

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.010

地线作业人员状态感知的可穿戴设备研究

马超¹, 袁昌斌¹, 杨治国¹, 刘家¹, 娄瑶²

(1. 中铁电气化局集团西安电气化工程有限公司, 西安 710000; 2. 西安理工大学电气工程学院, 西安 710054)

摘要: 为保障牵引供电的可靠性,接触网日常停电检修作业必不可少,实时掌握地线作业人员的状态,有助于保障检修人员的人身安全,提高接触网停电检修现场的安全管理水平。针对挂接地线作业过程中缺少对地线作业人员状态感知的问题,研制了一种面向挂接地线作业人员的可穿戴设备。可穿戴设备能够实时感知地线作业人员的健康状态,从而保障作业人员的人身安全和检修效率,通过 LoRa 自组网与原有系统通信,实现地线作业人员信息在后台的远程监测。实验结果表明,设备能够实现地线作业人员健康状态的监测。

关键词: 接触网停电检修;挂接地线;作业人员;可穿戴设备;状态感知

Research on Wearable Devices for State Perception of Ground Wire Operators

MA Chao¹, YUAN Changbin¹, YANG Zhiguo¹, LIU Jia¹, LOU Yao²

(1. China Railway Electrification Bureau Group Xi'an Electrification Engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: For assuring the reliability of traction power supply, it is necessary to do the maintenance in the case of daily power outage of the contact network. Mastering the status of ground wire operators in real time helps to assure the personal safety of the maintenance staff and improve the safety management level of the outage maintenance site at contact network. In view of lack of state perception of the ground wire operators during the grounding wire hanging operations, a kind of wearable device designed for grounding wire operators has been developed. The wearable device can perceive the health status of ground wire operators in real-time, thus assuring their safety and maintenance efficiency. Through LoRa self-organizing network communication with the original system, remote monitoring of ground wire operator information in the background can be achieved. The experimental results indicate that the device can achieve the monitoring of the health status of ground wire operators.

Keywords: power outage maintenance of contact network; hanging the grounding wire; operators; wearable device; status perception

0 引言

电气化铁路的核心组成部分之一是接触网^[1-4],为了进行停电检修作业,通常会使用临时挂接地线作为一项安全措施。然而,临时挂接地线存在多种不确定因素,这可能导致严重安全事故的发生^[5-8]。随着我国电气化铁路的迅速发展,铁路供电段供电维修机构面对着日益频繁和高强度的接触网线路维护工作^[9-14]。接触网挂接地线工作是一种高度的

重复性劳动,这项任务需要长时间完成,工作量大,并且需要专人监督执行。这些因素导致工作人员容易产生身体不适和过度疲劳,如体温、血压、心率异常等健康问题,进而会增加误操作的可能性^[15-17]。如果停电检修现场挂接地线作业时发生异常状况,管理员无法实时监控作业人员的健康状态,就会使得调整检修和防护工作变得不便^[18-21]。这种情况可能导致管控盲区的出现,同时也可能产生安全隐患。文献[22]探讨了基于 4G 技术的信息交互安全帽,其

收稿日期:2024-07-30

基金项目:国家自然科学基金(52077176);中铁电气化局集团西安电气化工程有限公司重点项目(2023-82)。

通过人工智能技术实现现场交互和后台管理工作。该安全帽通过高速 4G 进行摄像头和声音信息的传输,依赖于基站支持的通信技术。然而,这种设备的通信受到网络覆盖的限制,缺乏边缘计算的能力,导致智能化水平不高。文献[23]研究了一种利用可穿戴技术和互联网开发的电力营销数字化服务系统,包括智能眼镜、电力 5G 专网和后台系统。这些智能可穿戴设备之间使用蓝牙或 Wi-Fi 进行连接,并通过电力 5G 专网与后台系统进行通讯与交互。系统利用人脸识别技术、智能终端设备、电力 SCADA 系统等数据,对作业人员进行安全预警。然而,多种可穿戴设备的连接增加了管理、维护和学习的成本以及操作的复杂性^[24-29]。

为了提高接触网停电检修作业管控的可靠性,本文提出并研发了一种面向挂接地线作业人员状态感知的可穿戴设备。本设备能够实时感知地线作业人员的健康状态和位置等信息,以确保作业人员的检修进度和人员安全。在原有系统中通过 LoRa 自组网与挂接地线作业人员可穿戴设备进行通信,在后台实现对作业人员状态数据的实时监控。实验结果表明,设备能够实现对地线作业人员健康状态的监测。

1 设备硬件设计

根据接触网停电检修作业现场^[20-25]的实际状况,采用以下设计方案:根据原有的挂接地线作业信息系统,研制了一种面向挂接地线作业人员状态感知的可穿戴设备。本设备能够获取作业人员的健康状况和位置信息,并将这些数据传输至上位机,能够监测现场地线作业人员的状态。通过地线作业人员的现场信息对其工作状态进行判断,包括其是否在指定作业点按照规定监护地线、评估其身体健康状态是否良好以及能否正常完成挂接地线任务,以保证接触网停电检修作业的安全性和有效性。

地线作业人员状态感知的可穿戴设备由以下几个模块组成:显示模块、定位模块、LoRa 通信模块、健康状态监测模块和供电功能模块。设备包括以下几个部分:

1) 主控板

根据系统性能需求和功能设计,主控芯片采用 STM32F103RCT6 芯片。该芯片提供了充足的资源,包括 SDIO 接口、12 位 DAC、12 位 ADC、CAN 接口、USB 接口、串口、IIC 接口、SPI 接口、DMA 控制器、高级定时器、通用定时器、基本定时器以及通用

IO 口等。主控板的设计考虑了扩展部分、传感器接口、电量监测功能、电源部分等,以确保系统能够满足需求。

2) 心率实时监测模块

本设备采用了 MKB0805 血压心率监测模块,用于实时感知地线作业人员的健康状态。该监测模块包含 SFB2、HR、YK801 和 HR6 4 颗芯片,心率和血压数据由 UART 串口进行发送。

血压心率监测模块的特点是稳定性高和集成度高,采用了 MCU 算法,功耗较低,能够有效延长设备运行时间,适合持久动态监测血压心率,能够满足监测设备低功耗的需求;容易操作且监测可靠;具有较高的准确度,能够精准采集人体任何部位的血压、心率等信息。为了确保电路不受射频等信号干扰的影响,使用独立的 LDO 供电设计,并选择了 SGM2019 稳压器。这种设计有效控制了单独供电电路的输出纹波保持在 20mV 以下。

3) 电源

电源用于为主控板和各个模块供电,并可以实时监测设备的电量,主要包括电量检测电路、电源转换电路和锂电池部分。

① 电源供电以及转换部分

本设备的供电电路由电容滤波、AMS1117-3.3 和 AMS1117-5 共同组成,设备具有高稳压精度,能够给多种存储器芯片和微处理器供应稳定的电压。

② 电量监测电路

利用电阻分压实现电量监测功能。因为主控芯片的模数转换器输出电压受到 3.3V 的限制,因此采用的电阻需要确保电压输出在允许的范围里。

4) LoRa 模块

LoRa 模块可以与上位机通信,把地线作业人员的健康状态和位置数据发送至后台。

5) 定位模块

定位模块负责获取作业人员的 GPS 信息,并利用串口把原始的 GPS 信息传输至主控板,进而得到准确的经纬度数据。

6) 显示模块

为了节省电力和提高效率,采用功耗低的 OLED 屏幕。通过 SPI 接口,主控板可以把传感器收集的信息传输到 OLED 屏幕,显示心率、血压、异常状态报警阈值、经纬度、电量以及时间等信息。

2 设备软件设计

2.1 主程序

设备的主程序流程图见图 1。主程序包括两

部分,分别是初始化和循环体,共同实现软件的功能。

在初始化阶段,对各种变量进行声明和定义,设置其封装函数名和初始值,并初始化相关接口、封装函数名和初始值。一旦初始化完成,主程序就会进入主循环体阶段,实现相关功能。电量监测电路的输入电压将会被程序不断读取,并转变为设备的剩余电量。此外,程序利用串口收集地线作业人员的健康状态数据、当前时间和 GPS 信息。当人员的体温、血压和心率参数超过预设阈值并持续一定时间时,设备就会通过 LoRa 自组网将现场人员的状态信息进行上传,并发送报警状态标志;当人员的健康状态参数未超过阈值时,设备将保持正常运行,并重置发送倒计时。

在主程序运行时,通过进行中断的采集操作,LoRa 自组网发送 AT 指令,用于修改阈值。最后,利用 OLED 屏幕循环显示上述数据,以便后台能够实时监测地线作业人员的健康状态。

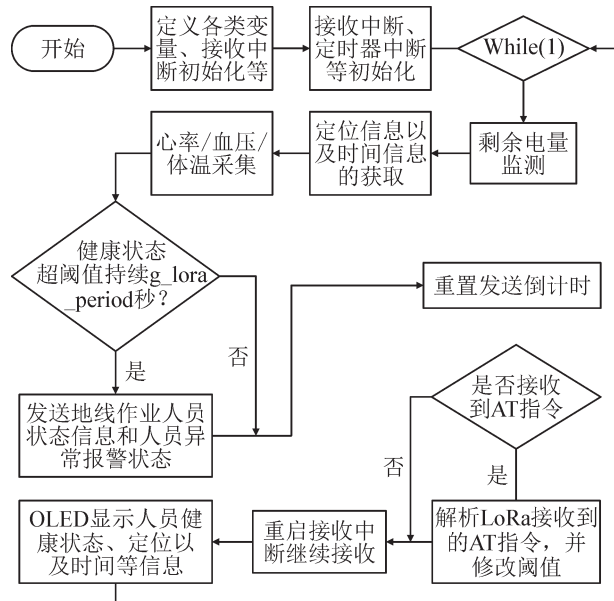


图1 主程序流程图
Fig. 1 Flow chart of main program

2.2 心率血压监测程序

可穿戴设备的心率血压监测程序流程图见图2。具体的运行步骤如下:首先,程序对心率相关的缓存变量进行初始化。若程序启动时间达到50个计数单位后,会清空以前保存的健康状态数据。然后,程序调用封装函数对健康状态数据进行采集,并检查采集的心率、舒张压以及收缩压是否在正常范围内。当有数据超出其阈值时,该数据的结果就会被程序置零。只要所有数据都在所设阈值内,程序就会检查心率血压数据是否超过预设

的限制值。若其超过了限制值,程序就会利用 LoRa 模块上传当前的健康状态数据和 GPS 数据。

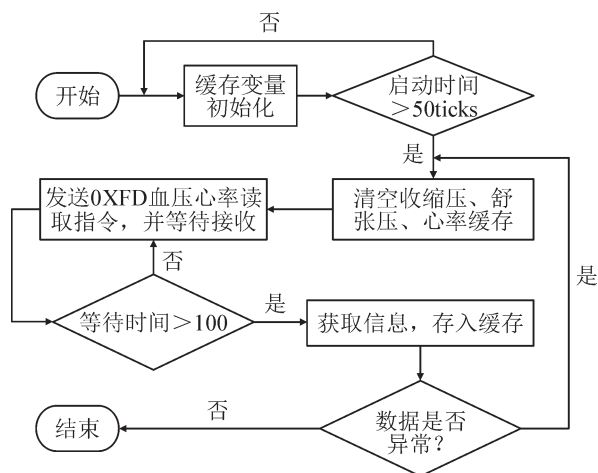


图2 心率血压监测程序流程图
Fig. 2 Flow chart of heart rate and blood pressure monitoring program

2.3 定位程序

GPS 信息获取的流程图见图3。首先分析\$GNRMC 的数据格式,\$GNRMC 数据的特点见表1。

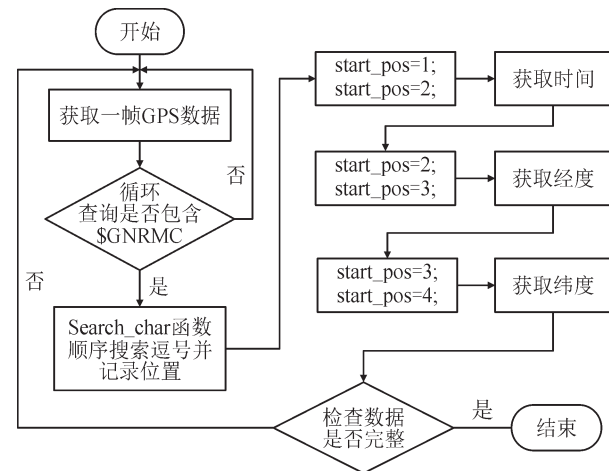


图3 定位程序流程图
Fig. 3 Flow chart of positioning program

表1 GNRMC的数据格式
Table 1 Data format of \$GNRMC

格式	\$GNRMC,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,.....
<1>	UTC时间,时分秒格式
<2>	定位状态,A=有效定位,V=无效定位
<3>	纬度,度分格式
<4>	纬度半球,北半球/南半球(N/S)
<5>	经度,度分格式
<6>	经度半球,东经/西经(E/W)

由于\$GNRMC 数据格式的特性,程序使用逗号作为分隔符来提取 GPS 数据的各个部分。首先,程

序利用串口中断采集完整的一包 GPS 数据。为确保信息采集的完整性,设置程序通过串口缓存收集 500 字节的信息。接下来,程序会对采集的信息进行处理,依次查找逗号,并对逗号所在位置进行记录,通过逗号的位置顺序采集纬度、经度、时间等数据。最后,验证信息的准确度,保证采集的信息能够用于之后的分析与处理。

2.4 体温监测程序设计

地线作业人员可穿戴设备的体温监测程序流程图见图 4。通过引入滤波算法和延时机制,能够平滑处理和控制温度信息,从而显著提升了读取温度的准确度和稳定性。

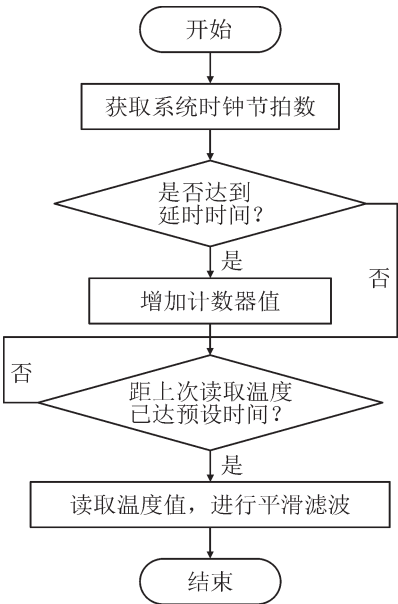


图 4 温度监测程序流程图
Fig. 4 Flow chart of temperature monitoring program

体温监测程序的具体步骤如下:首先,采集系统时钟的节拍数,判断延时计数器是否已经到达设置的时间。当延时计数器没有达到设定时间时,则在计数器内将当前的差值进行叠加,并改变之前采集温度数据的时钟节拍数。如果达到或超过预设的延时时长,程序将执行滤波操作和采集温度操作。在采集温度值时,原始温度数据使用 SMBus 通信协议进行采集,并把这些数据转变为当前的实际值。其次,把采集的温度数据保存在一个大小固定的缓冲区内,并改变目前的索引位置来完成循环存储操作。最后,对温度值缓冲区中全部温度数据进行求和运算,获得经过滤波处理后的温度数据,并把滤波处理后的温度数据赋给特定的变量。

2.5 OLED 显示程序设计

设备配备了尺寸为 1.3 寸的 OLED 显示屏,用

于显示血压和心率及其警报阈值、经纬度信息、发送倒计时、剩余电量以及当前时间。

实现的具体步骤如下:首先,固定显示心率及其警报阈值、剩余电量和当前时间。其次,按照 5 秒的周期轮流显示经纬度、舒张压和收缩压数据。在设备显示过程中,控制 OLED 显示屏,对不同数据进行轮换和显示,以提供最佳的用户体验。

2.6 电量监测程序设计

电量监测程序的具体设计如下:首先,在系统启动经过 50 次计数后,启用 ADC 的规则组通道。接着,对超过 10 次的电压采集数据使用均值滤波算法,以平滑和稳定电压数据。本设备选取满电量输出电压为 7.4V,截止放电电压为 6V 的锂电池,通过 ADC 获取电压并进行以下转换,得到当前的电压百分数为

$$\text{voltage_pcent} = \frac{(\text{voltage} - 60) \times 100}{74 - 60} \%$$

2.7 通讯程序设计

Lora 自组网的通讯程序由中断接收 AT 指令部分和发送部分组成。在监测心率血压过程中,当心率高于预设值时,程序会调用发送函数,把纬度、经度、电量、舒张压、收缩压和心率的缓冲区数据保存到对应变量里,启动 E32_send_data 函数对 LoRa 的运行状态进行设定,并通过串口发送信息。

设备在正常运行期间,为了能够及时获取地线作业人员的健康状态数据以及节省电能,可以向设备发送 AT 指令,见表 2,利用 AT 指令能够对工作参数进行实时变更。具体的设计如下:在判断血压心率阈值阶段后,程序会分析中断获取的信息帧。检查帧头、帧尾是否完整,若信息准确,再进行 AT 指令的识别,包括:心率监测功能的使能/禁止、心率阈值设定、LoRa 发送周期设定。

表 2 AT 指令的功能设置
Table 2 Function setting of AT command

序号	指令	格式	说明
1	心率监测功能使能/禁止	AT+HT_SW= n\r\n	n 取值为 0:心率监测功能禁止 n 取值为 1:心率监测功能使能
2	设置心率阈值	AT+HT_TH= n\r\n	n 取值:0-999
3	设置发送时间间隔	AT+LR_T=n\r\n	n 取值:5-99,单位 S \r\n:为回车换行符

3 实验测试及结果

验证地线作业人员状态感知的可穿戴设备的软件功能,包括地线作业人员的体温、血压和心率监测、GPS定位、人员和设备数据人机交互界面的功能测试、AT指令下发的阈值设置测试、通讯功能测试以及联调实验功能测试。

3.1 AT指令下发阈值设置测试

实验使用上位机向地线作业人员状态感知的可穿戴设备下发AT指令,测试远程设置阈值的功能。首先,对上位机和地线作业人员可穿戴设备程序进行初始化;接着,通过AT指令设置可穿戴设备的报警信息发送时间间隔、心率报警阈值和心率监测功使能/禁止3个功能;最后,对通过AT指令更改相应阈值后的可穿戴设备显示界面进行记录,见图5。实验结果表明,AT指令下发阈值设置功能满足要求。

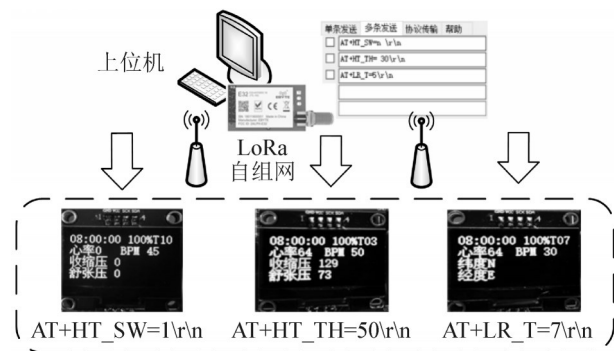


图5 AT指令下发结果展示

Fig. 5 Issue result display of AT command

3.2 通讯功能测试

实验测试地线作业人员可穿戴设备与上位机之间自组网的通讯功能以及上位机接收地线作业人员信息的准确性。见图6,利用LoRa自组网获取可穿戴设备发送的数据,上位机采集设备所发数据并在液晶屏进行显示,便于调度人员查看。

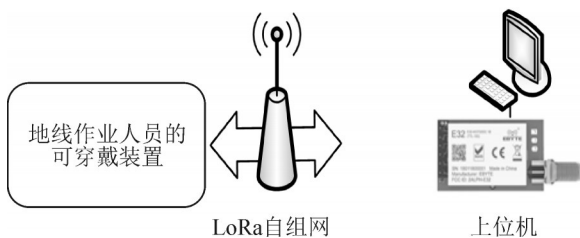


图6 各设备通讯示意图

Fig. 6 Communication schematic diagram of each device

通讯距离的影响要素较多,有障碍物、天线增益和通讯模块性能等。在实验中,测试人员选

择一个固定位置作为放置地线作业人员可穿戴设备的起点,依次增加通讯测试的距离,测试的初始通讯距离为300 m,每次测试距离依次增加100 m。

实验结果表明,在800 m的通讯距离范围内,丢包率为零,在800~1 000 m的通讯距离范围内,丢包率低于5%,当大于1 000 m的通讯距离时,丢包率高于10%。通过电脑串口界面获取通讯测试的数据,测试界面见图7。

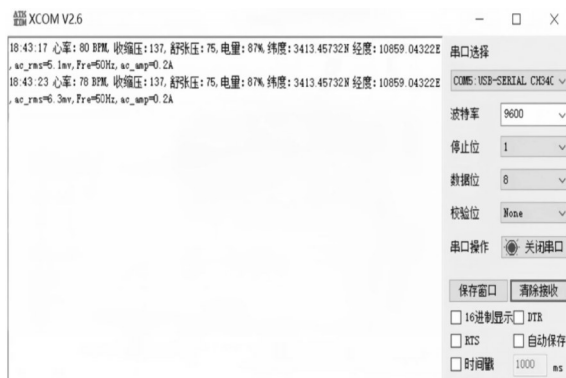


图7 通讯测试界面

Fig. 7 Communication testing interface

3.3 联调实验功能测试

1) 同监测主机的联调测试

监测主机获取来自LoRa自组网模块采集的地线作业人员可穿戴设备发送的数据,经过解析后,把所获取的数据显示在液晶屏上,便于操作人员查看,见图8。

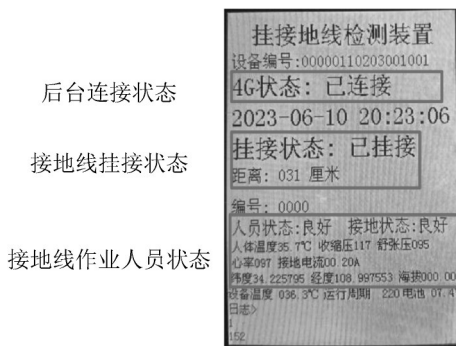


图8 同主机的联调测试

Fig. 8 Joint debugging and testing with the host

2) 同后台管理系统的联调测试

测试设备能否及时上传挂接地线作业现场人员的状态数据到接触网安全运行在线监测后台,后台正确获取设备发送的数据并显示在客户端上。实验界面见图9,通过多次实验测试,设备能够准确发送现场地线作业人员状态数据,后台可以正确解析并显示数据。



图9 同后台管理系统的联调测试
Fig. 9 Joint debugging and testing with the background management system

4 结语

本文研制的地线作业人员状态感知的可穿戴设备可以实时监测地线作业人员的健康状态,并通过 LoRa 自组网将数据上传至上位机。同时,实验验证了可穿戴设备的 AT 指令远程更改阈值功能、各设备的通讯功能以及联调实验功能,并给出测试结果。设备的研制能够实时监测地线作业人员的健康状态并进行定位,通过 LoRa 自组网将地线作业人员的状态数据上传至后台,保障了接触网停电检修作业的顺利、安全进行。

参考文献

[1] 孙东磊,杨思,许易经,等. 电网设备状态检修的时变决策模型[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(6):100-109.
SUN Donglei, YANG Si, XU Yijing, et al. Time-varying decision model for condition-based maintenance of power system equipment[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(6):100-109.

[2] 刘家军,高浩博,韩思丹. 接触网中验电位置对电容型验电器灵敏度的影响研究[J]. 电气工程学报,2021,16(3):177-183.
LIU Jiajun, GAO Haobo, HAN Sidan. Study on the influence of the position of electroscop on the sensitivity of capacitive electroscop in catenary[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(3):177-183.

[3] 孙劼,金益迥,刘光,等. 基于解析法的架空地线感应电流分布特性分析[J]. 广东电力,2021,34(4):123-131.
SUN Jie, JIN Yijiong, LIU Guang, et al. Analysis of induction current distribution on overhead ground wires based on analytic method[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(4):123-131.

[4] 王琳,侯涛,王得鹏,等. 基于4G通信的接触网绝缘子在线监测装置研制[J]. 电网与清洁能源,2023,39(4):31-

36.
WANG Lin, HOU Tao, WANG Depeng, et al. Development of an on-line monitoring device for catenary insulators based on 4G communication[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4):31-36.

[5] 吕鸿伟. 关于京沪铁路接触网专业验电死区问题的探讨[J]. 电气化铁道,2023,34(z2):96-98.
LYU Hongwei. Discussion on the dead zone problem of overhead contact line inspection in the Beijing-Shanghai railway[J]. Electric Railway, 2023, 34(z2):96-98.

[6] 陈青松. 浅谈铁路接触网的特点及其改进与保护[J]. 黑龙江科技信息,2011(15):27.
CHEN Qingsong. A brief discussion on the characteristics, improvement, and protection of railway overhead contact system[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(15):27.

[7] ANGELOV J, VULETI J, A KOVSKI R, et al. An extension in cable modeling for grounding system analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6):5086-5094.

[8] 王浩哲,刘之方,李永亮,等. 基于输电网架空地线感应电流的取能装置设计[J]. 广东电力,2020,33(6):99-106.
WANG Haozhe, LIU Zhifang, LI Yongliang, et al. Design of energy-taking device based on induced current of overhead ground wire in transmission network[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(6):99-106.

[9] JIANG Fan, CHEN Jiajun, GAO Youju, et al. Research on ECG classification based on transfer learning[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2022, 29(6):83-96.

[10] 裴晓芳,范阳,翟介新. 基于GD32的动态电流检测装置[J]. 国外电子测量技术,2021,40(7):170-176.
PEI Xiaofang, FAN Yang, ZHAI Jiexin. Equipment of dynamic current measurement based on GD32[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(7):170-176.

[11] 郑腾飞,吕默影,常建斌,等. 基于可穿戴技术的电力作业安全监护分析[J]. 集成电路应用,2020,37(9):134-135.
ZHENG Tengfei, LYU Moying, CHANG Jianbin, et al. Monitoring based on wearable technology for power operation safety[J]. Applications of IC, 2020, 37(9):134-135.

[12] 王利超,于永军,祁晓笑,等. 格库铁路沿线电网电压不平衡及治理研究[J]. 电器与能效管理技术,2022(11):81-86.
WANG Lichao, YU Yongjun, QI Xiaoxiao, et al. Treatment of power grid voltage imbalance along Geku railway[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(11):

- 81-86.
- [13] 昝孙清,潘浩,普国友,等. 用于实时在线融冰的双导体地线优化设计[J]. 广东电力,2023,36(12):83-88.
MAO Sunqing, PAN Hao, PU Guoyou, et al. Optimization design method of double conductor ground wire for real-time on-line ice melting [J]. Guangdong Electric Power, 2023,36(12): 83-88.
- [14] 张寅楠,王静,孟圆,等. 铁路信号继电器吸合电压与释放电压自动测试方法的研究[J]. 电器与能效管理技术,2022(12): 28-31.
ZHANG Yinnan, WANG Jing, MENG Yuan, et al. Research on automatic measurement method of pick-up voltage and release voltage for railway signal relay[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(12): 28-31.
- [15] 郭雨松,于振,赵炜妹. 基于可穿戴技术的电力作业安全监护平台研究[J]. 电力信息与通信,2015,13(1):72-77.
GUO Yusong, YU Zhen, ZHAO Weimei. Research on wearable technology based power operation safety monitoring platform[J]. Power Information and Communication Technology, 2015,13(1):72-77.
- [16] 张克宇. 关于智能可穿戴技术在电网中的应用研究[J]. 电力系统装备. 2019(22):216-217.
ZHANG Keyu. Research on the application of intelligent wearable technology in power grid[J]. Electric Power System Equipment, 2019(22):216-217.
- [17] ZHANG Qirui, XIE Qingsong, DUAN Kefeng, et al. A digital signal processor (DSP) - based system for embedded continuous-time cuffless blood pressure monitoring using single-channel PPG signal[J]. Science China Information Sciences, 2020,63(4): 149402.
- [18] 李娟,梁永昌,张晋乐. 一种接地线漏拆检测装置[J]. 电气开关,2022,60(1):81-83.
LI Juan, LIANG Yongchang, ZHANG Jinle. A kind of leakage detection device for ground wire[J]. Electric Switcher, 2022,60(1):81-83.
- [19] 李富国,宁凯,徐安俊. 基于FPGA的硬件测试电路设计[J]. 自动化与仪表,2019,34(2):35-37.
LI Fuguo, NING Kai, XU Anjun. Design of hardware circuit testing based on FPGA[J]. Automation & Instrumentation, 2019,34(2):35-37.
- [20] 张正轮. 城市轨道交通运营期施工安全风险控制方法研究[D]. 北京:中国铁道科学研究院,2021.
- [21] 卢文忠. 浅谈电气化铁路接触网的维护与检修[J]. 内蒙古煤炭经济,2010(4):109-110.
LU Wenzhong. Elementary discussion of maintenance and repairing of electric railway contact net[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2010(4):109-110.
- [22] 李想. 接触网可视化接地管理系统在城市轨道交通中的应用探讨[J]. 电气化铁道,2020,31(1):57-59.
- [23] 张天,管清琴. 基于智能可穿戴设备的电力营销数字化服务系统应用与研究[J]. 农村电气化,2022(9):39-42.
ZHANG Tian, GUAN Qingqin. Application research of electric power marketing digital service system based on intelligent wearable equipment[J]. Rural Electrification, 2022(9):39-42.
- [24] 刘家军,刘俊玲,杨瀚鹏. 基于ID3决策树算法接触网检修方案的研究[J]. 电气工程学报,2020,15(2):78-84.
LIU Jiajun, LIU Junling, YANG Hanpeng. Research on overhead contact line maintenance scheme based on ID3 decision tree algorithm[J]. Journal of Electrical Engineering, 2020,15(2):78-84.
- [25] 秦梓轩. 接触网停电检修作业中接地线接地状态检测与地线作业人员可穿戴装置研究[D]. 西安:西安理工大学,2023.
- [26] 江孝琪. 整备作业接触网残压检测系统的研究与实现[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.
- [27] JIANG D, OUYANG H, SHI B, et al. A wearable noncontact free - rotating hybrid nanogenerator for self - powered electronics[J]. Infomat, 2020,2(6):1191-1200.
- [28] VOLOKHOVSKII V Y, VORONTSOV A N, SUKHORUKOV D V, et al. Magnetic nondestructive testing as an effective instrument for monitoring conductors and ground wires of overhead transmission lines[J]. Power Technology and Engineering, 2020,54(2):242-249.
- [29] LEE H, CHUNG H, KO H, et al. Wearable multichannel photoplethysmography framework for heart rate monitoring during intensive exercise[J]. IEEE Sensors Journal, 2018,18(7):2983-2993.

作者简介:

马超(1993—),男,工程师,主要从事地铁供电系统运营维护工作。

袁昌斌(1983—),男,工程师,主要从事地铁刚性接触网供电技术研究。

杨治国(1977—),男,高级工程师,主要从事地铁运维安全管理工作。

刘家(1984—),男,高级工程师,主要从事地铁供电系统施工、运维技术管理工作。

姜瑶(1998—),女,硕士研究生,研究方向为电力系统测量与控制。E-mail:2962305475@qq.com。