

关于核岛管道三维模型设计的质量提升

宁可

核工业工程研究设计有限公司, 中国·北京 101300

摘要: 在核电工程建设中, 核岛管道三维模型设计的准确性直接影响施工图质量和施工效率。随着“华龙一号”三代核电技术的推广, 传统二维设计模式逐步向三维数字化设计转型, 但核岛管道三维模型设计错误率高的问题亟待解决。本文以某核电项目为背景, 针对模型设计错误率高的现状, 通过系统性分析发现相关症结, 制定实施改进措施, 以减少施工返工与资源浪费。同时, 形成的技术标准与高效工作模式为后续核电数字化设计奠定基础, 推动设计与施工效率同步提升。本文案例表明, 技术创新与流程优化是核电工程质量管理的关键, 为行业数字化转型提供了可推广的实践经验。

关键词: 三维模型设计; 质量提升; 模型管控; 错误率降低

Quality Improvement of 3D Model Design for Nuclear Island Piping

Ning Ke

Nuclear Industry Research And Engineering Co.,LTD., China Beijing 101300

Abstract: In nuclear power engineering construction, the accuracy of 3D model design for nuclear island piping directly affects the quality of construction drawings and construction efficiency. With the promotion of the Hualong One third-generation nuclear power technology, the traditional 2D design mode is gradually transitioning to 3D digital design. However, the problem of high error rates in 3D model design for nuclear island piping urgently needs to be addressed. Taking a nuclear power project as the background, this paper focuses on the current situation of high model design error rates. Through systematic analysis, the underlying causes are identified, and targeted improvement measures are formulated and implemented to reduce construction rework and resource waste. At the same time, the resulting technical standards and efficient working modes lay a foundation for subsequent digital nuclear power design, promoting simultaneous improvements in design and construction efficiency. The case presented in this paper demonstrates that technological innovation and process optimization are key to quality management in nuclear power engineering, and provides scalable practical experience for the digital transformation of the industry.

Keywords: 3D model design; Quality improvement; Model control; Error rate reduction

1 工作背景

核电工程作为国家能源战略的重要组成, 其设计质量直接关系工程安全性与经济性。随着“华龙一号”三代核电技术的全面应用, 核电建设对设计精度与效率的要求显著提升。传统二维设计模式依赖人工图纸解析与参数提取, 存在资源消耗大、协同效率低等问题, 难以满足复杂核岛管道的精细化设计需求。在此背景下, 三维数字化设计成为行业转型的必然方向, 其通过集成化模型实现多专业协同、数据联动及施工模拟, 可大幅提升设计质量与工程效率。

然而, 在“华龙一号”核电项目建设中, 核岛管道三维模型设计暴露出错误率高、返工频繁等问题。究其原因, 三维设计初期缺乏标准化建模规则、模型管控机制不完善,

且校审依赖人工操作, 导致设计一致性差、错误难以追溯。此类问题不仅影响施工进度, 更制约了数字化技术优势的充分发挥。

针对这一现状, 亟需通过技术创新与流程优化, 系统性提升核岛管道三维模型设计的质量控制能力, 为核电工程数字化转型提供技术支撑, 同时推动设计效率与施工质量的协同提升。

2 实践内容

2.1 案例问题

现场进行核岛管道焊接组对准备工作时发现, 某等轴图部件 2 异径套筒尺寸 $1" \times 3/4"$ 有误, 与续图 1.1/2" 的等径三通无法焊接。经核实, 该问题的产生是因三维模型中异径套筒选型错误, 模型中 BRAN 缺少连接关系, 异径套

筒作为 BRAN 分支的头部与等径三通的 P3 点未正确连接，导致材料选择错误未发现，进而造成施工图纸错误，此问题通过现场设计变更单 FCR 处理，但由于问题发现时，异径套筒已经预制完成，需要切割掉已经焊接的错误的异径套筒，替换正确的物项，造成了返工。

通过抽查该项目模型发现核岛管道三维设计存在模型设计不满足要求，存在模型属性赋值错误、元件选用错误、BRAN 划分不合理及连续煨弯直管段长度不满足施工要求等问题。为提升项目设计质量，以开展 QC 小组活动的形式，从三维模型设计质量着手，致力于解决存在的问题。

2.2 现状调查

对该项目核岛管道三维模型情况进行专项质量检查，并对问题建立跟踪台账，详细情况见下表 1。本次共检查管线（BRAN）9557 根，发现问题管线 478 根，错误率 5%。

表1 管道三维模型专项质量检查问题清单（截取部分）

序号	厂房	管线号	模型存在问题
1	L	CAM0009	LP/MP未按照要求建模
2	L	CAM0020A	多余焊口
3	K	CIS0009-K	核实穿墙点S076修改房间号
4	K	CIS0009-K	核实阀门流向，阀门流向与管道流向不符
5	K	CIS0009-K	branch属性温度压力与抽图不一致
6	R	CIS0050B	头部实焊口
7	R	CIS0051A	M2焊口FFW删除/M2改A2
8	R	CIS0033A	偏心大小头布置有误
9	S	CIS0009-S	与“3SR00-LSUP-E0943-V1”碰撞

对发现的差错类型和差错数量进行了归类、统计，详细情况见下表 2：

表2 核岛管道三维模型设计错误情况统计表

序号	差错类型	差错数量	占比（%）
1	布置设计不满足工艺要求	10	2.1
2	布置设计不满足规范要求	108	22.6
3	模型物项命名和属性赋值错误	136	28.4
4	元件库错误或元件选用错误	52	10.9
5	三维模型误修改	98	20.5
6	模型碰撞问题	45	9.4
7	其他	29	6.1
累计		478	100

根据差错率分析表，绘制了差错率分析图，见下图 1：

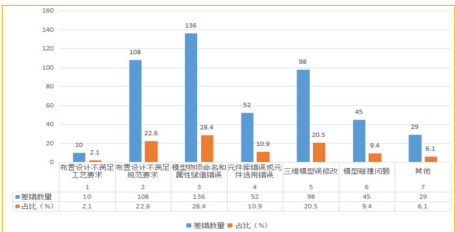


图1 差错率分析图

从上图可以看出，“布置设计不满足规范要求”+“模型物项命名和属性赋值错误”+“三维模型误修改”是影响核岛管道三维模型设计错误率的症结。

2.3 设定目标

依据项目质量考核要求，经过分析，如能将“布置设计不满足规范要求”“模型物项命名和属性赋值错误”和“三维模型误修改”的比重降低 90%，核岛管道三维模型设计错误率将降低至 1.9%。目标值设定为 1.9%，满足项目的质量考核要求（见图 2）。

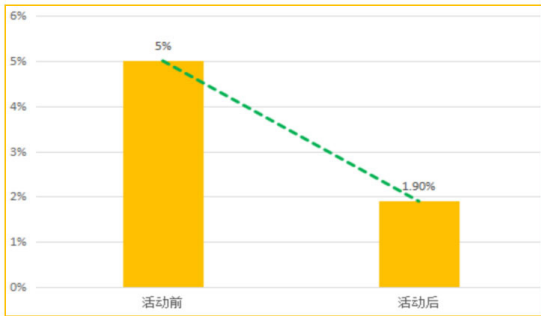


图2 目标值设定

2.4 原因分析

针对核岛管道三维设计差错问题，组织人员开展头脑风暴法，利用关联图（见下图 3）对可能原因进行了深入的分析。通过分析，我们得出了 7 个末端原因：

- 培训力度不够；
- 模型管控流程不明确；
- 缺少有效的模型管控工具；
- 建模规则不明确；
- 三维设计量大；
- 缺少有效的智能化辅助校审工具；
- 设计人员缺乏沟通。

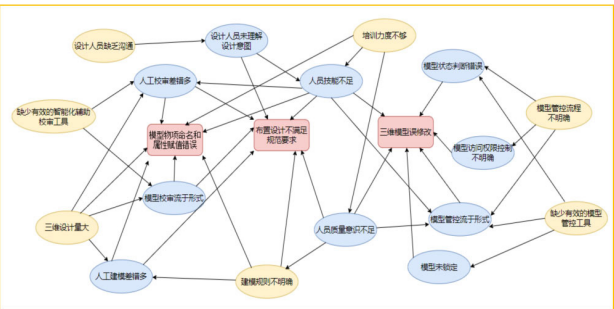


图3 利用关联图分析末端原因

2.5 要因确认

为确定影响核岛管道三维设计差错率的要因，制定了要因确认表，分别对 7 个末端原因进行了分析确认，见下表 3。

表3 要因确认

序号	末端原因	确认方法与内容
1	培训力度不够	调查项目组织培训情况
2	模型管控流程不明确	调查分析模型管控流程
3	缺少有效的模型管控工具	调查分析现有模型管控工具
4	建模规则不明确	调查分析现有建模规则是否完整、规范
5	三维设计量大	调查分析三维设计量与人力匹配情况
6	缺少有效的智能化辅助校审工具	调查分析校审过程，确认智能化辅助校审工具对降低错误率的影响作用
7	设计人员缺乏沟通	调查设计人员沟通情况

通过对 7 个末端原因进行的系统性分析确认，得出影响核岛管道三维模型设计错误率的要因为缺少有效的模型管控工具、建模规则不明确、缺少有效的智能化辅助校审工具。

2.6 制定对策

确认要因后，针对要因进行整理，分析这些主要影响因素产生的原因，根据原因分析，QC 小组按照“5W1H”的原则，进行深入细致的分析，制定了详细的对策计划表详见表 4：

表4 针对影响错误率因素制定对策

序号	要因	对策	目标	措施
1	缺少有效的模型管控工具	研发有效的模型管控工具	降低建模错误率至 1.9%	分析研究三维设计质量控制方法，研发一种正向设计管道及支吊架三维模型的过程质量控制工具
2	建模规则不明确	制定明确的建模规则	降低建模错误率至 1.9%	收集整理完善三维模型设计规则
3	缺少有效的智能化辅助校审工具	研发或引进有效的智能化辅助校审工具	降低建模错误率至 1.9%	分析校审工作流程和具体工作内容及方法，在必要环节增加智能化辅助校审工具

2.7 对策实施

实施对策 1：开发三维模型全流程管控系统。

针对模型误操作问题，基于三维模型平台构建全流程管控系统，通过用户分级权限（设计、校核、审核独立授权）限制模型修改。系统实现设计－校核－审核线上流转与状态追踪（如“设计中”“已校核”），确保流程透明。该方案使模型误修改率降低 80%，流程效率提升 30%（见图 4、图 5）。

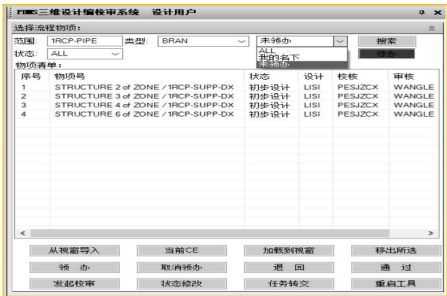


图4 设计过程质量控制工具

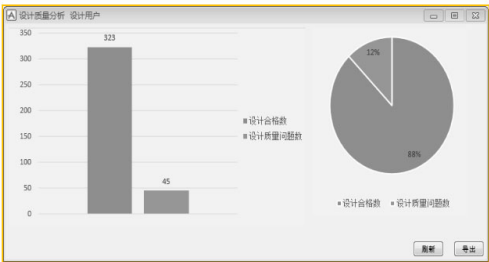


图5 设计质量分析工具

实施对策 2：制定标准化建模规则与设计输入数据库。

为解决建模规则模糊问题，项目制定《核岛管道三维建模技术规范》，明确管道布置等操作细则，并搭建设计输入数据库，集中关键资料且与模型平台同步。设计人员可调用标准化元件库，确保模型符合施工需求。规范实施后，建模规则掌握准确率从 65% 提升至 95%。

实施对策 3：研发与引入智能化校审技术。

为突破人工校审效率瓶颈，开发基于规则引擎的智能校审工具，实现：属性自动校验、碰撞自动检测及规则逻辑审查，生成问题报告。校审效率提升 50%，漏检率降至 2% 以下（见图 6、图 7）。



图6 三维模型质量检查工具

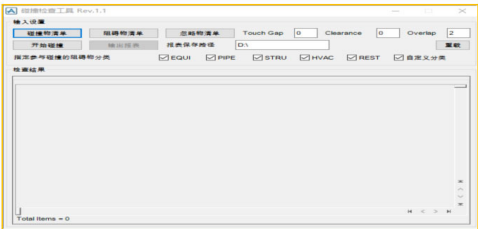


图7 碰撞检查工具

2.8 效果检查

经过以上对策的实施，对该项目核岛管道三维模型设

计错误率情况进行调查统计，见表 5。

表5 核岛管道三维模型设计错误率统计表

设计组别	三维模型设计 BRAN数量	三维模型设计BRAN 错误数量	错误率
设计小组一	200	4	2.0%
设计小组二	198	3	1.5%
设计小组三	205	2	1.0%
设计小组四	192	3	1.6%
合计	795	12	1.5%

从表 4 可知，对策实施后，管道三维模型设计错误率为 1.5%，低于对策目标（降低管道三维模型设计差错率至 1.9%），对策目标达成（图 8），措施有效。

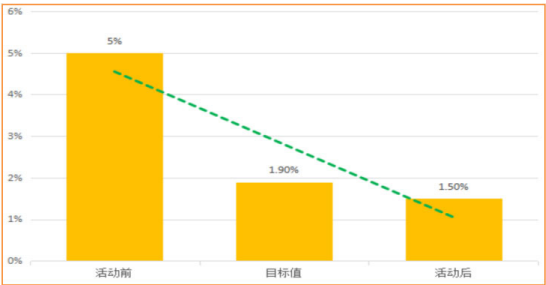


图8 目标值检查

3 典型经验

在核岛管道三维模型设计的质量提升实践中，形成了以下典型经验：

3.1 系统性问题诊断与精准施策

通过深入分析设计错误根源，锁定模型管控缺失、规则模糊及人工校审效率低三大症结。基于问题优先级，针对性开发权限管控与流程管理工具，明确建模规则并建立标准化数据库，结合智能化技术优化校审流程，确保改进措施直击痛点。

3.2 技术与管理协同创新

融合技术工具开发与流程优化，构建“权限控制 + 规则规范 + 智能校审”三位一体的质量管控体系。通过权限分层管理避免误操作，依托标准化规则库统一设计输入，借助批量校验与碰撞检测提升校审效率，实现技术与管理的深度耦合。

3.3 数据驱动的动态质量监控

建立设计过程数据库与可视化分析平台，实时跟踪模型设计质量趋势，识别薄弱环节并快速响应。通过数据反馈机制，动态调整人力配置与设计策略，形成“设计—校审—反馈—改进”的闭环管理。

3.4 标准化与经验传承

将改进措施固化为技术标准与指导手册，定期开展设计规范培训，强化设计人员对规则的理解与应用能力。同时，通过项目间经验共享，推动最佳实践的横向复制，避免重复性问题发生。

4 推广价值

本案例的实践经验对核电工程具有广泛适用性：其一，通过三维模型设计与智能化工具的结合，验证了数字化技术在降低设计错误率、提升协同效率方面的有效性，为核电工程从传统二维向三维全生命周期管理转型提供了可复制的技术路径；其二，“技术工具 + 流程规范 + 数据驱动”的管控模式，可推广至其他核电项目或类似高精度工程设计场景，助力企业构建标准化、可追溯的质量管理体系，减少人为因素导致的误差。

本案例通过技术创新与流程重构，系统性解决了核岛三维模型设计的关键质量问题，其经验具备普适性和前瞻性，不仅为核电工程数字化升级提供了实践样板，也为核电工程领域质量管理的智能化转型贡献了方法论支撑。

参考文献：

[1] 严经星，周焱. 三维设计环境下的设计质量保证实践[J]. 中国机械，2013 (16): 169-170.

[2] 周媛媛，李娟，黄育先等. 核电厂三维布置设计质量控制策略研究[J]. 科技创新与应用，2016(21): 126-126.

[3] 王军. 核电工程设计可视化质量控制应用研究[J]. 科技视界，2020(19): 228-229.

作者简介：宁可（1992.03-），男，汉族，黑龙江齐齐哈尔人，大学本科，工程师，研究方向：核电、核工程设计标准化、数字化和智能化技术研究。