

机电一体化设备的安全控制与保护研究

张振栋 412724198604167930

摘要：随着工业自动化进程的不断推进，机电一体化设备在制造业、交通运输、能源化工等多个领域的应用范围持续扩大，设备结构的集成化与运行过程的复杂化也对安全控制与保护体系提出了更高要求。本文从机电一体化设备安全风险的主要来源切入，分析了当前安全控制体系存在的常见问题，结合传感技术、可编程逻辑控制、人工智能等技术的发展，探究机电一体化设备安全控制与保护系统的优化路径，提出了分层级安全防护架构的构建思路，旨在为提升机电一体化设备运行安全性、降低生产安全事故概率提供理论参考。

关键词：机电一体化；安全控制；设备保护；工业安全

一、机电一体化设备安全风险的主要来源

机电一体化设备是集机械结构、电子控制、信息技术于一体的集成化设备，其运行过程涉及机械传动、电力驱动、信号传输等多个环节，任何一个环节出现故障都可能引发安全事故。从风险产生的源头来看，机电一体化设备的安全风险主要可分为四类，分别是机械结构风险、电气系统风险、控制逻辑风险以及环境与人为风险。

机械结构风险是机电一体化设备最常见的风险类型，主要来自于运动部件的失控、结构疲劳老化或者安装偏差。机电一体化设备普遍包含高速旋转的主轴、往复运动的传动机构、自动化抓取的机械臂等运动部件，如果设备的限位装置、制动装置失效，运动部件超出预设行程就可能撞击设备本体或者作业人员，引发机械伤害事故。此外，长期运行过程中，设备的承力结构会不断承受交变应力，容易产生疲劳裂纹，一旦结构断裂就会造成严重的生产安全事故。

电气系统风险主要来自于电力供应与电子控制单元的故障。机电一体化设备的运行依赖稳定的电力供应，高压线路绝缘老化、短路、过载等问题不仅会烧毁电气元件，还可能引发电气火灾或者触电事故。另一方面，电子控制单元受到电磁干扰、温度湿度变化影响时，可能出现信号传输失真或者控制指令出错的问题，导致设备运行失控，进而引发安全事故。随着机电一体化设备智能化程度提升，大量传感器、通信模块接入设备控制网络，网络安全风险也逐渐成为电气控制风险的新来源，非法入侵控制网络可能导致设备被恶意操控，造成大规模生产安全事故。

控制逻辑风险主要来自于安全控制程序设计缺陷或者参数设置错误。机电一

体化设备的运行完全依赖控制程序的指令输出，如果程序设计阶段没有考虑到设备异常运行场景的处理逻辑，当设备出现过载、异常振动等故障时，控制系统无法及时触发保护动作，就会导致故障进一步扩大。部分企业在对机电一体化设备进行参数调整或者程序升级时，没有进行完整的安全测试，修改后的控制逻辑存在漏洞，也会给设备运行埋下安全隐患。

二、当前机电一体化设备安全控制与保护体系存在的问题

当前多数生产企业针对机电一体化设备已经建立了基础的安全控制与保护体系，但在设备集成度不断提升、运行复杂度不断增加的背景下，现有体系仍然存在不少短板，主要体现在两个方面：安全保护滞后性、分层防护缺失。

首先，传统安全保护模式多为事后触发型，存在明显的滞后性。传统机电一体化设备的安全保护多依赖阈值触发式保护，即当设备故障已经发生、运行参数超过预设的安全阈值后，控制系统才会触发停机保护动作。这种保护模式只能在故障发生后避免事故扩大，无法在故障萌芽阶段提前预警并干预，仍然会造成一定的设备损坏，甚至可能在阈值触发前就已经引发安全事故。例如，机电设备主轴轴承的磨损是一个渐进发展的过程，在磨损量达到预设的振动阈值之前，传统保护系统不会发出警报，而当振动超过阈值时，轴承往往已经发生严重损坏，甚至已经引发主轴抱死等严重故障。

其次，多数企业的安全控制体系缺乏分层分级的防护架构，安全风险应对能力不足。当前很多企业将安全保护的核心放在终端执行层，仅依靠终端的限位开关、过载继电器、紧急停止按钮等基础保护装置实现安全防护，缺乏过程监测层、风险预警层、应急响应层等多个层级的防护体系。当终端保护装置本身发生故障时，整个安全系统就会完全失效，没有其他层级的保护措施进行兜底。同时，不同类型的安全保护装置之间缺乏联动，某一个环节监测到风险信号后，无法同步触发整个系统的联动保护动作，导致风险应对不及时。

三、机电一体化设备安全控制与保护体系的优化策略

针对当前机电一体化设备安全控制与保护体系存在的问题，结合现代传感、物联网、人工智能等技术的发展，可从构建分层防护架构、推广预测性安全保护、完善联动安全控制逻辑三个维度对体系进行优化。

1. 构建分层级一体化安全防护架构

构建分层级的安全防护架构，是提升机电一体化设备安全防护能力的基础，可将安全防护体系从下到上分为终端执行层、过程监测层、风险预警层、应急管

理层四个层级，实现风险的层层防控。终端执行层保留基础的硬件保护装置，包括紧急停止按钮、限位开关、过载保护器、安全光栅等，作为安全防护的最后一道防线，在风险发生时直接触发硬件保护动作，切断设备动力输出；过程监测层通过多类型传感器采集设备运行的核心参数，包括振动、温度、电流电压、压力、位置等数据，实时传输到控制单元，为风险判断提供数据支撑；风险预警层对采集到的运行数据进行实时分析，识别异常运行特征，提前发出故障预警，提醒运维人员进行处理；应急管理層则针对不同类型的安全风险预设应急处理流程，当风险发生后，自动触发对应的应急响应动作，包括降速运行、局部停机、全面停机、发出声光警报等，最大限度降低事故造成的损失。各层级之间实现数据互通与逻辑联动，任何一个层级监测到风险信号，都能触发上游层级提前干预，避免风险进一步发展。

2. 推广基于预测性维护的主动安全保护

将传统的事后触发式保护转变为主动预测性保护，是提升机电一体化设备安全控制水平的核心方向。依托物联网技术实现机电一体化设备运行数据的全采集，结合机器学习算法对设备的运行状态进行健康评估，通过分析历史故障数据与运行参数的变化规律，建立设备故障预测模型，能够在故障萌芽阶段识别异常征兆，提前安排维护作业，将风险消除在萌芽阶段。例如，针对机电一体化设备的传动轴承，可通过振动传感器采集轴承的振动信号，通过频谱分析识别轴承磨损的早期特征，在磨损量还没有影响设备正常运行的时候就进行更换，避免轴承抱死引发更大的安全事故。

四、结语

机电一体化设备的安全控制与保护是工业生产安全领域的重要研究内容，随着设备集成化、智能化程度的不断提升，安全控制体系也需要不断优化升级。通过构建分层防护架构，推广预测性主动安全保护，实现安全控制与生产控制的深度融合，能够有效提升机电一体化设备的运行安全性，降低安全事故发生的概率，保障生产作业的顺利开展。

参考文献

- [1] 张进生, 王经坤, 王志坚. 机电一体化设备安全技术与管理[M]. 机械工业出版社, 2018.
- [2] 李勇, 王健. 工业机电一体化设备的安全控制系统设计研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(5): 187-192.

[3] 王少雷. 预测性维护在机电一体化设备安全管理中的应用[J]. 设备管理与维修, 2021, (12): 14-16.

[4] 刘畅, 张明. 工业互联网背景下机电一体化设备网络安全防护研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(8): 921-927.