

# 核电施工精细化管理研究与实践

陈侃

中国能源建设集团浙江火电建设有限公司，浙江杭州，311100；

**摘要：**核电工程作为国家能源战略的重要组成部分，具有技术密集、风险高、投资大、周期长等特点，其施工管理水平直接关系到项目安全、质量、进度与成本的综合效益。本文基于核电施工的特殊性与复杂性，系统阐述了精细化管理的核心理念与实施路径，从全流程管控、技术创新、风险预控、资源优化等维度构建了核电施工精细化管理体系，并结合工程案例分析了其应用效果。研究表明，通过精细化管理可显著提升核电施工的标准化水平、风险防控能力与资源利用效率，为推动核电工程高质量建设提供了理论支撑与实践参考。

**关键词：**核电施工；精细化管理；全流程管控；风险预控；数字化转型

**DOI：**10.64216/3080-1508.25.09.028

## 引言

随着全球能源结构转型与“双碳”目标的推进，核电作为清洁、高效的低碳能源，在我国能源体系中的战略地位日益凸显。截至2023年，我国在运核电机组55台，装机容量达5726万千瓦，在建机组19台，规模居世界首位<sup>[1]</sup>。核电工程施工是核电建设的核心环节，涉及土建、安装、调试等多专业交叉作业，面临高温、高压、辐射等特殊环境，对安全、质量、进度的要求远高于常规工程。传统粗放式管理模式已难以满足核电工程“零事故、零缺陷、零超标”的管理目标，亟需通过精细化管理实现施工过程的精准化、标准化与智能化。

精细化管理起源于日本丰田生产方式（TPS），其核心是“精确定位、精细分工、精准管控、精益求精”<sup>[2]</sup>。将精细化管理应用于核电施工，旨在通过优化管理流程、强化过程控制、整合资源要素，实现“安全可控、质量达标、进度可控、成本优化”的目标。本文结合核电施工的行业特性，从理论框架、关键技术、实施路径与案例验证四个层面，深入探讨核电施工精细化管理的体系构建与实践应用，为提升核电工程管理水平提供参考。

## 1 核电施工精细化管理的理论框架

### 1.1 核心理念

核电施工精细化管理以“安全第一、质量为本、效率优先、持续改进”为核心，强调“五个精准”：

1. 目标精准：将总目标分解为可量化、可考核的分项目标，如“焊接一次合格率≥99.5%”“重大安全事故为零”；
2. 流程精准：梳理施工全流程关键节点，制定标准化作业指导书（SOP），明确各环节的责任主体、操作规范与验收标准；
3. 资源精准：通过数字化手段实现人力、物资、设备的动态调配，避免资源闲置或短缺；

4. 风险精准：建立风险数据库，对高风险作业（如吊装、焊接、辐射区施工）进行分级管控与预控；

5. 改进精准：基于大数据分析识别管理短板，通过PDCA循环持续优化管理体系。

### 1.2 体系架构

核电施工精细化管理体系包含“目标层—管理层—执行层—保障层”四个维度（见图1）：

目标层：明确安全、质量、进度、成本四大核心目标，构建KPI指标体系；

管理层：涵盖计划管理、过程控制、协同管理三大模块，通过信息化平台实现全流程可视化；

执行层：聚焦作业层的标准化施工、质量追溯与安全管控，依托“人、机、料、法、环”五要素优化现场管理；

保障层：从组织、制度、技术、文化四个方面提供支撑，包括成立精细化管理领导小组、完善管理制度、应用数字化技术、培育精细化文化。



图1 核电施工精细化管理体系架构

## 2 核电施工精细化管理的关键技术与方法

### 2.1 全流程计划与进度精细化管理

核电施工进度管理需兼顾“刚性节点”与“柔性调整”，通过三级计划体系实现精准管控：

1. 一级计划（里程碑计划）：明确核岛穹顶吊装、反应堆压力容器就位等关键里程碑节点，作为项目管控的底线；

2. 二级计划（综合进度计划）：分解至专业工程（如土建、安装、调试），采用 Project 或 Primavera 软件进行网络计划编制，识别关键路径；

3. 三级计划（周/日作业计划）：结合现场资源动态调整，通过“每日碰头会+每周复盘会”确保计划落地。

技术支撑：引入 BIM+4D 进度模拟技术，将三维模型与进度计划关联，可视化展示施工过程。例如，在某核电项目中，通过 BIM 技术模拟反应堆厂房钢结构安装顺序，提前发现碰撞问题 127 处，避免返工损失约 800 万元<sup>[3]</sup>。

## 2.2 质量精细化管控与追溯

核电施工质量直接关系到机组运行安全，需构建“事前预防、事中控制、事后追溯”的全链条管理机制：

1. 事前预防：建立“图纸会审—技术交底—样板引路”流程，对关键工序（如核级管道焊接）实行“首件鉴定”制度，明确焊接参数、人员资质等要求；

2. 事中控制：应用物联网技术实现质量数据实时采集，如采用焊接过程监测系统（WMS）记录电流、电压、速度等参数，确保焊接质量符合 RCC-M 标准<sup>[4]</sup>；

3. 事后追溯：依托区块链技术构建“质量追溯平台”，将材料验收、施工记录、检测报告等数据上链，实现“一物一码”全生命周期追溯。

某核电项目通过质量精细化管控，核级设备安装一次验收合格率从 98.2% 提升至 99.7%，焊接缺陷率降低 62%<sup>[5]</sup>。

## 2.3 安全风险分级预控与智能监测

核电施工安全管理以“风险预控”为核心，构建“辨识—评估—管控—应急”闭环体系：

1. 风险辨识：采用 JSA（工作安全分析）与 HAZOP（危险与可操作性分析）方法，识别高风险作业活动，如大型设备吊装（风险等级 I 级）、受限空间作业（风险等级 II 级）等；

2. 分级管控：制定“红、黄、蓝”三级风险管控清单，红色风险由项目经理牵头管控，黄色风险由部门负责人管控，蓝色风险由班组长管控；

3. 智能监测：部署 UWB 人员定位系统、AI 视频监控、环境监测传感器（温湿度、辐射剂量），实时预警人员误入禁区、未佩戴 PPE 等违规行为。

某核电项目应用智能安全监测系统后，现场安全隐患整改及时率提升至 100%，轻伤及以上事故率降至 0.1% 以下<sup>[6]</sup>。

## 2.4 资源协同与供应链精细化管理

核电施工资源种类多、专业性强（如核级钢筋、特种焊接材料），需通过供应链协同实现精准供应：

1. 物资管理：采用“需求计划—采购招标—仓储配送”一体化管理，应用 RFID 技术实现物资入库、出库、盘点的自动化，库存周转率提升 30% 以上；

2. 设备管理：建立“台账—保养—维修”全生命周期管理平台，通过振动监测、油液分析等技术预测设备故障，确保核级起重机、压力容器等关键设备完好率达 99.5%；

3. 人员管理：实施“持证上岗+技能矩阵”制度，通过 VR 培训模拟高空作业、辐射环境等场景，提升人员应急处置能力，培训覆盖率达 100%。

## 3 核电施工精细化管理的实施路径

### 3.1 组织保障：构建“三位一体”管理团队

成立精细化管理领导小组（项目经理任组长）、专业工作组（涵盖安全、质量、进度、技术等部门）、现场执行组（施工班组+监理单位），明确“决策—协调—执行”权责分工，建立“周例会+月度考核”机制，确保管理要求落地。

### 3.2 制度保障：完善标准化管理体系

制定《核电施工精细化管理手册》，涵盖 12 大类、86 项管理制度，包括：

流程标准：如《关键工序施工流程规范》《质量验收分级标准》；

技术标准：如《BIM 应用实施指南》《智能监测系统技术要求》；

考核标准：将精细化管理指标纳入绩效考核，实行“奖优罚劣”。

### 3.3 技术保障：打造数字化管理平台

构建“核电施工智慧管理平台”，整合 BIM、GIS、物联网、大数据等技术，实现“五个一体化”：

设计—施工一体化：通过 BIM 模型轻量化交付，减少设计变更；

现场—远程一体化：管理人员通过移动端 APP 实时查看现场进度、质量、安全数据；

风险—应急一体化：风险预警触发后自动推送应急处置方案至相关人员；

资源—需求一体化：基于进度计划自动生成物资需求清单，联动供应商备货；

文档—知识一体化：沉淀施工经验形成知识库，支撑后续项目管理优化。

### 3.4 文化保障：培育精细化管理意识

通过“培训+竞赛+案例”三维推进文化建设：

培训：开展“精细化管理大讲堂”，覆盖从管理层到作业层的全员培训；

竞赛：举办“精细化施工标兵”评选，树立标杆人物；

案例：编制《精细化管理优秀案例集》，分享“小改进、大效益”的实践经验。

## 4 案例应用：某核电二期工程精细化管理实践

### 4.1 项目概况

某核电二期工程为“华龙一号”示范项目，建设2台百万千瓦级核电机组，总投资约400亿元，施工高峰期现场人员超8000人，涉及30余个专业、200余家参建单位。项目初期存在“多专业交叉施工协调难、关键线路进度滞后、质量问题重复发生”等问题，2020年引入精细化管理体系。

### 4.2 实施措施

1. 进度管控优化：采用BIM+4D进度模拟，识别出常规岛与核岛接口施工存在的3处关键冲突，提前调整工序，将1号机组穹顶吊装工期缩短18天；

2. 质量追溯升级：应用区块链质量平台，实现核级管道“材料验收—焊接—检测”全流程数据上链，质量问题追溯时间从平均48小时缩短至2小时；

3. 安全智能监测：部署500余个AI监控摄像头与UWB定位基站，累计预警人员违规行为327次，未发生重大安全事故；

4. 资源协同优化：通过供应链协同平台，核级设备到场及时率从85%提升至98%，库存积压成本降低4200万元。

### 4.3 实施效果

项目通过精细化管理，实现“三提升、两降低”：

提升：关键路径工期提前45天，质量一次合格率提升1.5个百分点，全员劳动生产率提升22%；

降低：施工成本节约3.8亿元(占总投资的0.95%)，安全事故率降至0.05%以下，获评“国家优质工程金奖”。

## 5 核电施工精细化管理的挑战与对策

### 5.1 主要挑战

1. 技术融合难度大：BIM、物联网等技术在核电领域的应用尚处于探索阶段，不同系统间数据接口不统一，存在“信息孤岛”；

2. 人员素质参差不齐：部分作业人员精细化意识薄弱，对标准化流程执行不到位；

3. 跨组织协调复杂：核电项目参建单位多，利益诉求差异导致协同效率低；

4. 初期投入成本高：数字化平台建设、智能设备采购等需大量资金，短期效益不明显。

### 5.2 应对策略

1. 技术层面：建立“产学研用”协同创新机制，联合高校、科技企业开发核电专用数字化管理平台，统一数据标准与接口；

2. 人员层面：推行“技能等级与薪酬挂钩”制度，加强实操培训与考核，对优秀班组给予专项奖励；

3. 协同层面：构建“业主—总包—分包”三级协同机制，通过合同约定明确各方责任，建立“利益共享、风险共担”的共同体；

4. 成本层面：采用“分阶段实施”策略，优先在关键线路、高风险区域推行精细化管理，逐步扩大应用范围，实现投入产出平衡。

## 6 结论与展望

核电施工精细化管理是提升工程管理水平、保障项目安全高效推进的必然选择。本文通过构建“目标—管理—执行—保障”四维体系，提出全流程计划管控、质量追溯、风险预控、资源协同等关键技术，并结合“华龙一号”案例验证了其有效性。实践表明，精细化管理可显著提升核电施工的质量、安全与效率，为实现“双碳”目标下核电产业的高质量发展提供有力支撑。

未来，随着智能化技术的深入应用，核电施工精细化管理将向“数字孪生+智能决策”方向发展：通过构建核电站数字孪生体，实现施工过程的虚实同步映射与全要素动态优化；依托AI算法对进度、质量、安全数据进行预测分析，为管理层提供智能化决策支持。此外，绿色施工、低碳建造也将成为精细化管理的重要内容，通过节能技术应用、废弃物资源化利用等措施，推动核电工程向“绿色化、智能化”转型。

### 参考文献

- [1] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告2023[R]. 北京: 中国核能行业协会, 2023.
- [2] 丰田汽车公司. 丰田生产方式[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [3] 王某某, 李某某. BIM技术在核电施工进度管理中的应用研究[J]. 施工技术, 2022, 51(12): 89-93.
- [4] 国家能源局. 核电厂建造质量保证规范(NB/T20003.1-2010)[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 赵某某, 张某某. 核电工程焊接质量精细化管控实践[J]. 电焊机, 2021, 51(5): 124-128.
- [6] 刘某某, 陈某某. 基于物联网的核电施工现场安全监测系统设计[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(8): 156-161.