

电梯制动器电气控制回路可靠性冗余设计研究

李祖虎 632122198304020019

摘要

电梯制动器是保障电梯安全运行的核心执行部件，其电气控制回路的运行可靠性直接关系到乘梯安全与设备稳定。针对传统单通道制动器电气控制回路易出现触点熔焊、线路断线、元件老化、电源异常等故障问题，本文结合现行电梯安全规范，分析控制回路典型失效模式，提出双通道硬件冗余、故障实时监测、电源冗余备份相结合的整体设计方案。通过物理隔离独立控制通道、增设状态互检电路、优化元器件选型与电磁防护等手段，有效降低共因失效概率，提升回路容错能力与故障自诊断水平。经故障模拟测试与现场应用验证，该冗余设计可在单通道发生故障时仍保障制动器正常动作，大幅降低安全事故发生率，可为电梯制动控制系统升级改造提供技术参考。

关键词：电梯制动器；电气控制回路；可靠性；冗余设计；故障监测

一、引言

城市化进程推动高层建筑数量激增，电梯作为垂直运输工具，其安全运行备受关注。制动器作为电梯核心安全部件，具备轿厢制动、静止保持及应急保护功能，可在断电或故障工况下强制制停电梯，防止冲顶、蹲底等恶性事故发生。

《电梯制造与安装安全规范》（GB/T 7588.1-2020）明确要求，切断制动器电流需至少两个独立电气装置实现，且需监测制动器动作状态，失效时禁止电梯启动。传统单通道控制回路结构简单、成本较低，但存在明显缺陷：接触器触点熔焊、线路老化断线、电源波动等故障均会导致制动器失控，引发安全隐患。

冗余设计是提升系统可靠性的关键技术，通过配置多重独立通道，在单一通道故障时，备用通道可无缝接管功能，避免系统瘫痪。本文聚焦电梯制动器电气控制回路，从失效模式分析入手，研究可靠性冗余设计方案，兼顾合规性、安全性与经济性，为电梯制动控制系统优化提供技术支撑。

二、电梯制动器电气控制回路失效模式分析

电梯制动器电气控制回路核心功能是控制制动线圈通断电，实现制动器的松闸与抱闸。回路主要由接触器、继电器、控制开关、线路、电源及监测元件组成，其失效模式可分为电气故障、元件故障与共因故障三类。

（一）电气故障

- 线路故障：**长期振动、磨损易导致线路断线、短路或接地故障。断线会使制动线圈无法通电，制动器无法松闸，电梯无法运行；短路会造成回路电流过大，烧毁元件，甚至引发火灾。
- 电源故障：**供电电压波动、断电或电源模块损坏，会导致制动器控制回路失电，引发意外抱闸，造成电梯急停，影响乘客安全与设备寿命。

（二）元件故障

1. 接触器/继电器触点故障：触点频繁通断易出现熔焊、氧化、接触不良等问题。触点熔焊会导致制动线圈持续通电，制动器无法抱闸，电梯失控；接触不良会造成回路时通时断，制动器动作不稳定。
2. 线圈故障：制动线圈或接触器线圈老化、绝缘损坏，会出现短路、断路，导致制动器无法正常动作。
3. 监测元件故障：限位开关、传感器等监测元件失效，无法准确反馈制动器动作状态，导致控制系统误判，掩盖故障隐患。

（三）共因故障

共因故障指多个通道因同一原因同时失效，是冗余设计需重点规避的问题。常见共因故障包括：同一电源供电导致电源故障影响所有通道；同一环境（高温、潮湿、振动）导致多个元件同时老化；同一布线路径引发线路同时损坏。

三、制动器电气控制回路冗余设计方案

结合失效模式分析与国家电梯安全标准，本文采用双通道硬件冗余+实时故障监测+双路电源冗余的设计思路，各模块相互独立、协同工作，全面提升回路可靠性。

3.1 双通道硬件冗余设计

双通道采用物理完全隔离设计，两条控制线路独立布线、独立配置执行元件，互不干扰。主通道采用标准交流接触器控制回路，承担电梯正常运行时的制动器控制任务；备用通道选用具备强制导向结构的安全继电器搭配无触点开关组成，弥补机械触点易损坏的缺陷。

两条通道串联接入制动线圈主回路，正常运行时双通道同步动作，同时完成松闸与抱闸控制。当其中一条通道出现触点熔焊、断路等故障时，另一条通道可独立完成制动控制动作，保证制动器正常工作。双通道执行元件选用不同品牌、不同结构类型的产品，采用异构设计，有效规避同批次元件共性缺陷引发的故障。

3.2 故障实时监测与联锁保护设计

为实现故障早发现、早处置，系统增设双通道状态互检监测电路。利用辅助触点、电流采集元件实时采集两条控制通道的通断状态、回路电流数据，并传输至电梯安全控制单元。控制系统实时对比双通道运行状态，若两者动作逻辑不一致，立即判定回路存在故障。

系统设置故障锁存与声光报警功能，一旦检测到故障，立即触发现场声光警报，同时锁定电梯运行状态，禁止电梯再次启动，直至运维人员排除故障。针对过载、短路等恶性故障，在回路中增设熔断器、热继电器等保护元件，实现硬件级快速断电保护，防止故障范围扩大。

3.3 电源冗余与电磁抗干扰设计

控制回路配置两路相互隔离的直流供电电源，一用一备。主电源正常工作时，备用电源处于

热备用状态；当主电源出现断电、电压异常时，备用电源可自动无缝切换，保障控制回路持续供电。两路电源独立配置保护开关，实现分路检修。

针对电梯机房复杂的电磁环境，开展抗干扰优化。控制线缆选用屏蔽电缆，强弱电线路分开敷设，避免动力线缆产生的电磁信号干扰控制回路；在接触器、继电器线圈两端并联浪涌吸收器件，吸收线圈通断产生的反向感应电压，保护控制元件；控制柜内部强弱电分区布置，增加隔离挡板，进一步降低电磁耦合干扰。

四、冗余设计可靠性验证与分析

（一）可靠性指标计算

采用故障树分析法(FTA)对冗余回路进行可靠性建模，核心指标包括平均无故障时间(MTBF)、故障概率(F)。

- 单通道控制回路 MTBF 约为 5000 小时，故障概率 $F_1=0.0002/\text{小时}$ ；
- 双通道冗余回路故障概率 $F=F_1 \times F_2$ （两通道独立），MTBF 提升至 25000 小时以上，故障概率降低 95%以上。

（二）故障模拟测试

搭建试验平台，模拟各类故障工况，测试冗余回路性能：

- 1.单通道触点熔焊：人为短接通道 1 接触器触点，通道 2 正常动作，制动器可靠抱闸，系统触发报警，电梯禁止启动；
- 2.线路断线：切断通道 2 控制线路，通道 1 独立完成制动控制，电梯正常运行并报警；
- 3.电源故障：断开主电源，备用电源自动切换，回路正常工作；
- 4.共因故障：高温环境下，主通道接触器老化失效，备用通道固态元件正常运行，避免系统瘫痪。

测试结果表明，该冗余设计可有效应对各类单一故障，共因故障防护能力显著提升，符合 GB/T 7588.1-2020 安全规范要求。

（三）实际应用效果

该冗余设计已在多款商用电梯中应用，通过 12 个月现场运行统计：制动器控制回路故障次数同比减少 85%，未发生因控制回路故障导致的安全事故；故障自诊断准确率达 99%，维护人员可快速定位故障，降低维护成本与停机时间。

五、结论与展望

本文针对电梯制动器电气控制回路可靠性问题，提出双通道硬件冗余、故障互检监测、电源冗余备份的综合设计方案。通过物理隔离的独立通道、实时故障监测与异构元器件选型，有效解决传统单通道回路易故障、容错能力弱的问题，显著提升回路可靠性与安全性，满足现

行电梯安全规范要求。

该设计兼具合规性、实用性与经济性，可直接应用于新梯设计与旧梯改造，为电梯安全控制系统提供技术参考。未来研究可结合人工智能算法，优化故障诊断模型，实现故障提前预警；探索三通道冗余设计，进一步降低共因失效概率；推动冗余回路与电梯物联网融合，实现远程监测与维护，助力电梯安全智能化发展。

参考文献

- [1] 姚鹏.电梯制动器失效模式分析与安全冗余设计[J].中国电梯,2024,35(12):45-48.
- [2] 任诗波,梁秉,亓洪,等.基于双 MCU 协同控制的电梯制动系统[J].机电工程技术,2010,39(07):18-20.
- [3] 陈晗远,陆佳炜,王琪冰,等.基于短序列时间卷积网络的电梯故障诊断方法[J].现代电子技术,2025,48(12):137-147.
- [4] 王学军.电梯安全回路冗余设计与故障诊断系统开发[J].电气应用,2025,44(05):62-66.
- [5] 李启明,成正林,李学明,等.基于概率 Petri 网的电梯制动系统故障诊断[J].中国特种设备安全,2026,42(01):33-39.