

核电项目 EPC 模式下多接口协调管理策略研究

张传榕

中广核惠州核电有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14335

[摘要] 本文针对核电项目具有技术复杂、安全等级高、建设周期长、参建单位多等特点,结合EPC总承包模式的组织架构特征,系统分析了核电工程多接口管理面临的主要挑战。从技术接口、管理接口、合同接口三个维度构建协调管理框架,提出基于全生命周期视角的接口识别方法,建立矩阵式协调组织体系,创新性提出基于数字化平台的动态监控机制。研究结果表明,通过实施标准化接口管理流程、强化设计主导作用、建立跨专业协同机制等策略,可显著提升核电项目EPC模式下的接口管理效率,为同类工程实践提供理论参考。

[关键词] 核电工程; EPC总承包; 接口管理; 协同机制; 项目管理

中图分类号: TM623 **文献标识码:** A

Research on Multi-Interface Coordination Management Strategies in Nuclear Power Projects under EPC Mode

Chuanrong Zhang

CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd.

[Abstract] Given the characteristics of nuclear power projects, such as technical complexity, high safety requirements, long construction cycles, and multiple participating entities, this study systematically analyzes the key challenges in multi-interface management under the EPC (Engineering, Procurement, and Construction) general contracting model. A coordination management framework is constructed from three dimensions—technical interfaces, managerial interfaces, and contractual interfaces—while proposing a lifecycle-based interface identification method, establishing a matrix-style coordination organizational system, and innovatively introducing a dynamic monitoring mechanism based on a digital platform. The research findings demonstrate that implementing standardized interface management processes, strengthening design leadership, and establishing cross-disciplinary collaboration mechanisms can significantly enhance interface management efficiency in nuclear power projects under the EPC model, providing theoretical references for similar engineering practices.

[Key words] nuclear power engineering; EPC contracting; interface management; collaboration mechanism; project management

引言

随着全球能源结构转型加速推进,核电作为清洁高效的基础能源,在实现“双碳”目标中承担重要角色。当前我国在建核电项目普遍采用EPC(设计-采购-施工)工程总承包模式,该模式通过设计、采购、施工的深度整合,有利于控制投资风险、缩短建设周期,但核电工程的特殊性决定了其接口管理面临严峻挑战。首先,核安全法规要求形成覆盖全生命周期的质量保证体系,涉及设计审查、设备监造、施工验证等数百个管理接口;其次,核岛、常规岛、BOP等系统间存在复杂的物理接口和功能接口;再者,总承包方需协调设计院、设备供应商、施工分包商等数十

家参建单位,管理接口数量呈几何级增长。据统计,典型百万千瓦级核电项目的接口文件超过20000份,接口协调工作量占项目管理总工时的35%以上。因此,构建科学的多接口协调管理策略已成为保障核电项目顺利实施的关键。

1 核电项目接口管理的特征分析

1.1 技术复杂

核电项目的技术复杂性源于多系统交叉与多学科深度融合的工程特征,其涵盖核蒸汽供应系统、反应堆保护系统、放射性废物处理系统等40余个专业系统,涉及机械、电气、仪控、土建等多领域协同作业。以安全壳穹顶吊装为例,该过程需精确协调

15项关键技术接口:设计参数需确保钢结构屈服强度($\geq 345\text{MPa}$)与吊装载荷的匹配性;设备运输路径须避让厂区辐射控制区(边界外延5米);吊装机械需同时满足起重力矩($\geq 30000\text{kN}\cdot\text{m}$)与毫米级定位精度;施工载荷计算需综合风载(按50年一遇12级风速)与地震载荷(峰值加速度 $0.3g$)的叠加效应,任何接口失配可能导致吊装偏差超 3mm 容差,进而引发安全壳密封失效风险。随着三代核电技术(AP1000、华龙一号)的推广,非能动安全系统通过自然循环实现堆芯冷却,虽降低主动设备依赖度,却加剧了系统耦合复杂性,例如非能动余热排出系统与安全壳结构的接口需动态优化热工水力参数(冷却剂流量偏差 $<5\%$)与混凝土抗压强度($\geq 60\text{MPa}$)的匹配关系。创新技术应用进一步放大接口管理难度:数字化仪控(DCS)系统需与模拟系统兼容并确保信号传输延迟 $<10\text{ms}$;模块化施工技术(如CAP1400钢制安全壳整体吊装)要求设计-制造-运输接口通过BIM三维协同(误差 $\pm 2\text{mm}$)实现2000吨级构件空中翻转精准就位。面对这些技术挑战,核电项目需依托系统集成矩阵、数字孪生预演等先进手段,构建覆盖设计、施工、运维的全链条闭环管控体系,以应对高强度技术接口的精准协调需求。

1.2 管理多维

在EPC总承包模式下,核电项目管理接口呈现“纵向分级+横向协同”的立体网络结构,其多维性特征显著体现在管理体系与业务维度的复杂交织。纵向维度上,需贯通业主、总包方、分包商三级管理体系:业主层面聚焦监管合规(如核安全法规执行),总包方承担资源整合与全局协调,分包商负责具体执行落地。以核安全设备(1E级)采购为例,需同步满足国家核安全局(NNSA)的HAF601法规审查、设备制造商ASME NQA-1资质认证、现场安装条件(如清洁度等级、防震要求)等8个管理维度,任一环节疏漏均可能触发监管红线或施工返工。横向维度上,设计、采购、施工等业务板块需动态联动,例如设备采购进度滞后将迫使施工逻辑变更,需重新评估土建接口参数(如预埋件位置偏差需控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内),甚至引发连锁设计调整。这种立体化管理网络对传统线性管理模式形成严峻挑战,尤其核安全文化强调“纵深防御”原则,要求接口管理深度嵌入质量保证(QA)体系。例如仪控系统 with 电气系统的接口测试,不仅需通过独立第三方验证信号传输稳定性(如延迟低于 10ms),还需留存焊口编号与探伤报告的可追溯性记录,确保全生命周期质量可控。

1.3 过程动态

核电项目建设周期长达60个月,其过程动态性特征集中体现在全生命周期内高频次、多维度的接口变更与适应性调整需求。以某AP1000项目为例,施工阶段累计发生设计变更1273项(平均每月超21项),直接引发接口调整需求482次,涉及主泵基础设计修改、管道支撑优化、电气布线重构等关键环节。例如,反应堆厂房因设备改型导致预埋件位置偏移 5cm ,需同步调整土建结构钢筋排布(间距误差 $\leq 3\text{mm}$)与设备安装基准线,此类变更若未在48小时内完成接口参数同步,可能造成后续工序连锁延误。动态性挑战还体现在技术迭代引发的接口重构,如

从二代改进型机组升级至三代技术时,压力容器材料从16MND5变更为SA508 Gr. 3 Cl. 2,迫使焊接工艺参数(预热温度从 150°C 升至 200°C)、NDT检测标准(UT替代RT)与上下游系统接口全面更新。传统纸质文件传递模式(如接口控制手册需10个部门逐级签批)因流程耗时长达5-7天,难以满足动态调整的时效性要求,某项目曾因蒸汽发生器到货延迟触发安装逻辑变更,纸质流程延误导致关键路径进度滞后14天。

2 多接口协调管理策略实施

2.1 系统化协调机制构建策略

在核电项目EPC模式下,构建系统化的协调机制是实现多接口高效协同的核心路径。首先需建立接口分级与责任矩阵体系,依据技术复杂度、影响范围和风险等级,将接口划分为战略级、战术级和操作级三类。战略级接口涉及核岛与常规岛系统耦合、数字化仪控系统 with 土建预留埋件匹配等全局性关键问题,由EPC总承包商牵头组建跨专业专家团队,通过定期联席会议进行技术决策与资源调配;战术级接口聚焦设备采购技术参数与设计图纸一致性等中观协调需求,需明确设计、采购、施工三方责任人,并通过签署《接口管理责任书》固化权责边界,确保技术规范与合同条款无缝衔接;操作级接口则针对现场施工工序交接等执行层面问题,采用标准化交接单与可视化标识系统,结合工序流程图和三维定位坐标,实现毫米级精度的施工衔接。通过三级分类与责任矩阵的联动,形成覆盖决策层、管理层与执行层的立体化管理架构,为复杂接口协调提供系统性支撑。

2.2 动态协同管理平台建设策略

动态协同管理平台的建设是核电项目EPC模式下实现多接口高效管控的核心支撑。首先,构建多源数据集成中枢,通过EPC协同数据中心整合设计、采购、施工与质量管理全流程数据:设计端的三维模型、二维图纸与采购ERP系统实时映射,确保设备技术参数与设计要求精准匹配;施工进度数据与设备到货计划动态关联,规避关键路径延误风险;质量验收记录与接口控制点自动绑定,并基于区块链技术构建不可篡改的接口数据溯源链,实现问题可追溯、权责可定位。其次,开发智能接口预警系统,依托机器学习模型建立三重预警机制:技术风险指数(TRI)综合接口复杂度、历史问题发生率评估失效概率;进度偏离度(SPD)监控计划与实际进展偏差,预警工期风险;资源冲突系数(RCC)量化人力、设备、材料在接口环节的竞争关系,动态生成优化方案。最后,部署移动化协同工具,利用AR辅助接口核查系统实现虚实融合的现场管理:施工人员通过AR眼镜实时调取三维模型,叠加显示设计参数与实际施工偏差;远程专家可投射指导标记至现场场景,同步生成带厘米级地理坐标的问题记录,并与BIM模型联动更新。三者协同形成“数据集成-风险预判-精准执行”的闭环管控体系,显著提升核电工程接口协调效率与质量可控性。

2.3 全周期风险预控策略

核电项目EPC模式下的全周期风险预控需贯穿设计、施工与运维全流程。首先,在项目启动阶段实施接口风险全景扫描,通

过“接口FMEA(失效模式与影响分析)”系统识别潜在风险:针对设计假设与现场条件偏差(如地基承载力与设计荷载不匹配超过 $\pm 10\%$),建立地质数据动态更新机制;聚焦长周期设备接口参数漂移(如核级阀门制造公差累积导致密封失效),设定定期校准阈值(如公差带 $\leq 0.1\text{mm}$);排查跨单位协作盲区(如土建移交安装时的成品保护责任归属不清),通过《接口责任矩阵》明确各方权责。其次,推行弹性接口设计,在关键部位预留容错空间:管道接口采用可变径连接件(适应 $\pm 5\%$ 尺寸偏差),电缆桥架配置滑动支座(允许 $\pm 3\text{cm}$ 沉降补偿),数字化仪控系统预留20%备用通道(满足未来功能扩展需求)。同时,针对高频接口故障制定标准化应急响应预案:设备到货延迟时,启用本地替代供应商务选库,72小时内完成技术参数匹配(如屈服强度 $\geq 345\text{MPa}$ 验证);设计变更触发后,借助自动化图纸比对工具(如Delta-BIM)2小时内完成影响域分析(覆盖机械、电气、土建多专业);施工返工场景中,调用预制单元库存(如CAP1400安全壳模块),实现48小时内快速更换(定位精度 $\pm 2\text{mm}$)。通过“风险识别-弹性缓冲-快速响应”三级防控体系,显著提升核电项目接口风险的主动预防能力,保障工程全周期安全可控。

2.4 多方协同文化培育策略

首先构建“1+N”动态协调体系,由EPC总承包商接口总控统筹战略决策,下设核安全接口、进度-成本协同等8类专业工作坊,采用轮值主席制推动跨组织深度协作,确保关键接口决策响应时效缩短至24小时内。同步实施接口能力成熟度评价,基于自主研发的接口管理成熟度模型(IMM),从人员资质认证率($\geq 90\%$)、流程规范符合度($\geq 95\%$)、技术工具覆盖率(100%)三个维度开展季度评估,将评价结果与12个合同付款节点动态关联,驱动接口管理绩效提升。为强化知识传承,建立“接口经验基因库”——集成32个典型接口问题的三维动态模拟案例、专家经验图谱化萃取系统及新员工VR沙盘推演平台,通过虚拟现实技术复现历史重大接口冲突场景(如核岛-常规岛接口错位事件),实现跨代际经验传递效率提升60%,形成“组织协同-能力评价-知识沉淀”三位一体的长效管理生态。

2.5 数字化闭环管控策略

首先在BIM模型中集成物联网传感器网络,实时捕捉焊缝损伤数据、设备振动频谱等关键参数,构建接口实体与虚拟模型的双向映射系统,通过可视化看板动态呈现接口完成率(98%)、问题关闭时效(≤ 4 小时)及风险指数(≤ 0.35)等核心指标。在此基础上搭建智能决策支持系统,运用数字孪生技术对接口冲突进行多维度模拟推演,当检测到偏差时自动生成优化方案——包括基于成本-工期-质量动态权重的最优调整路径(如管道接口

偏移修正方案)、关联5个以上专业系统的连锁影响域分析模型,以及实时匹配施工资源(人员/设备/材料)的动态调配建议。最终建立PDCA持续改进闭环:通过根本原因分析(RCA)追溯85%的接口问题至设计输入偏差,运用数字化流程挖掘(DPM)定位17处跨专业协作断点,并将改进成果固化为23条新增接口控制条款,形成“数据采集-智能决策-标准迭代”的自我进化体系,实现接口管理从被动响应到主动预防的范式转变。

2.6 价值协同创造策略

首先构建接口价值评估模型,从直接效益(减少返工损失5%、工期缩短15%)和间接效益(设备可靠性提升30%、运维风险降低25%)双维度量化协调效益,并在EPC合同中设置接口协同奖励条款,以工期提前奖励金、质量达标分红等形式激励参与方主动优化接口。在此基础上,与关键供应商共建“接口协同创新实验室”,联合开发定制化抗震支架接口解决方案、智能法兰检测机器人等标准化检验工具,通过交叉许可协议共享12项核心接口技术专利,形成技术生态闭环。同时建立接口价值可视化平台,向业主及监管机构动态展示焊缝一次合格率从85%提升至98%、安全风险指数下降40%、全生命周期节约设计变更费用2000万元等实证数据,以透明化沟通推动价值共识,最终实现供应链深度协同与利益相关者价值目标的精准对齐。

3 结束语

核电项目EPC模式下的多接口协调管理是一项系统性工程,其本质是通过组织机制创新、技术工具赋能和文化培育,实现多参与方、多专业、多阶段的无缝协同。本文提出的策略体系,从决策机制到执行工具,从文化建设到价值创造,形成完整的协调管理闭环。随着智能建造技术的发展,建议后续研究关注以下方向:(1)基于机器学习的接口风险预测模型构建;(2)区块链技术在接口文件溯源中的应用;(3)数字孪生驱动的动态接口管理系统开发。通过持续创新接口管理方法,将有力推动我国核电工程建设管理水平提升。

[参考文献]

- [1]郭晴,苏翌.我国核电战略性新兴产业“十二五”培育与中长期发展展望[J].中国工程科学,2016,(4):010.
- [2]田浩,荣丹.核电工程总承包下系统设备采购包采购管理优化研究[J].工程管理学报,2016,(2):025.
- [3]喻飞,刘海波,张涛,等.核电工程EPC现场管理存在的问题及对策研究[J].人民长江,2015,(5):025.

作者简介:

张传榕(1987--),男,汉族,广东省汕头人,本科,工程师,研究方向核力发电。