

电气线束故障分析与检测技术研究

匡俊鹏

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410200

[摘要]高空作业机械电气线束系统受到机械振动、反复弯曲以及严苛的工作条件影响, 易发生各种问题, 而且不易被发现。基于此, 本文选取高空作业机械电气线束作为研究对象, 对其结构及功能进行介绍, 同时对其常见的几种故障形式及其原因进行了总结, 对于传统的目视检查、利用仪表测量的方法进行了简单介绍, 还对其它一些非破坏性检测手段如红外热成像法、超声波检测法、X 射线检测法以及时域反射法进行分析比较, 最后对智能诊断技术的发展情况进行简要说明, 并从设计上改进、生产工艺提高、运行过程中的检测与维护以及建立完善的在线监测系统四个方面提出了全面预防和检测措施。

[关键词]高空作业机械; 电气线束; 故障分析; 无损检测; 智能化诊断

DOI: 10.64635/ja.2026.1224

中图分类号: TH17

文献标识码: A

Research on Fault Analysis and Detection Technologies for Electrical Wiring Harnesses

Kuang Junpeng

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China

Abstract: The electrical wiring harness system of aerial work machinery is affected by mechanical vibration, repeated bending, and harsh operating conditions, making it prone to various faults that are often difficult to detect. Based on this, this paper takes the electrical wiring harness of aerial work machinery as the research object, introduces its structure and functions, and summarizes several common fault types and their causes. Traditional methods such as visual inspection and instrument-based measurement are briefly introduced. Other nondestructive testing methods, including infrared thermography, ultrasonic testing, X-ray testing, and time-domain reflectometry, are also analyzed and compared. Finally, the development of intelligent diagnostic technology is briefly discussed, and comprehensive prevention and detection measures are proposed from four aspects: design improvement, production process enhancement, inspection and maintenance during operation, and the establishment of a sound online monitoring system.

Keywords: aerial work machinery; electrical wiring harness; fault analysis; nondestructive testing; intelligent diagnosis

引言

高空作业机械工作高度高、环境恶劣, 而电气线束是输电和传输信号的重要媒介, 其工作情况直接影响到整个设备的安全可靠性能。线束随着臂架上下移动、平台转动一直在移动之中, 在长时间使用过程中不断受到弯折、拉扯以及扭转变形的影响。根据相关资料表明, 在高空作业机械中由于线束绝缘层破损或者线芯老化造成的电气问题所占比重大, 约为所有电气问题的 30%以上。再加上潮湿空气、温度变化、紫外线照射等影响, 使得线束出现的问题多种多样并且不易被发现。目前对于线束的检测已经由以往的人工观察发展为现在的自动化的实时监控。无损检测技术和人工智能相结合的应用, 在线束健康状态的

监测方面开辟一条新途径。

1 高空作业机械电气线束系统概述

高空作业机械电气线束系统是导线、连接器、护套以及固定件根据一定布局方式组合而成, 实现动力电源供给、控制信息传递以及传感器信息读取等作用。从整体上看分为臂架随动部分线束、底盘固定部分线束以及操作平台活动部分线束, 而臂架随动部分由于动作繁杂因此受到最大外力影响。相比于普通工业用线束, 高空作业机械线束有以下特点: 运动范围大并且方向变化多样, 需要良好的抗弯折疲劳能力; 处于户外环境中, 需承受温差剧烈变化、雨淋、日晒等情况; 安全性要求较高, 线束出现问题会造成较大危害。电缆是进行电能输送和电信号传输

的重要组成部分,而在长时间使用或者恶劣条件下容易出现故障^[1]。了解其结构特征以及工作环境是进行故障诊断及检测的前提。

2 高空作业机械电气线束常见故障类型与成因分析

2.1 常见故障类型

故障类型根据其电气特性、物理状态以及功能表现进行划分。从电气特性上,有断路、短路和接触不良;从物理状态上,有绝缘层损坏、导体疲劳断裂以及连接器老化等;从功能表现上,有信号失真、间歇性失效以及电磁干扰等。断路是指导体出现断裂现象,在反复弯曲位置易发生此问题。短路是指不同电位导体或者导体对地之间发生意外导通,一般由于绝缘层破坏所致。接触不良常见于连接器插接或者端子压接部位,造成间歇性工作。绝缘老化指材料逐渐退化直至最终击穿放电。信号串扰一般出现在信号线与电源线并行铺设的情况下。

2.2 故障成因分析

故障原因归结为机械应力、环境侵蚀、电气过应力以及设计制造缺陷四个方面,其中机械应力为主要因素。高空作业机械臂架线束不断弯折、扭动,在反复弯折处应力集中部位容易发生疲劳断裂,安装不合理或受到外力牵拉会导致导线断裂。振动造成的微动磨损造成连接器接触电阻逐渐增大。环境侵蚀包括温度、湿度、化学品以及紫外线等。高温促进绝缘老化,低温使材料变脆而易断;湿气和水分降低绝缘电阻并且使金属导线氧化。油污、灰尘加速护套老化,紫外线照射会使高分子材料表面产生粉末状物质并开裂。电气过应力表现为过大电流产生的热量和过高电压导致的击穿。导体发热超过绝缘耐热等级后,绝缘层碳化甚至熔融,高温促使绝缘材料更快老化降解,融化焊点或者绝缘层,雷电感应或开关浪涌可能导致瞬间击穿绝缘介质。设计制造问题有导线截面过细、弯曲半径不当、端子压接不良等。压接工具选择不当、压力不足或者过大、导体插入长度不够都会造成接触电阻大以及连接不可靠。

3 电气线束故障检测技术研究

3.1 传统检测方法

传统的检测方式主要依靠人工作业,主要包括目视检查和仪表测量两种方法。目视检查是利用人的视觉对绝缘破损、护套裂纹、端子锈蚀等问题进行观察,主要集中在臂架铰接弯曲位置、连接器插接处以及穿孔附近。目视检查和尺寸测量可由人工或者机器视觉完成导线绝缘层、端子等是否有破损、变形、锈蚀等情况。此方法简单,但是

不能发现内部问题并且受到经验限制^[2]。仪表测量是用电工工具进行测量。用万用表测量电压、电阻可以判断线束是否连通以及是否有短路情况发生。绝缘电阻测试仪用来测量绝缘程度,耐压测试用来测试绝缘强度。对于间歇性故障,在线束通电情况下逐段晃动可以找到故障大概位置。传统方法成本较低且简单易行,但是用万用表一点点接触的方法费时费力并且很容易出现误判或者漏判的情况。

3.2 现代无损检测技术

无损检测技术是在不对线缆造成损害情况下检查其内部有无问题,在电缆故障检测中常用的无损检测方法包括红外热像仪检测、超声波检测以及X射线检测等方式。红外热像检测是根据异常发热点所发出的红外辐射进行定位故障;红外热像法是使用红外摄像机拍摄由于绝缘故障造成的温度异常区域,无需接触、大面积、快速检测的优点,可用于巡检但是易受到外界干扰。超声波检测是根据声音传播过程中衰减程度来判断是否有故障;超声波法使用超声探头接收由局部放电引发的声音从而找到故障部位,对于绝缘层存在微小裂缝有良好检测效果。穿透力强但是需要较高技术水平。X射线检测是通过穿透来显示线束内部情况。X射线探伤可以发现内部虚焊,计算机断层成像技术比X射线数字成像技术更精确并且抗干扰能力强,但是成本高昂而且有辐射危害。时域反射法是根据电信号反射进行判断故障位置。目前使用较多的电缆故障检测方法有时间域反射法,可以对线束内故障精准定位,精度高适合较长线束。

3.3 智能化诊断技术

伴随着传感技术、物联网以及人工智能的进步,线束故障诊断已经逐步由传统的定期检查发展到现在的实时智能监控,在线监测技术是基于对线束工作时各种信息持续跟踪并进行分析判断来实现对其健康状况以及可能出现问题及时提醒的一种方法。

基于机器学习的故障诊断技术近年来取得了显著进展。在线缆运行状态监测中,通过采集局部放电、温度、电流等多源监测信息作为机器学习模型的输入,可有效实现线缆故障判别与健康状态预测,并已取得良好应用效果。在电缆接头故障分析方面,有研究采用XGBoost模型对实际数据集进行训练与测试,最高诊断准确率可达97.14%,验证了机器学习在电缆故障诊断中的可行性^[3]。此外,因果AI方法也被应用于电缆在线监测,其故障检测准确率达到98%,故障定位准确率达到97.2%,进一步提升了电缆故障智能诊断与定位的精度。

在线监测与预警系统是智能诊断的一种体现方式。通过对在线监测进行质量控制并将其融入到工作中,在此基础上运用物联网技术将检测信息上传至云端,再通过大数据进行处理分析找出故障发生的原因从而达到由“事后维修”到“预测性维护”。对高空作业机械,在重要部位安装小体积的温度传感器、电流传感器以及加速度计等设备,时时获取设备工作情况,一旦监测到的数据超过设定

范围则报警提示工作人员采取相应措施。实时传感器数据分析可以提供资产即将失效的预警信号,有利于进行预测性维护。

3.4 检测技术综合比较与适用性分析

以上各种检测方法均有各自优缺点,在不同场合下针对不同的故障类型、工作条件以及检测目的应具体问题具体分析。如表一所示,对主流几种检测方法进行对比总结。

表 1 线束故障检测技术综合比较

检测技术	检测原理	适用故障类型	优点	局限性
目视检查	人工视觉观察	绝缘破损、端子锈蚀、连接器松动	成本低、操作简便、无需设备	无法发现内部缺陷、依赖经验
万用表/兆欧表	电阻/绝缘电阻测量	断路、短路、绝缘劣化	设备普及、定量测量、成本低	逐点测试效率低、易漏检
红外热像	异常发热点红外辐射检测	接触不良、局部过载	非接触、大面积扫描、可在线	受环境影响、灵敏度有限
超声波检测	声波反射/衰减特性	绝缘裂纹、内部气孔	穿透能力强、对内部缺陷敏感	需耦合剂、技术要求高
X 射线成像	射线穿透成像	内部断线、压接缺陷、虚接	可视化直观、检测精度高	设备昂贵、辐射防护要求高
时域反射法	电信号反射定位	断路、短路、绝缘损伤定位	定位精度高、非开挖操作	需断开线束两端进行测试
机器学习诊断	多维数据模式识别	综合性故障预测与分类	可在线监测、预测性强	需大量训练数据、建模复杂

如表 1 所示,传统的检测手段由于其经济性和便捷性,在一般巡检以及简单故障判断上占有明显的优势;而现代无损检测技术由于其较高的准确率及对内部缺陷的有效识别,在复杂故障的精确定位上占据主导地位;智能化诊断技术是未来的趋势,但是目前还需要大量的训练样本以及改进的算法才能达到理想的水平,在实际应用中建议采用多种方法结合的方式,“以传统方法进行初步筛查、无损检测精确定位、智能化诊断进行实时监控”。

4 故障预防与检测策略

4.1 设计优化建议

从根本上减少线束故障的发生,在设计时就应尽量避免。一方面,应依据高空作业机械的工作轨迹来布置线束铺设的位置,使线束在工作时呈自然弯曲的状态,不能有小于最小允许弯曲半径的强制弯曲。另一方面,线束与其他活动件之间要有足够的距离,至少大于 25mm,以免受到挤压或者被操作杆牵拉。再者,对于活动处的线束要留有足够的余量,在该部件到达最大行程时,线束不受拉伸或压缩力的作用。此外,选择具有良好的抗弯曲疲劳特性的导体以及护套材质,电缆内的各个导体按一定的节距及方向绞合在一起,能起到均衡扭力的作用^[4]。第四,信号线与大电流动力线要拉开一定距离或者采取屏蔽方式,以免由于电磁干扰造成信号线之间发生交叉干扰故障。

4.2 制造与安装质量控制

制造、安装过程中的质量控制是保证线束可靠的重要防线,在生产中要严格遵守端子压接工艺标准,保证压接高度、拉脱力等各项指标达到规定的要求。不同截面导线有不同的规定拉脱力值,要用标定过的压接设备并且要经常做拉力检测。线束装配之后外面要留有足够的空间可以穿过去,插接件要在方便检修的地方并且要使用防水插接件或者用胶塞、胶套等防潮。过线孔处要加装橡胶防护物以免孔眼震动而破坏绝缘皮。蓄电池正极与活动部件之间的距离要在 25mm 以上并且要有绝缘挡板。

4.3 运维检测流程构建

建立规范化的运维检测流程可以有效提高线束寿命,减少故障的发生几率。建议采取“日常巡检一定期检测—专项检测”的三级运维检测方式。日常巡检主要是通过肉眼观察,查看运动段线束外观状态、连接器是否牢固、护套有无磨损等;定期检测一般每三个月或者半年进行一次,在此期间用万用表、兆欧表测量线束通断及绝缘阻值并做好相关数据比较分析工作,对红外热像仪发现温度较高部位再次复核确认;专项检测是当怀疑存在内部问题或者出现不明原因故障时进行,可采用时域反射法、超声波检测或者 X 射线成像技术来准确定位以及判断缺陷位置^[5]。所有检测结果都必须归入设备健康管理中,以便对故障进行

预测以及预防性维修提供依据。

4.4 智能化监测系统展望

智能化监测系统是电气线束故障预防技术的重要发展方向。未来在线束健康管理中,将集成分布式光纤传感、微机电系统传感器及边缘计算节点,实时获取线束工作状态参数;同时依托数字孪生技术,实现线束虚拟模型与实际运行工况的精准映射,并通过机器学习算法开展故障预警与寿命预测,构建“监测—识别—处置”的全闭环管理体系。该技术体系也可为电力电缆数字孪生研发奠定基础,推动设备运维从传统事后维修向预测性、智能化资产管理模式转型。针对高空作业机械,智能监测系统需重点关注臂架铰接处的关键线缆,通过布设温度、应变、局部放电等传感器,将采集数据经无线通信传输至车载诊断单元与云端服务器,为高效运维决策提供支撑。

5 结束语

电气线束是高空作业机械电气系统的重要部分,在很大程度上决定着整个设备的安全性。本文总结了高空作业机械电气线束常见的问题以及产生这些问题的原因,介绍了从传统的检查方法发展到现在非破坏性的检查方法以及智能诊断的方法,并对各种检查方式进行对比分析,最

后根据这四个方面提出全面预防和检查线束问题的方法。

目前,线束故障检测技术正处在由分散式检测转向整体监控的过程。今后重点工作是开展多种信息综合诊断技术研究、小型化轻量化在线监测传感器研发及针对不同高空作业机械工况下电气线束故障预测模型建立,实现电气线束维护由事后修理到事前预防转变。

【参考文献】

- [1]邹涛.机械电气系统设计和常见故障分析的方法[J].造纸装备及材料,2020,49(03):145.
- [2]徐庆祥,蒋进军,刘俊杰.浅析混动车型低压线束 CAN 网络通信丢失一般故障问题[J].汽车电器,2024(05):84-85.
- [3]曹胜伟.分析机械电气系统设计和常见故障分析的方法[J].内燃机与配件,2018(23):134-135.
- [4]吴怀伟.汽车线束端子退针故障分析与改进[J].汽车实用技术,2021,46(17):195-197+206.
- [5]孔志勇,张平,邓久奇,等.VE 系列箱体 Break-out Box 的故障分析[J].物探装备,2020,30(01):47-49+52.

作者简介:匡俊鹏(1995.02—),男,学历:大学本科,毕业院校:湖南科技大学,所学专业:电气工程及其自动化,目前职称:中级。