

城市轨道交通接触网磨损机理及检修周期优化研究

汪旭东 罗 明

宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司 浙江 宁波 315000

摘 要：城市轨道交通接触网磨损受多种因素影响，包括轨道线路构造、受电弓碳滑板状态、车辆速度变化、接触线拉出值及线面质量、环境因素及汇流排连接状况等。这些因素导致波浪形、裂缝型及中心偏磨型等磨耗现象，影响弓网关系和受流质量。本研究旨在分析磨损机理，并提出优化检修周期的措施，以确保接触网的安全稳定运行，提升城市轨道交通的运营效率。

关键词：城市轨道交通；接触网磨损机理；检修周期优化

引言：城市轨道交通作为现代城市交通的重要组成部分，其安全性和可靠性至关重要。接触网作为列车供电的关键设施，其磨损问题直接影响列车运行效率和乘客安全。本研究旨在深入探究接触网的磨损机理，分析各种因素对磨损的影响，同时结合实际需求，提出科学合理的检修周期优化策略，以期为城市轨道交通的可持续发展提供技术支持和理论依据。

1 城市轨道交通接触网概述

1.1 接触网的类型与结构

(1) 柔性接触网与刚性接触网的对比。接触网主要分为柔性接触网和刚性接触网两大类。柔性接触网以其良好的弹性和适应性著称，能够承受较大的温度变化和风力影响，适用于露天段、高架段等复杂线路环境。而刚性接触网则以其结构紧凑、稳定性高为特点，特别适用于隧道等封闭线路环境。相比柔性接触网，刚性接触网在维护成本、使用寿命和供电质量等方面具有显著优势。(2) 刚性接触网的构造及工作原理。刚性接触网主要由汇流排、接触线、绝缘子、悬挂装置等部分组成。其中，汇流排是刚性接触网的核心部件，负责承载和传输电流。接触线则紧密贴合在汇流排上，与列车顶部的受电弓形成电气连接，实现电能的传输。绝缘子则用于将导电部件与接地体隔离，确保系统的安全。悬挂装置则负责将刚性接触网固定在隧道顶部或侧壁上，保持其稳定。刚性接触网的工作原理相对简单，当列车行驶时，其顶部的受电弓与接触线紧密接触，从接触网上获取电能。由于刚性接触网结构紧凑、稳定性高，因此能够提供更加稳定、可靠的电能传输。

1.2 接触网在城市轨道交通中的作用

(1) 为列车提供持续电能。接触网是城市轨道交通列车的主要供电来源。通过接触线与受电弓的紧密接触，接触网能够将电能持续、稳定地传输给列车，满足

列车运行所需的牵引力和辅助设备用电需求。(2) 保障列车运行的稳定性与安全性。接触网的稳定性和可靠性对于列车运行至关重要。一旦接触网出现故障或异常，将直接影响列车的运行效率和安全性。因此，接触网的设计、施工和维护都必须严格遵守相关标准和规范，确保其始终处于良好的工作状态。同时，还需要加强对接触网的监测和维护，及时发现并处理潜在的安全隐患，确保列车运行的稳定性和安全性。

2 城市轨道交通接触网磨损机理分析

2.1 接触网磨损的主要形式

(1) 波浪形磨耗。波浪形磨耗是接触线表面呈现出波浪状起伏的磨耗形式。这种磨耗通常是由于受电弓在接触线上滑动时，因接触压力分布不均或受电弓的振动导致的。波浪形磨耗会改变接触线与受电弓之间的接触状态，进而影响取流质量和接触网的寿命。(2) 中心偏磨型磨耗。中心偏磨型磨耗是指接触线在某一特定位置出现明显的磨损，而其他位置磨损较轻的现象。这种磨耗通常是由于受电弓在某一位置长时间停留或频繁经过，导致该位置的接触线磨耗加剧。中心偏磨型磨耗会降低接触线的整体强度，增加断裂的风险。(3) 裂缝型磨耗。裂缝型磨耗是指接触线表面因长期受力或疲劳而出现裂纹的磨耗形式。这种磨耗通常是由于接触线材质不佳、制造工艺缺陷或长期承受过大负荷导致的。裂缝型磨耗会严重影响接触线的导电性能和机械强度，一旦裂缝扩展，可能导致接触线断裂^[1]。

2.2 磨损机理探讨

(1) 轨道线路构造及技术特点的影响。轨道线路的构造及技术特点，如曲线半径、坡度、道岔布置等，都会影响列车的行驶稳定性和受电弓与接触线的接触状态。曲线段和坡度较大的区段，列车行驶时产生的离心力和重力分量会加剧受电弓对接触线的冲击，导致磨损

加剧。(2) 受电弓碳滑板材质与形状的影响。受电弓碳滑板的材质和形状对接触网的磨损具有重要影响。不同材质的碳滑板具有不同的硬度、耐磨性和导电性能。硬度过高或过低都会导致与接触线的接触不良,加剧磨损。此外,碳滑板的形状也会影响其与接触线的接触面积和接触压力分布,进而影响磨损程度。(3) 车辆速度变化及加速区的冲击。列车在行驶过程中,速度的变化和加速区的冲击会对接触网产生较大的冲击力。这种冲击力会导致接触线的瞬时变形和振动,加剧磨损。特别是在加速区,列车的牵引力急剧增大,受电弓对接触线的压力也随之增大,进一步加剧了磨损。(4) 接触线拉出值不标准的问题。接触线的拉出值是指接触线在悬挂点处的偏移量。如果拉出值设置不合理,会导致受电弓在滑动过程中与接触线的接触不均匀,局部磨损加剧。拉出值过大或过小都会影响受电弓与接触线的接触状态,进而影响磨损程度。(5) 接触线表面硬点、扭曲等现象。接触线表面存在的硬点、扭曲等现象会导致与受电弓接触不良,产生额外的摩擦力和磨损。这些现象通常是由于施工工艺不当、材料缺陷或长期受力导致的。硬点和扭曲会改变接触线的几何形状和表面状态,进而影响其与受电弓的接触状态。(6) 环境因素的作用。环境因素如潮湿、渗水等也会对接触网的磨损产生影响。潮湿环境会加速接触线的腐蚀和磨损,渗水则可能导致接触线表面形成水垢,增加摩擦阻力。这些因素都会加剧接触网的磨损程度。(7) 汇流排连接不良导致的磨损。汇流排是接触网的重要组成部分,负责将电流从供电系统传输到接触线上。如果汇流排连接不良或存在缺陷,会导致接触线与汇流排之间的接触不良,产生额外的摩擦力和磨损。此外,连接不良还可能导致电流分布不均,进一步加剧磨损^[2]。

2.3 磨损对弓网关系及运营安全的影响

(1) 降低受电弓取流质量。接触网的磨损会改变接触线与受电弓之间的接触状态,导致取流质量下降。取流质量的降低会直接影响列车的牵引性能和动力输出,严重时可能导致列车无法正常运行。此外,取流质量的下降还会增加接触网的电阻,导致能量损失增加,降低整个系统的能效。(2) 缩短接触线与受电弓的使用寿命。接触网的磨损会加速接触线和受电弓的损坏过程,从而缩短其使用寿命。频繁的更换和维护不仅增加了运营成本,还可能因停机时间延长而影响列车运行的连续性和可靠性。此外,磨损还可能导致接触线和受电弓的性能逐渐下降,进一步影响列车运行的安全性和稳定性^[3]。(3) 可能引发弓网事故。严重的接触网磨损可能引发弓网事

故,如接触线断裂、受电弓脱落等。这些事故不仅会对列车和接触网造成损坏,还可能危及乘客的生命安全。弓网事故往往具有突发性和不可预测性,一旦发生,将给城市轨道交通系统带来巨大的挑战和损失。

3 城市轨道交通接触网检修周期现状及问题分析

3.1 当前检修周期的确定依据与方法

(1) 国内外相关标准与规范。当前,城市轨道交通接触网的检修周期主要依据国内外相关的标准和规范进行设定。这些标准通常基于行业经验、设备特性以及运营安全需求等因素制定,为检修周期的确定提供了基本框架。国内标准如《城市轨道交通供电系统检修规程》等,对接触网的各类检修项目、周期及要求进行了详细规定。同时,国际标准如IEC(国际电工委员会)的相关标准也为检修周期的设定提供了参考。(2) 主观经验与理论计算的结合。在实际操作中,检修周期的确定还往往依赖于技术人员的主观经验和理论计算。技术人员会根据接触网的运行状况、历史故障数据以及设备制造商的建议等因素,结合自身的专业知识和经验,对检修周期进行适当调整。此外,一些理论计算方法,如基于设备寿命分布特性的可靠性分析、基于经济性的成本效益分析等,也被用于辅助确定检修周期。

3.2 现有检修周期存在的问题

(1) 缺乏科学依据与理论支持。尽管当前检修周期的确定依据了一定的标准和规范,但在实际操作中仍显得缺乏足够的科学依据和理论支持。一方面,现有标准可能未能完全覆盖所有类型的接触网设备和运营环境;另一方面,主观经验的判断往往存在不确定性,难以确保检修周期的准确性和合理性。(2) 维修成本过高且效率不高。现有检修周期往往导致维修成本过高且效率不高的问题。一方面,过于频繁的检修会增加人力、物力和时间的投入,从而增加维修成本;另一方面,不恰当的检修周期可能导致一些潜在故障未能及时发现和处理,进而影响运营安全和效率。此外,现有的检修模式可能过于单一和僵化,缺乏灵活性和针对性。(3) 可能存在的安全隐患。不合理的检修周期还可能带来安全隐患。一方面,过长的检修周期可能导致设备故障频发,增加运营风险;另一方面,过于频繁的检修也可能对设备造成不必要的损伤和干扰。因此,需要在确保运营安全的前提下,合理设定检修周期。

4 城市轨道交通接触网检修周期优化研究

4.1 优化检修周期的思路与方法

(1) 基于接触网可靠性指标及失效率函数的分析。优化检修周期首先需深入理解接触网的可靠性特征。通

过分析接触网各关键部件的寿命分布特性,结合历史故障数据,建立失效率函数模型。这一模型能够反映部件随时间推移的故障概率变化,为确定合理检修周期提供科学依据。例如,对于接触线、绝缘子等易损部件,需重点分析其磨损、老化规律,以及环境因素对其寿命的影响。(2)利用延迟时间模型建立维修费用模型。维修费用模型的构建需考虑故障发生至修复的时间延迟及相应成本。延迟时间模型能够量化故障发生后对运营的影响,包括列车停运、乘客延误等损失。通过模拟不同检修周期下的维修成本,包括预防性维修和故障后维修的费用,找出成本最优的检修策略。此模型还需纳入维修资源的可用性和调度灵活性,确保策略的可实施性。

(3)结合多种检测方法优化巡检费用模型。巡检是预防故障的关键环节。结合无人机巡检、在线监测、人工检查等多种手段,可以大幅提高巡检效率和准确性。通过分析不同检测方法的成本效益,优化巡检频次和路线,构建巡检费用模型。该模型应动态调整,以适应接触网状态的实时变化^[4]。

4.2 优化检修周期的具体策略

(1)确定合理的维修周期与巡检周期。基于上述分析,可以确定更为合理的维修周期与巡检周期。这需要根据接触网的可靠性指标、维修费用模型以及巡检费用模型的结果,综合考虑运营需求、成本效益等多方面因素。合理的维修与巡检周期能够确保接触网在保持良好运行状态的同时,降低维修与巡检成本。(2)采用先进的检测技术与手段。为了进一步提高检修效率,应积极采用先进的检测技术与手段。这包括无人机巡检、远程监控、智能分析等,这些技术能够实时、准确地监测接触网的运行状态,及时发现潜在故障,为预防性维修提供有力支持。(3)实施动态监测与实时响应机制。除了定期维修与巡检外,还应建立动态监测与实时响应机制。这意味着通过实时监测接触网的运行状态,一旦发现异常或潜在故障,能够迅速响应并采取措施进行维修。这种机制能够大大降低故障对运营安全的影响,提高系统的稳定性和可靠性。

4.3 优化检修周期的效果评估与案例分析

(1)对比优化前后的检修成本与效率。为了评估优化检修周期的效果,可以对比优化前后的检修成本与效率。这包括人力、物力、时间成本的节约情况,以及维修效率的提高程度。通过数据分析,可以直观地看到优化策略带来的经济效益和社会效益。(2)分析优化检修周期对运营安全的影响。除了成本效益外,还应关注优化检修周期对运营安全的影响。这包括故障率的降低、系统可靠性的提高以及潜在安全事故的减少等方面。通过对比分析,可以验证优化策略在提升运营安全方面的有效性。(3)以实际案例验证优化策略的有效性。需要通过实际案例来验证优化策略的有效性。这包括选取具有代表性的城市轨道交通线路进行试点应用,收集并分析试点期间的数据,评估优化策略在实际运营中的表现。通过案例分析,可以进一步完善和优化检修周期策略,为未来的城市轨道交通接触网检修提供更为科学的依据和指导。

结束语

本文通过对城市轨道交通接触网磨损机理的深入分析,明确了影响磨损的关键因素,并提出了针对性的检修周期优化策略。这些成果不仅为接触网的维护管理提供了科学依据,也为提升城市轨道交通系统的整体运营效率和安全性做出了贡献。未来,我们将继续关注接触网技术的最新进展,不断探索更高效的维护方法,为城市轨道交通的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1]王睿鹏.轨道交通刚性接触网异常磨损研究及治理[J].人民公交,2025,(02):29-30.
- [2]许丁.城市轨道交通刚性接触网异常磨损机理与优化措施分析[J].运输经理世界,2024,(04):45-46.
- [3]李杰.基于运营磨损数据的刚性接触网线岔参数研究[J].电气化铁道,2024,(07):77-78.
- [4]李泽宇.刚性接触网弓网磨损机理及应对策略[J].城市轨道交通研究,2024,(11):107-108.