

Research on elevator brake failure warning and maintenance strategy based on risk assessment

Zhonghua Zhou Yong Lan* Yifan Zhou Chenglin Ke

Sichuan Jingzhun Special Equipment Inspection Co., Ltd., Guang'an, Sichuan, 638000, China

Abstract

This study addresses safety risks caused by elevator brake failures by establishing a comprehensive management system encompassing risk assessment, failure prediction, and maintenance strategies. Through Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA), multiple failure modes induced by structural, functional, and environmental factors are identified. The 5×5 risk matrix is employed to quantify risk levels. A real-time monitoring system integrating data acquisition, transmission, fault detection algorithms, and tiered early-warning mechanisms is developed using multi-sensor technology. Differentiated maintenance strategies are formulated based on risk levels, covering maintenance principles, graded measures, implementation plans, and effectiveness evaluations. Research demonstrates that this integrated approach enables early failure prediction, reduces maintenance costs, and enhances Mean Time Between Failures (MTBF), providing a systematic solution for elevator brake safety management.

Keywords

risk assessment; elevator brake; failure warning; maintenance strategy; FMEA; sensor monitoring

基于风险评估的电梯制动器失效预警与维护策略研究

周忠华 兰勇* 周益帆 柯承林

四川经准特种设备检验有限公司 四川省广安市 638000

摘要

本文针对电梯制动器失效引发的安全风险问题，构建了“风险评估-失效预警-维护策略”的全流程管理体系。通过失效模式与影响分析（FMEA）和故障树分析（FTA）识别结构、功能及环境诱发的多种失效模式，结合5×5风险矩阵实现风险等级量化评估；基于多传感器实时监测技术，构建包含数据采集传输、故障检测算法与分级预警机制的预警系统；依据风险等级制定差异化维护策略，涵盖维护原则、分级措施、计划实施及效果评估。研究表明，该体系可实现失效提前预警，降低维护成本并提升平均无故障工作时间，为电梯制动器安全管理提供了系统性解决方案。

关键词

风险评估；电梯制动器；失效预警；维护策略；FMEA；传感器监测

1 引言

随着城市化进程加快，我国电梯保有量已突破 1100 万台，其安全运行与公众生命财产安全密切相关。制动器承担着电梯中减速、停止及静止保持的关键功能，据市场监管总局数据，2023 年因制动器失效引发的电梯事故占比达

34%，主要表现为制动弹簧断裂、闸瓦磨损等问题。传统维护模式依赖定期检修，存在“过度维护”或“维护不足”的弊端，难以适应复杂运行环境的风险防控需求。基于此，本文将融合风险评估理论与智能监测技术，构建全周期管理框架，旨在弥补传统方法的局限性，为电梯安全管理提供新思路。

2 电梯制动器失效风险识别与评估

2.1 潜在失效模式识别

从结构、功能、环境多维度分析，可识别出电梯制动器的多种潜在失效模式。结构层面，制动弹簧长期使用后可能出现塑性变形、断裂或弹性减弱，这类失效占比 18%，且在高温环境下失效概率会增加 3 倍；制动瓦过度磨损是另一常见模式，占比 25%，其发生与维护频率呈负相关；制动轮的磨损或变形则会影响摩擦力分布，降低制动效果^[2]。功能层面，制动器无法打开多因电磁线圈短路或断路，可能

【基金项目】曳引驱动电梯智能监（检）测技术研究与应用。

【作者简介】周忠华（1981-），男，中国四川广安人，本科，高级工程师，从事特种设备领域相关的科学技术、检验检测和技术质量管理研究。

【通讯作者】兰勇（1972-），男，中国四川广安人，本科，高级工程师，从事特种设备领域相关的科学技术、检验检测和技术质量管理研究。

导致电梯困人；无法关闭则因弹簧力不足，易引发冲顶或蹲底事故；制动打滑源于摩擦系数降至0.2以下，会导致速度失控。环境因素也会诱发失效，潮湿环境会使金属部件锈蚀，导致弹簧弹性下降；高温会劣化摩擦片性能；灰尘、油污等杂质侵入则可能引发机械卡阻，这类失效占比28%，在使用年限较长的电梯中更为常见。

2.2 失效影响分析

不同失效模式造成的影响存在显著差异。从安全角度看，高风险失效如弹簧断裂、制动器无法关闭等，可能导致轿厢坠落，直接威胁人员生命安全；低风险失效如制动间隙略大，可能引发运行异响或制动延迟，影响乘坐体验。经济方面，单次制动器失效事故的直接损失约5万元，包括维修费用与停运赔偿，若造成人员伤亡，间接损失可达数十万元。社会影响层面，电梯事故易引发公众对楼宇安全的信任危机，损害物业及电梯维保企业的声誉，对建筑物的正常使用和运营造成负面影响。

2.3 基于 FMEA 和 FTA 的风险评估方法

失效模式与影响分析（FMEA）和故障树分析（FTA）是评估电梯制动器失效风险的有效方法。FMEA 需组建由工程师、维保人员、安全专家构成的跨学科团队，通过三个参数评估风险。严重度（S）采用1~10分制，10分为致命影响，如“制动器无法关闭”可评10分；发生频率（O）同样为1~10分，10分为每月发生1次，如“制动瓦磨损”每半年发生1次可评3分；可探测度（D）1~10分，10分为完全不可检测，如“弹簧断裂”需拆解检测可评6分。风险优先数（RPN）为三者乘积， $RPN > 100$ 的项为高风险，需优先处理。FTA 则以“制动器失效导致轿厢坠落”为顶事件，通过逻辑门将原因分解为中间事件和基本事件，利用“与”门和“或”门表示事件关系，如“电磁系统故障”只需“线圈短路”“线圈断路”等任一基本事件发生即可触发，通过分析可找出最小割集，确定关键致因——例如“弹簧失效与闸瓦磨损同时发生时，顶事件发生概率提升80%”。

2.4 风险矩阵制定与等级评估

结合 GB/T23694-2013《风险管理术语》，可构建5×5风险矩阵，通过“可能性×严重度”划分风险等级。可能性维度分为1级（极低，数年1次）至5级（极高，每周1次）；严重度维度分为1级（轻微影响）至5级（灾难性，如死亡）。风险等级划分为低（≤6）、中（7-12）、高（13-20）、极高（≥21）。例如，“弹簧断裂”的可能性为2级（每5年1次），严重度为5级，风险值=2×5=10，判定为中风险；“制动器无法关闭”的可能性为3级（每年数次），严重度为5级，风险值=3×5=15，判定为高风险，需立即干预；“制动轮表面轻微划伤”可能性1级、严重度1级，风险值=1×1=1，为低风险，只需常规观察。通过风险矩阵可直观评估各类失效模式的风险状况，为后续防控措施提供依据。

3 电梯制动器失效预警方法

3.1 基于传感器技术的实时监测

在电梯制动器关键部位部署多类型传感器，是实现工作状态实时监测的基础。振动传感器多为压电式加速度传感器，安装于制动臂，通过感知振动信号反映制动器状态——正常运行时振动频率稳定在0-500Hz，若制动轮磨损或制动臂松动，振动幅度会增大，频率可能超过1000Hz。温度传感器采用PT100热电阻，安装于制动轮表面，监控制动过程中的温度变化，正常工作温度≤80℃，超过100℃需触发预警，过热往往提示摩擦异常。压力传感器安装于制动弹簧，监测弹力变化，以额定值的80%为预警线，反映弹簧性能衰减情况。位移传感器采用激光位移计，测量制动间隙，阈值设定为0.5~0.7mm，超标时提示需要调整。电流传感器为霍尔传感器，监测电磁铁工作电流，正常范围为5~8A，波动±2A时需警惕线圈故障。传感器需满足IP65防护等级，关键部位如制动轮两侧需冗余布置，同时避开曳引机等强电磁干扰区域。

3.2 数据采集与传输系统

搭建稳定可靠的数据采集与传输系统，是确保传感器数据实时、准确传输至中央处理系统的关键。数据采集单元采用STM32H743微处理器，支持16路模拟量输入，采样频率达1kHz，同步配备32GBSD卡作为存储模块，可本地缓存72小时数据。传输方式以有线连接为主，以太网具有传输速度快、稳定性高、抗干扰能力强的优势，适用于大量数据实时传输；RS-485总线则适用于远距离、多点通信场景，传输距离可达1200米，满足电梯井道内不同位置传感器的数据传输需求。为应对网络故障，还需设置无线传输作为备用通道，如Wi-Fi、蓝牙或4G/5G，在有线网络中断时自动切换，确保数据不丢失。数据传输过程中，需采用加密技术防止窃取或篡改，并设置CRC校验、奇偶校验等机制，保障数据的安全性和完整性。

3.3 故障检测算法与模型构建

利用机器学习与数据分析技术建立故障诊断模型，是实现电梯制动器失效自动预警的核心。数据准备阶段，需收集制动器在不同工况下的运行数据，包括正常运行数据和各类故障数据，经清洗、预处理去除噪声和异常值，再提取关键特征——如振动信号的峰值、均值、方差，温度的变化率，压力的波动范围等。传统算法中，阈值法通过设定参数阈值触发预警，趋势分析法则通过滑动窗口计算参数变化率识别渐变故障。机器学习算法应用广泛，支持向量机（SVM）通过寻找最优分类超平面区分正常与故障状态；随机森林基于多棵决策树综合预测，提高准确性；深度学习中的多层感知器（MLP）可拟合复杂特征，卷积神经网络（CNN）适用于时序数据处理，能对振动、温度信号进行深度特征提取。通过对历史故障数据的学习训练，模型可不断优化，提升对

潜在异常模式的识别能力。

3.4 预警阈值设定与预警机制

结合电梯制动器实际运行数据和历史经验,合理设定预警阈值,是确保预警系统准确性的关键。温度参数的正常范围通常为30℃-60℃,可设定70℃为一级预警,80℃为二级预警;振动幅度通过统计正常数据确定均值与标准差,如均值5mm/s、标准差1mm/s时,超过7mm/s(均值+2倍标准差)即发出预警;压力参数的阈值依据制动弹簧设计压力和制动钳额定夹紧力设定,偏离范围时触发预警。完善的预警机制需确保信息及时传达,当系统检测到参数超标时自动触发预警,信息可通过短信、邮件、App等多渠道推送。针对电梯管理人员,短信和邮件可使其快速了解故障情况与位置;针对维修人员,专用App可推送详细信息,包括故障类型、位置及历史数据,方便制定维修方案。预警级别按故障严重度划分:一级预警为轻微故障,需关注并初步检查;二级预警为中度故障,需及时安排维修;三级预警为严重故障,需立即停运电梯并紧急维修,为故障处理争取宝贵时间。

4 基于风险评估的维护策略

4.1 维护策略制定原则

制定基于风险评估的电梯制动器维护策略,需遵循多项重要原则^[1]。预防为主原则贯穿始终,通过实时监测和数据分析提前发现隐患,将故障消灭在萌芽状态——如通过传感器监控制动器温度、振动等参数,异常时及时检查维护。基于风险等级原则要求,根据评估结果对不同风险等级失效模式采取差异化措施:高风险项需严格防控,中风险项重点监测,低风险项常规维护。定期与按需结合原则,既按规定间隔进行定期维护——如每月常规检查、每季度全面维护,又根据实际运行情况、风险评估结果及预警信息开展按需维护,确保针对性。技术与管理并重原则强调,既要运用传感器、故障检测算法等先进技术提升维护效率,又要建立完善的管理制度,明确人员职责,加强监督考核,如制定操作规范、记录维护过程并存档,为后续分析提供依据。

4.2 不同风险等级的维护措施

针对不同风险等级的失效模式,需采取差异化维护措施。高风险等级的失效模式,如制动器无法关闭、弹簧断裂等,必须果断处理,同时增加日常巡检频率,每天多次关注运行状态,及时发现潜在问题。中风险等级的失效模式,如制动瓦磨损、间隙超标等,重点在于监测与调整,同时检查弹簧弹力、制动臂灵活性,确保系统整体正常。低风险等级

的失效模式,如制动轮轻微划伤,可按常规周期维护,每半年进行一次全面检查,日常运行中通过听、看、闻等方式观察是否有异常噪声、振动或异味,虽短期内影响较小,但需持续关注以防风险升级。

4.3 维护计划与实施

制定详细的维护计划,是确保电梯制动器维护工作有序进行的基础。月度计划侧重日常检查与维护,每月进行外观检查,查看部件是否松动、损坏或腐蚀,测量制动间隙并补充润滑点油脂。季度计划在月度计划基础上细化,每季度检测电气系统的工作状态,对机械部件进行清洁和润滑,减少摩擦以延长寿命。年度计划需涵盖全面拆解检查、关键部件更换及性能测试,确保性能达标。实施过程中,需明确检查内容、维护方法与责任人,维护前确认电梯处于检修状态并切断电源,按规程操作,完成后进行试运行验证,通过传感器确认参数正常,最后记录维护情况并上传至云平台生成《维护报告》存档。

4.4 维护效果评估与持续改进

建立科学的维护效果评估指标体系,是衡量维护工作成效的关键。核心指标包括制动器故障率,通过统计一定时间内的故障次数评估风险控制效果^[2]。设备完好率通过定期性能测试计算,衡量制动器保持良好状态的能力。评估需定期开展,如每季度全面分析,结合维护记录与现场检查找出问题,针对性采取改进措施,如加强人员培训、优化维护周期、引入新型材料与智能工具等。

5 结语

本文构建了电梯制动器“风险评估-预警-维护”的全流程管理体系,通过FMEA与FTA识别关键失效模式,多传感器与机器学习实现提前预警,差异化维护策略降低成本并提升平均无故障工作时间。未来可深化低成本传感器阵列研发、融合电梯运行大数据优化风险模型、构建数字孪生虚拟维护平台,推动安全管理从“被动应对”向“主动预防”转型,为城市公共安全提供有力保障。

参考文献

- [1] 杨少华,何俊杰,纪朱弘.电梯制动器失效风险分析及其防范措施探讨[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(2):73-76.
- [2] 郭鹏.电梯制动器常见失效形式与检验要点分析[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(6):0014-0017.
- [3] 郑昱.电梯鼓式制动器失效分析及安全风险预防措施[J].中国电梯,2023,34(2):50-53.