

城市轨道交通自动扶梯系统可靠性提升方法研究

郭庆

天津市政工程设计研究总院有限公司 天津 300392

摘要：随着我国城市化进程的加速和公共交通网络的不断完善，城市轨道交通已成为大城市居民日常出行的重要方式。作为连接站厅与站台、实现乘客高效集散的关键设备，自动扶梯在地铁、轻轨等轨道交通系统中扮演着不可或缺的角色。然而，自动扶梯故障频发不仅会严重干扰正常运营秩序，降低乘客满意度，更可能引发安全事故，威胁公共安全。因此，提升自动扶梯系统的可靠性已成为保障城市轨道交通安全、高效、稳定运行的核心课题之一。本文首先系统阐述了自动扶梯系统可靠性的内涵及其在城市轨道交通中的重要性，继而深入剖析了当前影响其可靠性的主要因素，包括设备本体设计缺陷、运维管理粗放、环境适应性不足及人为操作不当等。在此基础上，本文提出了一套涵盖“预防-监测-诊断-优化”全生命周期的可靠性提升综合策略，并结合智能运维、状态监测、备件管理及人员培训等具体措施进行了详细论述。研究表明，构建以数据驱动为核心的智能化、精细化运维体系，是未来提升城市轨道交通自动扶梯系统可靠性的根本路径。

关键词：城市轨道交通；自动扶梯；可靠性；智能运维；预防性维护

引言

进入21世纪以来，中国城市轨道交通建设呈现出爆发式增长态势。截至2025年底，全国已有超过50个城市开通了轨道交通线路，运营总里程突破12,000公里，日均客流量高达数千万人次。在如此庞大的客流压力下，车站内的垂直交通设施——尤其是自动扶梯——承担着疏导客流、维持秩序的重任。一部位于换乘枢纽或出入口的自动扶梯一旦发生故障停运，往往会在短时间内造成局部区域的客流拥堵，甚至引发踩踏等恶性事件。自动扶梯作为一种复杂的机电一体化设备，其运行涉及机械传动、电气控制、安全保护等多个子系统。长期处于高负荷、连续运转的状态，加之地下车站潮湿、多尘的特殊环境，使得其故障率居高不下。据行业统计，自动扶梯故障在城市轨道交通所有机电设备故障中占比常年位居前列，是影响乘客服务体验和运营安全的关键短板。因此，深入研究并有效提升自动扶梯系统的可靠性，不仅是保障轨道交通网络韧性与安全的迫切需求，也是践行“人民至上、生命至上”理念、提升城市公共服务质量的重要体现。本研究旨在系统梳理自动扶梯可靠性问题的根源，并探索一套科学、可行、高效的提升路径，为相关运营单位提供理论参考与实践指导。

1 城市轨道交通自动扶梯系统可靠性内涵与影响因素分析

1.1 可靠性的定义与评价指标

在工程领域，可靠性通常指产品或系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。对于城市轨道

交通自动扶梯而言，其可靠性可具体化为：在满足客流高峰时段连续、满载运行的要求下，保持无故障、安全、平稳运行的能力。衡量自动扶梯可靠性的核心指标包括平均故障间隔时间（MTBF）、平均修复时间（MTTR）、可用度（Availability）以及故障率（ λ ）^[1]。其中，MTBF反映设备的固有可靠性，数值越高越好；MTTR则体现运维响应与处置效率，数值越低越好；可用度作为二者的综合体现，是运营方最关心的指标，直接关系到乘客服务的连续性。此外，安全性指标如紧急停止装置的有效性、防逆转保护的响应时间等，虽不直接计入MTBF，但却是可靠性不可分割的组成部分，必须纳入整体评估体系。

1.2 影响可靠性的主要因素

通过对大量故障案例的归因分析，可将影响自动扶梯可靠性的因素归纳为设备本体与设计、运维管理、运行环境以及人为操作与使用四个方面。

1.2.1 设备本体与设计因素

设备本体与设计因素是决定自动扶梯可靠性的先天基础。部分早期或低价中标项目中，扶梯关键部件如主轴、链条、轴承存在材质不达标或热处理工艺不良等问题，导致其疲劳寿命远低于设计预期。同时，为控制成本，一些设备在安全保护回路冗余、驱动功率配置等方面设计余量过小，在极端工况下极易触发保护性停机。此外，人机工程学设计的缺陷也不容忽视，例如梳齿板与梯级间隙过大易卡入异物，扶手带速度与梯级不同步则可能导致乘客失衡，这些都为故障埋下了隐患。

1.2.2 运维管理因素

运维管理因素则是影响可靠性的后天关键变量。目前,许多运营单位仍沿用“定期检修+事后维修”的被动维护模式,缺乏对设备实际健康状态的动态感知,难以有效预防潜在故障。即便制定了维保计划,执行过程中也常流于形式,润滑、紧固、清洁等基础工作未能按标准落实。更严重的是,备件管理混乱现象普遍存在,缺乏科学的库存模型,导致故障发生后因缺件而被迫延长停机时间,显著拉低了设备可用度。

1.2.3 运行环境因素

运行环境因素构成了自动扶梯长期稳定运行的外部挑战。地下车站普遍湿度大、粉尘多,这种恶劣环境会加速电气元件的老化和金属部件的锈蚀,缩短设备寿命。在节假日或大型活动期间,瞬时客流常常远超设计容量,迫使设备长期处于超负荷运行状态,加剧了机械磨损与电气应力^[2]。此外,乘客携带的行李、鞋带、小

物件等异物侵入梯级缝隙,是引发突发性停机的常见诱因,这类外部干扰虽难以完全杜绝,但可通过环境优化与引导措施加以缓解。

1.2.4 人为操作与使用因素

人为操作与使用因素同样不可忽视。乘客在扶梯上的不当行为,如倚靠侧板、逆行、奔跑等,会增加设备异常受力的风险,甚至直接导致安全事故。另一方面,站务人员对紧急停止按钮的误用或滥用,虽然出于安全考虑,但若操作不当,也可能对设备传动系统造成不必要的冲击,反而降低了其长期运行的稳定性。因此,提升乘客文明乘车意识与规范工作人员应急处置流程,同样是提升系统可靠性的重要一环。

2 自动扶梯系统可靠性提升的综合策略

针对上述影响因素,本文提出一个覆盖“预防-监测-诊断-优化”四个阶段的全生命周期可靠性提升综合策略。



图1 自动扶梯可靠性提升综合策略框架

一是预防阶段:通过优化设计选型、改善运行环境、加强乘客引导,从源头上降低故障发生的可能性。二是监测阶段:部署多源传感器网络,实时采集设备运行状态数据。三是诊断阶段:利用数据分析模型,对异常状态进行精准识别与故障定位。四是优化阶段:基于诊断结果,动态调整维护计划,并反馈至设计与管理环节,形成持续改进的闭环。

2.1 预防阶段:筑牢可靠性根基

预防是提升可靠性的第一道防线。在设备选型与验收环节,运营单位应摒弃唯低价中标的做法,转而将可靠性指标如MTBF作为核心评标依据,并明确要求不低于8000小时。同时,引入具备资质的第三方检测机构,对到货设备进行严格的型式试验和出厂检验,确保其各项性能参数完全符合最新的国家安全技术规范(如GB 16899),从源头上杜绝劣质设备入网。车站运行环

境的优化同样至关重要。可在扶梯入口处加装防尘帘与除湿机,有效降低环境湿度与粉尘浓度,减缓设备老化进程。通过设置清晰的客流引导标识和物理隔离栏,可以平抑瞬时客流冲击,避免设备在极端负载下运行^[3]。此外,在扶梯两端铺设防滑垫,并辅以醒目的安全警示广播与视频循环播放,能够显著提升乘客的安全意识,减少因滑倒或失衡引发的次生风险。乘客安全文明乘车教育是一项长期而基础的工作。运营单位应充分利用车站广播、电子显示屏、宣传海报乃至社交媒体等多种渠道,持续普及自动扶梯安全乘用知识。通过倡导紧握扶手、面向前方、不嬉戏打闹等良好习惯,营造安全有序的乘车氛围,从而在无形中降低因人为因素导致的设备异常。

2.2 监测阶段:构建全面感知网络

传统的依靠人工巡检的方式已无法满足高可靠性要

求,必须构建一个基于物联网的智能感知网络。该网络的核心在于对关键状态参数的全面、实时采集。具体而言,应在驱动主机、减速箱、梯级主轮等关键机械部位安装振动与温度传感器,以捕捉轴承磨损、齿轮啮合异常等早期征兆;通过电流互感器与电压传感器监测电机三相电流的平衡度与功率因数,判断是否存在绕组老化或负载异常;利用高精度编码器精确测量梯级与扶手带的实时速度,计算二者同步偏差,及时发现打滑风险;同时,对所有安全开关的状态进行数字化采集与记录,确保任何一次安全回路触发都有据可查。为应对海量数据带来的传输与处理压力,应在扶梯本地部署边缘计算网关。该网关能够在数据源头完成滤波、降噪、特征提取等预处理工作,仅将提炼后的关键信息上传至云端平台。这种“端-边-云”协同的架构,不仅有效降低了通信带宽需求,还大幅提升了系统的实时响应能力,为后续

2.3 诊断阶段:实现精准故障预警

监测是基础,诊断才是价值所在。要实现从“看得见”到“看得懂”的跨越,需要建立多层次、融合式的故障诊断模型。对于逻辑清晰、因果明确的故障模式,例如“梳齿板开关触发伴随梯级速度骤降”,可以构建基于规则的专家系统。该系统通过预设的专家知识库,能够快速、准确地完成初步诊断,适用于处理大量已知的常规故障。然而,对于轴承磨损、链条伸长等复杂的、非线性的渐进式退化过程,仅靠规则系统则力有不逮^[4]。此时,数据驱动的机器学习模型便展现出巨大优势。可以采用支持向量机(SVM)或随机森林(RF)等算法对故障类型进行分类;利用长短期记忆网络(LSTM)强大的时序建模能力,对设备健康状态进行趋势预测;或者借助卷积神经网络(CNN)对振动信号的时频图进行深度特征学习,实现高精度的故障模式识别。通过将规则系统与多种机器学习模型有机融合,构建一个鲁棒性强、泛化能力好的混合智能诊断系统,能够有效覆盖从突发性故障到慢性退化的全谱系异常。

2.4 优化阶段:驱动运维模式变革

诊断的最终目的是指导行动,驱动运维模式的根本性变革。首要任务是全面推行预测性维护(PdM),彻底取代僵化的定期保养模式。系统应根据设备的实际健康状态,动态生成个性化的维护工单。例如,当预测模型判定某部扶梯的驱动链剩余寿命不足500小时时,系

统可自动触发更换任务,并智能地将其安排在夜间非运营时段,从而在保障安全的同时,最大限度地减少对正常运营的干扰。与此同时,必须构建与之匹配的智能备件供应链。利用历史故障数据与预测模型,建立科学的备件需求预测算法。结合ABC分类法,对高价值、长采购周期的关键备件(如变频器、主驱动链)实施精准的安全库存管理,确保“随坏随换”,从根本上解决因等待备件而导致的长时间停机问题,大幅缩短平均修复时间(MTTR)。最后,要建立一个知识反馈的闭环机制。每一次故障的根因分析、处置过程及效果评估都应被系统性地录入知识库。这些沉淀下来的经验数据不仅是宝贵的资产,更能反过来用于优化未来的设备选型标准、更新诊断模型的参数、完善各类应急预案,从而推动整个可靠性管理体系实现螺旋式上升和持续改进。

3 结语

本文聚焦城市轨道交通自动扶梯系统可靠性提升,得出主要结论:自动扶梯可靠性是设计、制造、运维、环境、使用等多因素共同作用的结果,需坚持系统性思维;以物联网等为代表的数字技术,为运维模式变革提供技术支撑,数据驱动是提升可靠性的未来方向;构建全生命周期闭环管理体系,能持续稳定提升设备可靠性。尽管本文方法已初见成效,但未来研究空间广阔。数字孪生技术深度应用值得期待,构建高保真数字孪生体可提升管理前瞻性与科学性;将扶梯健康管理系统与客流预测等系统深度集成,有望实现全局最优的资源调度与应急响应,推动可靠性管理从单点优化走向网络协同;长远而言,新材料与新结构的应用,将从物理层面提升设备固有可靠性,为智慧城轨高质量发展筑牢根基。

参考文献

- [1]王小轮.城市轨道交通领域在用自动扶梯LVC风险评估方法研究[J].中国电梯,2020,31(08):34-38.
- [2]崔扬扬,黄益良,姜明理.轨道交通自动扶梯通行能力探讨[C]//中国消防协会.2022中国消防协会科学技术年会论文集.天津盛达安全科技有限责任公司;应急管理部天津消防研究所,2022:54-58.
- [3]罗情平,房斌,唐连波.城市轨道交通自动扶梯智能安全监控系统应用研究[J].中国设备工程,2021,(01):178-179.
- [4]姬健,荀殿山,沈书林.物联网监控系统在轨道交通车站自动扶梯中的应用[J].中国电梯,2024,35(03):72-74+78.