

Connector failure mode analysis and preventive maintenance strategy optimization in subway operating environment

Boxiong Zhi Jinyao Zeng Jinhan Xu

Avic Optronics Huayi (Shenyang) Electronic Technology Co., LTD., Shenyang 110000, China

Abstract

With the continuous promotion of modern urban construction, the subway has become a key part of China's urban rail transit system by virtue of its efficient, fast and large transportation characteristics. The acceleration of urbanization has led to an increasingly prominent problem of urban traffic congestion. Subway construction provides convenient and punctual travel services for citizens by relieving the pressure of surface traffic, which is crucial to improving the efficiency of urban traffic. The safe and stable operation of urban rail transit system depends on the cooperative work of multiple subsystems, among which connectors, as the core components, assume the important responsibilities of connecting electrical equipment, transmitting electrical energy and signals. This study focuses on the analysis of fault modes of electrical connectors in subway operation and the optimization of preventive maintenance strategies.

Keywords

subway; Connector; Failure mode; Preventive maintenance

地铁运营环境下连接器失效模式分析及预防性维护策略优化

智伯雄 曾进瑶 徐金汉

中航光电华亿(沈阳)电子科技有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110000

摘要

随着现代城市建设的持续推进,地铁凭借其高效、快速、大运量的特点,已成为我国城市轨道交通系统的关键一环。城镇化进程的加速导致城市交通拥堵问题日益突出,地铁建设通过缓解地面交通压力,为市民提供了便捷、准时的出行服务,对提升城市交通效率至关重要。城市轨道交通系统的安全稳定运作依赖于多个子系统的协同工作,其中,连接器作为核心组件,承担着连接电气设备、传输电能与信号等重要职责。本研究聚焦于地铁运行中电接头的故障模式分析以及预防维修策略的优化。

关键词

地铁; 连接器; 失效模式; 预防性维护

1 引言

城市轨道交通系统的顺畅运行离不开各子系统的协同合作,连接器作为核心部件,在电气设备连接、电能与信号传输中发挥着关键作用。从牵引、制动到通信、控制、车站供电、信号等系统,连接器无处不在,其性能直接关系到地铁的安全、可靠与高效运行。一旦连接器发生故障,将引发信号传输中断、设备失效乃至列车停运,严重影响旅客出行与城市运行。因此,深入探究地铁系统中连接器的失效模式,并优化预防维修策略,具有极为重要的现实意义。

2 连接器失效模式分析

2.1 电接触失效

2.1.1 接触电阻增大

在地铁运行过程中,接头因氧化、腐蚀及磨损等因素导致接触电阻上升是一个常见现象。尤其是在湿度较高的环境下,接头金属接触面容易与空气中的氧气发生反应,形成高阻抗的氧化物,从而阻碍电流的顺畅传输,进而使接触电阻增大。例如,在滨海地区的地铁交通系统中,由于大气中盐分含量较高,接头的腐蚀速度加快,氧化膜生成更为迅速,接触电阻增加的问题尤为显著。

此外,地铁运营过程中,接插件的接触面会持续受到摩擦与振动的作用,导致接触面磨损。摩擦系数增大时,触点面积会相应减小,进而增大接触电阻。而接触电阻的上升又会导致接头内部温度升高,加速触点的氧化与磨损,形成一个不断恶化的循环。

【作者简介】智伯雄(1989-),男,中国辽宁沈阳人,硕士,工程师,从事轨道交通连接器研究。

2.1.2 接触力下降

随时间推移,弹性体材料会逐步老化,回弹力减弱,从而导致触点压力不足。而随着温度的升高将会进一步加速弹性体老化,加剧接触力下降问题。此外,在列车经过道岔、弯道时,接头会受到强烈冲击,使弹性体发生塑性变形,影响接头的力学性能。触点压力的下降会降低触点质量,进而影响接头的导电性能,严重时甚至引发停电事故^[1]。

2.2 绝缘失效

2.2.1 绝缘性能减弱

受环境湿度高、污染严重以及绝缘材料老化等多重因素影响,绝缘电阻呈现出下降趋势。在潮湿闷热的地铁隧道环境中,水分容易渗透进接头内部,附着并侵入其表面及内部,导致电阻率缩减,进而使得绝缘电阻值降低。此外,空气中的尘埃、油污等杂质也会沉积在绝缘材料表面,形成导电通道,加剧绝缘电阻的下降。随着使用时间的增长,绝缘材料逐渐老化,分子结构发生变化,绝缘性能逐渐衰退,进一步导致绝缘电阻的降低,在地铁线路中,绝缘电阻的下降可能引发线路短路、漏电等故障,对城市轨道交通的安全运行构成严重威胁。当绝缘电阻降至临界值时,电流可能穿透绝缘层,造成电器设备损坏,严重时甚至引发火灾危害。

2.2.2 绝缘击穿

在城市轨道交通系统中,雷击、电气设备运行异常等因素可能导致过电压现象频发,久而久之,当接头所承受的电压超过其绝缘材料的耐受极限时,将发生绝缘击穿。同时,如果连接件存在尖角、孔洞等设计缺陷,将引发电场强度集中,降低其耐压能力,增加绝缘失效的风险。

地铁线路绝缘击穿是影响地铁运营安全的关键因素之一,可能导致设备损坏、列车停运等后果,严重时甚至危及行车安全。不仅如此,绝缘击穿发生时,巨大电流瞬间穿透绝缘层,产生高温及电弧,对连接件及周边电器造成严重损害^[2]。

2.3 机械连接失效

2.3.1 接头不稳

振动、摇晃以及不当的安装方式均可能导致接头出现不稳现象。地铁列车在高速行驶过程中,会产生持续的振动与冲击,使得接头连接部位反复受力,进而引发接头松动。若连接件在安装时未能按照规定的力矩拧紧,或安装位置存在偏差,也可能导致接头在使用过程中变得不稳。接头的这种不稳定状态会降低连接的稳固性和可靠性,严重时甚至会导致接头脱落,进而引发电器故障。在列车通讯系统中,连接件的不稳可能导致信号传输中断,对行车计划和安全监控造成不利影响。

2.3.2 零件破损

材料的疲劳、应力集中以及过大的外力均可能成为零件破损的诱因。在长期的运行过程中,连接件的力学部件会经历多次受力,一旦应力超过材料的疲劳极限,便可能产生

疲劳裂纹,并随着裂纹的扩展导致零件破损。若连接件存在设计上的缺陷,如尖角、缺口等,将引发应力集中,从而降低零件的强度,增加破损的风险。在列车发生碰撞、脱轨等意外情况时,连接件会承受巨大的外力,进而导致其机械部件破损。这种破损将使连接件完全失去连接功能,对地铁的安全运营构成严重威胁。在列车刹车系统中,若接头的机械部分发生破损,轻则导致刹车失效,重则危及行车和乘客的安全。

3 预防性维护策略的优化升级

3.1 基于状态监测的维护策略

3.1.1 监控技术选择策略

我们选用振动监控技术,通过为连接件装配振动传感器,实时捕获列车运行状态下连接件的振动信号。地铁运行时振动频繁,振动幅值、频率及相位的变化能够直观反映接头的机械连接状态。例如,连接件松动会导致振动信号幅度增大、频率改变。分析这些振动信号,我们可以检测潜在的松动、磨损等问题,从而及时采取紧固或更换措施,预防机械连接故障。

同时,为了有效规避这种现象,可以采用电参数监控技术,实时监测连接器的电压、电流和电阻等关键参数。通过监控触点电阻的变化,能够直接了解连接件电触点的性能,当触点电阻异常增加时,便会出现触点氧化、腐蚀或松动等问题,需立即处理。通过结合多种监控手段,能够及时发现异常现象,实现对接头多维度、全面且精确的监控,为预防性维护工作提供了坚实的数据基础。

3.1.2 数据收集与深度分析

采用压电式振动传感器、热敏电阻温度传感器、霍尔电流传感器等高精度传感器,通过有线或无线方式实时传输振动、温度和电气参数等信息至数据采集系统。在数据采集过程中,确保传感器正确放置且能真实反映连接器工作状态至关重要。为了直观获取振动信息,还应将振动传感器安装在连接器壳体或连接处;为了确保测温精度,传感器需与接插件发热点紧密接触。

在此基础上,可以运用机器学习中的 SVM 算法和人工神经网络等方法对收集到的数据进行深度挖掘,即在故障发生后,利用该模式进行诊断并预测故障发展趋势。例如, SVM 算法能在高维空间中寻找最优分类超平面,有效区分正常与异常数据,从而准确判断接头状态。

3.1.3 维护策略制定

当监控数据显示某一连接件的某项参数达到或超过预设阈值时,系统会发出警报,提示维修人员进行进一步检查。例如,若检测到连接器振动幅度持续增大并超过临界值,维修人员应立即拧紧连接器或检查连接部位磨损情况。根据警报的严重程度和连接件的实际状况,确定维修工作的优先级和时间表。对于可能引发重大故障的警报,立即安排维修人

员处理；对于轻微故障，根据具体情况灵活调整维修计划，适时提前或延迟维修^[3]。

3.2 维护资源的优化配置

3.2.1 人力资源与物资配置优化

维修人员不仅需要扎实的机电知识基础，还需熟练掌握振动监测、温度监测等多种监控手段以及数据分析软件的应用，以便准确判断接头故障并实施有效维修。依据维修任务的复杂程度和工作量，合理调配维修人员资源。面对地铁线路长、站点多的情况，适当增加维修人员数量，确保各站点接插件得到及时维护。同时，加强对维修人员的技能培训，定期组织培训与考核，不断提升其维修能力，以满足维修工作的实际需求。

在物资管理方面，优化零部件库存管理，根据连接件使用频率、故障率及采购周期等因素，科学设定合理的库存量。对于常用接头类型和易损零件，保持适量库存，确保故障发生时能够迅速替换。通过库存管理系统的应用，实时监控备品备件的库存量和出入库情况，实现动态管理。与供应商保持紧密联系，缩短采购周期，降低库存成本。在库存不足时，及时补充，避免因备件短缺导致的维修延误。

3.2.2 维护计划灵活调整策略

在城市轨道交通运营过程中，应结合实际情况灵活调整维修计划。列车故障、线路施工等因素可能导致工作环境变化，增加故障发生概率。面对这种情况，应迅速调整维修计划，加强对相关连接件的监控与维修。在施工期间，针对振动、粉尘等可能对邻近接插件造成的影响，应提前安排维修人员进行检测与保护，确保设备正常运行。

通过连接器运行状态监控与失效预测，弹性调整维修方案。在监控过程中，若发现某连接器性能逐渐下降，虽未失效但存在隐患，也应及时安排检修或更换工作，预防失效发生。相反，若某连接器运行状态持续良好，且监控数据表明其稳定可靠，适当延长维修周期，合理配置维修资源。通过灵活调整维修计划，使维修工作更加贴合地铁运营实际需求，提高了维修工作的针对性和实效性。

3.3 人员培训与技术提升

3.3.1 专业维修技能培育

通过实际操作演示和图解说明，维修人员能够直观了解连接器内部结构，如插头、插座、绝缘材料等部件的功能及其相互作用，从而增强对连接器整体构造的认识。

在维修技能培训课程中，重点教授维修人员如何通过细致观察、精确测量及深入分析，准确判断连接器故障类型

及其成因。例如，面对接触不良问题，维修人员需学会观察接触点外观，测量接触电阻，以判断是否为氧化、腐蚀或松动等因素所致。同时，通过典型故障案例分析，维修人员能够更全面地了解各种故障的表现形式及应对策略，进而提升其故障诊断与解决能力。

3.3.2 创新技术应用教育

在“智能监控技术”专题培训中，特邀业内专家或厂商技术人员，为维修人员详细解读智能监控装置的工作原理、安装步骤、调试方法及操作流程。针对振动监测、温度监测等智能化监控设备，指导维修人员正确安装、设置监控参数，并利用监控软件实时查看与分析监控数据。通过实践操作和实例演示，维修人员能够熟练掌握智能监控技术的使用方法，实现对连接器的实时高效监控。

在数据分析技能培训方面，应根据维修人员的实际需求，选择合适的数据处理软件，如 Python、Excel 等，开展针对性培训。培训内容涵盖数据收集、数据清洗、数据分析及数据可视化等多个环节。例如，教授维修人员如何利用 Python 编写程序处理与分析监控数据，完成统计分析与趋势预测；同时，利用 Excel 软件进行数据可视化处理，以图形化方式直观展示分析结果，帮助维修人员更清晰地了解连接器的工作状态。通过这一系列培训，维修人员的专业知识水平得到显著提升，对维修工作的认识更加深入，维修效率也随之提高。

4 结语

因此，在地铁运行所面对的复杂多变环境中，电连接器的故障已成为影响地铁运行安全性和可靠性的重要因素。基于对其失效原因的深度剖析，我们识别出电接触失效、绝缘失效以及机械连接失效这三种主要形式。这些失效方式的发生，不仅与连接器本身的设计和制造质量密切相关，同时也深受地铁特有的工作环境所影响。本文所取得的研究成果，将为确保地铁的安全可靠运行提供坚实的理论支撑和重要的技术支持。

参考文献

- [1] 郜建涛,王西召,耿彦超,等.腐蚀损伤下复杂构型平台刚性连接器极限强度的时变可靠性分析[J].船舶,2023,34(05):106-112.
- [2] 安维峰.多因素耦合下水下卡箍连接器金属密封机理及结构可靠性分析[D].中国石油大学(北京),2023.
- [3] 郭鸿杰.高温振动应力下电连接器的可靠性试验评估[D].浙江理工大学,2023.