

金洋, 刘继媛, 甘志鹏, 等. 高层建筑电梯系统地震应急处置的机械—电气协同策略[J]. 华南地震, 2025, 45(4): 157–161. [JIN Yang, LIU Jiyuan, GAN Zhipeng, et al. Mechanical–Electrical Coordination Strategies for Earthquake Emergency Response in High-Rise Building Elevator Systems[J]. South China journal of seismology, 2025, 45(4): 157–161]

高层建筑电梯系统地震应急处置的机械—电气协同策略

金洋, 刘继媛, 甘志鹏, 杨冬雪, 袁旭

(吉林通用航空职业技术学院 航空机电学院, 吉林 吉林 132000)

摘要: 地震灾害中电梯系统的失效是高层建筑应急响应的关键薄弱环节, 机械与电气子系统各自独立运行的处置模式难以应对复杂地震动荷载下的耦合失效风险。解析电梯机械结构与电气系统的地震失效路径, 揭示报警延迟导致停靠失效、通讯中断加剧人员受困等典型障碍的成因; 提出通过机电状态耦合响应机制实现故障信息的实时交互, 非对称震级响应策略依据不同震级动态调配机电功能权重, 以及建立跨系统安全闭环管理模式, 提升电梯系统在强震下的功能连续性, 为高层建筑电梯抗震设计提供理论与实践参考。

关键词: 高层建筑; 机械系统; 电气系统; 地震; 应急处置

中图分类号: TU857

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2025)04-0157-05

DOI: 10.13512/j.hndz.2025.04.21

Mechanical–Electrical Coordination Strategies for Earthquake Emergency Response in High-Rise Building Elevator Systems

JIN Yang, LIU Jiyuan, GAN Zhipeng, YANG Dongxue, YUAN Xu

(Jilin General Aviation Vocational and Technical College, School of Aviation Electromechanics, Jilin 132000, China)

Abstract: The failure of elevator systems during earthquakes represents a critical vulnerability in the emergency response of high-rise buildings. The conventional operational mode, where mechanical and electrical subsystems function independently, is inadequate for addressing coupled failure risks under complex seismic loads. This study analyzes the seismic failure pathways of both elevator mechanical structures and electrical systems, elucidating the causes of typical malfunctions such as landing failures due to alarm delays and aggravated passenger entrapment caused by communication interruptions. To enhance the functional continuity of elevator systems under strong earthquakes, a framework integrating the following strategies is proposed: a mechanical–electrical state coupling response mechanism for real-time fault information exchange, an asymmetric magnitude response strategy to dynamically allocate functional weights between subsystems according to varying seismic intensities, and a cross-system safety closed-loop management model. The findings offer theoretical and practical insights for the seismic design of elevators in high-rise buildings.

Keywords: High-rise buildings; Mechanical systems; Electrical systems; Earthquakes; Emergency response

收稿日期: 2025-06-15

基金项目: 吉林省2024年度职业教育与成人教育教学改革研究课题(2024ZCZ011)

作者简介: 金洋(1988-), 男, 讲师, 研究方向为智能焊接技术

E-mail: 182118366@qq.com

0 引言

在现代都市化进程中,高层建筑日益成为城市空间的垂直延伸,电梯系统作为其核心交通载体,其安全性与可靠性直接影响城市应急响应效能^[1]。国家统计局数据显示,2024年中国中高层电梯市场规模已达到数百亿元人民币,预计到2029年将突破千亿元,年复合增长率(CAGR)保持在较高水平。2024年,全国电梯、自动扶梯及升降机累计产量为149.2万台(图1)。

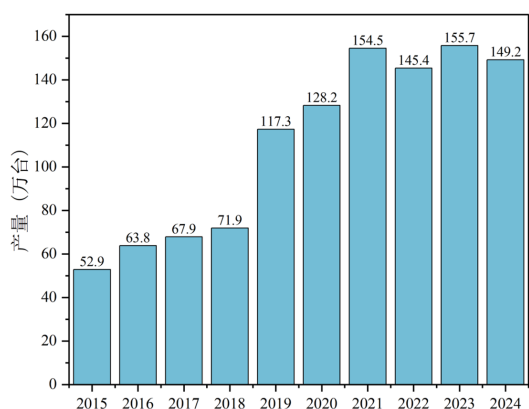


图1 2015—2024年全国电梯、自动扶梯及升降机累计产量^[2]

Fig.1 Cumulative production of elevators, escalators, and lifts nationwide from 2015 to 2024

地震作为突发性极强的自然灾害,剧烈震动不仅直接破坏导轨、缆绳等机械结构,更易引发电气控制系统失效,导致轿厢停运、人员受困乃至次生伤害。目前电梯抗震设计多停留在单一子系统加固层面,机械部门侧重物理结构强度提升,电气部门聚焦传感器灵敏度优化,二者协同机制的缺失使得地震触发时系统响应碎片化^[3]。在应急处置流程中,早期预警信号未能有效穿透机电系统边界,报警延迟使电梯错失最佳避震停靠窗口^[4];传统控制协议下通讯中断切断了轿厢与救援中心的交互通道,受困乘客成为信息孤岛;人工干预与自动制动切换的时序断层更暴露出机电协同调度的深层次矛盾。这些挑战亟需打破专业壁垒构建融合策略。因此,本文立足机电协同视角,探讨高层建筑电梯系统地震应急处置的机械—电气协同策略,以期为高层建筑电梯抗震设计提供理论参考。

1 高层建筑电梯系统的结构与地震的破坏机理

1.1 电梯系统基本结构

高层建筑电梯系统是由机械与电气两大子系统

深度融合构成的垂直运输生命线。其机械主体结构包含井道空间核心组件与轿厢运载单元,井道内固定安装的导轨作为轿厢垂直运动的刚性基准面,通过导轨支架与建筑主体结构锚固^[5];曳引机驱动系统依托电动机输出动力,经减速机构传递至曳引轮,牵引无接头钢丝绳拖动轿厢与对重装置实现平衡升降;轿厢作为乘载舱体,通过悬挂装置与钢丝绳联动,配合导靴沿导轨滑移确保运行平稳性;底坑缓冲器则为极限位置提供冲击耗散保护^[6]。

电气系统则构成感知—决策—执行神经网络,分布于井道的位置传感器实时采集轿厢运行轨迹,速度检测模块监控曳引匹配状态;中央控制单元基于预设逻辑算法处理信号流,动态生成驱动指令与门机动作指令;安全回路串联门锁触点、限速器开关等关键节点,形成故障熔断保护机制;应急照明与通讯装置作为突发事件中维持功能连续性的关键链路。机械骨架与电气神经通过随行电缆束实现能量传输与信号交互,其中机械部件提供物理支撑与动力转化载体,电气单元赋予精准控制与自适应调节能力,二者在空间耦合与功能嵌套中形成闭环运行体系。

1.2 电梯系统在地震中的脆弱点

电梯系统在地震中的脆弱性源于机械结构的物理形变与电气控制的逻辑崩溃之间的相互催化。在机械子系统层面,剧烈水平与竖向震动导致井道空间严重畸变。导轨刚度不足时发生弯曲甚至断裂,使轿厢脱离预设轨迹形成“卡梯”风险;曳引机底座锚固松动引发齿轮错位咬合失效,钢丝绳共振甩动后可能与井道壁碰撞磨损或跳出曳引轮槽;轿厢导靴在三维震动中产生非设计方向的巨大剪力,致使滚轮变形、滑轨撕裂,削弱垂直导向稳定性;缓冲器在持续地震波作用下丧失一次性耗能能力,加剧轿厢对底坑的冲击破坏。

电气子系统易受震动导致的间接物理损伤与信号紊乱侵袭,精密传感器因支架松动位移产生误读或中断,向控制系统传递错误位置信息^[7];控制柜内继电器触点、接线端子等微动元件在震动中接触电阻剧变,触发电流波动乃至短路,造成核心模块宕机;随行电缆的摆动幅度远超设计阈值,其内部线芯疲劳断裂或瞬时拉扯致接头脱落,切断信号通路及电力供给。安全钳的机械触发装置因微弱电信号丢失而无法及时动作,使制动功能滞后^[8];门机系统电气解锁指令与机械门锁物理状态错位,形成“电气显示开启而门扇机械卡死”的矛盾;这种

物理损伤与信号失真的交错作用,最终瓦解电梯系统的空间完整性功能链。

2 高层建筑电梯系统地震应急处置流程与现存问题

2.1 现行应急处置流程

高层建筑电梯系统的地震应急处置遵循“监测预警→紧急制动→状态评估→联动救援→恢复验证”的动态闭环流程。地震初期,建筑结构监测系统实时捕捉P波信号并将烈度数据传输至电梯中央控制器,一旦超出预设阈值,系统即刻触发全线的急停锁定,主控板切断变频器输出,电磁制动器紧急抱闸,轿厢就近平层并保持门扇开启状态;同时,地震开关通过安全回路强制切断动力电源,防止二次晃动导致非受控移动^[9]。在震中阶段,智能监测单元通过加速度传感器动态识别余震风险,持续锁定电梯运行权限直至楼宇振动能量衰减至安全阈值。震后响应阶段启动多系统协同处置,一方面通过视频监控与轿厢紧急通讯装置定位困人位置,消防系统利用机房松闸装置手动释放制动器,配合卷扬机实施非通电状态下的层站级救援;另一方面由专业技术人员利用激光定位仪检测导轨垂直度偏差,采用扭矩扳手校验曳引机基座锚固螺栓预紧力,并通过绝缘电阻测试仪评估随行电缆损伤。在设备恢复阶段,自检由控制系统执行安全回路导通性测试、门锁触点信号校验与限速器机械触发试验;通过载荷模拟装置进行制动试验及超速保护触发测试;最终需联合建筑结构工程师出具井道变形评估报告。

2.2 协同失效与策略缺口

2.2.1 机电时序失配

当前高层电梯地震应急流程中的机电时序失配,集中表现为控制系统指令与机械执行环节的断层式割裂,形成贯穿监测、制动、救援全链路的系统性延迟。前端智能传感单元基于算法预判触发的“急停锁定”指令,难以精准耦合后端的机械制动系统固有动作迟滞。地震初期,当楼宇振动监测模块以毫秒级响应发送停梯指令后,由于电磁制动器的铁芯消磁过程需完成机械能转化,抱闸装置实际生效存在不可忽略的缓冲期^[10];而变频器在切断输出后,曳引轮因惯性持续旋转产生的残余动能,进一步延长轿厢完全静止的耗时。这种毫秒级指令与

秒级执行的鸿沟,导致轿厢在理论平层位置与实际锁停位间产生偏移,部分门锁触点因非计划性位移触发错误啮合,直接阻断紧急开门通道。在震中阶段,余震监测系统虽能快速识别二次振动,但液压缓冲器的能量吸收周期与控制系统恢复供电的时序冲突频发,若先解除制动则轿厢可能因未耗尽的振动能滑移,过度延长制动保持又使困舱通讯装置因备用电源耗尽失效。这种机电时序的链式脱钩是数字控制逻辑与机械运动物理时域未建立动态协同模型所致。

2.2.2 资源竞争冲突

高层建筑电梯系统的地震应急流程中,关键资源的非对称性争夺引发多子系统间的动态博弈式冲突,贯穿监测响应、联动控制及灾后恢复全周期。震前阶段,安全回路自检程序与地震传感模块的并行激活形成算力抢夺。当加速度计需实时解析振动频谱特征时,冗余安全电路的周期性诊断持续消耗控制器带宽,导致预警决策延迟;而备用电源的有限容量被迫在通讯中继、应急照明、制动保持三个高能耗单元间强制分配^[11],若优先保障轿厢对讲系统无线信号传输,则液压缓冲器的预热电磁阀可能因瞬时电压跌落丧失预压力补偿能力。

震中制动环节暴露物理空间的恶性竞争,当轿厢非平层急停需要开启井道救援通道时,门机解锁装置的横向位移空间常与安全钳触发机构的纵向动作轨迹交叠干涉。门刀执行破门入舱动作的扇形展开角度可能挤压井道壁安装的制动电阻箱盖板,迫使安全钳楔块仅作单向而非对称式夹持,降低导轨抱死可靠性。救援响应期的冲突聚焦于人力资源错配^[12],机电工程师执行手动盘车时的力臂位置与消防人员操作消防门三角钥匙的作业平面存在空间重叠,机房狭窄环境下的同步操作易导致救援动作相互掣肘;同时,远程指挥中心的AI排困算法因过度侧重最短路径生成,忽视现场消防栓位置、楼道坍塌点等实时动态障碍,引导救援队陷入二次受阻窘境。

3 高层建筑电梯系统地震应急处置的机械—电气协同策略

3.1 协同框架设计原则

高层电梯地震应急处置的机械—电气协同策略框架设计,遵循动态适应性、功能强耦合、资源可仲裁三大核心原则。动态适应性要求系统实时匹配建筑振动特性与设备物理状态^[13],控制算法需依据

传感器捕捉的震波频谱特征,动态切换制动模式,低频长周期震动启用缓冲型软停靠,高频冲击波则触发抱闸死锁;同时通过机械传动部件的振动反馈,自动修正安全钳触发阈值与制动减速度曲线。

功能强耦合聚焦打破电气控制与机械执行的人为割裂,构建双向闭环控制链,使紧急制动指令的生成逻辑深度融合机械动作时序^[14]。例如电磁制动器释放瞬间同步激活液压缓冲器预压补偿,轿厢完全静止时自动触发门锁位置校准;救援阶段需实现松闸装置机械位移信号与控制柜状态继电器的硬线互锁,消除伪释放风险^[15]。

资源可仲裁建立全局资源调配中枢。在备用电源分配上实施分时动态优先级机制,震初保障传感通讯供电,制动阶段切换至制动保持单元,救援时优先对讲系统;物理空间竞争通过预设冲突消解预案,如门机破门角度自动避让安全钳运动包络线,机房手动操作划分立体作业分区;对关键检测设备启用云端预约系统,确保导轨校准与结构评估交替进行。

3.2 机电状态耦合响应机制

高层电梯地震应急处置的关键在于建立机械状态与电气控制的实时互馈链条,通过精确感知设备物理形变并动态修正控制逻辑,实现安全响应的闭环优化。首先,构建振动—荷载链式感知。电梯井道内安装的高灵敏度应变片实时捕获导轨弯矩变化,同时轿厢底部的压力传感器监测载重分布偏移。当震动导致导轨微量弯曲时,应变数据与轿厢重心偏移量立即融合计算,动态修正电磁制动器的预夹持力阈值^[16]。例如轿厢因振动发生前倾时,控制系统依据实时重心偏移量自动提升前侧制动闸瓦压力,抵消不均匀荷载导致的制动跑偏风险。其次,构建位移—制动双重触发机制。地震传感模块初判震动等级后,控制系统结合激光测距仪实时扫描的轿厢的垂向摆幅量与水平漂移轨迹,分阶段触发制动机制^[17]。当检测到高频微幅振动时,率先激活钢丝绳阻尼器的变刚度液压系统吸收高频能量;监测到低频大幅震荡,则立即切换为渐进式抱闸,并依据摆幅方向选择性投入对侧安全钳,阻断轿厢失控摆动的惯性积累。最后,构建变形—指令协同修正机制,使机械部件的物理形变直接参与控制算法迭代。如钢丝绳弹性伸长导致平层误差时,编码器数据与绳头弹簧压缩量进行交叉校验,自动生成位置补偿指令,在松闸启动前预调平层感应器基准值,使

轿厢再平层精度控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 内。安全钳动作后,其楔块嵌入深度的毫米级差异将通过线性电位器转换成电信号,驱动控制系统重新计算摩擦系数补偿量,为二次制动准备精确参数库。该响应机制通过将钢结构的形变量、传动部件的位移偏差等参数全面转化为可编程控制变量,打通物理空间与数字空间的认知闭环,实现“机械变形即时驱动算法迭代、电气指令精准校正机械动作”的共生式安全防护。

3.3 非对称震级响应策略

高层电梯地震应急处置需突破传统分级响应的局限性,建立针对震动能量空间分布特征与设备局部脆弱性精准适配的非对称策略。首先,识别建筑不同高程震级异质性^[18],基于井道内立体传感器阵列捕获的震动传播特性差异,在建筑低区重点监测近断层地震的高加速度冲击波,通过三轴加速度计识别剪切力突变方向;中高区侧重捕捉长周期共振诱发的低频大位移摆荡,结合风速仪数据过滤风振干扰;超高区则追踪顶部鞭梢效应的多阶谐波叠加态,采用应变片阵列绘制导轨曲率变化热力图。基于此,依据区域风险特征定制制动逻辑^[19]。低区遭遇冲击波时,启用毫秒级相位制动响应。系统依据加速度矢量方向,动态解算轿厢惯性分量,对钢丝绳阻尼器实施象限差异化调压;中高区响应缓慢大幅摆动时,激活蛇形轨迹预测制动,通过前10秒轨迹推导安全包络线,控制安全钳仅钳制摆动方向位移;超高区则启动多频段解耦制动,将共振能谱拆解为基波与谐波分量^[20]。此外,震后恢复应遵循“核心功能优先重建”原则。低区执行抗冲击快速自检,液压缓冲器预留行程余量应对余震冲击波;中高区实施摆荡遗留复位,松刹装置分三步渐进释放;超高区则需完善谐波残留消解补偿,采用电流注入法主动抑制钢丝绳残余振荡,待波动衰减至阈值以下才允许再平层。

3.4 跨系统安全闭环管理

高层建筑电梯的地震应急处置需突破设备独立运行的孤岛状态,构建与建筑结构、应急消防、电力保障系统的动态协同网络。如图2所示,在跨系统安全闭环管理中。当建筑体内的倾角传感器捕捉到楼体扭转变形时,这一空间姿态数据实时同步至电梯控制系统,触发轿厢在井道内的反相位补偿制动。当建筑向东倾斜时,电梯主动增强

西侧导轨的电磁阻尼力,抵消惯性偏移带来的剪切风险。消防系统的破拆作业信号通过磁吸式耦合器直连电梯主控板,当液压剪扩器启动震动,电梯立即激活防坠冗余锁扣,双倍投入制动钳模块形成机械保险。同时,应急柴油机组接入瞬间的电压波动被转化为电能契约参数,优先保障制动器维持电流,动态调节轿厢照明、风扇等次要负载的通断频率,形成电力分配的动态优先级矩阵。震后修复阶段的安全闭环则依赖于物理修复与技术恢复的双重契约认证。建筑工程师对变形导轨的激光矫直作业需通过蓝牙测距仪向控制系统持续反馈精度值,每矫正 0.1 mm 即自动校验轿厢导轨的间隙容差,确保机械修复量精准映射到控制算法的补偿参数中。电梯自检生成的故障树分析报告将自动嵌入建筑 BIM 模型,在三维视图中定位钢丝绳跳槽或缓冲器压溃等隐患点,引导救援人员定向排查。

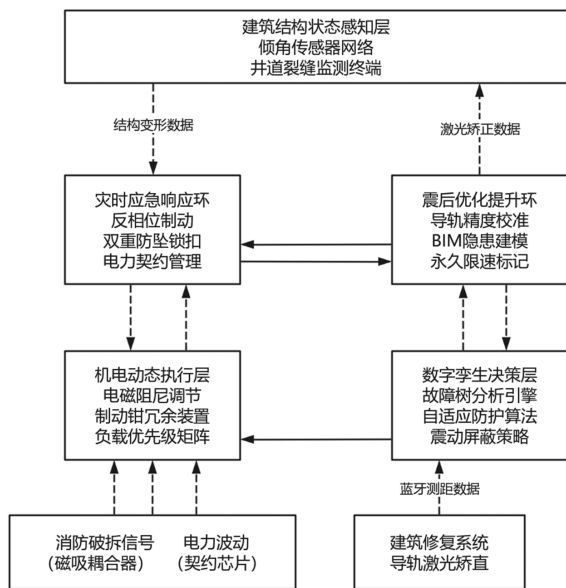


图2 跨系统安全闭环管理

Fig.2 Cross-system security closed-loop management

4 结论

机械系统失效和电气系统失效是高层建筑电梯系统在地震中的脆弱点,现行应急处置流程遵循详细的动态闭环流程,但面临着机电时序失配和资源竞争冲突的协同时效与策略缺口的问题,研究基于动态适应性、功能强耦合、资源可仲裁三个原则,提出机电状态耦合响应机制、非对称震级响应策略与跨系统安全闭环管理的机械—电气协同策略,将被动防护转化为能预测风险、自主优化的生命保障系统,为高层建筑的地震应急

管理提供参考。

参考文献

- [1] 侯少坤,林旭川.基于物理指标的区域地震电梯停运分析研究[C]//中国力学学会产学研工作委员会.第二届中国CAE工程分析技术年会论文集.哈尔滨:中国地震局工程力学研究所地震工程与工程重点实验室,2024.
- [2] 2024年全国电梯采购数据报告蓝皮书[EB/OL].(2025-02-18)[2025-06-25].<https://www.caigou2003.com/>.
- [3] 高福明.电梯地震预警方法及应急处置系统应用[J].防灾减灾工程学报,2024,44(02):505-506.
- [4] 戴君武,庞辉,姜涛,等.近场高烈度区某高层筒体结构组合隔震设计的分析[J].地震工程与工程振动,2023,43(05):90-99.
- [5] 李世龙.兼具应急管理及节能功能的电梯用四象限变频器系统设计[D].武汉:武汉科技大学,2023.
- [6] 王敏.电梯应急管理系统的设计与实现[J].电脑知识与技术,2023,19(03):84-85+88.
- [7] 周宗金.抗震电梯对重装置抗震能力的分析[J].中国新技术新产品,2022(22):134-136.
- [8] 李挺,李科.电梯物联网在地震预警中的应用[J].中国电梯,2021,32(22):22-24.
- [9] 蔡俊清.环氧树脂材料在铁路电力设备中的绝缘应用[J].塑料助剂,2024(03):75-77.
- [10] 钟卫连,李奇.基于电动汽车电气设备的电池管理系统的检修——评《电动汽车动力电池管理系统原理与检修》[J].电池,2023,53(06):715-716.
- [11] 闫旭,宿爱香,陈增江.电梯综合应急管理平台的设计与应用——以泰安市为例[J].中国电梯,2020,31(22):24-25+28.
- [12] 余新文,詹英.浅谈电梯应急救援的现场处置[J].特种设备安全技术,2018(06):42-45.
- [13] 张甜甜,邹皓,王河,等.对地震带区域电梯安全改进的探讨[J].中国电梯,2018,29(16):27-29+40.
- [14] 蓝瑶.河源市电梯突发事件应急管理研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [15] 吕风英.电梯对重—导轨体系的地震响应分析研究[D].大连:大连理工大学,2016.
- [16] 马雯波,杨生泉,刘荟琼.电梯对重导轨支架在不同标准地震烈度下的应力研究[J].起重运输机械,2015(11):81-84.
- [17] 汪建,赵来军,顾彩云.地震应急避难需求的系统动力学研究[J].中国安全科学学报,2013,23(01):121-128.
- [18] 吴春鸿.高层建筑电梯若干问题探讨[J].民营科技,2011(07):169.
- [19] 胡俊.高层建筑电梯系统水平地震响应分析[D].上海:同济大学,2007.
- [20] 房建斌,李观松,孙锁柱,等.电梯移动应急管理系统设计与实现[J].信息技术与信息化,2021(09):46-48.