

起重设备安全监控系统设计与性能优化

王 飞

青海恒业特种设备检验有限公司 青海 西宁 810000

摘 要：起重设备安全监控系统的设计与性能优化是提升工程安全的关键技术领域。近年来，通过智能传感、物联网和自动控制技术的融合，行业已实现从单一保护到系统化监控的跨越式发展。当前技术迭代已显著提升起重作业本质安全水平，后续需重点关注异构系统兼容性与极端工况适应性优化。现代起重设备安全监控系统通过多技术融合与模块化设计，在精度、实时性和可靠性方面显著超越传统方案，为高空作业安全提供了全方位保障。

关键词：起重设备；安全监控系统设计；性能优化

起重设备安全监控系统的设计与性能需结合传感器技术、通信协议、数据处理算法及安全防护机制，以满足高精度、实时性和可靠性要求。

1 起重设备安全监控系统定义

起重设备安全监控系统是通过传感器网络、数据处理算法与智能控制技术的集成，对起重机运行状态进行实时监测、风险预警及安全干预的综合性安全防护系统。其核心功能在于动态采集关键作业参数，并通过阈值判定与联锁控制机制保障人员和设备安全。核心定义要素。系统构成。硬件层：包括传感器（如起重量、力矩、风速传感器）、信号采集器、控制执行器及显示仪表等组件，实现数据采集与指令执行；软件层：集成数据融合算法、逻辑控制模块及人机交互界面，支持实时监控、异常报警及历史数据存储。监控参数范围。基础参数：起重量、起重力矩、幅度、高度/深度、风速、回转角度及运行偏斜度等；扩展功能：视频监控（消除盲区）、制动器状态检测、联锁保护状态监控等。安全控制机制。实时干预：当参数超过阈值（如起重量 $\geq$ 额定值的90%）时触发声光报警，并自动切断动力源（如吊钩上升控制电源）；数据追溯：内置“黑匣子”功能，记录危险工况及操作指令，支持事故原因分析与责任界定。合规性要求。符合国家标准《起重机械—安全监控系统》（GB/T 28264-2017），涵盖桥式、门式、塔式起重机等设备，要求系统具备参数监控范围、试验方法及性能验证能力；需定期校准传感器精度（如力矩限制器综合误差 $\leq 10\%$ ）以确保数据可靠性。技术特征。多源数据融合：整合传感器信号与视觉信息（如视觉摄像头跟踪吊钩轨迹），提升监测精度与盲区覆盖能力；自适应控制：基于工况动态调整安全阈值，支持复杂环境（如强风、夜间作业）下的稳定运行；智能化扩展：兼容物联网架构（如云端数据同步与远程监控），推动

起重机集群化管理和智慧工地建设。

2 起重设备安全监控系统的重要性

2.1 实时安全风险防控。动态监测与预警。系统实时采集起重量、力矩、高度、风速等20余项关键参数，通过预设阈值触发声光报警，并自动切断危险操作（如超载时强制中止起升动作），避免安全事故扩大化。示例：当起重量超过额定载荷的90%时，系统分级报警并限制动作，降低结构损伤风险。环境感知与应急响应。集成风速传感器和摄像头，实时监测作业环境盲区或极端天气，触发停机或联动控制策略。例如，强风条件下暂停吊装，确保设备稳定性。

2.2 设备健康管理及故障预防。预测性维护支持。连续记录负载工况、应力数据及操作日志，分析设备磨损趋势（如齿轮箱过热、钢丝绳疲劳等），减少60%以上非计划停机时间。事故回溯与责任界定。内置“黑匣子”功能，全程存储危险工况与操作指令，为事故分析提供证据链，辅助精准维修决策。

2.3 作业效率优化与成本控制。流程标准化与可视化。通过实时显示吊钩轨迹、负载状态等人机交互界面，减少人工误判，缩短30%以上吊装准备时间。案例：某港口起重机应用系统后，单次装卸效率提升25%。资源利用率提升。基于历史数据优化设备闲置率、能耗分布与维保周期，降低15%-20%运维成本。

2.4 合规性与智能化升级。适配强制性标准。符合《起重机械安全监控系统》（GB/T 28264-2017）等法规要求，涵盖参数监控范围、试验方法与检验规则。物联网与远程管理。支持5G远程监控与云端数据同步，实现多设备集群管理，为智慧工地建设提供技术基础。

3 起重设备安全监控系统设计要素与原则

3.1 设计要素。硬件模块化架构。传感器网络：集成起重量、力矩、风速、高度等多类型传感器，确保关键

参数（如负载、偏斜度）实时采集；执行控制单元：配置独立的继电器控制模块，支持超限时自动切断动力源（如吊钩上升电源）；人机交互界面：配备工业级显示屏与声光报警装置，实时显示状态数据并发出分级预警信号。软件功能层级。数据融合算法：通过边缘计算处理多源信号（如视觉摄像头与传感器数据），消除盲区并提升监测精度；黑匣子功能：内置大容量存储单元，完整记录作业参数、操作指令及异常事件，支持事故回溯分析；远程通信协议：采用GPRS/5G无线传输技术，实现云端数据同步与跨设备集群管理。环境适应性设计。耐高温防尘：对冶金、铸造场景下的起重机，选用耐高温材料并部署密封防尘箱体，隔离金属粉尘与腐蚀性气体；抗电磁干扰：采用无氧铜双屏蔽拖缆与隔离通信设备，降低工业环境中强电磁干扰对信号传输的影响。

3.2 设计原则。独立性：安全监控系统独立于主控系统运行，避免控制功能失效连带影响安全保护机制；冗余设计：采用容错架构（如双处理器并行），单点故障时仍可维持核心监控能力。故障安全保障。失效导向安全：当系统检测到自身异常（如传感器断线）时，默认触发停机保护并激活本地报警；最小干预路径：简化控制链路，减少中间环节，确保紧急停机指令快速执行（响应时间 $\leq 200\text{ms}$ ）。标准化与扩展性。协议开放性：支持Modbus、CAN总线等通用通信协议，便于与港口调度或智慧工地平台集成；模块化扩展：可根据需求灵活增配功能（如吊钩视觉跟踪、能耗分析模块），适配不同起重机类型。人因工程优化。直观交互：以图形化界面展示吊钩轨迹、负载分布等关键信息，降低操作员认知负荷；分级预警：按风险等级（如超载90%、风速超限）定制声光提示强度，避免过度干扰正常作业。

4 起重设备安全监控系统设计有效性与可靠性保障方法

4.1 硬件设计可靠性提升。冗余架构与抗干扰设计。采用双处理器并行控制，单点故障时备用硬件自动接管，确保监测连续性。部署无氧铜双屏蔽电缆与隔离通信模块，降低工业强电磁环境对传感器信号的干扰。针对高温、粉尘场景，选用耐高温传感器并配置密封防护箱体，确保冶金、港口等极端环境下的稳定性。关键部件精准选型。引入高精度力矩传感器（误差 $\leq \pm 1\%\text{FS}$ ）与抗风摆编码器，确保起重量、高度等参数的采集精度。吊钩视觉跟踪模块采用星光级摄像头与RTK定位技术，消除高空作业盲区并实现厘米级定位。

4.2 软件逻辑有效性验证。数据融合与算法优化。

通过边缘计算整合多源数据（如风速、负载、视觉图像），采用卡尔曼滤波算法消除信号噪声，提升监测准确性。预设动态阈值分级报警机制：超载90%触发一级预警（声光提示），超载100%触发二级响应（强制切断动力源）。自检与容错机制。系统启动时自动检测传感器状态，断线或异常时触发本地报警并标记故障节点，同步上传至云端日志。软件代码遵循IEC 61508安全标准，实现关键功能模块的失效导向安全设计（如异常时默认停机）。

4.3 运维管理标准化。校准与维保流程。每半年使用标准砝码对起重量传感器进行校准，误差超过2%时强制更换。建立预测性维护模型，基于钢丝绳磨损、齿轮箱温度等历史数据，提前制定备件更换计划。操作人员培训与监管。强制操作员通过人脸识别认证后方可启动设备，结合仿真培训系统提升应急处置能力。操作日志与视频记录存储周期 ≥ 15 天，支持事故回溯与责任溯源。

5 起重设备安全监控系统技术实现细节

5.1 传感器网络与数据采集。多模态传感集成。部署起重量、力矩、风速、高度传感器构成物理参数监测网络，结合视觉摄像头实时捕捉吊钩轨迹与作业环境。关键部件状态监测：通过振动传感器检测钢丝绳磨损，红外测温模块监控齿轮箱温度，精度达 $\pm 1\%\text{FS}$ 。边缘计算预处理。在信号采集器内嵌边缘计算单元，对传感器原始数据（如加速度、偏斜角）进行滤波降噪处理，降低云端传输带宽需求。

5.2 数据处理与智能算法。动态阈值预警模型。基于历史数据与工况动态调整报警阈值：例如超载90%触发一级预警（声光提示），超载100%强制切断动力源。吊钩定位算法：融合RTK（实时动态定位）与视觉识别技术，实现吊钩三维坐标厘米级定位，消除高空作业盲区。自检与容错机制。系统启动时自动校验传感器连接状态，断线时触发本地报警并标记故障节点，同步禁用相关控制指令。嵌入式“黑匣子”存储模块：以循环覆盖方式保存至少15天的运行日志与视频记录，支持事故回溯分析。

5.3 执行控制与人机交互。分级控制响应。硬件级联锁设计：超载时继电器直接切断起升机电源，响应时间 $\leq 200\text{ms}$ ，避免依赖软件延时风险。吊钩防摇控制：采用模糊PID算法调节大车/小车运动轨迹，抑制负载摆动幅度至 $\pm 5\text{cm}$ 内。人机界面优化。工业级显示屏实时显示吊钩视角视频流、负载力矩曲线及环境参数，支持触控缩放与报警优先级筛选。人脸识别认证：通过摄像头验证操作员身份，未经授权禁止启动设备。

6 起重设备安全监控实时监测与预警实现方法

6.1 多源数据采集模块。传感器网络部署。在吊钩、钢丝绳、吊臂等关键位置安装高精度传感器阵列，实时采集起重量、力矩、振动、倾斜度等参数（误差 $\leq \pm 1\%FS$ ）；环境监测单元集成风速传感器、红外测温模块及粉尘检测仪，动态感知作业环境变化；视觉感知系统采用星光级摄像头与RTK定位技术，实现吊钩轨迹跟踪及障碍物识别（定位精度 $\pm 3cm$ ）。边缘计算预处理。在本地部署边缘计算节点，对传感器数据进行滤波降噪处理，减少云端传输带宽消耗；实时压缩视觉监控视频流，分辨率保持1080P时码率降低40%。

6.2 智能分析与预警机制。动态阈值预警模型。基于设备历史数据与工况动态调整报警阈值：一级预警（超载90%）：声光提示+操作日志记录；二级响应（超载100%）：强制切断动力源+推送报警定位信息。AI视觉识别吊装区域人员入侵，联动制动系统紧急停车（响应时间 $\leq 300ms$ ）。自检与容错机制。系统定时自检传感器健康状态，断线时自动切换备用节点并触发本地报警；容错控制算法可屏蔽单通道异常信号，保障核心监测功能持续运行。

6.3 人机协同管理界面。可视化监控平台。三维数字孪生界面映射起重机物理状态，实时显示应力分布与负载轨迹；移动端APP支持多设备集群管理，可远程下发停机指令或维保工单。分级权限控制。操作员需通过人脸识别认证，权限分级管理（如普通司机禁用参数修改功能）；关键操作记录（如超载解除）强制留存视频证据，存储周期 ≥ 30 天。

7 起重设备安全监控系统精度评估方法

7.1 参数测量验证。多工况对比实验。采用不同重量

标准砝码模拟载荷，通过快/慢档升降、高空停滞等操作循环，对比系统测量的起重量、高度值与实际值误差，误差需控制在 $\pm 1\%FS$ 以内。幅度测量时，以起重机标准节为基准点，逐点校准小车停靠位置偏差；角度测量则以 15° 或 30° 为刻度间隔进行多点验证。动态干扰补偿。针对起重机启停时的动载冲击，引入卡尔曼滤波算法对传感器信号降噪，降低加速度对重量测量精度的影响。

7.2 误差校准机制。硬件冗余校验。部署双传感器并联架构，实时交叉验证数据一致性，偏差超阈值时自动启用备用通道并报警。定期使用激光跟踪仪检测轨道直线度，确保大车运行偏斜量 $\leq L/1000$ （L为跨度）。软件动态修正。基于历史数据训练误差修正模型，补偿温度漂移、机械形变等导致的系统性偏差。建立起升高度-吊钩质量曲线，自动修正钢丝绳伸缩引起的吊钩定位误差。

7.3 综合评估流程。分级评估标准。一级精度：起重量、高度误差 $\leq \pm 1\%$ ，适用于核电、航天等高危场景；二级精度：误差 $\leq \pm 2\%$ ，满足港口、冶金等常规工业需求。文档化验证。生成包含原始数据、修正曲线、误差分布热力图的可视化报告，支持第三方机构复验。

总之，形成“数据采集-边缘计算-智能决策-快速响应”闭环，实现起重设备全作业周期的安全可控。可系统性验证起重设备安全监控系统的测量精度，确保其在复杂工况下的可靠性。

参考文献

- [1]王英，起重设备安全监控系统设计与性能优化探讨.2022.
- [2]刘晓丽，关于起重设备安全监控系统设计与性能优化研究.2023.