

起重机械安全防护装置（限位、制动）可靠性评估与优化设计

周 莉

武桥重工集团股份有限公司 湖北 武汉 430090

摘要：本文聚焦起重机械安全防护装置中的限位与制动装置，阐述其可靠性评估与优化设计。先介绍起重机械工作原理、安全防护装置重要性及限位与制动装置工作原理，构建可靠性评估指标体系，选择评估方法并构建模型。分析设计、制造与安装、使用与维护、环境等因素对可靠性的影响。因此，提出基于可靠性设计的结构优化、智能控制技术集成、冗余设计与容错机制、维护策略优化等优化设计方法与策略，为保障起重机械安全运行提供参考。

关键词：起重机械；安全防护装置；限位装置；制动装置；可靠性评估；优化设计

1 起重机械安全防护装置概述

1.1 起重机械的工作原理

起重机械作为重要的物料搬运设备，广泛应用于各类工业和建筑领域。其工作原理基于力学原理，通过电动机或其他动力装置提供动力，经传动系统将动力传递至起升、运行、变幅和回转等机构。起升机构负责重物的升降，运行机构实现起重机在轨道上的水平移动，变幅机构改变起重臂的幅度以调整工作范围，回转机构则使起重机上部结构相对下部结构做旋转运动。这些机构协同工作，完成重物的起吊、运输和放置等操作。例如，在建筑工地，塔式起重机通过起升机构将建筑材料吊运至高空作业面，运行机构和回转机构配合实现建筑材料的水平转运和定位，确保施工的顺利进行。

1.2 安全防护装置的重要性

起重机械在运行过程中，由于操作环境复杂、负载变化大等因素，存在诸多安全隐患。安全防护装置作为保障起重机械安全运行的关键部件，其重要性不言而喻。限位装置能够限制起重机械各机构的运动范围，防止因超程运动导致的设备损坏和人员伤亡。例如，起升限位器可在重物上升至极限位置时自动切断起升机构动作，避免钢丝绳过卷断绳事故。制动装置则能在起重机械停止运行时，迅速可靠地使运动部件停止，防止重物下滑或起重机溜车。一旦安全防护装置失效，将可能引发严重的安全事故，造成巨大的经济损失和人员伤亡。因此，确保安全防护装置的可靠性是起重机械安全运行的重要保障^[1]。

1.3 限位与制动装置的工作原理

限位装置主要通过机械或电气方式检测运动部件的位置，当达到预设极限位置时，触发控制信号，切断动

力源或采取其他保护措施。常见的限位装置有行程限位器、高度限位器等。行程限位器利用行程开关，当运动部件移动到设定位置时，行程开关动作，切断相应电路。高度限位器则通过传感器检测重物的高度，当达到极限高度时发出信号。制动装置一般由制动器和控制机构组成。制动器通过摩擦力使运动部件停止，常见的制动器类型有块式制动器、盘式制动器等。控制机构根据操作指令或安全信号，控制制动器的制动和释放。例如，在起重机停止运行时，控制机构发出制动信号，制动器抱闸，使起重机迅速停止。

2 可靠性评估方法与模型构建

2.1 可靠性评估指标体系

构建科学合理的可靠性评估指标体系，是精准评估限位与制动装置可靠性的基石。这一体系需全面且细致，涵盖多个关键维度。可靠性指标是核心所在，可靠度直观反映装置在规定时间和特定条件下，成功完成规定功能的概率，是衡量其可靠运行能力的关键参数；失效率则体现了单位时间内装置发生故障的频率，能清晰展现装置的故障倾向；平均故障间隔时间（MTBF）明确了装置两次故障之间的平均时长，为评估装置的稳定运行周期提供了重要依据。可维修性指标同样不可忽视，平均修复时间（MTTR）反映了装置出现故障后，从发现故障到完成修复所需的平均时长，体现了维修的效率；维修率则从另一个角度反映了装置维修的难易程度，对制定合理的维修计划具有指导意义。安全性指标聚焦于故障对人员和设备安全的潜在威胁，故障模式影响及危害性分析（FMECA）中的风险优先数（RPN），综合考虑了故障发生的可能性、严重程度和检测难度，为评估故障的安全风险提供了量化标准^[2]。经济性指标则从成本

角度出发，维修成本和全寿命周期成本等指标，有助于在保障可靠性的前提下，实现成本的最优化控制，综合评估装置的可靠性水平。

2.2 评估方法选择

鉴于限位与制动装置的独特特性以及评估需求，精心挑选适宜的评估方法显得尤为关键。在众多评估方法中，故障模式影响分析（FMEA）具有显著优势，它通过深入剖析装置各组成部分可能出现的故障模式，以及这些故障模式对整体装置性能产生的影响，能够精准地找出潜在的故障点和薄弱环节，为后续的改进和优化提供明确方向。故障树分析（FTA）则以装置不希望出现的故障事件作为顶事件，运用逻辑推理的方式，全面分析导致顶事件发生的各种原因及其相互之间的逻辑关系，构建出直观的故障树模型。借助这一模型，可以清晰地找出系统的薄弱环节和关键故障路径，为故障的预防和排除提供有力支持。可靠性预计主要用于预测装置在规定条件下的各项可靠性指标，为装置的设计和选型提供理论依据。可靠性分配则是将系统的整体可靠性指标合理分配到各个组成部分，确保每个部分都能满足相应的可靠性要求。在实际评估过程中，由于各种方法的侧重点不同，综合运用多种方法能够相互补充、相互验证，从而获得更为全面、准确的评估结果，为限位与制动装置的可靠性提升提供坚实保障。

2.3 评估模型构建

在选定评估方法和明确指标体系后，构建可靠性评估模型成为关键环节。以故障树分析为例，首先要精准确定顶事件，对于限位与制动装置而言，限位装置失效或制动装置制动失灵等都是典型的顶事件。接着，深入分析导致顶事件发生的各种中间事件和基本事件，如传感器故障可能导致限位装置无法准确检测位置，控制电路故障可能影响制动装置的正常制动，制动器摩擦片磨损会降低制动效果等。将这些事件按照逻辑关系构建成故障树，使整个故障发生过程清晰可见。通过计算故障树的最小割集和最小径集，能够准确确定系统的薄弱环节和关键故障路径，为针对性的改进提供依据。同时，结合可靠性预计方法，计算各基本事件和中间事件的发生概率，进而计算出顶事件的发生概率，以此全面评估装置的可靠性水平。此外，随着计算机技术的飞速发展，利用计算机仿真技术构建装置的虚拟模型成为可能。通过模拟不同工况下装置的运行情况，可以对装置的可靠性进行动态评估，更加真实地反映装置在实际使用中的性能表现，为装置的优化设计和可靠运行提供更加科学、准确的决策支持。

3 限位与制动装置可靠性影响因素分析

3.1 设计因素

设计是影响限位与制动装置可靠性的首要因素。合理的设计能够确保装置在各种工况下稳定运行。例如，限位装置的行程设计应准确考虑起重机械各机构的最大运动范围，避免因设计行程过短导致限位失效，或过长造成不必要的限制。制动装置的制动力矩设计需根据起重机的额定载荷和工作特点进行精确计算，确保制动可靠。同时，设计过程中还应考虑装置的结构合理性、零部件的选型和匹配等因素。若设计不合理，如结构强度不足、零部件选型不当，将导致装置在使用过程中出现故障，降低可靠性^[3]。

3.2 制造与安装因素

制造与安装质量直接影响限位与制动装置的可靠性。在制造过程中，零部件的加工精度、材料质量等对装置性能至关重要。例如，限位装置的传感器制造精度不高，可能导致位置检测不准确，引发限位失误。制动器的摩擦片材料质量差，会影响制动效果和寿命。安装过程中，若安装位置不准确、安装工艺不规范，也会导致装置性能下降。如制动器安装时制动轮与制动瓦的间隙调整不当，会使制动器制动不平稳或制动失灵。因此，严格控制制造与安装质量是提高装置可靠性的重要环节。

3.3 使用与维护因素

使用与维护情况对限位与制动装置的可靠性有着显著影响。在使用过程中，操作人员的操作规范与否直接影响装置的寿命和性能。例如，频繁的急停操作会加速制动器的磨损，降低制动可靠性。超载使用起重机械会使限位与制动装置承受过大负荷，容易导致装置损坏。维护方面，定期的检查、保养和维修是确保装置可靠运行的关键。若维护不及时，如未及时更换磨损的零部件、未对装置进行清洁和润滑，会使装置的故障率增加，可靠性降低。

3.4 环境因素

环境因素也是影响限位与制动装置可靠性的重要方面。起重机械通常在恶劣的环境下工作，如高温、潮湿、腐蚀、粉尘等环境。高温环境会使制动器的摩擦片性能下降，制动效果变差；潮湿环境容易导致电气元件受潮短路，影响限位装置的正常工作；腐蚀环境会加速装置零部件的腐蚀，降低其强度和寿命；粉尘环境会使装置的运动部件磨损加剧，影响装置的精度和可靠性。因此，在设计、制造和使用过程中，应充分考虑环境因素的影响，采取相应的防护措施。

4 起重机械安全防护装置优化设计方法与策略

4.1 基于可靠性设计（RBD）的结构优化

基于可靠性设计（RBD）的结构优化，是提升限位与制动装置可靠性的关键途径。在对装置结构进行深度剖析时，需全面且细致地识别关键部件与薄弱环节。以限位装置为例，传感器作为检测核心部件，其安装位置和结构形式直接影响检测精度与抗干扰能力。通过优化算法，如遗传算法、粒子群算法等，对传感器的安装角度、距离等参数进行精准调整，能有效减少外界干扰，提升检测的准确性。对于制动装置，制动器的结构优化至关重要。优化其摩擦副材料、制动盘尺寸等参数，可提高制动效率，降低磨损速率，延长使用寿命。同时，要兼顾结构的可靠性与经济性。在确保装置满足高可靠性要求的前提下，对材料选择、制造工艺等方面进行优化，降低制造成本。通过结构优化，装置在面对复杂多变的工况时，如高温、高湿、强振动等环境，都能保持稳定可靠的运行状态，为起重机械的安全作业提供坚实保障^[4]。

4.2 智能控制技术集成

将智能控制技术集成到限位与制动装置中，是实现装置可靠性与性能显著提升的重要举措。传感器技术作为智能控制的基础，可实时精准监测装置的运行状态。在限位装置中，位置传感器能精确反馈限位位置信息；在制动装置里，温度传感器和压力传感器可实时监测制动过程中的温度和压力变化。通过数据采集和分析系统，对这些海量监测数据进行高效处理和深入分析，能够及时发现潜在的故障隐患，如传感器信号异常、温度过高预警等。利用智能控制算法，如模糊控制可根据输入的模糊信息，通过模糊推理规则输出合适的控制量；神经网络控制能通过学习和训练，自动调整控制参数以适应不同工况。在制动过程中，根据重物的重量和运动速度，智能控制算法自动调整制动器的制动力矩，使制动过程更加平稳、可靠，有效避免制动过猛或制动不足等问题，提升起重机械作业的安全性和稳定性。

4.3 冗余设计与容错机制

冗余设计与容错机制是增强限位与制动装置可靠性的有效策略。冗余设计通过增加额外的部件或系统，为装置的正常运行提供双重保障。在限位装置中，采用双传感器设计是一种常见的冗余方式。当主传感器因故障无法正常工作时，冗余传感器能立即接替其工作，确保限位功能不受影响，继续准确提供限位信号。容错机制则侧重于通过合理的控制策略和算法，使装置在出现故

障时能够自动调整运行状态。以制动装置为例，当某个制动器出现故障时，控制系统迅速感知并自动调整其他制动器的工作状态，合理分配制动力，保证整体制动效果。这种机制能有效避免故障的扩大和恶化，防止因单个部件故障导致整个装置失效，大大提高了装置在复杂工况下的可靠性和容错能力，保障起重机械在各种情况下的安全运行。

4.4 维护策略优化

优化维护策略对于保障限位与制动装置长期可靠运行起着至关重要的作用。建立基于状态的维护（CBM）策略，改变了传统的固定时间间隔维护模式。通过实时监测装置的运行状态和性能参数，如振动频率、电流大小等，能够精准掌握装置的实际状况。根据这些实时数据制定个性化的维护计划，避免了过度维护造成的资源浪费和欠维护引发的潜在故障。利用信息化技术，构建设备维护管理系统，对装置的维护历史、故障记录、更换部件信息等进行全面管理。通过数据分析，可发现装置的故障规律和潜在问题，为维护决策提供科学依据。同时，加强对维护人员的培训至关重要。通过专业培训，提高维护人员的技术水平和故障诊断能力，使其能够准确判断装置故障，采取有效的维护措施，确保维护工作的质量和效果，延长装置的使用寿命，保障起重机械的安全稳定运行。

结束语

起重机械限位与制动装置的可靠性关乎其安全运行，对工业和建筑领域意义重大。通过构建评估方法与模型，深入剖析影响可靠性的诸多因素，并提出系列优化设计方法与策略，为提升装置可靠性指明方向。在实际应用中，需综合考量各种因素，科学运用评估方法和优化策略，持续提高装置可靠性。因此，方能为起重机械安全运行筑牢根基，推动工业和建筑领域安全生产与可持续发展迈向新高度。

参考文献

- [1]江伟,刘宏伟.起重机械检验现场的危险源分析与防控[J].特种设备安全技术,2021(03):39-40.
- [2]郑严,程文明,程跃.起重机械疲劳断裂可靠性分析的新进展[J].起重运输机械,2022(10):112-115.
- [3]陈卫国.试论起重机械疲劳断裂可靠性的新进展[J].科技风,2022(05):117-119.
- [4]许建新.起重机机械构造及安全运行要求[J].中国设备工程,2020(17):120-121.