

核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系构建

高祥成

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518038

摘要: 针对核燃料操作设备PMC系统运行维护难题, 构建机电仪一体化检修体系。以系统性框架整合组织管理、技术支持等子体系, 应用状态监测、预防性维护等技术, 强化人员培训。实践表明, 该体系显著降低设备故障率, 延长维修周期, 提升维修效率与安全性, 有效控制维修成本, 为核电站PMC系统稳定运行提供可靠保障。

关键词: 核燃料操作设备; PMC系统; 机电仪一体化

1 核燃料操作设备 PMC 系统概述

1.1 PMC系统的功能

核燃料操作设备PMC系统(PlantManagementandControlSystem)作为核电站核燃料操作的核心控制中枢, 承担着确保核燃料装卸、运输、储存等关键环节安全、高效运行的重任。其首要功能是实现对核燃料操作流程的精准控制, 通过预设的操作程序和逻辑, 自动或手动执行核燃料组件的抓取、吊运、定位等动作, 避免因人为操作失误引发安全事故。在实时监测方面, PMC系统集成了大量的传感器和监测设备, 能够对核燃料操作过程中的温度、压力、位置、运动状态等参数进行不间断监测。一旦监测数据出现异常, 系统会立即触发报警机制, 并根据预设的应急预案采取相应措施, 如暂停操作、启动冷却系统等, 以保障核燃料和设备的安全^[1]。PMC系统还具备数据管理与分析功能, 它能够收集、存储操作过程中的各类数据, 通过数据分析算法挖掘数据背后的潜在信息, 为设备的优化运行、故障预测以及后续的检修维护提供科学依据, 有助于提高核燃料操作的整体效率和安全性。

1.2 PMC系统的结构与组成

PMC系统采用分层分布式架构, 由管理层、控制层和设备层组成。管理层作为最高层级, 由服务器与工作站构成, 通过人机交互界面实现系统运行管理、数据处理及操作指令下达, 可实时监控核燃料操作全流程并配置参数。控制层是连接上下层的桥梁, 包含PLC、DCS等控制设备, 负责将管理层指令转化为控制信号传输至设备层, 同时反馈设备状态信息。该层具备逻辑处理能力, 能依据预设策略自主控制设备, 保障操作稳定性。设备层为底层执行单元, 涵盖起重机、抓取装置等机械设备及位移、压力、温度等传感器。前者负责完成核燃料抓取、吊运等实际操作, 后者实时采集运行状态与环境参数并反馈至控制层。三层结构相互协作, 共同构建

了完整高效的PMC系统。

1.3 PMC系统的运行与维护现状

当前, PMC系统在核电站运行中占据重要地位, 但也面临诸多挑战。运行层面, 随着核电站服役年限增长, 设备老化问题加剧, 部分传感器与执行机构精度降低, 致使核燃料操作准确性受影响。加之核燃料操作的特殊性, 要求PMC系统必须7×24小时不间断稳定运行, 一旦故障便可能引发严重安全事故, 这对系统可靠性与稳定性提出严苛要求。维护方面, 传统定期检修方式存在明显弊端, 过度维护易造成资源浪费, 还可能因频繁拆卸损坏设备; 而维护不及时又会使潜在故障无法及时排除, 增大安全风险。并且, 随着PMC系统持续升级、结构日益复杂, 对维护人员的技术水平要求不断提高, 现有维护人员的知识与技能已难以适配新型设备和技术, 导致维护效率与质量亟待提升。

2 机电仪一体化检修体系理论基础

2.1 机电一体化技术概述

机电一体化技术是机械技术、微电子技术、信息技术、自动控制技术、传感检测技术等多种技术相互融合的产物。它通过将机械系统与电子控制系统有机结合, 使设备具备智能化、自动化的功能, 能够实现对复杂任务的精确控制和高效执行^[2]。在机械技术方面, 主要涉及机械结构设计、制造工艺等内容, 确保设备具备良好的机械性能和承载能力; 微电子技术则为设备提供了核心的控制单元, 如单片机、微处理器等, 实现对设备运行的精确控制; 信息技术使设备能够实现数据的传输、存储和处理, 为设备的智能化运行提供支持; 自动控制技术能够根据预设的程序和算法, 自动调节设备的运行参数, 保证设备稳定运行; 传感检测技术通过各类传感器实时采集设备的运行状态信息, 为控制系统提供反馈, 实现闭环控制。机电一体化技术的应用, 显著提高设备的性能、可靠性和自动化程度, 在工业生产、交通运

输、航空航天等领域得到广泛应用。

2.2 机电仪一体化检修的概念

机电仪一体化检修是针对机电仪一体化设备开展的一种综合性检修模式。它打破了传统机械、电气、仪表专业检修相互独立的界限，强调从设备的整体功能和系统运行的角度出发，运用多学科知识和技术手段，对设备进行全面、系统的检测、诊断、维修和维护。这种检修模式不仅关注设备的单个部件或子系统的故障，更注重分析各部件、各系统之间的相互关联和影响，通过对设备运行数据的综合分析和处理，准确判断设备的故障原因和潜在隐患。机电仪一体化检修还引入了先进的状态监测和故障诊断技术，能够实时掌握设备的运行状态，提前预测设备故障，实现预防性维护，从而提高设备的可靠性和可用性，降低维修成本和停机时间，保障设备的安全、稳定运行。

2.3 关键检修技术与方法

2.3.1 状态监测与故障诊断技术

状态监测与故障诊断技术是机电仪一体化检修的核心技术之一。它通过在设备上安装各类传感器，如振动传感器、温度传感器、电流传感器等，实时采集设备运行过程中的振动、温度、电流、电压等参数，并将这些数据传输到监测系统进行分析处理。利用信号处理、模式识别、人工智能等技术，对采集到的数据进行特征提取和分析，与设备正常运行状态下的数据进行对比，判断设备是否存在故障以及故障的类型、程度和位置。例如，通过分析设备振动信号的频谱特征，可以判断设备是否存在不平衡、不对中、轴承故障等问题；通过监测设备的温度变化，能够及时发现设备过热故障。状态监测与故障诊断技术能够实现设备故障的早期预警，为设备的维修决策提供科学依据，避免设备故障的扩大和突发停机事故的发生。

2.3.2 设备预检与预防性维护

设备预检是在设备正常运行状态下，通过对设备进行定期或不定期的检查、测试，及时发现设备存在的潜在问题和隐患。预检内容包括设备的外观检查、性能测试、参数测量等，通过对预检结果的分析，评估设备的运行状况和健康水平。预防性维护则是根据设备的运行状态、使用年限、故障历史等信息，制定科学合理的维护计划，在设备故障发生前对设备进行维护和保养，如更换易损件、调整设备参数、润滑设备部件等。预防性维护能够有效降低设备故障率，延长设备使用寿命，减少设备维修成本和停机时间。与传统的事后维修相比，预防性维护更具主动性和前瞻性，能够提高设备的可靠

性和可用性，保障生产的连续性和稳定性。

2.3.3 精密维修与更换技术

精密维修与更换技术是针对机电仪一体化设备中高精度、复杂部件的维修和更换技术。由于这些部件的精度要求高、结构复杂，传统的维修方法往往难以满足维修需求。精密维修技术包括精密加工、表面处理、零部件修复等技术，能够对损坏的零部件进行修复，恢复其原有性能和精度。在更换零部件时，需要采用精密安装和调试技术，确保新更换的零部件与设备其他部件之间的配合精度和运行性能。例如，在更换数控机床的滚珠丝杠时，需要精确控制其安装位置和预紧力，通过精密测量和调试，保证机床的定位精度和运动精度。精密维修与更换技术能够提高设备的维修质量和效率，延长设备的使用寿命，降低设备的维修成本和备件库存。

3 核燃料操作设备 PMC 系统机电仪一体化检修体系构建

3.1 检修体系框架设计

核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系框架的设计，以保障PMC系统安全、稳定、高效运行为目标，遵循系统性、科学性、实用性的原则。该框架主要由组织管理、技术支持、质量控制和安全保障四个子体系构成。组织管理子体系负责明确检修工作的职责分工和 workflow，建立完善的检修管理制度和考核机制，确保检修工作有序开展^[3]。技术支持子体系整合机电仪一体化相关技术资源，为检修工作提供先进的检测、诊断、维修技术和设备支持。质量控制子体系制定严格的检修质量标准 and 验收规范，对检修过程和结果进行全程监控和评估，保证检修质量符合要求。安全保障子体系建立健全安全管理制度和应急预案，加强检修过程中的安全防护和 risk 管控，确保检修人员和设备的安全。这四个子体系相互关联、相互支撑，共同构成一个完整的检修体系框架。

3.2 检修技术与方法应用

在核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系中，充分应用上述关键检修技术与方法。在状态监测与故障诊断方面，在PMC系统的关键设备和部件上安装振动、温度、压力等多种传感器，构建实时监测网络，对系统运行状态进行全方位监测。利用大数据分析和人工智能算法，对采集到的海量数据进行深度挖掘和分析，及时发现设备潜在故障并进行预警。设备预检与预防性维护方面，制定详细的预检计划和预防性维护策略，根据PMC系统设备的运行特点和历史故障数据，确定合理的预检周期和维护内容。定期对设备进行检查、保养和部件更

换,降低设备故障率。对于精密部件的维修和更换,采用精密维修与更换技术,确保维修质量和设备性能。

3.3 检修人员的培训与能力提升

检修人员的专业素质和技能水平直接影响着机电仪一体化检修体系的实施效果。因此加强检修人员的培训与能力提升至关重要。首先,制定系统的培训计划,培训内容涵盖机电一体化技术基础、PMC系统原理与结构、检修技术与方法、安全操作规程等方面。通过理论授课、实践操作、案例分析等多种培训方式,提高检修人员的理论知识水平和实际操作能力。其次,鼓励检修人员参加行业内的技术交流和培训活动,学习先进的检修技术和经验,拓宽知识面和视野。同时建立完善的考核和激励机制,对培训效果进行评估,对表现优秀的检修人员给予奖励,激发检修人员的学习积极性和工作热情,打造一支高素质、专业化的检修队伍,为核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系的有效实施提供人才保障。

4 核燃料操作设备 PMC 系统机电仪一体化检修体系实施效果评估

4.1 设备故障率与维修周期的变化

通过实施核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系,设备故障率得到了显著降低。在实施前,由于传统检修方式的局限性,设备故障时有发生,平均故障率较高。而实施后,借助状态监测与故障诊断技术,能够及时发现设备潜在故障并进行处理,将故障消除在萌芽状态。预防性维护策略的实施,有效减少了设备因正常磨损和老化导致的故障。设备维修周期也得到了合理延长,以往定期检修模式下,维修周期往往基于经验设定,存在一定的盲目性。而机电仪一体化检修体系根据设备的实际运行状态制定维修计划,避免了过度维护和维修不及时的问题,使设备在满足安全运行要求的前提下,尽可能延长维修周期,减少设备停机时间,提高设备的利用率。

4.2 维修成本与维修效率的对比

在维修成本方面,实施机电仪一体化检修体系后,虽然在前期需要投入一定的资金用于购置先进的检测设备和开展人员培训,但从长期来看,维修成本得到了有效控制。一方面,设备故障率的降低减少因设备故障

导致的直接维修费用和生产损失;另一方面,预防性维护和精密维修技术的应用,延长设备和零部件的使用寿命,降低备件更换成本^[4]。维修效率也有明显提升,传统检修方式下,由于故障诊断不准确、维修技术落后等原因,维修工作往往耗时较长。而机电仪一体化检修体系采用先进的检测诊断技术,能够快速准确地定位故障原因,制定合理的维修方案。专业化的检修队伍和科学的维修流程,提高维修工作的效率,缩短了设备维修时间,保障核电站的正常生产运行。

4.3 安全性与可靠性的提升情况

核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系的实施,显著提升了系统的安全性和可靠性。通过实时状态监测和故障预警,能够及时发现并处理设备安全隐患,避免因设备故障引发的核安全事故。预防性维护和精密维修技术的应用,确保了设备始终处于良好的运行状态,提高设备的可靠性和稳定性。安全保障子体系的建立和完善,加强检修过程中的安全管理和风险管控,保障检修人员的人身安全。在系统运行过程中,机电仪一体化检修体系能够有效应对各种突发情况,确保核燃料操作过程的安全可靠,为核电站的安全稳定运行提供有力保障。

结束语

核燃料操作设备PMC系统机电仪一体化检修体系,通过多技术融合与科学管理,切实解决了传统检修弊端。未来,可进一步深化智能化技术应用,探索更精准的故障预测模型与智能决策系统,持续优化检修体系,以适应核电行业更高的安全与效率要求,为核电产业高质量发展筑牢技术根基。

参考文献

- [1] 周国.核燃料操作设备铅垂度测量调整方法的研究及应用[J].中国核电,2023,16(3):417-426.
- [2] 张尉.基于物联网的机电一体化设备实时监测与维护系统设计[J].家电维修,2025,(05):83-85.
- [3] 郝立国.基于机电一体化的炼钢设备故障诊断与预测技术[J].冶金与材料,2025,45(02):121-123.
- [4] 赵长梅,段有艳,韩珂.机电一体化设备的故障诊断方法与预测性维护技术应用[J].造纸装备及材料,2025,54(02):13-15.