

冗余驱动与蓄能制动的电梯应急装置协同设计

陈俊林, 李政熠, 彭波

湖南省特种设备检验检测研究院, 湖南 张家界

收稿日期: 2026年3月13日; 录用日期: 2026年4月27日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

电梯安全是当今人们普遍关心的问题。电梯应急辅助装置的发展经历了从依赖机械保护装置到冗余驱动与蓄能制动协同的主动安全技术转变。近年来, 随着科技的快速发展, 基于冗余驱动与蓄能制动的高速曳引电梯应急辅助装置展现出巨大优势, 显著提升了高速条件下电梯的平稳制动。为确保装置在极端工况下的可靠性, 文章引入热-力-动态多物理场耦合仿真分析, 并建立包含台架试验、故障注入测试与加速寿命试验的评估体系, 结合失效模式与效应分析FMEA与可靠性指标形成完整的可靠性论证框架。当前该技术的推广仍面临实际验证不足、长期数据缺乏等挑战, 未来需进一步优化现场部署和监测, 建立标准测试规范, 推动该技术在高速电梯安全领域的工程应用。

关键词

冗余驱动, 蓄能制动, 可靠性评估, 台架试验, 故障切换

Co-Design of Elevator Emergency Device with Redundant Drive and Energy-Storage Braking

Junlin Chen, Zhengyi Li, Bo Peng

Hunan Special Equipment Inspection and Testing Institute, Zhangjiajie Hunan

Received: March 13, 2026; accepted: April 27, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

Elevator safety remains a matter of widespread public concern today. The evolution of emergency auxiliary devices for lifts has transitioned from reliance on mechanical protective mechanisms to active safety technologies integrating redundant drives with energy-storage braking systems. In recent years, rapid technological advancements have demonstrated the significant advantages of high-speed

traction lift emergency auxiliary devices based on redundant drives and energy-storage braking, markedly enhancing stable braking performance under high-speed conditions. To ensure the reliability of these systems under extreme operating conditions, this paper introduces thermo-mechanical-dynamic multiphysics coupled simulation analysis. An evaluation framework incorporating bench testing, fault injection testing, and accelerated life testing is established. This is combined with Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) and reliability metrics to form a comprehensive reliability assessment framework. Currently, the adoption of this technology faces challenges, including insufficient practical validation and a lack of long-term data. Future efforts should focus on optimizing field deployment and monitoring, establishing standardized testing protocols, and advancing its engineering application within high-speed lift safety systems.

Keywords

Redundant Drive, Energy-Storage Braking, Reliability Assessment, Bench Test, Fault Switching

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市化进程的加速以及对高层建筑需求的不断增加，高速电梯作为提升建筑垂直交通效率的关键设备，其需求量将持续攀升。根据行业报告，运行速度超过 4 m/s 的高速电梯应用占比逐年提升，部分超高层建筑电梯速度已达 10 m/s 以上[1]。电梯制动系统的失效，将极易导致轿厢冲顶、轿厢下坠甚至结构损毁。由国家市场监督管理总局发布的《市场监管总局关于 2024 年全国特种设备安全状况的通告》[2] 表明，2024 年我国发生电梯事故 41 起，死亡 27 人，占事故总起数的 31.06%，仅次于场车发生次数。

目前，电梯所用的机械保护装置仍是由限速器、制动器和安全钳等构成[3]，这类装置在高速冲击工况下存在制动冲击大、响应滞后等性能局限。传统的制动安全技术主要致力于提高电磁鼓式和盘式制动器的可靠性[4]，这种技术方法有效地提高了电梯在正常情况下的运行可靠性。然而，传统制动系统的所有监测和控制功能都依赖于主系统的电源和控制器，一旦主控制器出现故障系统将难以实现主动且精确的紧急制动。现代电梯制动安全技术研究正朝着冗余驱动与蓄能制动相结合的方向发展。根据不完全统计，约有 15% 的电梯安全事故是电梯制动失效导致的，主要是电气装置或制动器本身的问题[5]，冗余驱动与蓄能制动的协同应用成为解决该问题的核心研究方向。但现有研究多聚焦于单一技术路径的性能优化，对两者在动态响应、功率匹配等方面的协同机理缺乏系统探讨，也缺少可量化的工程可靠性评估框架。为此，本文聚焦工程实现与可靠性验证，系统梳理了冗余驱动、蓄能制动及切换逻辑的技术演进，引入热-力-动态多物理场耦合仿真以进行制动过程的耦合分析，构建完整技术体系并提出可工程实现且易维护的解决方案，为高速电梯应急装置的系统化设计提供支撑。

2. 冗余驱动与蓄能制动设计

2.1. 冗余驱动设计

冗余驱动是指使用多个驱动以提高系统可靠性的设计理念。在高速曳引电梯中，冗余驱动系统意味着即使主驱动系统发生故障，备用驱动也能及时切换并承担任务，确保电梯的安全运行。电梯冗余驱动系统的发展经历了从同构备份到异构冗余，再到本体容错的演进。

同构备份指的是使用两个及以上规格完全相同的部件来构建冗余。在高速曳引电梯领域,采用双曳引机架构是实现驱动冗余、提升系统可靠性的经典且直接的思路。在控制系统中确立主控制器,并增设一套功能相同的辅助控制器,设定优先级以确保在主控制链路故障时系统仍能维持应急运行[6]。然而,同构备份存在明显缺陷,如果由于某种原因造成一个子系统的故障,那么同样的原因也有可能造成另外的子系统故障。模拟试验表明,实现理论上高可靠性所必需的毫秒级无缝切换,对物理离合器的响应速度及双机之间的实时同步控制算法提出了极为苛刻的要求,工程实施难度大。

为克服同构备份的成本与技术缺陷,冗余设计发展至异构冗余阶段。崔星等[7]提出构建独立于主曳引力的力学路径,通过调节动态配重平衡来实现故障力矩补偿,成本较同构方案降低 40%以上。王建莉[8]开发了一台为普通 PLC 机,另一台为热机备份 PLC 机的双 PLC 控制的系统,两台控制器同步运行并相互监控状态。在主控制器发生故障时,可实现无缝切换,以保障控制指令的连续性。当前研究表明,异构冗余更适配主流高速电梯场景,但动力特性的匹配精度仍需通过进一步优化来应对不同力学路径切换时的冲击问题。

现阶段,电梯的冗余驱动已发展至本体容错阶段,使系统本体具备功能自愈能力。实现本体容错的物理基础在于电机本体的冗余设计。与传统同构备份和异构冗余不同,本体冗余是通过在单台电机内部创建多个功能性子单元来实现。早期研究主要集中在控制策略的优化,周志翔等[9]虽提出了双逆变器控制层冗余方法,但他们的优化重点在于振动抑制和智能算法,并没有涉及驱动电机本体的故障隔离和容错运行。驱动单元容错方面的重大突破直到 Fan 等[10]提出用于无机房电梯的双电机部件永磁线性电机后才出现,这种设计拥有高力密度、低推力波动及固有的容错齿结构。蒋雪峰等[11]采用一种双绕组永磁容错电机通过在定子嵌入多套电气与磁路隔离的独立绕组,使电机在发生局部绕组故障时,仍能实现故障下的持续运行。然而,这类永磁解决方案成本高昂且在高温下永磁体有退磁风险,其大规模应用仍需权衡。表 1 对比了同构备份、异构冗余、本体容错三种技术方案在成本、切换时间、可靠性及适用场景等方面的差异。可以看出,异构冗余在成本与可靠性之间取得了较好平衡,更适配主流高速电梯场景,但动力特性的匹配精度仍需进一步优化。

Table 1. Comparison of redundant drive technology solutions

表 1. 冗余驱动技术方案对比

技术方案	成本	切换时间	可靠性	使用场景	主要局限
同构备份	高	毫秒级	中	高安全电梯	双机同步控制难度大,共因失效风险高
异构冗余	中	数十毫秒	较高	主流高速电梯	动力特性匹配精度仍需优化
本体容错	高	微秒级	高	特种电梯	永磁体有退磁风险,成本高

2.2. 蓄能制动单元

蓄能制动单元是冗余驱动系统能源安全的核心。在主电源与主制动失效时,蓄能制动单元能为应急备份单元提供独立且稳定的能源供给,驱动制动执行器能实现轿厢平稳减速停靠。蓄能制动单元是集能量存储、功率转换、制动执行及热管理于一体的复杂子系统,其性能直接决定应急制动的可靠性与平滑性,必须与冗余驱动系统进行深度协同适配。

根据能量存储形式的不同,蓄能制动技术主要可被分为电气式与机械式两大类,两者性能互补,适用于不同应用场景。电气蓄能因其响应速度快、可控性强,成为高速电梯应急制动的主流选择。其中超级电容与锂电池混合储能系统结合了超级电容的高功率密度和锂电池的高能量密度优势,能够在各种运行条件下保持稳定输出,被学术界与工程界认为是最优方案。Makar 等[12]通过台架试验验证了超级电容

器可在毫秒级时间内响应制动需求，功率密度超 10 kW/kg，循环寿命高达百万次，能有效应对制动过程中的瞬时功率峰值。Kermani 等[13]提出了分层控制策略，进一步优化了能量分配，超级电容负责瞬时功率支撑，锂电池提供持续能源补给，补偿了电容自放电损耗，还将系统应急续航能力提升 40% 以上，有效克服了单一储能元件功率不足或续航有限的短板。

在拓扑结构方面，单向制动能量回收系统因结构简单、成本低，能够轻松地与现有驱动系统进行并联整合，适用于现有电梯的节能改造。然而这些系统仅提供能量回收和紧急释放功能，缺乏向电网反馈电力的能力。相比之下双向拓扑功能更全面，可实现与电网的能量交互，但它们结构复杂且存在多个潜在的故障点，更适合用于新建高端高速电梯的安装。

机械蓄能作为电气蓄能的核心备份方式，主要包括液压蓄能器与弹簧蓄能等形式。陈轶辉等[14]验证了液压蓄能器即使在 -40°C 至 85°C 的极端环境下也能保持 80% 以上的效能，曹军峰等[15]通过参数优化进一步将液压制动系统的力控误差控制在 $\pm 5\%$ 以内，然而，机械蓄能系统普遍存在能量密度低和体积庞大的问题，使其工程应用限制在最终停车备份或特殊操作条件。磁流变制动器因其制动力矩可连续调节、响应速度快、控制功耗低，被视为理想智能制动终端[16]，然而，磁流变制动器在实际工程化应用中仍需进一步解决长期运行中的材料沉降、密封可靠性以及在更高功率密度下的散热设计等挑战。表 2 对比了电气蓄能与机械蓄能各技术方案的能量密度、寿命及环境适应性等关键指标。可以看出混合储能兼顾了功率密度与能量密度优势，适合作为主应急电源；磁流变制动器则在力矩可控性方面优势突出，是理想的智能制动终端，但其材料沉降与散热问题仍需工程化突破。

Table 2. Comparison of energy storage braking technology solutions

表 2. 蓄能制动技术方案对比

技术类型	具体方案	能量密度	循环寿命	环境适应性	主要优势	主要局限
电气蓄能	超级电容	低	百万次以上	$-40^{\circ}\text{C}\sim 65^{\circ}\text{C}$	功率密度高，响应快	能量密度低
电气蓄能	锂电池	高	数千次	$0^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$	能量密度高，续航长	功率密度低，低温性能差
电气蓄能	混合储能	中	适中	综合两者	功率与能量兼顾	系统复杂，成本较高
机械蓄能	液压蓄能器	低	数十万次	$-40^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$	环境适应性强	能量密度低，体积大
机械蓄能	弹簧蓄能	低	数万次	$-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$	结构简单，成本低	能量密度低，行程受限
机械蓄能	磁流变制动器	-	数十万次	受温度影响大	力矩连续可调，功耗低	材料沉降，散热要求高

2.3. 切换逻辑与智能控制策略

实现可靠应急备份系统的关键在于快速准确的故障诊断和无缝切换。这要求在数十毫秒内完成故障判定和系统转换，同时保证切换过程中的动态稳定性。这确保了电梯轿厢的安全停靠，并最大限度地提升乘客舒适度。

切换触发必须基于对主系统关键状态实时监测。当检测到预设故障模式时，独立运行的可编程安全系统应立即启动并接管控制[17]，这一过程可以参考热备控制基本原理，以确保指令的连续可靠性[8]。故障识别和响应可以采用基于安全冗余主动控制策略，实现按风险分级并启动相应的应急程序[6]。为实现向备用系统平稳过渡，并在切换过程中尽量减少对乘客舒适性的干扰。控制算法设计同样至关重要，可采用具有强鲁棒性的先进算法如滑模控制，以抑制切换过程中的扰动和冲击[18]。这一控制策略参数必须与冗余驱动系统动态响应以及蓄能制动单元功率输出紧密匹配，以形成协调高效的应急动作序列。系统通过实时监测关键参数实现故障检测与确认，故障确认时间 $< 10\text{ ms}$ ，无缝切换完成时间 $< 50\text{ ms}$ 。切换

过程依次完成主系统断电隔离、备用控制器激活、储能单元接入、冗余驱动启动、蓄能制动介入五个步骤，切换完成后设备由备用系统接管控制，实现轿厢平稳制动，如图 1 所示。

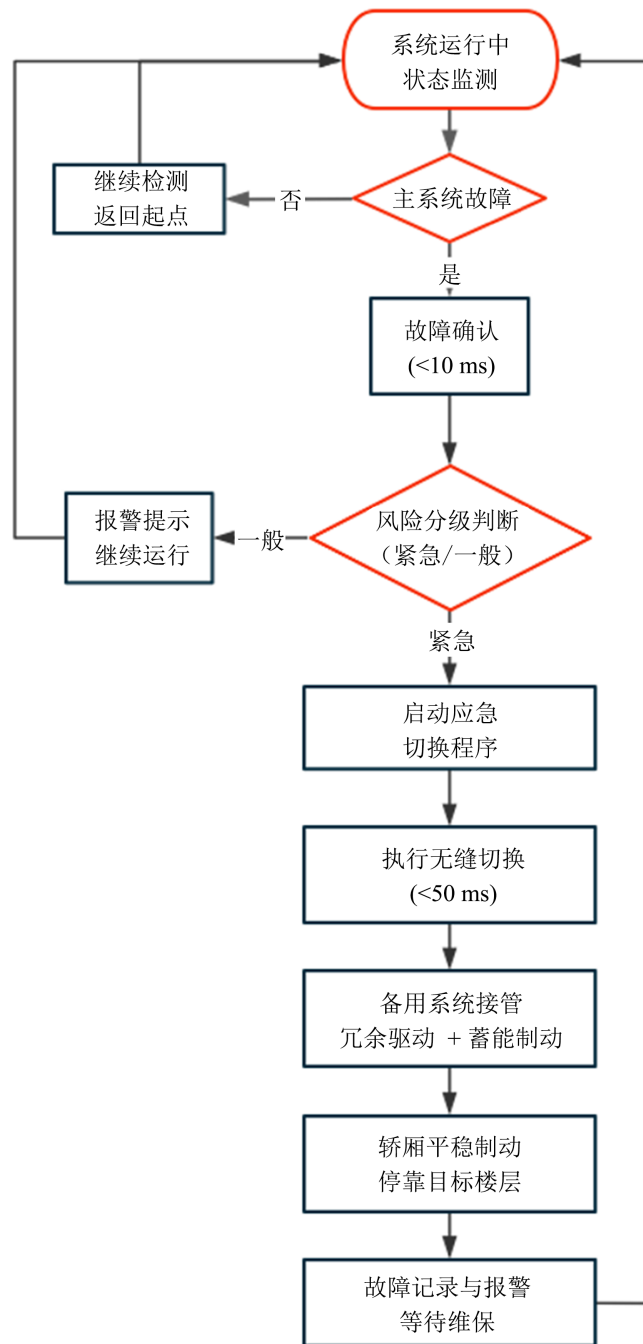


Figure 1. Fault diagnosis and seamless switching control logic flowchart
图 1. 故障诊断与无缝切换控制逻辑流程图

为确保该协同控制策略的长期可靠性，可使用 COMSOL 多物理场仿真平台进行热 - 力 - 流多物理场耦合仿真，优化液冷散热路径，规避热失效风险。这种热管理策略与多物理场仿真形成闭环，为蓄能制动单元与冗余驱动系统的长期协同运行提供可靠性保障，支撑电梯系统在复杂工况下的安全稳定运行。

2.4. 系统总体架构

图 2 为系统总体架构框图，系统由混合储能单元、冗余驱动单元、蓄能制动单元、主曳引系统及安全控制系统五大部分构成。正常工况下，主电源为主曳引系统供电；应急工况下，混合储能单元为冗余驱动单元与蓄能制动单元提供能源支持，安全控制系统完成故障诊断与无缝切换，实现轿厢平稳制动。

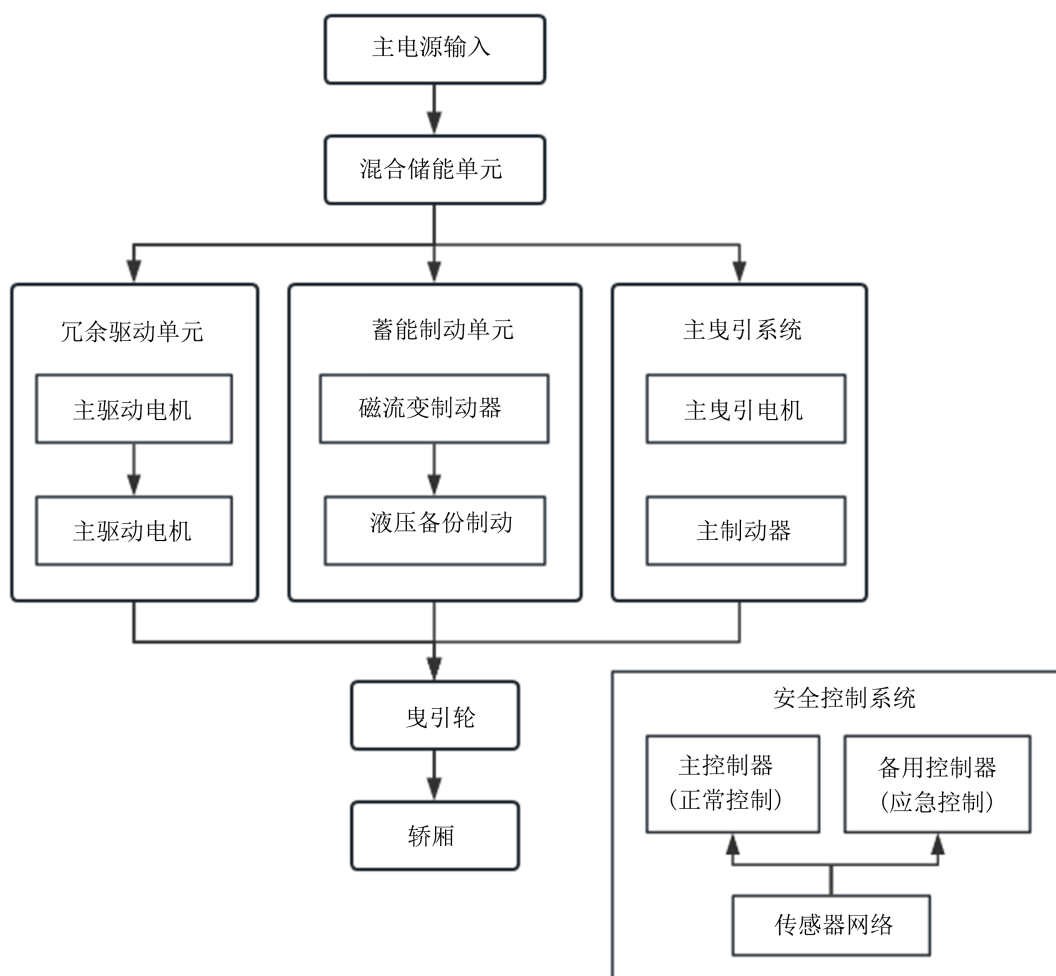


Figure 2. System overall architecture block diagram

图 2. 系统总体架构框图

3. 冗余驱动与蓄能制动的耦合机理分析

冗余驱动与蓄能制动的有效耦合是确保电梯在紧急情况下安全稳定运行的关键，其协同效果取决于两者在动态响应、功率匹配和信息交互三个层面的耦合特性。

3.1. 动态响应耦合

冗余驱动系统在故障切换时会产生短暂的力矩中断或阶跃变化，而蓄能制动单元需要在同一时间窗口内完成能量释放与制动力建立。两者动态响应的匹配程度直接决定了制动过程的平稳性。若蓄能制动单元的建压时间快于冗余驱动系统的力矩恢复时间，将导致制动力过大；反之，则可能出现制动力不足。因此，必须通过联合仿真与试验标定，使两者的响应时间常数相互匹配。

3.2. 功率匹配耦合

在紧急制动过程中，冗余驱动系统与蓄能制动单元共用同一储能系统。混合储能系统需同时满足驱动电机再生制动能量回馈与制动终端功耗需求。功率分配的合理性直接影响系统稳定性和续航能力。研究表明，超级电容适合承担瞬时功率峰值，而锂电池则提供持续能量补给[12]。因此，能量管理策略需根据制动阶段动态调整功率分配系数，以实现最优匹配。

3.3. 信息交互耦合

冗余驱动系统与蓄能制动单元之间的信息交互主要包括故障状态、力矩指令、储能状态等关键参数。信息传输的实时性与完整性是协同控制的基础。采用独立于主控制器的安全冗余通信链路，可有效避免主控系统失效时信息中断的风险。同时，控制策略应具备信息容错能力，在部分信号丢失时仍能维持基本应急功能。

4. 热 - 力 - 动态多物理场耦合分析

高速电梯的紧急制动过程伴随着强烈的能量转换和耗散，是一个涉及热、力、动态响应的复杂瞬态耦合物理过程。在制动过程中，绝大部分动能通过摩擦副的剪切作用转化为热能，在接触界面产生极高的瞬态热流密度[19]。该热流作为主要输入载荷，会引发局部温度急剧升高进而产生显著的热应力，热应力与外部机械压紧力和惯性力相互作用，共同决定制动力矩的传递稳定性。与此同时，由制动初始冲击等因素引发的机械激励，以及轿厢高速运动所诱导的气动效应所构成的额外动态载荷，又反过来通过改变接触状态与摩擦系数影响热量的产生速率，形成了一个紧密关联的反馈闭环。忽略任一耦合环节，都可能导致对制动效能、部件寿命及系统稳定性的预测出现严重偏差。

为了对这一复杂耦合过程进行准确描述，可以构建一个综合数值仿真模型。该模型通常整合了基于三维瞬态热传导方程的温度场分析、考虑热弹性本构关系的结构应力场分析、基于多体系统动力学的振动响应分析，以及依托计算流体动力学的气动载荷分析。通过仿真能够预测在紧急制动工况下磁流变制动器工作间隙的峰值温度及其空间分布，识别因高温可能导致的材料性能退化的潜在风险点[19]。进一步将瞬态温度场作为热载荷映射至结构模型上，可计算出关键机械部件的热 - 机械耦合应力历程，结合材料的疲劳特性，为其低周热疲劳寿命评估提供定量依据[18]。结合动力学与气动分析能够再现轿厢从高速运行到完全制停的完整减速过程，输出其减速度曲线、振动频谱及关键结构点的动态应力，从而对制动平稳性、乘员舒适性及系统冲击强度进行全面量化评估。基于仿真结果，可对制动装置的散热结构、材料选择、控制参数进行迭代优化，在设计阶段最大限度地规避热失效、结构过载与不良振动风险，保障应急制动过程的安全可靠。

5. 实验验证与可靠性量化评估体系

验证试验是通过实验手段检验理论、设计或系统有效性的科学方法，电梯设备的可靠性则直接影响其性能和使用寿命。为保证基于冗余驱动与蓄能制动的应急辅助装置能从实验室走向高可靠的工程化产品，有必要建立一套系统且量化的可靠性评估体系。该体系旨在将装置的安全性能，从定性描述转化为基于概率模型与客观数据的量化指标，从而为设计优化、测试验证与运维决策提供科学依据。

5.1. 实验验证

通过建立一个能够精准模拟高速电梯运行工况的实验台架用于对冗余驱动、蓄能制动及故障切换逻辑等进行独立与集成测试。重点采集冗余驱动单元的转矩响应特性与切换同步误差、混合储能系统的瞬

时功率输出与能量回收效率、制动终端制动力矩梯度与响应时间。为深入解析物理机制，台架测试数据还需与基于 COMSOL 等平台开展热-力-动态多物理场耦合仿真结果进行对标验证。

故障注入测试是通过主动引入故障场景来验证系统容错能力和稳定性的测试方法。通过模拟主电源突发中断、曳引机失速、关键传感器信号丢失或控制器失效等高速电梯运行过程中易出现的典型故障场景，检验系统能否无缝切换至备份工作模式以确保电梯运行状态的连续与稳定[6]。通过这种主动制造障碍测试的方式，能真实还原系统在突发故障下的实际表现，切实验证该安全策略的可行性与有效性，为后续系统可靠性评估提供数据支撑。

加速寿命试验是指在不改变产品失效机理的前提下对产品施加超越正常运行条件的强化应力来加快产品失效或性能退化过程，通过统计分析加速应力下获得的数据，从而预测产品寿命指标的一种技术途径[20]。构建高频次故障切换的场景并模拟电梯制动时的严苛工况，同步监测制动过程中的力矩输出与部件温升，获取关键部件的失效时间数据。使用三参数威布尔分布等统计寿命模型拟合，估算装置的特征寿命及平均无故障时间，为制定预测性维护计划提供依据。

5.2. 可靠性量化评估

失效模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)是系统可靠性评估最常用的方法之一，是分析系统中所有可能产生的故障模式及其对系统造成的所有可能影响，并按每一个故障模式的严重程度，检测难易程度以及发生频度予以分类的一种归纳分析方法。Yu 等[21]将模糊集理论与传统 FMEA 相结合，克服了传统 FMECA 在处理复杂系统模糊性和不确定性方面的局限性。表 3 给出了本文所设计应急装置关键部件的 FMEA 分析结果。从表中可以看出，磁流变液沉降 RPN = 192 和速度传感器失效 RPN = 160 风险优先级最高，需优先采取改进措施；主控制器宕机 RPN = 60 虽严重度高但发生度低，通过双 PLC 热备可有效控制风险。

Table 3. FMEA analysis table for redundant drive and energy storage braking emergency device

表 3. 冗余驱动与蓄能制动应急装置 FMEA 分析表

部件	故障模式	故障原因	严重度(S)	发生度(O)	探测度(D)	危险优先数(RPN)
冗余驱动单元	主驱动电机失速	控制器失效	9	3	4	108
冗余驱动单元	切换装置卡滞	机械离合器故障	10	2	5	100
蓄能制动单元	磁流变液沉降	长期静置	8	4	6	192
蓄能制动单元	液压制动器泄露	密封老化	9	3	5	135
混合储能单元	超级电容电压骤降	温度过高	8	3	4	96
混合储能单元	锂电池过放保护	BMS 失效	7	3	6	126
安全控制系统	主控制器宕机	硬件故障	10	2	3	60
安全控制系统	速度传感器失效	传感器损坏	8	4	5	160

基于上述定性分析，研究工作进一步借助试验数据对可靠性进行定量表征。基于台架试验与加速寿命试验采集的失效时间数据可以统计计算出关键部件平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF)。MTBF 越长，表明系统的可靠性越高，故障发生的频率越低。在此基础上应用蒙特卡洛仿真技术模拟装置在复杂时变任务剖面下的可靠度函数随时间变化曲线，并计算其在规定任务时间内任务可靠度及 MTBF，实现对装置长期运行可靠性的量化评估与预测。

最终, 电梯的安全性论证必须综合 FMEA 分析结果和量化可靠性指标并置于整个电梯系统全生命周期风险管理框架内。高速电梯的制造与安装应符合 GB7588《电梯制造与安装安全规范》等现有标准, 并参考杜娅[22]通过扎根理论建立的电梯安全风险因素体系, 构建覆盖人员、设备、环境和管理的多维评估框架, 确保装置的设计与应用符合行业安全法规与工程伦理要求。

6. 总结

随着高速电梯安全需求的不断增加, 电梯应急辅助装置逐渐从传统机械制动依赖向冗余驱动与蓄能制动协同的智能容错系统演进。通过冗余驱动和蓄能制动的协同运行并配合热-力-动态多物理场耦合仿真, 应急辅助装置成功完成从部件性能优化到系统动态响应的协同设计, 显著提升了高速条件下制动平稳性和结构可靠性。研究进一步引入台架试验、故障注入测试及加速寿命试验的系统化验证方法, 结合 FMEA 与 MTBF 等量化可靠性评估工具, 形成从实验到工程应用的闭环验证体系。这种集成智能控制、仿真和可靠性量化评估的系统设计与验证方法, 为高速电梯提供主动安全防护的工程解决方案, 同时为特种设备安全系统的开发与标准化提供可推广的技术范式, 具有明确的工程应用价值和行业推广前景。

基金项目

湖南省市场监督管理局科研项目: 高速曳引驱动电梯应急救援辅助装置研究(编号: KJJH202550)。

参考文献

- [1] 中国宁波网. 最快运行速度 10 米/秒! 宁波有了“全省最快电梯” [EB/OL]. 2024-10-15. <http://news.cnnb.com.cn/system/2024/10/15/030621189.shtml>, 2026-06-29.
- [2] 市场监管总局关于 2024 年全国特种设备安全状况的通报[EB/OL]. 2025-05-07. https://www.samr.gov.cn/tzsbj/qktb/tb/art/2025/art_1b31b22095744942af16cf24cec957ac.html, 2026-06-29.
- [3] 李辉. 基于 PLC 的电梯安全保护控制系统设计[J]. 机电工程技术, 2021, 50(11): 255-257.
- [4] 杜凤霞. 电梯限速器——安全钳联动试验失效分析[J]. 中国质量监管, 2024(2): 68-69.
- [5] 揭英锐. 电梯制动失效原因分析及检验探讨[J]. 中国设备工程, 2025(22): 187-189.
- [6] 刘传奇, 张东平, 罗恒. 基于安全冗余理念的电梯故障主动控制技术[J]. 中国电梯, 2023, 34(11): 20-22.
- [7] 崔星, 王宏, 徐华勒, 等. 冗余式电梯系统设计[J]. 自动化应用, 2022(9): 148-150, 153.
- [8] 王建莉, 张总. 双重冗余电梯控制系统故障-安全设计与研究[J]. 新技术新工艺, 2019(5): 40-42.
- [9] 周志翔, 刘剑. 超高速电梯发展中存在的问题与研究方向[J]. 控制工程, 2003(S1): 1-4, 32.
- [10] Fan, H., Chau, K.T., Liu, C., Cao, L. and Ching, T.W. (2018) Quantitative Comparison of Novel Dual-Pm Linear Motors for Ropeless Elevator System. *IEEE Transactions on Magnetics*, **54**, 1-6. <https://doi.org/10.1109/tmag.2018.2842083>
- [11] 蒋雪峰, 黄文新, 郝振洋, 等. 双绕组永磁容错电机的冗余电驱动系统[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 22-29.
- [12] Makar, M., Pravica, L. and Kutija, M. (2022) Supercapacitor-Based Energy Storage in Elevators to Improve Energy Efficiency of Buildings. *Applied Sciences*, **12**, Article 7184. <https://doi.org/10.3390/app12147184>
- [13] Kermani, M., Shirdare, E., Abbasi, S., Parise, G. and Martirano, L. (2021) Elevator Regenerative Energy Applications with Ultracapacitor and Battery Energy Storage Systems in Complex Buildings. *Energies*, **14**, Article 3259. <https://doi.org/10.3390/en14113259>
- [14] 陈轶辉, 李洪星, 赵树忠, 等. 采用蓄能器的大负载液压缸制动系统设计及其能量回收率仿真分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(1): 165-168.
- [15] 曹军峰, 陈杰. 基于制动能量再生系统的蓄能器特性分析[J]. 液压与气动, 2010(1): 59-62.
- [16] 郑祥盘, 郭源帆, 唐晓腾, 等. 曳引电梯磁流变制动装置的多物理场耦合分析与试验[J]. 中国机械工程, 2019, 30(15): 1821-1827.
- [17] 蔡景新. 电梯轿厢意外移动保护装置冗余系统的介绍[J]. 机电工程技术, 2018, 47(8): 257-259.

-
- [18] 包继刚, 张莹, 傅龙飞. 基于滑模算法的大型货运电梯控制器控制方法优化[J]. 电气自动化, 2020, 42(3): 74-76.
- [19] Qu, J., Wang, W., Shangguan, Y., Wang, X. and Jiao, B. (2023) Thermomechanical Modelling and Strength Assessment of C/C-SiC Composite Brake Disc. *Applied Composite Materials*, **30**, 1547-1568. <https://doi.org/10.1007/s10443-023-10136-6>
- [20] 姚姚, 宋添. 加速寿命试验方法在电梯门滑块寿命预估中的应用[J]. 中国电梯, 2024, 35(5): 6-9.
- [21] Yu, J., Zhang, J., Li, C., Chen, Z. and Huang, C. (2025) Reliability Analysis of Freight Elevator Systems Based on FFMEC, FTA and Bn. *Scientific Reports*, **15**, Article No. 22384. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05254-z>
- [22] 杜娅, 谢科范, 梁本部, 等. 电梯安全风险因素分析及预警研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(4): 71-79.