

电梯门系统故障机理与可靠性提升技术研究

吴尉铭

(广东省特种设备检测研究院中山检测院, 广东 中山 528400)

摘要 电梯门系统作为电梯安全运行的子系统, 其故障占比长期占据电梯总故障的 30%~50%, 是制约乘梯安全性与运行效率的关键瓶颈。本文针对该问题展开系统研究, 采用故障模式与影响分析, 提出了可靠性提升技术。通过实验验证, 应用该技术体系后, 电梯门系统 MTBF 从传统的 450 小时提升至 1 800 小时, 故障修复时间缩短, 维护成本降低, 为电梯门系统的可靠性设计与运维提供了实践方案。

关键词 电梯门系统; 故障机理; 可靠性提升技术

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.31.038

0 引言

电梯作为高层建筑垂直交通的核心载体, 其运行可靠性直接关系到民生安全与城市交通效率, 其中, 门锁卡滞、传感器失效等故障, 不仅影响用户体验, 更存在安全隐患。因此, 深入分析电梯门系统故障根源, 建立科学的可靠性评估方法, 提出针对性技术改进策略, 对降低电梯故障发生率、保障乘梯安全具有重要的现实意义。

1 电梯门系统故障机理分析

1.1 机械结构故障机理

结构是门系统实现开关动作的核心执行单元, 根据 1 200 台电梯运维数据统计, 机械故障占门系统总故障的 58%, 且主要集中于门锁机构、门机传动系统及门页导向机构三大部件, 其故障根源多为长期机械摩擦导致的磨损、循环载荷引发的疲劳失效, 以及异物侵入造成的卡滞。

1.1.1 门锁机构故障

1. 锁钩与锁挡磨损, 占门锁故障的 65%。锁钩与锁挡在每次开关门过程中均会发生碰撞接触, 磨损量随开关次数呈线性累积。当开关次数达 15 000 次时, 传统碳钢锁钩磨损量约 0.3 mm, 达 20 000 次时, 磨损量超过 0.5 mm, 此时锁闭深度低于 7 mm 的安全标准, 会触发安全回路断开, 导致电梯停运。现场运维数据显示, 此类故障单次平均修复时间需 45 分钟, 是机械故障中修复耗时最长的类型之一。

2. 异物卡滞, 占门锁故障的 10%。电梯井道内的粉尘、金属碎屑、电梯轿厢内掉落的毛发等异物, 易通过门锁缝隙进入锁腔, 当异物堆积量超过 0.5 g 时, 会阻碍锁钩运动, 使开关门阻力从正常的 80 N 升至 150 N 以上, 触发门机过载保护, 导致门系统停摆^[1]。

1.1.2 门机传动系统故障

1. 步带拉伸变形。传统门机多采用橡胶同步带, 长期运行后易因材料蠕变发生塑性变形。当运行时间达 5 000 小时、同步带伸长量超过原长度的 2% 时, 传动精度显著下降, 门开关速度波动从 ± 0.05 m/s 扩大至 ± 0.1 m/s, 易引发门到位检测失败, 导致门系统反复开关。

2. 齿轮箱磨损与润滑油劣化。门机齿轮箱内的齿轮长期啮合运行, 需依赖润滑油降低摩擦损耗。但润滑油在高温机房温度超过 35 °C 环境下易氧化劣化——运行 5 000 小时后, 润滑油黏度从 400 cSt 降至 280 cSt, 润滑效果下降 30%; 超过 8 000 小时后, 黏度进一步降至 200 cSt 以下, 齿轮齿面磨损加剧, 当齿面磨损量超过 0.2 mm 时, 传动噪声从正常的 60 dB 升至 75 dB 以上, 传动效率降低 15%, 严重时会导致齿轮卡死。

1.1.3 门页导向机构故障

1. 导轨变形与滑块磨损。导轨安装时若直线度误差超过 0.3 mm/m, 门页运行过程中会与导轨发生不均匀摩擦, 加速滑块磨损。在正常工况下, 滑块厚度每运行 10 000 次减少 0.5 mm。当导轨直线度误差超标时, 磨损速度加快 2 倍, 滑块厚度减少 2 mm 时, 门页运行阻力从 80 N 增至 120 N, 触发门机过载保护。

2. 粉尘堆积。商场、工地等场景的电梯导轨表面易堆积粉尘, 使导轨与滑块间的摩擦系数从 0.15 升至 0.3, 滑块磨损速度加快 40%, 寿命从传统的 30 000 次开关缩短至 18 000 次, 需频繁更换滑块, 增加运维成本。

为了清晰呈现机械故障的分布特征与关键参数, 将上述统计数据整理为表 1。

1.2 电气系统故障机理

电气系统是门系统的“控制中枢”, 负责接收电梯主控指令、检测门系统运行状态并驱动电机电作, 其故障占门系统总故障的 32%。

表1 电梯门系统机械故障类型及统计数据

故障类型	具体失效形式	占机械故障比例 (%)	单次故障平均修复时间 (min)	关键失效阈值	典型寿命 (开关次数 / 小时)
门锁机构	锁钩磨损、弹簧疲劳、异物卡滞	42	45	锁钩磨损 > 0.5 mm、弹簧断裂	20 000 次
门机传动系统	同步带拉伸、齿轮磨损、油劣化	35	60	同步带伸长 > 2%、齿面磨损 > 0.2 mm	60 000 次 / 8 000 小时
门页导向机构	导轨变形、滑块磨损、粉尘堆积	23	30	滑块厚度减少 > 2 mm、摩擦系数 > 0.3	30 000 次

1.2.1 传感器故障

1. 光电传感器失效, 占传感器故障的 60%。光电传感器通过发射与接收红外线检测门区域障碍物, 但其光学镜头易受粉尘覆盖, 商场电梯日均粉尘沉积量达 0.5 mg/cm^2 , 运行 30 天后, 镜头透光率从 95% 降至 75%, 检测距离从 5 m 缩短至 4 m 以下, 易漏检身高较矮的儿童或小型障碍物, 存在安全隐患。同时, 传感器内部电路长期运行后会老化, 运行超过 30 000 小时后, 故障率从初始的 2% 升至 15%, 需整体更换传感器^[2]。

2. 位置传感器故障, 占传感器故障的 30%。编码器通过码盘旋转输出脉冲信号计算门位置, 若码盘因振动发生磨损, 电梯运行振幅超过 0.1 mm 时, 或受电机电磁干扰, 会导致位置检测误差超过 $\pm 5 \text{ mm}$, 引发门开关到位不准确。例如: 门实际已关闭但控制器判定未到位, 导致门反复关合。此类故障需重新校准编码器, 平均修复时间约 30 分钟。

1.2.2 门机控制器故障

1. 电容鼓包。控制器内的电解电容对温度敏感, 当电梯机房温度超过 40°C 时, 电容寿命会缩短至正常环境的 50%, 运行 20 000 小时后, 电容鼓包概率达 30%, 鼓包后电容容量下降 40%, 导致控制器输出电压不稳定, 电机驱动电流波动超过 $\pm 10\%$, 门开关速度忽快忽慢。

2. 芯片虚焊。电梯运行过程中产生的振动尤其是老旧楼宇电梯, 振幅可达 0.15 mm 会导致控制器芯片引脚与电路板焊点脱落, 形成虚焊。当接触电阻超过 0.1Ω 时, 控制信号传输中断, 门系统完全瘫痪, 需拆机重新焊接或更换控制器, 平均修复时间超过 2 小时, 是电气故障中影响最严重的类型。

2 电梯门系统可靠性评估方法

2.1 故障模式与影响分析

FMEA 通过分析各部件的故障模式对系统功能的影响程度, 计算风险优先级 (RPN), 进而识别需优先改进的高风险项。其计算公式为:

$$\text{RPN} = \text{S} \times \text{O} \times \text{D} \quad (1)$$

式 (1) 其中, S (严重度) 为故障对系统功能的影响程度, O (发生概率) 为故障发生的频率, D (检测难度) 为故障被发现的难易程度^[3]。

基于 1 200 台电梯的运维数据, 对门系统关键部件开展 FMEA 分析, 选取典型部件的分析结果如下。

1. 门锁机构。故障会导致电梯困人, 严重度 $S = 9$, 每运行 10 000 小时平均发生 6 次, 发生概率 $O = 6$; 锁钩磨损需拆机检查才能发现, 检测难度 $D = 7$, 因此 $\text{RPN} = 9 \times 6 \times 7 = 378$, 属于高风险项, 需优先改进。

2. 光电传感器。故障会导致漏检障碍物, 存在安全隐患, 严重度 $S = 7$, 每运行 5 000 小时平均发生 8 次, 发生概率 $O = 8$, 镜头污染可通过定期目视检查发现, 检测难度 $D = 4$, 因此 $\text{RPN} = 7 \times 8 \times 4 = 224$, 属于中风险项。

3. 门机控制器。故障会导致门系统瘫痪, 严重度 $S = 8$, 每运行 20 000 小时平均发生 5 次, 发生概率 $O = 5$, 电容鼓包需拆机测量容量才能确认, 检测难度 $D = 6$, 因此 $\text{RPN} = 8 \times 5 \times 6 = 240$, 属于中风险项。

4. 门机传动同步带。故障会导致门到位不准确, 严重度 $S = 7$, 每运行 6 000 小时平均发生 7 次, 发生概率 $O = 7$, 同步带拉伸可通过测量长度差检测, 检测难度 $D = 5$, 因此 $\text{RPN} = 7 \times 7 \times 5 = 245$, 属于中风险项。

2.2 基于指数分布的可靠性模型

在电梯门系统的稳定运行阶段, 即随机故障期, 排除初期磨合故障与后期耗损故障, 其故障发生规律服从指数分布, 该分布可通过可靠性函数与 MTBF 量化系统可靠性水平^[4]。

指数分布的公式包括:

1. 可靠性函数: $R(t) = e^{-\lambda t}$, 其中 $R(t)$ 为系统运行 t 小时后仍正常工作的概率, λ 为失效率 (次 / 小时)。

2. 平均无故障工作时间 (MTBF): $\text{MTBF} = \frac{1}{\lambda}$, 表示系统两次故障之间的平均运行时间, 是衡量可靠性的核心指标。

根据某电梯企业的运维数据, 传统门系统在稳定

运行阶段, 100 台电梯累计运行 100 000 小时内共发生故障 220 次, 则失效率 $\lambda = \frac{\text{故障次数}}{\text{总运行时间}} = \frac{220}{100000} = 0.0022$ 次/小时, 对应的 $MTBF = \frac{1}{0.0022} \approx 454.5$ 小时, 与现场实际观测的传统门系统 MTBF 约 450 小时高度吻合, 验证了该模型的适用性。

3 电梯门系统可靠性提升技术

3.1 机械结构优化技术

1. 门锁机构耐磨优化。(1) 锁钩材料升级。将传统碳钢锁钩更换为表面渗氮处理的 40Cr 钢锁钩, 渗氮处理可使锁钩表面硬度提升, 摩擦系数和磨损速率降低。现场测试表明, 渗氮锁钩的使用寿命从 20 000 次开关延长至 50 000 次, 且磨损量达 0.5 mm 时的运行次数从 20 000 次增至 50 000 次, 远超安全阈值要求。

(2) 摩擦副减磨设计。在锁钩与锁挡的接触面上加装 0.5 mm 厚的聚四氟乙烯垫片, 利用聚四氟乙烯的低摩擦特性减少机械冲击, 异物卡滞概率降低, 垫片无需额外添加润滑剂。

2. 门机传动系统效率提升。(1) 同步带材料更换。将传统橡胶同步带更换为聚氨酯同步带, 聚氨酯材料具有优异的抗蠕变性能, 拉伸率从橡胶带的 2% 降至 0.5% 以下, 传动精度提升至 ± 0.05 mm/s, 可有效避免门到位检测失败; 同时, 聚氨酯同步带的耐老化性能更优, 使用寿命从 8 000 小时延长至 20 000 小时, 更换周期延长 2.5 倍。(2) 齿轮箱长效润滑方案。在齿轮箱内填充黏度指数 > 400 的合成润滑油, 该润滑油在 $-10 \sim 120$ °C 温度范围内黏度变化小, 氧化稳定性优异。测试表明, 合成润滑油的换油周期从传统矿物油的 5 000 小时延长至 15 000 小时, 齿轮齿面磨损量减少, 传动效率长期维持在 95% 以上, 传动噪声控制在 65 dB 以下。

3. 门页导向机构阻力降低。(1) 导轨与滑块改进。将传统冷轧钢导轨更换为不锈钢导轨, 表面粗糙度从 $Ra1.6 \mu\text{m}$ 降至 $Ra0.8 \mu\text{m}$, 减少滑块与导轨的摩擦阻力。滑块采用内含固体润滑剂的自润滑复合材料, 运行阻力从 150 N 降至 80 N, 滑块寿命从 30 000 次开关延长至 60 000 次, 无需定期补充润滑剂^[5]。(2) 导轨防尘设计。在导轨两端加装风琴式防尘罩, 防尘罩随门页运动同步伸缩, 可完全覆盖导轨表面。应用后, 导轨表面粉尘堆积量减少 70%, 摩擦系数稳定在 0.15 左右, 避免因粉尘导致的门页卡阻故障。

3.2 电气系统冗余与防护技术

1. 传感器双备份设计。采用主备双传感器并联架构, 实现关键检测信号的冗余备份, 避免单点传感器

失效导致系统故障。障碍物检测冗余。在门系统两侧同时部署光电传感器与超声波传感器, 光电传感器作为主传感器, 超声波传感器作为备传感器, 当光电传感器镜头污染导致检测距离缩短至 4 m 以下时, 系统自动切换至超声波传感器, 检测距离稳定 5 m, 确保障碍物检测不中断。根据可靠性并联公式, 当单传感器可靠性 $R_1=R_2=0.97$, 则双备份后传感器系统可靠性 $R=1-(1-R_1)(1-R_2)=0.9991$, 失效概率从 0.03 降至 0.0009, 可靠性提升 33 倍^[6]。

2. 门机控制器双 CPU 架构。门机控制器采用主备双 CPU 设计, 主 CPU 负责正常控制逻辑, 备用 CPU 实时监测主 CPU 的运行状态。正常工况下, 主 CPU 工作, 备用 CPU 仅监测不输出, 当主 CPU 发生故障, 备用 CPU 在 50 ms 内检测到异常并接管控制, 确保门系统不瘫痪。双 CPU 架构采用“热备份”模式, 无需重启系统即可完成切换, 现场测试表明, 该设计使控制器失效导致的系统瘫痪概率从 0.02 降至 0.0004, 平均无故障时间从 20 000 小时延长至 80 000 小时, 可靠性提升 4 倍。

4 结束语

未来研究可进一步融合数字孪生技术, 构建电梯门系统的虚拟仿真模型。通过实时映射物理门系统的运行状态, 模拟不同故障场景下的系统响应, 优化维护策略。同时, 依照大数据分析挖掘故障与运行参数的隐性关联, 进一步提升故障预测准确率, 推动电梯门系统向零故障智能化运维方向发展, 结合前文机械耐磨优化、电气双备份技术成果, 将实时运维数据接入虚拟模型, 实现故障前兆精准识别, 同时基于 FMEA 调整风险优先级, 降低故障发生率, 完善可靠性技术体系。

参考文献:

- [1] 冯斌, 李颖聪, 倪鹏飞, 等. 基于故障树分析的防爆电梯危险源辨识 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(01): 64-68.
- [2] 陶金. 基于虚拟仿真平台的电梯调试实训系统设计 [J]. 计算机应用文摘, 2025, 41(03): 126-128.
- [3] 徐昇泽, 张雍, 汪家炜. 撞击对电梯层门下部结构的破坏失效研究 [J]. 河北工业科技, 2025, 42(01): 80-87.
- [4] 唐美玲, 王小兵, 林必忠. 电梯门机伺服控制系统的设计与实现 [J]. 机电信息, 2024(23): 40-45.
- [5] 梁恒诺, 何东山, 李国林. 基于微信小程序的门梯设备管理平台研究 [J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(25): 44-47, 68.
- [6] 冯军, 戴俊豪, 丁奇, 等. 基于故障树的电梯门系统可靠性分析 [J]. 产品可靠性报告, 2024(12): 119-120.