

# Research on Online Coating Technology of New Railway Power Supply Line Insulation Layer Robot

Chao Xiao<sup>1</sup> Xiaoxu Li<sup>1</sup> Qiujiang Liu<sup>2</sup> Guotong Duan<sup>3</sup> Jianchao Cao<sup>3</sup>

1. Datong West Power Supply Section of Daqin Railway Co., Ltd., Datong, Shanxi, 037005, China

2. Beijing Jiaotong University, Beijing, 100000, China

3. Beijing Chaozhi Information Control Technology Co., Ltd., Beijing, 100000, China

## Abstract

In order to solve the problem of frequent short-circuit insulation faults of overhead railway power supply lines, a new robot online coating technology of insulation layer of railway power supply lines is developed by studying the ways and methods of insulating reconstruction of existing overhead lines, which can realize the purpose of improving the insulation performance of existing railway power supply contact suspension, additional suspension and power line automatic coating, the coated insulation material has excellent plasticity, self-melting and automatic curing, and has excellent waterproof, ice-resistant, anti-dangerous trees, anti-bird damage, anti-foreign matter and other properties after coating, and can realize the insulation treatment of irregular structure lines, which is a new technology that can improve the insulation performance of naked wires on a large scale, the biggest advantages of this technology are that there is no need to replace the thread, the robot online efficient automatic coating, the insulation life is extended, and the skylight and transportation are less restricted, which can greatly reduce the construction difficulty and production and operation costs.

## Keywords

railway; power supply; insulation; robots; online coating

# 新型铁道供电线路绝缘层机器人在线涂覆技术的研究

肖潮<sup>1</sup> 李晓旭<sup>1</sup> 刘秋降<sup>2</sup> 段国通<sup>3</sup> 曹建超<sup>3</sup>

1. 大秦铁路股份有限公司大同西供电段, 中国·山西大同 037005

2. 北京交通大学, 中国·北京 100000

3. 北京超智控信科技有限公司, 中国·北京 100000

## 摘要

为解决铁道供电架空线路绝缘短路故障频发的问题, 通过对现有架空线路绝缘化改造的方式方法的研究, 研发一种新型铁道供电线路绝缘层机器人在线涂覆技术, 可实现对既有铁道供电接触悬挂、附加悬挂和电力线在线自动涂覆而提高绝缘性能的目的, 其涂覆的绝缘材料具备优异的可塑性、自融性、自动固化性, 涂覆后具有优异的防水、抗冰、防危树、防鸟害、防异物等性能, 并可实现不规则结构线路的绝缘化处理, 是一项能够大规模提高裸线绝缘性能的新技术, 该技术最大的优点是无需更换线索、机器人在线高效自动涂覆、绝缘寿命延长、受天窗及运输制约少等, 可以大幅度降低施工难度和生产运营成本。

## 关键词

铁道; 供电; 绝缘; 机器人; 在线涂覆

## 1 架空线路存在的主要危害

传统铁道供电接触悬挂、附加悬挂和电力线多选用裸导线, 且结构复杂、分布广泛、运行工况恶劣, 线路周边环境复杂, 冰害、鸟害、危树、异物等外部环境影响安全供电的风险较多, 极易因异物搭接、绝缘距离不足等原因发生短路跳闸。

## 2 现状调查

近年来, 针对供电系统架空裸导线进行绝缘化技术有多项研究, 部分已运用到生产实践中。例如, 部分穿越林区的电力线路改为绝缘导线, 有效降低了电力线跳闸次数; 还有绝缘护套、预绞式铠装护线条在部分区段的供电线路上安装后, 提升了上跨线、上跨桥、隧道口附近线索绝缘性能。

但是既有运用的各种绝缘方式在实际运用中存在不同程度的不足之处。例如, 在裸导线外加绝缘护套, 运行中发现, 绝缘护套有开口, 水汽进入线索内产生电腐蚀, 影响了导线的导电性能和抗拉强度性能, 已不再作为长期绝缘防护

【作者简介】肖潮(1985-), 男, 中国山西大同人, 本科, 工程师, 从事电气工程及其自动化研究。

材料,既有方式不同程度存在应用范围有限、成本高、施工难度大、运行寿命有限等不利因素,因此需研究一种既能满足安全性能又能尽可能节约成本、施工便捷的新技术。

### 3 技术方案

裸导线绝缘涂料的主要材料是有机硅、纳米氧化铝、气相硅氧烷等高分子材料。组成成分包括端羟基聚二甲硅氧烷、mq 硅树脂、交联剂、催化剂、气相法白炭黑、氢氧化铝、硅烷偶联剂、硅藻土以及纳米轻质玻璃空心微球。此外,还需要添加一些促进剂、稀释剂等辅料。这些材料具有优异的耐电性能、耐热性和耐候性能,能够有效地缓解裸导线表面间隙放电、击穿、老化等问题,使用效果非常显著。它可以起到绝缘、防腐、耐候、保护裸导线表面、减少电力线路运行风险等作用。使用绝缘涂料处理的导线是不易发生表面间隙放电,即使在恶劣的自然条件下,也能保持长期稳定的电性能和导电性能,有利于提高输电和配电系统的安全可靠性。

#### 3.1 自固化绝缘材料的研究

涂覆绝缘材料需满足铁道供电架空线路绝缘化需求,并能配合智能涂覆机器人可实现对 10kV/27.5kV 架空裸导线绝缘化均匀涂覆,对于 27.5kV 裸导线,涂覆厚度需达到 4.5mm 以上,以满足线缆击穿电压大于 55kV 的要求,确保涂覆后绝缘强度达标,同时自固化涂覆材料还需兼容铁道供电线路特殊定位点处绝缘化等需求。

##### 3.1.1 自固化绕包胶泥性能特点

综合市场调研和铁道供电线路运营实际,选用轻型自固化膏状硅橡胶绝缘涂料,铝塑包装,涂覆材料在遇到空气后无需加热或进行特殊处理,30min 可快速晾干,8h 后形成稳定的绝缘层,24h 完全固化。材质轻盈,不会对架空裸线造成重量负担,保证长期使用,而且涂覆材料固化含量高,几乎没有挥发物质,对人体和环境无影响。材料具备优异的耐热、耐紫外线以及优异的老化性能,与金属表面有良好的附着力,起到了径向防水的作用,可满足户外长期使用的需求。

##### 3.1.2 自固化绕包胶带性能特点

由于机器人尺寸及带电作业要求的限制,线路档距一侧末端约有 1m 左右较难进行机器人自动绝缘涂覆;同时两端的裸露线夹等部件,由于其形状不规则,无法采用机器人直接进行涂覆。

针对上述问题,采用自固化绝缘防水保护包材,其材料与轻型自固化硅橡胶绝缘涂料类似,是专门为 35kV 以下架空裸导线的绝缘和防水保护而设计的可快速施工并能自固化的特殊带状片材。相比于普通的防水胶带或绝缘材料,自固化绝缘防水保护包材具有固化前和固化后两阶段的特性:

①固化前:自固化绝缘防水保护包材材质具备一定的

初始强度、优良的自融合性能和优异的贴附性能,易于施工和安装,且能自适应不同形状的金具、线夹和导线,并具有可靠的防水和绝缘性能。

②固化后:自固化绝缘防水保护包材具有优良的绝缘性能、自融合后的优异防水性能,突出的耐紫外线老化性能,与硅橡胶材料本身的耐高低温性能无差异,同时对金属具有良好的附着力、并具有良好的散热和阻燃性能。

#### 3.2 在线自动涂覆技术的研究

基于智能机器人技术的发展,目前在特定、专业领域,尤其是一些具有危险、高风险的场景,如电力、安防与救援、军用、核工业、矿业、石油化工等领域,已经具备可以替代人工进行高寒、空中、水下等高危环境中作业的重度垂直领域的场景机器人研究成功,并在实践中应用。在电力专业中,目前已有巡检机器人等相对成熟的产品可以借鉴。为实现在线自动涂覆,也需要采取机器人来代替人工。同时考虑到铁路供电线路这一特殊结构,需进一步对机器人在绝缘性能、材料均匀喷涂控制等方面进行改造和升级,以满足在线自动涂覆的需求。

##### 3.2.1 自动涂覆技术方案

挂载机器人到线路上,通过远程可视化遥控操作,由涂覆机器人本体沿导线行走,拖动绝缘涂覆头,将自固化绝缘涂覆料均匀地涂覆在导线四周,在架空裸导线表面包覆一层 2.5~4.5mm 厚的绝缘材料,绝缘涂覆材料在遇到空气后表面迅速固化,形成稳定的绝缘层结构。机器人具有在涂覆过程实时监控系统,在涂覆过程中实时回传视频,前置摄像机对未涂覆区域进行检查,后置摄像机对涂覆效果进行确认;机器人内部有多种传感实时监测设备及后置摄像机对涂覆效果进行确认;机器人内部有多种传感实时监测设备及材料状态,对机器人的续航时间、材料容量进行判断并预估剩余程度,作业完成后可生成多种数据分析报表。

##### 3.2.2 自动涂覆机器人关键技术

①可靠的安全性能:绝缘涂覆机器人采用 ABS 纯绝缘外壳,耐受电压可达到 55kV,完全满足带电作业要求,有效避免了相间放电、对地放电、对人等潜在安全风险。

②良好的稳定性:基于自固化液态硅橡胶绝缘材料及线路机器人新科技,开发创新的“机器人上线自动涂覆绝缘”技术,实现对架空裸线进行快速、可靠的就地绝缘化改造,而且无需更换裸导线,大大降低施工成本,提高线缆的使用寿命,节省人力物力,且易于实施推广。绝缘涂覆机器人因其独特的结构设计,不受磁场干扰影响,可顺利完成涂覆;同时保障绝缘涂覆机器人在作业过程中,不受高空作业时导线晃动以及风力等自然环境因素产生的振动影响,从而确保设备的正常涂覆作业进行。

③便捷的施工操作性:操作人员可通过遥控设备,即可在不停电的情况下快速、高效、方便、可靠地完成架空线绝缘涂覆,大大降低了铁路供电网的天窗作业时间,提高了

供电可靠率。同时,此方案特别适用于人员无法或难于进入的绝缘化改造线路,如大桥、水域或树林上方,有效降低了施工难度和风险,大幅缩短绝缘化改造的工程时间。

④优异的经济效益:绝缘涂覆机器人可在导线通电情况下对 27.5kV 裸导线进行绝缘化涂覆作业,更可以在天窗点内涂覆作业,涂覆速度在 3m/min,按 2h 有效天窗点计算每台设备可涂覆 360m 左右。因设备具有便利的施工性,大幅度降低了对人力、物力的需求,既提高了工作效率,又降低了安全风险,具有十分显著的经济效益。

## 4 应用效果

### 4.1 现场运用情况

针对太原局大秦线、北同蒲线及其相关联络线、专用线等线路周边环境复杂,冰害、鸟害、危树、异物等外部环境影响安全供电的风险较多,极易因异物搭接、绝缘距离不足等原因发生短路跳闸的问题,开展了新型铁道供电线路绝缘层机器人在线涂覆技术的研究,2023年在隧道口、上跨桥、穿越林区等处所进行了现场试验涂覆,绝缘涂覆机器人在斗臂车登高挂线的配合下,稳定挂线后缓缓沿导线移动,在 30min 的时间里,为近百米裸露导线披上“绝缘防护外衣”,智能机器人自动、高效、方便、可靠地完成绝缘层涂覆,并且涂覆过程和质量实时监控,设备状态实时监控,安全高效。整个过程不仅有效降低作业风险,保障作业人员安全,作业后线路绝缘层涂覆完整、绝缘性稳定,有效避免因外力因素导致的跳闸断电,达到了提升供电可靠性,彻底消除该区段外力跳闸的隐患。

### 4.2 工作原理

#### 4.2.1 系统组成及工作原理

在线涂覆机器人系统主要由线上主机、地面遥控器及附件组成。线上主机包含卷扬机构、行走机构、推料机构、涂覆装置以及线径测量装置;地面遥控器采用触摸屏人机界面与开关按键组合操控方式,通过触摸屏输入作业工艺参数进行人机交互,显示机器人姿态、速度、障碍距离、作业产量及剩余胶量等状态数据和工作视频。开关按键主要用于实时控制机器人整套工作流程。附件包括备用电池、模头组件套装、耗材包等。

机器人采用 PLC 为主控器,协调控制卷扬机构、行走机构、推料机构等多台电机协调工作,精确控制住胶流量,从而精准控制涂覆层厚度。倾角传感器感知机器人的俯仰角、横滚角姿态信息,从而自动调整压紧轮的压力,提供与路线坡度和滑差状态相适应的驱动力,确保在不同坡度线路上稳定运行;测距传感器感知障碍物的距离,用于控制减速、停机、上下线等关联动作。

#### 4.2.2 作业流程

设备调试及装入绝缘涂覆材料→无人机/绝缘杆挂牵引绳→挂线装置扣入导线→机器卷扬带固定→遥控一键自主

上线→线上行走至作业位置,开始自动涂覆→作业完成→一键自动下线→挂线装置反方向取下,脱离导线→作业结束涂覆材料自固。

#### 4.2.3 清扫与涂覆装置

裸露的导线往往会覆盖有灰尘、冰霜、鸟类粪便或者塑料布等,会严重影响绝缘涂覆材料的附着,也会影响行进轮与导线的契合,因此在机器的前部设置有清扫机构,清扫机构由上下两根钢丝刷啮住导线,钢丝刷由两个电机驱动,开机后,先启动清扫刷再进行前进和喷涂。为了防止行走轮对已经涂覆的部分碾压破坏,涂覆机构连接在机器的尾部,涂覆的原理有两种选择,一种是挤压式,通过挤压料罐使涂料从喷涂口流出,挤压式驱动的方式较为简单,只需要一个推杆即可,由于挤料推杆与装料料罐在满载时的空间不可叠加性,导致整个涂覆装置横向长度过长,体积过大,不便于安装和运输;另外一种为气动式,采用气泵增大料罐中的压强,实现涂料的喷涂,由于 500kV 四分裂导线涂覆机器人要求一次对四根导线同时涂覆,每个涂覆头有三个涂覆孔,共计 12 个涂覆孔,这样的涂覆要求导致需要的气泵与蓄电池的重量超过 50 公斤,因此论文提出一种气泵、电机、蓄电池与汽油机组合的供压驱动的涂覆装置,通过电机启动汽油机,汽油机通过发电机给蓄电池充电,同时蓄电池为气泵供电,减少了蓄电池的重量,为 12 个涂覆孔提供足够的压强,同时也作为行进轮的动力来源。

#### 4.2.4 控制系统

控制系统主要功能:控制机器人完成涂覆工作。

控制机器人的速度:实时监测机器人主动轮的速度,并与上位机给定理论速度进行 PID 运算,形成对主动轮速度的闭环控制。保护系统的正常工作包括材料不足监测保护、电压电流监测保护、通信控制失灵重启保护、电池电量监测保护。通过无线高清摄像头与图像传输模块,实现地面工作人员实时监控涂覆作业情况。

## 5 结语

随着智能科技与新材料技术的进一步发展,将继续进一步研究多种线路工况下的绝缘涂覆作业,大力提升智能涂覆机器人实用性,继续开展机器人作业,以“能带电不停电”为原则,提高架空线路绝缘改造作业效率,保障线路安全稳定运行。为人们的生产生活提供更加可靠和安全的电力供应。可以预见,智能科技的高速发展将长期、持续地改变人类的生产、生活方式。为电气化铁路运维安全,保驾护航。

### 参考文献

- [1] 刘睿.高压架空输电线路除冰机器人本体结构设计[D].长沙:湖南大学,2010.
- [2] 刘文博.架空裸导线绝缘化喷涂装置研究及应用[D].保定:华北电力大学,2014.
- [3] 刘建伟.高压线防冰除冰机器人的设计[D].桂林:桂林电子科技大学,2014.