 2 变压器健康状态判定条件

Tab.2 Judgment conditions of transformer health state		
事件来源	判定指标	判定条件
局放特高频传感装置	放电幅值	变压器局部放电状态 过高报警
	放电周期	
	放电相位	
	放电类型	
	放电幅值	变压器局部放电状态 超限报警
	放电周期	
	放电相位	
	放电类型	
臭氧传感器	臭氧浓度	环境臭氧浓度超限报警
SCADA 系统	输入电流	输入电流有效值过高报警
	输入电压	输入电压超限报警
红外热像仪	绝缘子温度	监测点超温报警
	分接头温度	监测点超温报警
	绕组连杆接头温度	监测点超温报警
	电缆终端头温度	监测点超温报警
	变压器本体 A 相绕组温度	A 相超温报警
温控仪	变压器本体 B 相绕组温度	B 相超温报警
	变压器本体 C 相绕组温度	C 相超温报警
	变压器本体铁芯温度	铁芯超温报警
温湿度传感器	环境温度	环境温度超限报警
	环境湿度	环境湿度超限报警

根据表 2 所示的判定指标及变压器工作原理所构建的判定变压器设备健康状态的复合事件处理如下:

1) 复合事件 1:局部放电过高报警+臭氧浓度超限报警(局放-臭氧)的组合报警。变压器局部放电产生高频电磁波,特高频传感器能够感知并通过特征计算发出报警信息;局部放电使空气中产生臭

氧,臭氧浓度传感器产生超限报警。局放-臭氧复合事件可加强变压器局放问题确认,降低单一传感器故障引起的误报。

2) 复合事件 2:局放过高报警与环境湿度超限报警(局放-环境湿度)的组合报警,可对局放的裂化趋势进行预判,提醒问题跟踪。

3) 复合事件 3:变压器监测点超温+输入电流有效值过高(温度-电流)的组合报警。反映由大电流引起的变压器温度过高问题。变压器测温点包括内部的三相绕组、铁芯,以及外部高、低压侧的电缆终端接头和连杆接头等部位。

4) 复合事件 4:变压器监测点超温报警+局放过高报警(温度-局放)的组合报警。反映局部放电引起的变压器温度过高问题,并可结合测温点辅助故障定位。

3.2 35 kV 开关柜状态的多源处理

针对 35 kV 开关柜(以下简称开关柜),采用电流监测、局放监测、臭氧浓度监测、进/出线电缆温度监测和环境温/湿度监测等多维度监测,综合判定开关柜设备的健康状态。开关柜设备健康状态判定指标如表 3 所示。

表 3 35 kV 开关柜健康状态判定条件

Tab.3 Judgment conditions of 35 kV switchgear health state		
事件来源	判定指标	判定条件
局放特高频传感装置	放电幅值	35 kV 开关柜局部放电状态 过高报警
	放电周期	
	放电相位	
	放电类型	
	放电幅值	35 kV 开关柜局部放电状态 超限报警
	放电周期	
	放电相位	
	放电类型	
无线测温传感器	A 相进线温度	A 相电缆超温报警
	B 相进线温度	B 相电缆超温报警
	C 相进线温度	C 相电缆超温报警
温湿度传感器	环境温度	环境温度超限报警
	环境湿度	环境湿度超限报警
SCADA 系统	电流	电流有效值过高报警
臭氧传感器	臭氧浓度	环境臭氧浓度超限报警

根据表 3 所示的判定指标及开关柜工作原理所构建的判定开关柜设备健康状态的复合事件处理如下:

1) 复合事件 1:局部放电过高报警+臭氧浓度超限报警(局放-臭氧)的组合报警。开关柜局部放电产生高频电磁波,特高频传感器能够感知并通过特征计算发出报警信息;局部放电使空气中产生臭

氧,臭氧浓度传感器产生超限报警。局放-臭氧复合事件可加强开关柜局放问题确认,降低单一传感器故障引起的误报。

2) 复合事件 2:局放过高报警与环境湿度超限报警(局放-环境湿度)的组合报警,可对局放的裂化趋势进行预判,提醒问题跟踪。

3) 复合事件 3:进/出线电缆监测点超温+输入电流有效值过高(温度-电流)的组合报警。反映由大电流引起的进/出线电缆温度过高问题,三相电缆测温点选在开关柜电缆室内电缆终端接头附近。

4) 复合事件 4:开关柜监测点超温报警+局放过高报警(温度-局放)的组合报警。反映局部放电引起的开关柜温度过高问题,并可结合测温点辅助故障定位。

3.3 35 kV 开关柜断路器状态的多源处理

通过巡检机器人或摄像机对 35 kV 开关柜设备进行智能巡检,通过对指示灯状态和开关位置的图像识别处理,综合判定断路器分/合闸状态,判定指标如表 4 所示。

表 4 35 kV 开关柜断路器状态判定条件
Tab.4 Judgment conditions of 35 kV switchgear circuit breaker state

事件来源	判定指标	判定条件
巡检机器人/摄像机	断路器分闸指示灯	0 灯灭/1 灯亮
巡检机器人/摄像机	断路器合闸指示灯	0 灯灭/1 灯亮
巡检机器人/摄像机	断路器机械位置指示	0 竖向位置/ 1 横向位置
巡检机器人/摄像机	断路器分合闸位置指示	0 为“1”/1 为“0”

注: 1 表示合闸;0 表示分闸。

根据表 4 所示的判定指标及 35 kV 开关柜工作原理所构建的判定断路器分/合状态的复合事件处理如下:

判定条件 0100,状态为合闸;判定条件 1011,状态为分闸;判定条件 00XX 或 11XX,判定为指示灯故障或图像识别错误,可下达再识别指令进行二次确认;判定条件 XX01 或 XX10,判定为机械位置故障或图像识别错误,可下达再次识别指令进行二次确认。

3.4 35 kV 开关柜气室压力状态的多源处理

SF₆ 气体处于密封的气室内,主要作用于主回路的绝缘,SF₆ 气体压力过高或过低均会对设备造成影响。SCADA 系统只有 SF₆ 压力过高或过低的报警信息,没有气室压力值的数字量。可通过巡检机器人或摄像机对开关柜 SF₆ 压力表读数进行图像识别处理,结合 SF₆ 传感器和 SCADA 系统报警信息,综合判定

35 kV 开关柜气室压力状态,判定指标如表 5 所示。

表 5 35 kV 开关柜气室压力状态判定条件
Tab.5 Judgment conditions of 35 kV switchgear air chamber pressure state

事件来源	判定指标	判定条件
SCADA 系统	断路器气室 SF ₆ 压力报警	压力超限报警
	母线气室 SF ₆ 压力报警	压力超限报警
巡检机器人/ 摄像机	断路器气室 SF ₆ 压力表 读数	压力值超限报警
	母线气室 SF ₆ 压力表 读数	压力值超限报警
SF ₆ 传感器	SF ₆ 浓度	环境 SF ₆ 浓度超限 报警

根据表 5 所示的判定指标及 35 kV 开关柜工作原理所构建的判定气室压力状态的复合事件处理如下:

通过智能巡检图像识别 SF₆ 压力表读数,根据阈值设定过高/过低报警,同时结合 SCADA 系统 SF₆ 压力过高/过低报警,互为判定,加强报警事件的双确认;对 SF₆ 气室压力值巡检数据生成历史曲线,比较环境 SF₆ 气体浓度变化历史曲线,进行趋势判断,实现预告报警。

面对多传感器和异构系统产生的多源异构数据,研制感知数据智能网关软件,实现数据的采集、汇聚,并基于复合事件的实时主动处理,基于可视化技术的人机界面,实现了供电设备状态、环境参数的全覆盖,多维展示设备健康状态。

4 应用实例

本文研究设计的复合事件多源异构数据的实时主动处理技术,在苏州轨道交通 4 号线吴江人民广场站进行了测试和试点应用。该站变电所类型为牵引、降压混合变电所,主要设备用房包括 35 kV/1 500 V 开关柜室、400 V 开关柜室(含动力变压器)、整流变压器室和控制室,现场感知层设备安装部署如图 3 所示。通过设备安装调试和软件开发测试,实现了复合事件多源异构数据的实时主动处理技术在供电智能运维站级系统的有效应用,部分应用如图 4~6 所示。

5 结语

本文基于多传感器协同监测问题,提出了一种基于精确感知多种不同传感器可能在短时间内产生大量多层次数据的并行采集方法,研究了复合事件多源异构数据的实时主动处理技术。该技术以单





图6 多源数据复合事件联动软件截图

Fig. 6 Multi-source data compound event linkage in software

参考文献

- [1] 郭德龙. 地铁供电系统智能运维架构与功能实现[J]. 城市轨道交通研究, 2020(12): 155.
GUO Delong. Realization of metro power supply system intelligent operation and maintenance structure and functionality [J]. Urban Mass Transit, 2020(12): 155.
- [2] 李展鹏, 邹孝付, 苏雍贺, 等. 基于 FPGA 的多源异构数据并行可配置采集方法[J]. 计算机集成制造系统, 2021(4): 1008.
LI Zhanpeng, ZOU Xiaofu, SU Yonghe, et al. Configurable acquisition method of multi-source heterogeneous data based on FPGA [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021(4): 1008.
- [3] 马玉涛, 黄新波, 朱永灿, 等. 面向多源异构数据的牵引变压器故障诊断平台设计[J]. 广东电力, 2020(2): 131.
MA Yutao, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan, et al. Design of traction transformer fault diagnosis platform for multi-source heterogeneous data [J]. Guangdong Electric Power, 2020(2): 131.
- [4] 郭怀东, 侯新伟, 胡玉平. 基于电力物联网多源异构数据分析的变电站智能健康系统的研究[J]. 电气技术与经济, 2019(3): 1.
GUO Huaidong, HOU Xinwei, HU Yuping. Research on substation intelligent health system based on multi-source heterogeneous data analysis of electric Internet of Things [J]. Electrical Equipment and Economy, 2019(3): 1.
- [5] 李杰, 邱伯华, 刘宗长, 等. CPS 新一代工业智能[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
LI Jie, QIU Bohua, LIU Zongchang, et al. Cyber-physical system: the new generation of industrial intelligence [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2017.
- [6] 石伟, 袁顺刚, 卢高庆. 基于自动化交互行为的电力机房巡检机器人系统设计[J]. 制造业自动化, 2021(2): 152.
SHI Wei, YUAN Shungang, LU Gaoqing. The design of inspection robot system for power computer room based on automated interactive behavior [J]. Manufacturing Automation, 2021(2): 152.
- [7] 刘嵘, 刘辉, 贾然, 等. 一种智能型电网设备红外诊断系统的设计[J]. 红外技术, 2020(12): 1198.
LIU Rong, LIU Hui, JIA Ran, et al. Design of intelligent infrared diagnosis system for power grid equipment [J]. Infrared Technology, 2020(12): 1198.
- [8] 黄山山, 盛健, 银星茜, 等. 基于大数据的局放在线监测与诊断[J]. 城市轨道交通, 2019(3): 79.
HUANG Shanshan, SHENG Jian, YIN Xingqian, et al. Online monitoring and diagnosis of partial discharging based on big data [J]. China Metros, 2019(3): 79.
- [9] 黄新波, 王霄宽, 方寿贤, 等. 智能变电站断路器状态监测 IED 设计[J]. 电力系统自动化, 2012(22): 95.
HUANG Xinbo, WANG Xiaokuan, FANG Shouxian, et al. Design on status monitoring IED of circuit breaker for smart substation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012(22): 95.

(收稿日期: 2022-02-10)

(上接第 15 页)

- ZHOU Yeming, LIU Yuwen. On the maximum wear limit of tram wheel flange [J]. Urban Mass Transit, 2017(6): 21.
- [4] 李涛, 刘志远, 赵卓, 等. 城市轨道交通车辆车轮轮缘严重磨损分析[J]. 城市轨道交通研究, 2018(11): 74.
LI Tao, LIU Zhiyuan, ZHAO Zhuo, et al. Analysis on seriously wheel flange wear of urban rail transit vehicle [J]. Urban Mass Transit, 2018(11): 74.
- [5] 于春广, 陶功权. 地铁车轮磨损测试及数值仿真[J]. 工程力学, 2016(1): 201.
YU Chunguang, TAO Gongquan. Analysis of metro wheel wear based on field measurement and numerical simulation [J]. Engineering Mechanics, 2016(1): 201.
- [6] 周橙, 池茂儒, 梁海啸, 等. 城市轻轨低地板列车独立轮对接触与磨损分析[J]. 中国铁路, 2021(5): 33.
ZHOU Cheng, CHI Maoru, LIANG Haixiao, et al. Analysis on the contact and wear of independent wheelsets for low-floor trains of urban light rail transit [J]. China Railway, 2021(5): 33.
- [7] 沈钢, 王浩川, 韩明盛. 具有独立轮轻轨列车的脱轨问题及轮缘侧面磨损研究[J]. 铁道学报, 2006(4): 49.
SHEN Gang, WANG Haochuan, HAN Mingsheng. Study on derailment and flange side-wear of tramway vehicles with independently-rotating wheels [J]. Journal of the China Railway Society, 2006(4): 49.
- [8] 王超生. 长春市轻轨规划的优化调整与设计[J]. 现代城市轨道交通, 2004(4): 5.
WANG Chaosheng. Planned optimization and engineering of light rail in Changchun [J]. Modern Urban Rail Transit, 2004(4): 5.

(收稿日期: 2021-03-09)