

核电 DCS 智能数字化设计体系构建与应用研究

马瑞

中核控制系统工程有限公司 102488

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21171

[摘要] 对于核电 DCS 设计时系统大、技术复杂、多专业间协调难等痛点, 创建出核电 DCS 智能数字化设计体系, 该体系用分层架构达成数据、算法和应用深度融合的效果, 融合了模型驱动设计、并行协同、知识图谱、虚拟验证这些核心技术, 并且完成设计全过程中智能化革新。经过应用后得出结论, 本体系可以有效地降低设计的人工成本、提高设计的质量和速度, 大大缩减项目的时间, 并且对于核电仪控领域数字化的转变来说, 提供了一条可行的途径。

[关键词] 核电 DCS; 智能数字化设计; 协同设计; 数字孪生

引言

由于核电产业的规模化、批量化发展, 核电站仪控系统 (DCS) 成了保证核电机组安全、可靠运行的“大脑中枢”, 其设计的复杂程度和技术的要求也越来越高。传统的核电 DCS 设计模式以文档为重心, 多专业依次推进工作, 存在着数据一致性差、协同效能低、质量风险大、验证时间长等状况, 不能符合目前核电项目快速完成、高质量建造的要求。智能数字化技术迅猛发展, 给核电 DCS 设计模式变革提供技术支撑, 创建一体化的智能数字化设计体系, 可以促使设计流程重构并提升效率。本文对核电 DCS 智能数字化设计体系的架构、核心模块以及技术支撑进行了阐述, 分析了它的应用效果, 为核电仪控领域数字化升级提供一定的借鉴。

1 核电DCS智能数字化设计体系的整体构建

1.1 体系的分层架构

核电 DCS 智能数字化设计体系是分层的, 由下到上分为数据层、算法层、应用层三个主要部分, 各个层次之间通过标准接口实现数据交换和功能配合, 形成起“数据支撑、算法推动、应用落地”的全要素技术链条, 如图 1 所示。

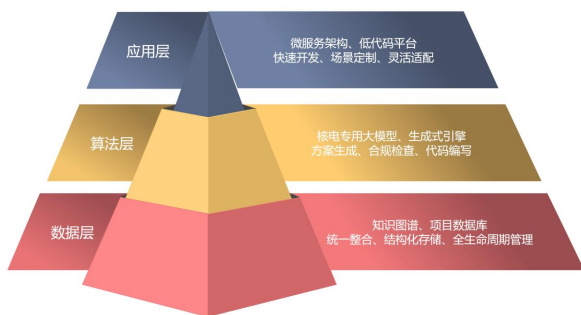


图 1 核电 DCS 智能数字化设计体系分层架构图

数据层为体系的根基支撑, 依靠创建基于知识图谱的工

程方案库和项目数据库, 统一整合管理多种来源的异构设计数据, 融合历史核电 DCS 项目全部设计数据、行业标准规范、设计经验反馈、设备参数库等各方面的数据, 用知识图谱语义化建模的方式把设计知识结构化存储起来并加以关联检索, 给上层智能应用赋予优良的数据根基^[1]。

算法层为体系智能核心, 以多模态大语言模型(LLM)和生成式引擎为基础, 开发出核电 DCS 设计专用智能算法能力, 经过核电设计领域专业数据微调后, 训练得到适合核电仪控设计的专用大模型, 具有方案生成、代码编写、文档生成、合规检查、问题诊断等智能功能, 可以自动生成符合要求的设计输出, 并且可以对设计进行实时合规性检查和错误预警, 辅助设计人员的工作^[2]。

应用层为体系功能落地的载体, 使用微服务架构和低代码开发平台, 可以迅速地创建出各种智能化的设计应用场景, 并且能够把底层的数据和算法能力封装成可以被复用的服务模块, 根据不同的设计场景来灵活组合配置, 满足不同的堆型以及项目的设计需求, 支持个性化的定制, 实现平台通用、场景定制的灵活适应, 保证体系的扩展性和适应性。

1.2 体系的核心应用模块

按照分层架构, 构建了涵盖核电 DCS 设计全过程的主要应用模块, 对核电 DCS 的设计全生命周期进行了全流程智能化支撑, 主要包含以下六个模块。

创成式方案生成模块根据项目的设计输入要求, 自动产生项目级的整体设计方案, 推荐最优的专项设计方案, 学习历史项目方案与当前需求相匹配, 修改适合的方案模板, 缩短方案设计时间, 克服传统方案设计依靠资深专家经验、效率低的难题, 效率提高超过 90%。

智能辅助设计模块嵌入到设计人员的工作环境当中, 为设计过程提供即时的辅助支持, 提醒管理系统以及规范, 给出推荐的自动化设计工具, 并且推送同类型项目的经验反馈。

功能图智能布线模块针对核电 DCS 设计中大量的功能图、SAMA 图设计工作, 实现智能化自动布线, 解决手工布线工作量大、易造成交叉的难题, 根据功能块之间的连接关系自动完成最优布线规划, 生成布局美观、逻辑清晰的设计图纸, 布线效率提高 80% 以上。

多专业协同管理模块支持工艺、仪表、控制、电气等多个专业同时进行协同设计, 保证设计数据的实时同步共享, 统一数字模型供各个设计人员同步设计、修改实时同步, 解决传统模式下专业之间信息数据不一致的问题; 支持设计任务智能分配和进度跟踪。

数字化虚拟验证模块创建全数字化虚拟验证平台, 在设计阶段就能完成 DCS 控制逻辑功能的验证, 不需要依赖物理硬件, 利用虚拟 DCS 技术模拟真实的运行环境, 结合工艺仿真模型进行闭环测试, 提前发现逻辑上的问题, 避免了传统模式必须等到硬件完成之后才能验证的情况, 缩短了验证周期、降低了验证成本, 在设计完成之后立即可以开始验证工作, 提前几个月就能发现问题。

2 体系的核心技术支撑

2.1 模型驱动的一体化设计技术

该体系使用模型驱动的设计技术, 把传统文档驱动的设计方式变成了模型驱动的设计方式。传统的设计模式是以文档为设计中心, 各个专业的设计输出都是独立的文档, 数据分散在不同的文档里, 容易造成数据不一致的问题, 而且数据复用性差, 同一个参数要出现在多个文档上填写, 既耗时又易出错。模型驱动的设计技术把统一的数字模型当作核心, 所有设计工作都围绕这个统一的模型展开, 设计数据只进行一次输入, 就能在全流程、全专业之间重复使用, 创建出“单一数据源”的设计模式, 从根本上杜绝了数据不一致的情况发生^[9]。

在此基础上, 设计人员采用标准化、模块化、变量化的设计方法, 可以批量地完成设备配置、功能图生成、KKS 编码分配等工作, 从而达到实现功能图、SAMA 图等设计图纸自动生成的目的, 大大提高设计的标准化程度和效率^[10]。

2.2 多专业并行协同技术

多专业并行协同技术属于支撑体系高效运转的重要技术之一, 它冲破了传统设计模式下各专业之间的壁垒, 达成多专业并行协同的工作。传统的核电 DCS 设计流程为串行流程, 工艺设计完成后才能开始仪表设计, 仪表设计完成后才能进行控制设计, 各个专业之间需要等待的时间较长, 整个设计周期也较长, 而并行协同技术通过统一的数字模型和实时同步机制, 使各个专业可以并行开展工作, 具体的流程如图 2 所示。

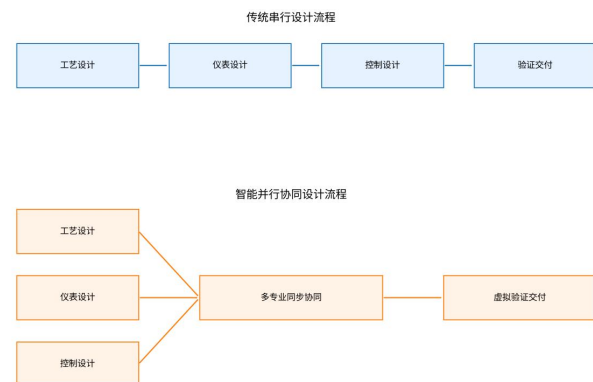


图 2 传统串行设计与多专业并行协同设计流程对比图

该技术采用数据实时同步的方式, 使各个专业设计人员都能得到最新的设计数据, 当某个专业的设计内容发生变化的时候, 修改的内容会立即同步到所有的相关专业中, 相关专业可以及时对自身的设计内容进行修改, 从而防止因为专业之间信息滞后而产生设计冲突、返工等问题^[5]。

2.3 知识图谱与智能生成技术

知识图谱和智能生成技术是体系智能化的主要支撑, 它创建核电 DCS 设计领域知识图谱, 把组态数据, 标准规范, 历史维修记录, 经验反馈这些多种类型的数据融合起来, 从而达成设计知识的结构化以及关联化。利用知识图谱可以准确地进行设计知识检索和推理, 给设计人员提供精确的知识支持, 并且给智能生成算法提供领域的知识支持^[6]。

依托知识图谱以及多模态大语言模型, 体系具备了智能生成的功能, 可以实现方案的自动生成、控制逻辑的自组态、技术文档的自撰写等任务。经过对历史设计数据的学习, 智能生成模型已经掌握了核电 DCS 设计的专业知识和规则, 根据设计输入可以自动生成满足要求的设计输出, 并且可以对设计内容进行自动的错误检查, 发现设计中不符合标准的内容, 提前预警设计风险, 大大提高了设计质量与效率。

2.4 数字化仿真验证技术

数字化仿真验证技术对核电 DCS 的设计实施了全部的数字验证过程,利用虚拟 DCS 技术创建了一个和真实 DCS 完全一致的虚拟运行环境,虚拟 DCS 系统可以完全模拟出真实 DCS 的控制逻辑模拟、显示操作模拟、数据采集和输出模拟、网络通信模拟、组态配置模拟等一系列重要功能^[7]。

另外,此技术又联系了工艺仿真模型,创建起了闭环的逻辑测试环境,可以将设计好的控制逻辑装入虚拟 DCS 环境之中,同工艺仿真模型展开数据交流,模拟真实机组的运行状况,从而对控制逻辑的功能和性能实施全面的检验。测试期间还可以采用静态代码剖析以及动态剖析手段,全方位地剖析控制逻辑的代码,静态剖析能够找出代码里的运行时错误、编码准则合规情况,动态剖析可以达成 99% 以上的分支覆盖量,从而保证代码可靠,提早发觉设计上的毛病,防止出现后期的返工费用。

3 体系的应用成效分析

核电 DCS 智能数字化设计体系在规模化应用过程中,取得明显成效,从人工投入、设计质量、项目周期、协同效率等各方面实现了对传统设计模式的超越,具体的性能对比如图 3 所示。

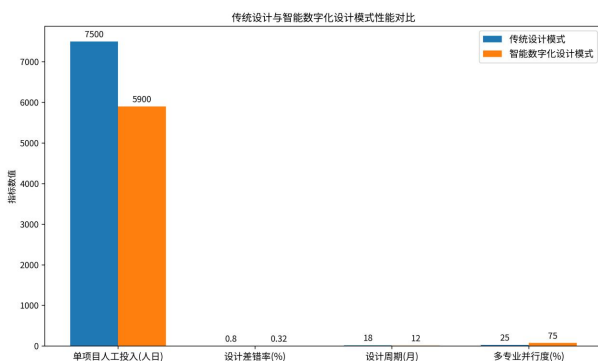


图 3 传统设计模式和智能数字化设计体系应用效果对比图

人工投入部分,借助自动化、智能化的设计工具削减了设计人员的重复性工作,总计节省了 5000 多人日的工作,单个项目的人均人工消耗由原来的 7500 人日降低到现在的 5900 人日,缩减了人力成本和工作量。设计质量上,该体系依靠实时合规检查、自动错误检测、数据一致性的保证,减少设计差错率,设计质量比传统模式高出了 60% 以上,差错率由原来的 0.8% 降到现在的 0.32%,减少了由于设计缺陷造成的后期返工,降低了项目质量风险,符合核电行业严格的质量要求,对于保证核安全有着重要的意义^[8]。项目周期上

该体系依靠多专业并行协同、虚拟验证技术压缩了设计周期,传统的核电 DCS 设计周期是 18 个月,采用此方法之后缩减到 12 个月,缩短了 33%,提高了交付速度,满足核电项目批量化建造的要求,能加快核电项目实施和能源结构转变。协同效率上该体系达到多专业深度并行协同的效果,多专业并行度由原来的 25% 提高到现在的 75%,减少了各个专业的等待时间,提高了设计效率。

4 结论

核电 DCS 智能数字化设计体系的创建,促使核电 DCS 设计模式完成了智能化、数字化的转型,凭借分层架构、核心技术模块以及关键技术支撑,很好地应对了传统设计模式所存在的诸多难题,极大改善了设计效能、品质及协作水平,给核电 DCS 的设计赋予了全新的解决办法。该体系的应用,既可以提高核电 DCS 设计的效率和质量,支持核电项目快速高质量建设,也可以给核电仪控领域数字化转型提供一条可行之路,推进核电产业高质量发展。

[参考文献]

- [1]潘海波. 基于规则模型的核电 DCS 算法逻辑图自动设计研究 [J]. 自动化仪表, 2026, 47 (6): 57-62+74.
 - [2]方垚. 基于核电 DCS 通信模块 RE 超标问题的方案研究 [J]. 自动化博览, 2026, 43 (3): 78-82.
 - [3]李祁颖,陈钊,文景,等. 核电厂安全级 DCS 报警显示设计研究 [J]. 自动化与仪器仪表, 2026, (1): 195-198.
 - [4]纪立军,李兵,杜晓彬. 核电工程数字化设计及交付标准体系分析 [J]. 数字技术与应用, 2024, 42 (9): 186-188.
 - [5]祁蔚,胡旭鹏,鲁星言,等. SPDM 系统在核电数字化设计仿真验证平台的应用研究 [J]. 核动力工程, 2024, 45 (S1): 52-57.
 - [6]张立群,刘问杰,曹惺笛. 核电厂电气系统自动建模数字化设计 [J]. 自动化仪表, 2023, 44 (S1): 353-356+360.
 - [7]李友,吴德成. 核电室外工程数字化设计平台建设研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (S1): 740-744.
 - [8]周建秋,张洁,赵栋,等. 核电设备数字化设计平台关键技术研究与应用 [J]. 制造业自动化, 2022, 44 (2): 10-15+30.
- 作者简介: (马瑞, 1987 年, 男, 汉族, 籍贯内蒙古鄂尔多斯, 高级工程师, 学士学位, 核电 DCS)