

# 核电厂 CA 模块工程设计管理的痛点分析与解决措施

苏昌旺 李京航 唐 韬 何小龙

中电投广西核电有限公司 广西 防城港 538021

**【摘要】**：本文聚焦核电厂 CA 模块工程设计管理，深入剖析其面临的痛点，如技术复杂程度高、多专业协同困难、设计变更管理不足、经验反馈评估落实不及时及设计变更执行流程多等。结合 CAP1000 等实际案例，提出针对性解决措施，包括引入先进技术、建立协同机制、完善变更管理流程、加快经验反馈评估落实及简化变更执行审批流程等。通过分析旨在为核电厂 CA 模块工程设计管理提供理论支持与实践指导，提升设计质量与效率，保障核电项目安全稳定运行。

**【关键词】**：CAP1000；CA 模块；设计管理；设计变更

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.066

## 引言

核电作为一种清洁、高效的能源形式，在全球能源结构中占据着愈发重要的地位。核电厂的建设与运营不仅关乎能源供应的稳定性，更与国家安全和人民生命财产安全紧密相连。在核电厂的建设过程中，工程设计管理是关键环节，其质量直接影响着核电厂的安全性、可靠性和经济性。

核电工程项目具有技术复杂度高、安全要求严格，法规监管严格、周期长、投资大等显著特点<sup>[1]</sup>。这些特点使得核电工程项目管理面临着诸多挑战，如技术难题的攻克、法规变化的应对、资源的有效协调以及风险的全面管理等<sup>[2]</sup>。

在核电工程设计管理方面，文章<sup>[3]</sup>强调了设计对项目安全性和经济性的关键影响。设计管理需要确保设计方案符合国家标准和法规要求，同时要满足营运单位建造的相关需求<sup>[4]</sup>。CA 模块作为核电工程中的特殊结构，其设计管理具有独特之处，现有的核电工程设计管理研究成果难以完全覆盖 CA 模块设计管理中的具体问题。

## 1 核电厂 CA 模块工程设计管理概述

### 1.1 CA 模块的定义与分类

CA 模块是核电厂中一种特殊的结构模块，通常为钢板模块<sup>[5]</sup>。CA 结构模块为分布在反应堆厂房与辅助厂房内的钢结构墙体或楼板组合体，在安装完成后，会在模块内部或外部浇灌混凝土，钢板与混凝土共同构成墙体或楼板等结构件，起到替代加强筋和模板的作用。这种设计使得混凝土浇灌与房屋构建以及设备模块安装能够同步进行，大大提高了施工效率。

根据不同的功能和结构特点，CA 模块可分为多种类型。CA 结构模块现场组装数量为 16 个，分别为 CA01，CA02，CA03，CA04，CA05 等，单个机组的

结构模块总组装工程量约为 2059 吨，如表 1 所示。其中，CA20 模块是 CAP1000 核电站中的重要组成部分，是结构高度最高的 CA 模块，具有燃料储存、运输以及热传递等多方面功能，常安装于辅助厂房的 5&6 区域。它由碳钢以及双相不锈钢材质制成，长宽高分别为 20.5m、14.2m、20.7m，由 18 个房间组成，包含 32 个墙体模块和 39 个楼板模块，结构总重量达到 762 吨。不同类型的 CA 模块在核电厂中承担着不同的任务，共同保障核电厂的正常运行。

表 1 CA 结构模块清单

序号	模块编号	所属厂房	组装重量/t(未计附件)	附件重量/kg
1	CA01	反应堆厂房	764.471	173634
2	CA02	反应堆厂房	28.332	3274
3	CA03	反应堆厂房	191.304	5442
4	CA04	反应堆厂房	25.384	898
5	CA05	反应堆厂房	45.4895	19430
6	CA20	辅助厂房	761.420	68354
7	CA22	辅助厂房	12.565	
8	CA31	反应堆厂房	29.717	
9	CA33	反应堆厂房	31.46	
10	CA34	反应堆厂房	9.79	
11	CA35	反应堆厂房	32.738	
12	CA37	反应堆厂房	34.97	
13	CA55	反应堆厂房	41.64	
14	CA56	反应堆厂房	11.295	

15	CA57	反应堆厂房	18.189	
16	CA58	反应堆厂房	20.063	
	小计		2058.828	

注：续表 1。

## 1.2 设计管理的目标

设计管理的主要目标在于确保工程项目设计的质量、安全性、经济性及满足项目建设的需求。高质量的设计是保障核电厂安全稳定运行的前提，通过严格的设计管理，可以确保设计方案满足核安全要求，降低潜在的安全风险。此外，设计管理还需确保设计进度与项目整体进度相协调，避免因设计延误影响项目整体推进。

## 2 核电厂 CA 模块工程设计管理的痛点分析

(1) 技术复杂程度高：核电技术涉及核物理、热工水力、材料科学等众多专业领域，技术复杂性体现在多学科深度耦合、安全要求严苛及精度控制极限化等方面，给工程设计管理带来严峻挑战。CA 模块涉及结构、焊接、防腐、无损检测等多领域，各专业技术标准差异大。以 CAP1000 项目为例，CA20 结构模块集成了 380 余个设备接口、5200 余条焊缝，需同时满足抗震 I 类要求、LOCA 事故工况密封性及毫米级安装精度，技术复杂性成为设计管理的核心痛点。

(2) 多专业协同困难：CA 模块工程设计涉及多个专业领域，包括结构、机械、电气、通风等。各专业之间相互关联、相互影响，需要紧密协同工作。然而，在实际设计过程中，由于各专业设计人员沟通不畅、信息传递不及时等原因，常常出现接口不匹配的问题。在管道与结构模块的设计中，管道专业设计人员与结构专业设计人员缺乏有效沟通时，存在管道布局与结构模块的预留孔洞位置不匹配的潜在风险，从而导致需要在施工过程中进行现场开孔或调整管道布局，造成增加了施工难度和成本、影响施工进度和质量的不利影响。此外，不同专业在设计过程中可能对同一问题考虑的角度不同，导致设计方案存在冲突。

(3) 设计变更管理不足：在核电厂 CA 模块工程设计过程中，设计变更难以避免。政策法规的变化、技术难题的出现以及业主需求的调整等因素都可能引发设计变更。然而，目前的设计变更管理流程存在诸多不完善之处。设计变更申请的提出和审批流程不够规范。部分变更申请缺乏详细的说明、对建安进度影响充分论证，导致审批人员难以准确判断变更的必要性和可行性。

(4) 经验反馈评估落实不及时：在核电厂 CA 模块的设计管理中，经验反馈是持续改进设计、优化管理、保障安全及制造效率的关键环节。然而，设计院评估后需进行的建模分析计算常因模型复杂度高、设计人员及计算资源分配不合理及流程冗余，导致耗时冗长，成为制约经验反馈闭环效率的核心痛点。部分对曾出现过因模块接口尺寸偏差导致安装困难的问题，仅进行了记录，但在后续项目中类似问题仍反复出现。设计人员面临进度压力时，易忽视“非紧急”的经验优化。

(5) 设计变更执行流程多：在核电厂模块化建造中，设备制造厂作为 CA 模块生产主体，常因设计变更执行流程环节多、跨部门协同断层、流转慢而深陷效率泥潭，导致变更任务耗时冗长，甚至引发重复性返工。设计变更需经设计部门、技术部门、质量部门、生产部门等多个部门审核，单次变更平均耗时较长，严重挤压制造周期，成为制约模块化优势发挥的突出痛点。变更本身工艺较为简单且执行耗时较短，但需要经过多个审批、验证和实施环节，导致变更执行周期长、成本高，严重影响了项目的整体效率。

## 3 引入先进技术辅助设计

利用建筑信息模型技术可以实现 CA 模块设计的可视化、协同化和信息化。通过建立三维模型，设计人员可以直观地展示设计方案，提前发现各专业之间的接口问题，及时进行协调和优化。在管道与结构模块的设计中，利用 BIM 技术可以将管道系统和结构模型进行集成，通过碰撞检测功能，快速发现管道与结构之间的冲突点，避免在施工过程中出现接口不匹配的问题。

(1) 建立有效的多专业协同机制：搭建并运行统一的设计管理平台是实现多专业协同工作的关键。该平台应具备信息共享、沟通协作、任务分配等功能，打破各专业之间的信息壁垒，确保各专业设计的一致性。定期召开跨专业协调会议也是加强沟通与协作的重要方式，各专业共同参与，共同讨论设计过程中遇到的问题和解决方案，充分交流意见，协调设计接口，明确工作界面和责任分工。

(2) 完善设计变更管理流程：制定规范的设计变更管理程序是确保变更有序进行的基础。明确设计变更的申请、审批、实施和验证等环节的具体要求和流程，确保变更申请有详细的说明和充分的论证。规定设计变更申请必须包含变更原因、变更内容、变更影响分析等信息，经相关专业人员审核、批准后方可实

施。变更实施完成后，组织相关人员对变更效果进行评估，验证变更是否达到预期目标，是否对其他方面产生了不利影响。

(3) 多举措加快经验反馈评估落实：一是设计院应优化建模流程，建立参数化模型库，降低复杂度，提升建模效率；二是合理配置设计人员与计算资源，设立专项分析小组与高性能计算集群，避免资源冲突；三是精简冗余流程，采加速计算与结果传递；四是建立经验案例强制关联机制，在设计评审时自动推送类似问题，确保“非紧急”优化不被忽视。

(4) 简化变更执行审批流程与标准化：在变更执行前，组织跨部门沟通会议，确保所有参与方对变更内容、影响和执行计划有清晰的理解。设备制造厂应定期召开跨部门变更协调会，确保各方对变更的理解一致。通过变更协调会，有效减少因沟通不畅导致的误解和延误。通过流程标准化、数据贯通与协同平台建设，系统性破解 CA 模块设计变更执行流程冗余问题，为核电模块化建造提质增效提供关键支撑。

#### 4 CA01 模块设计与制造需求不匹配案例分析

在核电厂 CA 模块工程设计过程中，由于设备布置方案变化、同行电厂经验反馈(如预埋件布置优化)、新出现技术难题以及现场其他需求的调整等因素都可能导致模块设计需重新开展建模分析计算，导致设备制造厂加工制造进度滞后。

某核电厂 CA01 模块由于主泵热交换器挂泵调整、换料水池检漏槽接长及同行核电厂针对 CA 模块预埋件优化的经验反馈，发布了较多数量的设计变更。同时，根据现场需要，由设备制造厂主动发起工程变更，其原因包括：(1) 设备制造厂对图纸理解不全面，未充分识别部分工艺施工的困难，导致现场制造错误；

(2) 现场制造进度较慢，为保证拼装要求，部分埋件

或附件加工需要到现场加工；(3) 设备制造厂原材料准备不足或国内无法采购相关材料，需要申请材料代换。多种设计变更及工程变更的共同影响下，导致 CA01 模块设计与制造需求不匹配的问题发生。

针对不匹配问题，设计管理推出多重技术及管理措施：(1) 协调设计院设计人员赴设备厂解决技术问题，疏通模块加工制造的设计堵点。(2) 结合项目建设时间节点，梳理现场需求时间，形成 CA01 模块一体化专项计划，保证模块的发运及拼装。(3) 建立设计、采购、设备制造沟通协作平台，各方紧密沟通协作，及时处理相关技术问题。(4) 形成每日周报的进度报送机制，确保及时发现并纠正进度偏差。(5) 形成经验反馈案例，同步对 CA 模块需变更情况开展全面梳理、分析评估，并匹配 CA01 模块一体化专项计划，制定设计变更发布计划。

针对主泵热交换器挂泵调整，在设计过程中，设计院充分利用三维建模和协同设计，各专业设计人员在统一的三维模型上进行设计工作，通过碰撞检测功能提前发现并解决了大量接口问题。对设计变更管理流程进行了优化，缩短了审批时间，进一步提升了设计管理效果。通过以上措施的实施，对解决 CA01 模块设计与制造需求不匹配问题取得了显著成效，设计质量得到了有效保障，项目进度按计划顺利推进。

#### 5 结语

本文通过对核电厂 CA 模块工程设计管理的痛点进行深入分析，针对设计管理存在的多个现实问题，提出了引入先进技术辅助设计、建立有效的多专业协同机制、完善设计变更管理流程、加快经验反馈评估落实以及简化变更执行审批流程与标准化等一系列解决措施。通过 CAP1000 核电厂 CA01 模块设计与制造需求不匹配案例分析，验证了上述措施的有效性和可行性。

#### 参考文献：

- [1] 王寿荣,叶超.核电工程项目区域化管理模式探索[J].中国核工业,2023,(06):46-48.
- [2] 郑海龙,马腾达,周若凡.总承包模式下核电项目业主方的设计管理研究[J].建筑经济,2021,42(S1):155-158.
- [3] 董正方,朱信义.核电示范项目设计方案变化管控研究[J].能源与节能,2021,(04):36-38.
- [4] 姚梦凯.核电工程设计变更管理研究与改进[J].能源与节能,2019,(11):50-52.
- [5] 王了一,孙国庆.核电 CA01 结构模块焊接变形控制[J].设备管理与维修,2020,(11):144-146.