

# 核电工程建设安全管理体系创新与数智化实践研究

姜 宁

中广核阳江核电有限公司 广东阳江 529941

**摘要:**本研究聚焦2023—2025年间中国广核集团(以下简称“中广核集团”)核电工程安全管理体系创新实践,通过调研阳江、台山、防城港、宁德等核电基地,重点分析安全管理责任体系、重要节点风险控制与安全文化培育的协同机制。数据显示,此期间中广核集团核电工程百万工时事件率从2022年0.35降至0.12,辐射污染、消防隐患等专项安全指标优于国家标准,关键安全管控环节一次达标率达100%,形成可复制的安全管理范式。

**关键词:**核电工程; 安全管理体系; 数智化实践研究

## 1 安全管理责任体系创新

传统安全管理责任体系存在责任边界模糊、考核机制僵化、基层执行动力不足等问题。2023年起,中广核集团阳江核电基地率先启动改革,构建双层监管架构,实现安全责任全链条覆盖。

### 1.1 双层监管架构的核心设计

架构以“分级负责、协同联动”为核心,分“决策层—执行层”两级:决策层以基地安全质量委员会为核心,总经理任主任,成员含工程、技术等关键部门负责人,每季度查高风险区域,重大风险“挂牌督办”,明确整改责任人、时限与措施,确保风险闭环管理。执行层中,工程公司与承包商签安质环责任书,将责任分解至项目部、班组及个人,结合岗位细化条款,如核岛班组重高空防护与辐射管控,技术部门聚焦施工方案安全审查,避免“一刀切”式责任划分。协同机制:设“月度安全协调会”,联合多方通报情况,2024年累计解决跨单位安全责任纠纷46项,提升责任执行效率。

### 1.2 2025年考核体系的三大安全管理特征

#### 1.2.1 全员安全责任穿透

首次将秘书、协管、后勤保障等辅助岗位纳入安全考核范围,通过岗位安全风险评估,明确52类岗位差异化安全责任清单:秘书岗位需协助传达安全文件、提醒会议期间安全规范;协管岗位需监督作业人员防护用品佩戴、上报现场违章行为。配套专项培训确保岗位人员掌握安全职责,2025年上半年辅助岗位累计上报安全隐患89项,同比增长62%,实现“人人有安全责任、人人管安全”。

#### 1.2.2 动态安全奖惩机制

建立“约谈—奖金扣减—晋升否决”递进式惩处机制,强化安全责任约束力:对轻微安全履职缺陷者,由部门负责人约谈并制定改进计划;对多次违规或较严重履职不到位者,扣减5%—30%绩效奖金;发生重大安全责任事故或严重违章者,实施1—3年晋升否决。

2024年累计执行安全绩效扣罚127人次,其中晋升否决10人次。同时设立“月度安全之星”“年度安全先进个人”等荣誉,2024年156名员工获安全奖励,32人因安全表现突出优先晋升,激发员工安全履职积极性。

#### 1.2.3 智能安全考核工具

表 1 2025 年核电工程核心安全考核指标(安质环专项)

安全风险类别	考核扣分规则	行业安全基准值	阳江核电 2025 年实际值	安全改进幅度
人身安全	死亡 30 分 / 人, 重伤 15 分 / 人, 轻伤 5 分 / 人	≤ 0.2 起 / 百万工时	0.05 起 / 百万工时	较基准值下降 75%
辐射安全	放射源丢失 20 分 / 起, 体表污染 1 分 / 人次, 剂量超标 5 分 / 次	污染事件 ≤ 3 起 / 年	0 起 / 年	完全杜绝辐射污染事件
消防安全	核岛内烟头 2 分 / 个, 消防设施失效 10 分 / 处, 演练未达标 8 分 / 次	烟头检出率 <0.5%	0.1%	较基准值下降 80%
设备安全	安装精度超标 5 分 / 台, 设备损坏 15 分 / 台, 调试失败 10 分 / 次	设备安装合格率 ≥ 98%	100%	较基准值提升 2%

开发移动端“安全积分 APP”，实现安全考核智能化管理，实时记录作业人员违章行为、隐患整改情况及安全培训参与度，自动计算个人安全积分；后台通过大数据生成个人、班组、部门安全排名与趋势报告，数据反馈效率提升 80%，准确率超 99%；上线安全学习资料 200 余份、违章案例 150 余个，兼具考核与培训功能，成为安全管理数字化载体。

## 2 重要节点安全风险控制

核电工程建设中，DCS 系统安装、核岛穹顶吊装等节点集中高风险作业，中广核集团针对各节点特性制定专项安全管控方案，实现风险精准防控。

### 2.1 DCS 系统安装安全专项控制

DCS 系统作为核电机组“神经中枢”，其安装质量直接影响机组安全运行。2025 年，中广核集团防城港核电 4 号机组通过双重管控，实现 DCS 系统安装“零安全缺陷”。

#### 2.1.1 三维空间安全预演

采用 BIM 技术构建 DCS 系统电缆敷设三维模型，对 7.2 公里电缆的敷设路径、弯曲半径、与设备间距等参数进行模拟优化：提前规避 43 处电缆与管道、建筑物的碰撞风险，避免施工中因路径调整引发的安全隐患；精准计算每根电缆长度，减少材料浪费的同时，避免因电缆短缺导致的停工与返工安全风险，累计节约成本 20 万元。

#### 2.1.2 无尘化安全环境管控

DCS 设备对环境洁净度要求极高，颗粒物易导致设备短路、信号干扰。防城港核电 4 号机组实施超严环境管控：设立正压防尘室，采用三级空气过滤系统，将颗粒物浓度控制在  $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，严于国家标准 5 倍；制定无尘作业规范：施工人员需经风淋除尘、穿戴专用防尘服，工具设备清洁后方可入场，电缆敷设时用专用套管保护，避免外皮磨损产生碎屑。最终实现 DCS 设备调试一次成功，未出现因环境因素引发的安全故障。

### 2.2 核岛穹顶吊装安全专项控制

核岛穹顶吊装是核电工程标志性节点，具有吊装重量大（单台穹顶重量超 2000 吨）、作业高度高（吊装高度超 60 米）、精度要求高（对接偏差需  $\leq 5\text{mm}$ ）等特点，安全管控难度大。2024 年，中广核集团台山核电 3 号机组核岛穹顶吊装作业，通过“三维模拟 + 全程监测 + 应急备援”三重安全管控，实现“零偏差、零风险”吊装。

#### 2.2.1 吊装前三维模拟与方案优化

数字孪生预演：采用 BIM+ 有限元分析技术，构建穹顶与吊装设备的数字孪生模型，模拟吊装过程中起吊、旋转、对接等全流程，分析吊点受力、绳索形变、风荷载影响等关键参数，优化吊装角度与速度曲线，提前规避 8 处潜在碰撞风险与 2 处受力过载风险。

方案多级评审：组织行业专家、吊装工程师、安全管理人员开展 5 轮专项评审，对吊装设备选型（选用 3200 吨级履带吊为主吊、1200 吨级汽车吊为辅助）、吊索具强度校验、地基承载力检测等核心内容进行论证，确保方案安全可行性。

#### 2.2.2 吊装过程全程安全监测

实时受力监测：在吊索具、吊点等关键部位装 28 个应力传感器，采样频率 500 次 / 秒，实时监测受力并传至指挥中心，受力近安全阈值 90% 时自动预警，保障设备与结构安全。

姿态与偏差监测：用激光定位仪、高清工业相机实时监测穹顶姿态与对接偏差（精度  $\pm 1\text{mm}$ ），指挥人员借可视化平台调参数，最终对接偏差仅 2.3mm，优于  $\leq 5\text{mm}$  标准。

环境实时监测：吊装区部署风速仪等，监测风速（要求  $\leq 12\text{m/s}$ ）、能见度，风速超 8m/s 预警、超 12m/s 停作业，2024 年吊装当日规避 2 次短时大风风险。

#### 2.2.3 应急备援与人员管控

应急方案与物资：制定“设备故障、姿态失稳、极端天气”3 类应急处置预案，储备备用吊索具、应急电源、救援设备等物资，组织 200 人次应急演练，确保突发情况快速响应。划定吊装警戒区，设置物理隔离与电子围栏，严禁无关人员进入；吊装指挥团队（12 人）经专项培训并考核合格，佩戴智能安全帽（具备实时通话、定位、一键报警功能），实现人员位置与状态全程可控；高空作业人员（8 人）配备双钩安全带与防坠器，作业平台设置防护栏杆与安全网，杜绝高空坠落风险。

## 3 安全文化培育机制

### 3.1 多维度安全教育模式

2025 年，中广核集团阳江核电基地整合“系统化宣贯 + 浸没式警示 + 实战化排查”三维教育模式，变“被动安全”为“主动安全”。

#### 3.1.1 系统化安全宣贯教育

构建“线上 + 线下”安全培训体系：线上依托安全管

理平台设法规、规程、核电专项课程，员工学后需通过测试获取学分确保学习效果；线下定期办专题讲座、知识竞赛，邀专家与资深安全员授课。2025年开展线上课45期、线下讲座28场，员工安全知识考核合格率从92%升至98%。

### 3.1.2 沉浸式安全案例警示

基于中广核集团真实安全事故案例，开发VR事故模拟系统：模拟高空坠落、物体打击、辐射泄漏等场景，员工佩戴VR设备可体验事故过程与后果，安全风险认知提升40%；每月组织事故案例分析会，邀请事故亲历者分享教训，强化“违章即事故”的安全意识，减少侥幸心理。

### 3.1.3 实战化安全隐患排查

将施工现场划分为若干安全责任区，由安全总监带队，联合工程、技术、质量等7部门组建联合巡查小组：采用“查现场、看资料、问人员”方式，重点排查高空作业防护、特种设备状态、消防设施等隐患；现场分析隐患成因与危害，指导员工识别风险，2025年上半年闭环整改安全隐患376项，其中重大隐患18项，培养“人人都是安全员”的责任意识。

## 3.2 基层安全能力激活工程

### 3.2.1 安全技能比武

2024年举办28场安全技能专项竞赛，覆盖焊工、吊装工、电工等12类高危工种：理论考核侧重安全操作规程与应急处置知识，实操考核模拟真实作业场景，如主管道焊接安全操作、核岛设备吊装风险控制；评选“安全技能标兵”120名，员工安全操作技能平均提升30%，关键工种操作失误率下降25%，从技能层面降低安全风险。

### 3.2.2 承包商安全自主管理

将承包商纳入安全管理体系，激发自主管控动力：设“优秀承包商安全员”奖，获奖者可参与中广核安全培训，获奖单位优先续约；建承包商安全绩效评价体系，从隐患自查率、违章发生率等维度考核，结果与合同金额挂钩——优秀者奖5%-10%合同额，不合格者约谈或终止合同。2025年承包商安全隐患自查率从2023年65%升至90%，获奖承包商续约概率提35%。

### 3.2.3 近失事件安全激励

近失事件是事故预防的重要预警信号。2025年阳江核电基地设近失事件专项基金：员工可通过APP、邮件报告事

件（含时间、地点、潜在风险），安全部门分析后定整改措施，按事件重要性奖200-2000元；数据显示，每100起报告可消80余个隐患、防1起重大事故。2025年上半年收报告1200余起，消除隐患960余个，从源头遏制事故。

## 4 安全管理未来发展与建议

### 4.1 智能安全预警升级

当前安全管理已从“事后处置”向“事中控制”转变，未来需向“主动预防”突破：推广AI违章行为识别系统：在阳江核电试点基础上，扩大应用范围，优化算法以识别高空作业违规、有限空间未通风等特殊场景违章，系统对未佩戴PPE行为识别准确率达98.7%，响应时间<3秒，实现违章实时预警；构建设备安全预警模型：基于数字孪生与物联网传感器，实时监测主泵、蒸汽发生器等关键设备运行参数，通过AI分析预测故障，提前1-3个月发出预警，避免设备突发故障引发安全事故。

### 4.2 承包商安全深度整合

承包商安全管理是整体安全关键，需构建“安全命运共同体”：建立安全文化成熟度评估模型，从四维度（安全理念、制度执行、行为规范、绩效结果）量化评估，得分纳入合同续签核心条款，优先选安全管理强的合作单位；打造一体化安全培训体系，整合中广核与承包商资源，联合开发课程、组织演练，统一标准提素养；搭建安全协同平台，实现隐患、整改、文件实时共享，破信息壁垒提效，确保与集团标准一致。安全管理实证启示：防城港核电DCS安装“零缺陷”、台山核电穹顶“零偏差”吊装等表明，核电安全需“双轮驱动”——制度精益化（全员考核、吊装方案评审）定边界，执行精准化（VR培训、近失激励）激动力。“制度约束”与“文化自觉”深度融合，方能筑牢核电安全长效根基。

### 参考文献：

- [1] 中核五公司. 防城港核电DCS系统安装安全质量控制 [R]. 广西防城港：中广核集团, 2025.
- [2] 陈伟仲, 崔建斌. 追求卓越, 聚焦安质环提升, 全面实现阳江核电六台机组高质量投产 [J]. 中国核电, 2021, 14(03):370-376.
- [3] 中国核能行业协会, 中广核集团. 核电工程安全文化培育指南 [S]. 北京, 2023.