

核电厂机械设备安装调试技术的探究

刘 凯

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 核电厂作为清洁能源的重要组成部分,其安全稳定运行关乎能源战略与公众安全。本文围绕核电厂机械设备安装调试技术展开系统探究。剖析其技术特殊性与关键难点,从安全性、高精度及环境适应性阐述技术特性,指出系统集成、设备大型化等挑战;介绍了安装前技术准备、关键安装技术及调试技术,包括图纸审查、主设备安装、调试阶段划分等核心内容。研究表明,通过规范技术流程、应用先进工艺及数字化手段,可有效提升核电厂机械设备安装调试质量与安全性,为核电厂建设与稳定运行提供技术支撑。

关键词: 核电厂; 机械设备; 安装技术; 调试技术

引言: 机械设备作为核电厂运行的物质基础,安装调试技术直接影响核电厂的可靠性与安全性。但核设备安装调试面临高辐射、高精度等特殊要求,技术难度大且风险高。随着核电技术发展,对安装调试技术的精细化、智能化需求日益迫切。本文系统梳理核电厂机械设备安装调试技术要点,分析技术难点与应对策略,旨在为核电工程实践提供理论与技术参考。

1 核电厂机械设备安装调试的技术特点

1.1 技术特殊性

核电厂机械设备的安装调试技术特殊性,集中体现在安全性、精度和环境适应性三个维度。(1) 安全性。核设备直接关系核反应堆的稳定运行与核安全屏障完整性,任何安装偏差或调试疏漏都可能引发放射性物质泄漏等灾难性后果,因此需严格遵循国际原子能机构(IAEA)核安全法规及国内核安全导则,确保设备密封性、抗震性达到最高标准。(2) 高精度。要求贯穿安装全程,例如反应堆压力容器的定位误差需控制在毫米级以内,主管道焊接需满足近乎零缺陷的质量标准,这对安装工艺、检测技术提出极高挑战。(3) 环境适应性。核设备长期处于高温、高压、强辐射环境,安装调试阶段需模拟运行工况进行多轮测试,确保设备材料、连接结构在极端条件下仍具备可靠性,同时施工人员需穿戴专业防辐射装备,采用特殊防护措施避免辐射暴露。

1.2 关键难点

核电厂机械设备安装调试面临的技术难点,主要涉及系统复杂性、设备大型化及特殊工艺要求。(1) 系统集成难度高。核电厂包含反应堆冷却、蒸汽供应、安全壳隔离等数十个子系统,各系统设备间接口繁多,安装时需精准协调管道、电气、仪表等多专业交叉作业,任何环节误差都可能导致系统功能失效。(2) 设备大型化

与运输安装挑战。如百万千瓦级核电机组的蒸汽发生器重达数百吨,需采用特制吊装设备与专用运输通道,且在狭窄的安全壳内完成高精度就位,对施工方案设计和现场操作能力要求极高。(3) 特殊工艺实现困难。核级焊接需采用窄间隙自动焊、电子束焊等特种技术,确保焊缝质量达到ASME标准;设备密封性测试需检测微小泄漏率(如氦质谱检漏精度达 $10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$),常规检测手段难以满足需求。调试阶段需模拟核事故工况进行应急系统测试,既要保证设备安全运行,又需验证极端条件下的响应能力,进一步加剧了技术实施难度^[1]。

2 核电厂机械设备安装前的技术准备与方案设计

2.1 图纸审查与技术交底

核电厂机械设备结构复杂、系统庞大,涉及土建、机械、电气等多专业协同,需组织设计方、施工方、监理方开展联合审查。审查过程中,利用三维建模与BIM(建筑信息模型)技术,对设备空间布局、管道走向、接口位置进行可视化模拟,提前发现设计冲突或不合理之处。通过BIM模型可直观检查蒸汽发生器与主管道的连接角度是否符合流体力学要求,避免安装后返工。技术交底环节则需将设计意图精准传递给施工人员,重点讲解设备安装的关键技术参数、质量标准及安全注意事项,通过书面文件与现场演示相结合的方式,确保施工团队全面掌握技术要点。

2.2 设备开箱检验与仓储管理

设备到货后,严格的开箱检验是确保设备质量的重要关卡。开箱前需制定详细的检验计划,明确检验项目、方法和验收标准,对设备外观、数量、随箱文件(如质量证明、安装手册)进行逐项核对。针对核级设备,需重点检查放射性表面污染情况,采用便携式辐射检测仪进行实时监测,确保设备无放射性超标风险。仓

储管理同样不容忽视,由于核电厂设备多为精密部件,对存储环境要求严苛。设备需分区存放,如大型主设备需设置专用支架,避免受压变形;电子元件应存放于恒温恒湿、防静电的环境中。建立完善的仓储管理系统,通过RFID技术对设备出入库进行动态跟踪,确保设备存储、运输过程中的可追溯性与安全性。

2.3 安装工艺方案制定

安装工艺方案是指导现场施工的核心文件,需综合考虑设备特性、现场条件与安全规范。对于大型设备吊装,需运用有限元分析软件对吊装方案进行力学模拟,优化吊点位置、钢丝绳规格及吊装路径,确保吊装过程安全稳定。定位校准方面,运用激光准直仪、全站仪等精密测量设备,将设备安装误差控制在毫米级,确保设备轴线与设计图纸完全吻合。针对核级焊接、管道吹扫等关键工序,需制定专项工艺规程,明确焊接参数、无损检测比例、吹扫介质及合格标准,通过工艺评定试验验证方案可行性,为现场施工提供可靠的技术依据^[2]。

3 核电厂机械设备安装关键技术

3.1 主设备安装技术

核电厂主设备如反应堆压力容器、蒸汽发生器等,是核岛的核心组成部分,其安装质量直接关系核安全屏障的完整性。主设备安装的核心技术围绕以下方面展开。(1)在定位校准方面。采用高精度测量技术确保设备轴线与设计基准的一致性。通常运用激光跟踪仪、全站仪等设备,结合三维坐标系统,对设备的水平度、垂直度、同心度进行实时监测与调整,误差控制在毫米级甚至亚毫米级。安装过程中,需考虑混凝土基础沉降、环境温度变化等因素对设备位置的影响,通过预留补偿量和动态校准策略,保证设备长期运行稳定性。(2)固定支撑技术。旨在保障主设备在地震、高温高压等极端工况下的结构安全性。采用预埋锚栓、抗震阻尼器等装置,将设备与基础牢固连接,并通过有限元分析优化支撑结构的力学性能。如在反应堆压力容器底部设置弹性隔振装置,可有效吸收振动能量,降低地震对设备的冲击。(3)密封处理。主设备的法兰连接、贯穿件接口等部位,需采用金属缠绕垫片、O型密封圈等密封材料,并配合螺栓预紧力控制技术,确保密封面的均匀压紧。安装后通过氦质谱检漏、压力测试等手段,对密封性能进行严格验证,泄漏率需满足核安全法规要求。

3.2 管道系统安装技术

核电厂管道系统承担着冷却剂输送、蒸汽传输等关键功能,其安装技术包含以下三个核心环节。(1)焊接工艺。核级管道多采用厚壁合金钢材材料,采用窄间

隙自动焊、热丝TIG焊等特种焊接技术,以减少焊接变形、提高焊接效率和质量。焊接过程中,需严格控制焊接电流、电压、层间温度等参数,并通过焊接工艺评定(PQR)验证工艺的可靠性。完成焊接后,采用射线检测(RT)、超声检测(UT)等无损检测方法,对焊缝内部缺陷进行100%检测,确保焊接接头的完整性。(2)清洁度控制。安装前对管道内壁进行化学清洗、机械打磨等预处理,去除油污、铁锈等杂质;安装过程中采用封口保护、充氮保护等措施,防止二次污染。系统安装完成后,通过蒸汽吹扫、水冲洗等方式,进一步清除残留异物,并采用颗粒计数仪、油分检测仪等设备对清洁度进行定量检测。(3)应力消除技术。用于降低管道因热胀冷缩、机械振动产生的应力。通过合理布置膨胀节、支吊架,优化管道走向,减少应力集中;对焊接接头进行焊后热处理(PWHT),消除残余应力,提高材料韧性和抗疲劳性能。运用有限元分析软件对管道应力分布进行模拟,指导应力消除方案的设计。

3.3 转动设备安装技术

核电厂转动设备(如核主泵、风机)的安装关键在于对中调试、振动控制和润滑密封,具体如下:(1)对中调试。采用激光对中仪对电机与泵、风机等设备的轴系进行精确校准,控制同轴度误差在允许范围内。对中过程需考虑设备运行时的热膨胀因素,预留适当的补偿量,并通过多次复测验证对中精度。(2)振动控制技术。通过优化设备安装结构和运行参数,降低振动幅值。在设备基座设置隔振垫、弹簧阻尼器等减振装置,隔离振动传递;调整转子动平衡,减少因质量分布不均引起的振动。运行过程中,利用振动监测系统实时采集振动数据,通过频谱分析诊断振动原因,及时采取调整措施。(3)润滑密封。采用高性能润滑油脂和密封材料,如机械密封、迷宫密封等,防止润滑油泄漏和介质侵入。安装时需严格控制密封间隙、润滑系统压力等参数,并定期对润滑油脂的理化性能进行检测,确保润滑效果。

3.4 特殊环境设备安装技术

核电厂安全壳内、放射性区域等特殊环境下的设备安装,需克服辐射防护、空间限制和抗地震设计等技术难题,具体如下:(1)辐射防护。施工人员需穿戴铅防护服、呼吸防护装置等个人防护装备,并采用远距离操作工具(如机械手臂)减少人员受照剂量。通过辐射监测系统实时监控作业区域辐射水平,动态调整施工方案,确保人员安全。(2)空间限制要求采用精细化安装技术。由于安全壳内空间狭小、设备布置密集,需采用

模块化安装方法,将大型设备拆解为多个模块,在安全外壳外预组装后再进行整体吊装。利用三维建模技术优化安装顺序和路径,避免设备碰撞干涉。(3)抗地震设计。设备需采用抗震支吊架、限位装置等加固措施,并通过抗震试验验证设备在地震工况下的结构完整性和功能可靠性^[3]。安装过程中,严格控制设备与结构的连接强度,确保地震时设备不发生位移、倾倒等失效情况。

4 核电厂机械设备调试技术

4.1 调试阶段划分与逻辑关系

核电厂机械设备调试遵循以下“单体—系统—联合”的递进逻辑,各阶段相互关联且验证标准逐级提升。(1)单体调试。聚焦单台设备的性能验证,对泵、阀门、风机等进行空载试运行,检测设备机械性能、电气参数及控制功能,确保设备自身无缺陷;(2)系统调试。以子系统为对象,如反应堆冷却系统、蒸汽供应系统,通过模拟介质循环、压力加载等操作,验证系统内设备间的联动性与参数匹配性;(3)联合调试。则将核岛、常规岛及辅助系统整合,模拟机组正常运行、启停及事故工况,检验全厂系统响应的协调性与安全性。各阶段需制定详细的调试大纲与验收准则,前一阶段未达标不得进入下一阶段,形成闭环质量控制体系。

4.2 功能性调试核心技术

功能性调试围绕以下压力测试、泄漏率检测、性能验证等核心技术展开,确保设备满足设计功能与安全要求。(1)压力测试。用于验证承压设备及管道的强度与密封性,采用水压试验或气压试验模拟运行工况压力,通过分级升压、保压观测,检测设备是否存在变形、渗漏;(2)泄漏率检测。针对核安全关键系统,采用氦质谱检漏技术量化微小泄漏量,对法兰连接、焊接接口等薄弱部位进行100%检测,泄漏率需符合ASME等国际标准;(3)性能验证。则依据设备类型开展专项测试,如核主泵需进行流量、扬程、效率测试,阀门需验证启闭时间、密封性及远程控制响应速度,确保设备性能参数达到设计指标。调试过程中同步采集振动、温度、应力等数

据,建立设备运行基线,为后期状态监测提供依据。

4.3 自动化控制系统调试技术

自动化控制系统(如DCS系统)与机械设备的协同调试是实现核电厂安全运行的核心,具体如下:(1)联动测试。通过模拟生产信号触发设备动作,验证控制系统指令传输的准确性与及时性,如在反应堆功率调节试验中,检测控制信号与控制棒驱动机构响应的一致性;(2)冗余系统验证。对关键设备的备用控制通道进行功能测试,确保主系统故障时备用系统无缝切换;(3)安全联锁调试。重点验证保护系统逻辑,通过模拟超温、超压等异常工况,检验系统触发紧急停堆、隔离措施的可靠性;(4)人机界面优化。则针对操作站显示界面、报警功能进行测试,确保操作人员能准确获取设备状态信息并及时响应。调试过程需结合故障注入技术,人为设置通信中断、传感器失效等模拟故障,全面检验系统的容错能力与故障诊断功能,最终实现自动化控制系统与机械设备的深度融合与安全互锁^[4]。

结束语:核电厂机械设备安装调试技术是一项复杂且专业性强的系统工程。从前期技术准备到关键安装环节,再到调试阶段的层层验证,每个步骤都需严格把控。随着核电行业向更高安全性、智能化方向发展,未来需持续探索数字化孪生、智能检测等新技术的应用,完善质量与安全管理体系。通过不断优化技术方案、加强跨专业协同,进一步提升核电厂机械设备安装调试水平,为核电事业的可持续发展筑牢技术根基。

参考文献

- [1]徐绍强,张均栋.机械设备安装调试的关键技术与对策浅析[J].门窗,2020(14):167-168.
- [2]母雯钰,王迪芬,唐涛,等.核电厂机械设备老化机理调研分析[J].核工程研究与设计,2021(6):53-59.
- [3]温亮,李盛杰,顾明洲,等.机械设备故障安全在核电厂中的应用探讨[J].山东电力技术,2021,48(4):68-71.
- [4]孙想文.核电厂通用机械设备现场安装问题分析及对策[J].机械与电子控制工程,2022,4(7):18-19