

基于人工智能的核安全级 DCS 验证 与确认新范式

冯晋涛, 龚磊, 曾辉, 靳津

(中国核动力研究设计院 核反应堆技术全国重点实验室, 成都 610213)

摘要: 数字化控制系统 (DCS) 是保障核电站安全稳定运行的“神经中枢”, 直接关系到核安全, 其可靠性和安全性要求极为严格; 围绕 AI 技术在 DCS 验证与确认 (V&V) 中的创新应用, 在 3 个关键领域取得重要突破: 基于大语言模型的自然语言分析技术实现了需求文档的智能解析与比对, 结合核电知识图谱提升了文档验证效率与准确性; 在结构化语言分析方面, 提出了基于 IO 自动化分配验证方法和 CRNN 驱动的仪控功能图智能比对算法, 显著提高了 IO 分配验证和设计变更审查的效率; 针对核工业遗留系统代码分析难题, 基于大模型的代码语义理解与强大重构能力, 实现了老旧代码的智能化分析; 研究表明, AI 技术的引入使核安全级 DCS 验证与确认过程的效率提升显著, 同时降低了人工操作风险, 为核领域 V&V 工作提供了智能化的全新解决方案。

关键词: 人工智能 (AI); 核安全级 DCS; 验证与确认 (V&V); 大语言模型; 数字化转型

An AI-Based New Paradigm for Verification and Validation of Nuclear-Safety-Class DCS

FENG Jintao, GONG Lei, ZENG Hui, JIN Jin

(National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Nuclear Power Institute of China,
Chengdu 610213, China)

Abstract: The digital control system (DCS) serves as the "nerve center" ensuring the safe and stable operation of nuclear power plants, which is of great significance to nuclear safety, reliability, and security. AI technologies are innovatively applied in DCS verification and validation (V&V), achieving significant breakthroughs in three key areas. A large model-based natural language analysis technology is used to intelligently parse and compare with requirement documents, which is combined with nuclear power knowledge graphs, significantly improving the efficiency and accuracy of document verification. In structured language analysis, an IO-automated allocation verification method is proposed, with a CRNN-driven intelligent comparison algorithm for instrumentation and control function diagrams presented, which significantly improves the efficiency of IO allocation verification and design change review. Additionally, to address the challenges of legacy code analysis in the nuclear industry, the intelligent code analysis of outdated codes is achieved based on the semantic understanding and powerful refactoring capabilities of large language models. Research findings demonstrate that the AI technologies significantly improve the efficiency of nuclear-safety-class DCS V&V processes while reducing manual operation risks, providing an intelligent and novel solution for V&V in the nuclear industry.

Keywords: artificial intelligence; nuclear-safety-class DCS; verification and validation (V&V); large language model; digital transformation

收稿日期:2025-12-09; 修回日期:2026-01-13。

基金项目:国家自然科学基金项目(U25A20439)。

作者简介:冯晋涛(1985-),男,硕士,高级工程师。

引用格式:冯晋涛,龚磊,曾辉,等.基于人工智能的核安全级 DCS 验证与确认新范式[J].计算机测量与控制,2026,34(4): 242-248.

0 引言

《中国核能发展报告 2025》显示,我国商运核电机组已达 57 台,总的装机容量为 5 976 万千瓦,位居全球第三;在建核电机组 28 台,装机容量连续 18 年保持全球第一^[1]。核电站作为国家能源安全的重要支柱,其数字化控制系统(DCS, digital control system)是保障核电站安全稳定运行的“神经中枢”。中国核动力研究设计院自主研制的龙鳞平台成功打破了国外技术垄断,实现了 DCS 系统的完全自主可控,该平台系统包含 200 余个机柜、50 多个控制站,管理超过 10 万个的 I/O 测点,代码量达到千万行级别^[2]。

核电安全级 DCS 系统由于其失效可能带来的灾难性后果,因此其可靠性和安全性要求极为严苛。我国核安全法规 HAF 102 及导则 HAD 102 明确规定了在系统开发过程中必须实施一套独立、系统、严格的验证与确认(V&V, verification & validation)流程。V&V 工作的质效已成为保障核安全级 DCS 系统安全性的关键屏障。

近年来,人工智能技术正深刻改变全球工业格局。随着以 DeepSeek 为例的国产大模型的广泛应用^[3],AI 赋能测试的成本和质量优势正引发革命性变革,在安全关键系统的测试验证领域中展现出巨大潜力。基于深度学习等技术,中国核动力研究设计院将扩大了反应堆事故模拟的测试范围^[4],何伟鑫等人^[5]提升了对目标编号识别的准确率,杨泰波人^[6]等提升了压力容器振动探测效果,阳惠等人^[7]对控制棒驱动机构正常运行工况和典型故障模式识别准确率显著提升;特斯拉 Autopilot 团队^[8]基于生成式对抗网络(GAN, generative adversarial network)自动生成 14 万种极端测试场景;华为云 CodeArts^[9]通过时序神经网络分析代码提交模式,大幅提前缺陷提交时间并降低误报率。全球标准也在同步升级:ISO 26262-2018 新增 AI 验证附录;核电领域 IAEA GS-R-3 修订版明确将数字孪生测试场纳入安全认证体系^[10-11]。

AI 赋能测试有望高效高质重构软件质量保障基线,本文立足核电领域 DCS 验证与确认,针对与人工智能相关技术融合的 V&V 新范式开展研究。

1 核电软件 V&V 领域机遇与挑战

为满足我国核安全法规体系的要求,需按照如图 1 所示的生命周期开展 V&V 活动。这些 V&V 活动严格遵循国际标准 IEEE 1012《系统、软件和硬件验证与确认标准》,如图 2 所示,通过执行相应的 V&V 任务覆盖系统全生命周期的验证过程,确保安全级 DCS 的每一项功能都完全符合核电厂的安全设计要求和规范,从

而为核电安全级 DCS 系统的可靠性和安全性提供坚实保障^[12-13]。

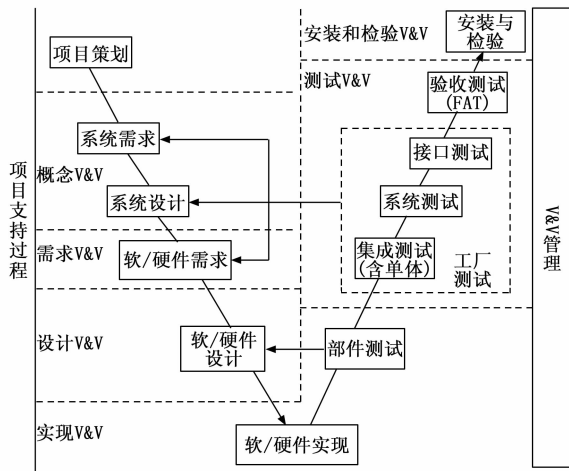


图 1 V&V 生命周期

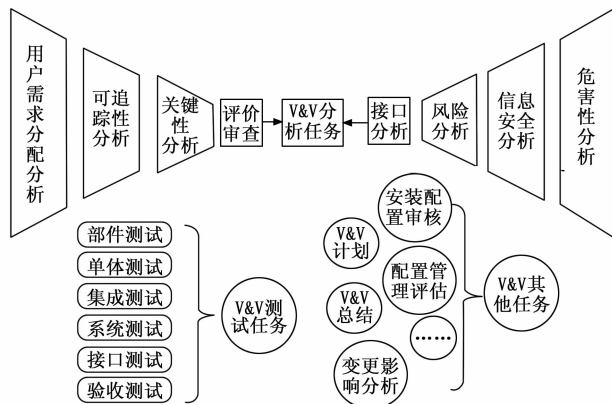


图 2 V&V 任务活动

随着我国核电事业的高速发展,核安全 DCS 的验证与确认(V&V)工作正面临五大挑战:1)对复合型人才的极高要求;2)系统判据繁复、接口关系复杂;3)监管严格与规模庞大导致验证工作量剧增;4)人工验证效率低、成本高且易出错;5)作为工程末端面临严峻进度压力^[14-16]。

在此背景下,人工智能技术的突破为 V&V 工作带来了革命性机遇:智能工具提升效率与准确性,大模型辅助完成复杂验证任务,知识库建设降低专家依赖。通过数据挖掘增强缺陷识别能力,最终构建智能化验证流程,减少人为错误和成本,实现 V&V 工作的智能化升级。

2 验证与确认新范式构建

基于人工智能核安全级 DCS 验证与确认(V&V)的新范式框架以“可信智能”为核心设计理念。该架构构建在三大技术支柱之上,如图 3 所示:AI 大模型提

供认知能力，自动化工具实现流程优化，核领域知识库确保专业深度，并通过严格的 V&V 方法论将这些技术有机整合。这种架构设计能够将底层智能技术安全、可靠地转化为核安全领域的实际应用价值，显著提升了工业遗留代码重构、危害性评估、I/O 分析、仪控逻辑图比对以及代码审查等关键 V&V 任务的效率和质量。

该框架主要聚焦 3 大应用方向：自然语言处理（面向技术文档分析）、结构化数据分析（处理图纸和清单等标准化资料）以及智能代码分析。每个应用方向都配备了专门优化的 AI 解决方案，通过差异化赋能全面提升核安全级 DCS 的验证效能。

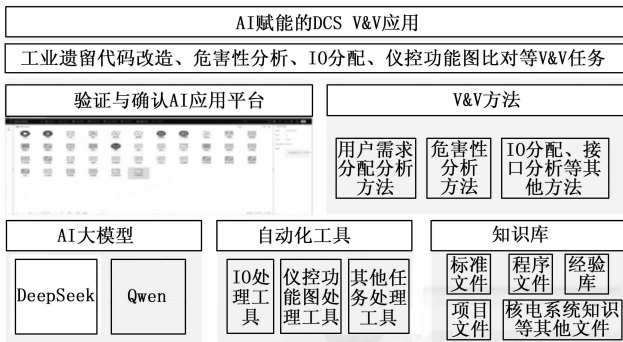


图 3 安全级 DCS V&V AI 新范式框架

2.1 自然语言分析赋能一用户需求分配分析、危害性分析

系统需求文档、系统设计文档和软件需求文档作为核电 DCS 系统开发的重要依据，其内容主要由自然语言构成。这类文档需要经过严格的验证流程，包括但不限于文档规范性评价、系统危害性分析、信息安全风险评估等关键验证环节。这些验证工作旨在确保文档内容的完整性、准确性和合规性，为后续的系统实现奠定可靠的基础。

在传统的核电 DCS 验证与确认 (V&V) 工作流程中，验证过程需要经历一系列严谨而复杂的环节：首先由 V&V 工程师对用户文档进行系统性的整理和深入解

读；随后各专业角色分工开展具体验证工作并详细记录验证结果，完成验证后还需组织不同验证人员开展交叉验证，验证记录需经专业审查人员进行二次审核，通过审核后，各角色需编写验证报告和相关表单，这些文档还需经过审查人员的最终确认，最终才能形成完整的验证任务报告。这一流程通常涉及上百份技术文档，从最初的文档整理、分析到后续的交叉验证和审核，每个环节都高度依赖人工操作，不仅工作效率较低，而且容易出现人为疏漏。整个过程文档处理工作量大，人工投入成本高，耗时费力，如图 4 所示^[17-19]。

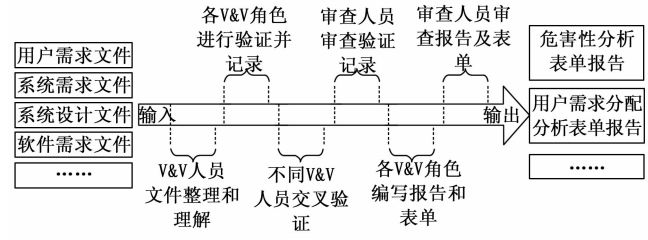


图 4 传统自然语言验证流程

核安全领域的严苛监管对验证过程的可解释性要求极高，验证人员需通过控制决策规则建立与提取方法加人工二次确认的手段，把控大模型的决策过程和预测依据，从而提升 AI 技术在核安全领域应用中的可行性和可接受性。在构建 V&V 任务分析智能体时，如用户需求分配分析，将推理的需求类别范围固定，对每项需求类别的判断规则进行明确和约束，建立清晰的需求类别范围边界，并对各需求类别进行优先级排序。将优先级的需求判断作为决策规则赋予大模型，降低大模型的无序化和模糊化识别。在危害性分析时，智能体设计遵从“设计理解—危害识别—危害分析—防范措施”的思维链进行分析。在整个过程中，大模型的逻辑推理过程作为结果一并进行输出，通过验证人员的二次确认，确定最终的分析结果。

针对用户需求分配分析任务，通过深度挖掘历史项

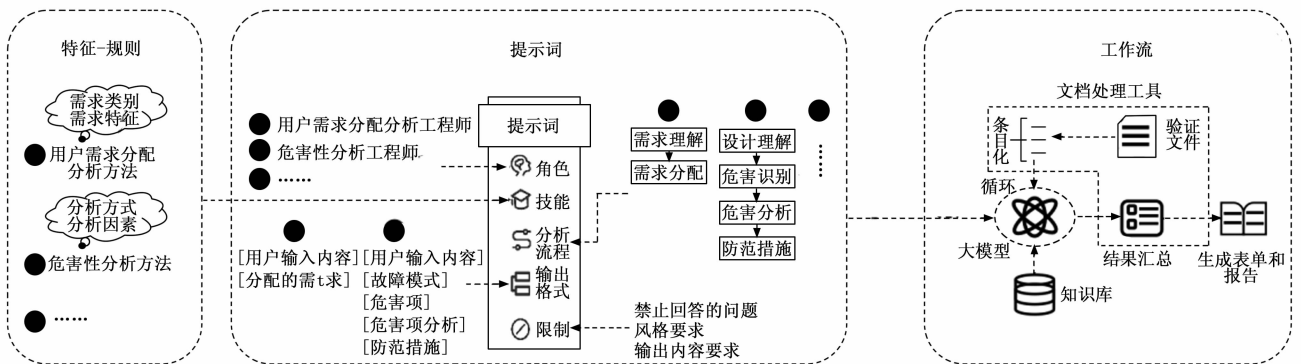


图 5 用户需求分配 V&V 智能体流程

目数据 (包括用户需求文档、过往验证记录及组织过程资产), 系统实现了特征提取与规则学习的智能化。针对核安全级 DCS 系统验证任务的需求, 基于验证方法论和领域知识, 将传统的验证分析方法 (包括需求追踪、逻辑验证、边界条件测试等) 转化为可被大语言模型理解和执行的标准化指令。通过“特征—规则—提示词”的 3 层架构设计 (如图 5 所示), 实现了从验证需求到 AI 执行的全链路映射。具体而言: 1) 在特征—规则层, 我们对验证对象进行多维特征提取并建立规则库; 2) 在提示词层, 基于特征规则设计具有明确指令结构的提示模板; 3) 在工作流层, 将验证流程分解为可自动化执行的标准化步骤。上述设计思路在保留传统验证方法严谨性的同时, 显著提升了验证效率和覆盖度。

针对危害性分析任务, 构建智能化危害性分析智能体: 首先通过自然语言处理技术对输入文档进行智能解析, 提取关键内容节点并转化为结构化数据; 随后采用迭代式分析方法, 通过大语言模型对每个数据条目进行多维度风险评估, 自动生成符合“条目编号+危害描述+严重等级”的标准化分析结果; 最终通过智能文档生成引擎自动输出规范报告, 实现了从需求输入到危害性分析报告生成的全流程自动化处理。

2.2 结构化语言分析赋能

2.2.1 I/O 分配清单验证的智能化升级

传统人工验证方法在处理大规模 I/O 信号分配清单时明显存在效率瓶颈, 特别是面对上万点信号验证任务时, 工程师需要执行复杂的多步骤流程: 首先按照工艺系统逐项核查信号完整性, 接着详细检查每个变量的属性参数, 依据严格的分配准则验证卡件配置的合理性, 随后进行精确的 I/O 容量计算, 最后完成报告编制和审核工作。这种人工操作模式不仅耗时费力, 而且难以追溯修改记录, 极易出现人为差错^[20-22]。

本研究基于多年的工程实践经验与 AI 赋能结合, 实现了 I/O 验证工作的智能化升级转型: 首先对原始 I/O 信号文档进行智能识别和提取, 通过自动化预处理工具对数据进行清洗和标准化处理, 生成结构化的专用验证清单, 并构建信号关联关系。基于标准化清单, 自动化工具能够高效完成变量命名规范检查、属性参数一致性验证等基础工作。特别值得一提的是, 通过精心设计的分配规则提示词体系, 结合大语言模型的智能推理能力, 实现了信号分配合理性的自动化评估, 大幅提升了验证工作的准确性和效率, 具体流程如图 6 所示。

2.2.2 结构化语言分析赋能—仪控功能图验证的智能化升级

本研究基于一种结合了卷积神经网络 CNN (Conv-

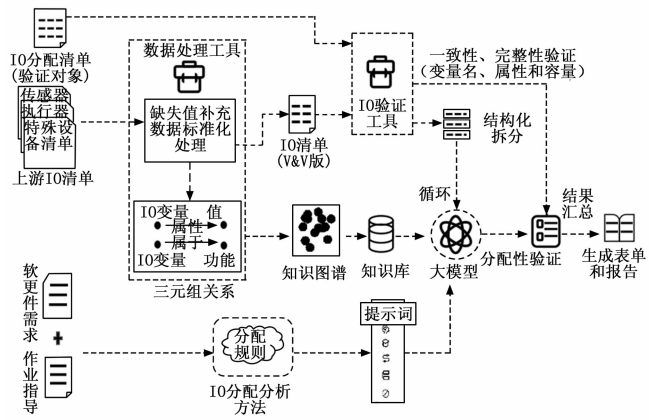


图 6 IO 验证智能体实现流程图

olutional Neural Network) 和循环神经网络 RNN (Recurrent Neural Network) 的深度学习架构 CRNN (Convolutional Recurrent Neural Network), 实现仪控功能图版本差异检测, 采用三阶段处理流程, 实现仪控功能图的自动化比对^[23], 大致流程如图 7 所示。

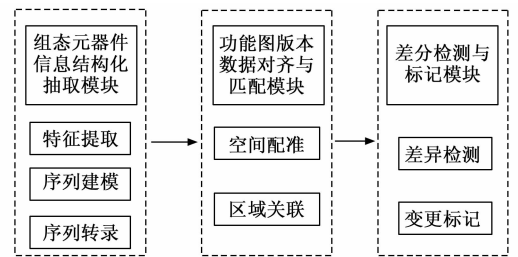


图 7 基于 CRNN 的仪控功能图比对实现流程图

1) 组态元器件信息结构化抽取模块。通过深度学习实现图纸元素的精准识别与结构化:

(1) 特征提取层: 采用深度卷积神经网络, 通过多层卷积和池化操作构建高维特征图谱, 有效捕捉元器件的视觉特征;

(2) 序列建模层: 引入双向长短期记忆网络 (Bi-LSTM, bidirectional long short-term memory), 利用其门控机制建模特征序列的上下文依赖关系;

(3) 文本转录层: 基于动态规划算法优化处理, 将冗余的帧级预测合并为准确的文本标签输出。

2) 版本数据对齐与匹配模块。建立多版本图纸的精确对应关系:

(1) 空间配准: 基于特征点检测技术, 采用仿射变换模型校正不同版本间的整体性坐标偏差 (包括平移、旋转和缩放);

(2) 区域关联: 在配准后的统一坐标系下, 以欧氏距离为度量标准, 实现文本元素的空间位置匹配。

3) 差分检测与可视化标记模块。智能识别并突出显示变更内容:

(1) 差异检测：对已建立关联的元器件元素执行精确匹配算法，识别参数或配置变更

(2) 变更可视化：采用云图标记技术对差异区域进行高亮显示，支持多级颜色编码区分变更类型。

2.3 工业遗留代码分析

在核电等高度工程化的领域，遗留系统代码维护正面临严峻挑战。技术更迭导致核心设计思想流失，遗留代码充斥“魔法数字”和复杂分支，维护成本持续攀升。传统人工注释效率低且不稳定，现有工具缺乏语义理解能力，注释质量难以满足工程需求。在高安全领域，不完善的代码注释可能引发功能异常、逻辑错误甚至安全事故，形成制约系统可持续性和风险管理的关键瓶颈。

在应用大模型技术自动化生成和增强代码注释的过程中，重点解决了 3 个关键问题：1) 内网（单独隔离的局域网）计算资源有限，大模型 API 的调用受到严格限制（例如每分钟每个 API 密钥仅允许两次访问），我们设计并采用了按项目全时不间断处理的运行策略，确保任务能够持续进行，最大化利用有限的访问额度；2) 模型处理上下文长度有限是另一个现实约束，当遇到体积较大的单个代码文件时，我们采用了文本分块策略，这种方法将大文件分解为模型能够有效处理的片段，并对每个片段进行独立分析和注释生成；3) 为了保证生成注释的准确性，尽可能减少模型“幻觉”（即生成看似合理实则错误的内容），整个流程的核心在于对代码本身的深度解析和预处理。我们精心设计了提示词工程（PE, prompt engineering），引导模型聚焦于理解代码的实际意图和逻辑。

此外，我们引入动态知识检索机制，实时关联 API 文档、设计规范等外部知识库，形成层次化的上下文理解框架。这种将代码静态分析与动态知识增强相结合的技术路径，大幅提升了注释生成的专业性和可维护性，具体流程如图 8 所示。

3 实验结果与效果分析

3.1 自然语言分析赋能验证结果分析

本研究将 AI 技术引入传统 V&V 验证领域，通过对比智能验证与传统人工验证的效果，采用重复试验计算标准差与专家验证相结合的方式开展评估。具体方法是对历史项目文档进行智能分析（每份文档重复 3 次），并由行业专家将智能分析结果与人工分析数据进行对比验证，最终获得需求分配分析和危害性分析智能体的试验数据。实验统一采用 Deepseek-V3 (128B) 大模型作为智能体基础架构。

试验数据为应用面最广的华龙一号需求规格书和其他核电改造项目的需求规格书及应用软件需求说明书。

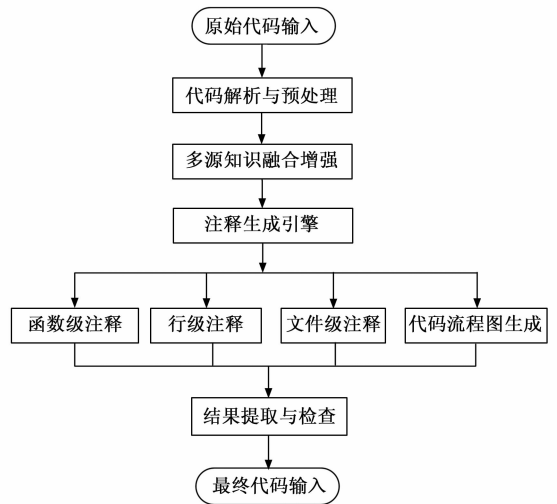


图 8 智能化代码分析流程图

需求规格书用于用户需求分配分析，应用软件需求说明书用于危害性分析。

其中各个核电站的华龙一号需求内容大致相同，仅选择最新的华龙一号需求规格书和应用软件需求说明书；不同核电改造或新堆项目差异性较大，选择近 3 年内 3 个不同改造或新堆项目的需求规格书和应用软件需求说明书。上述文档均为历史项目的真实文档，各个需求条目下的数据长短不同，按照文档中原有约定好的条目结构化自然语言内容作为智能体分析内容，不做人为调整。例如，分别按照以下 XXX-SYS-RQ-流水号下的需求层次作为大模型每次循环分析的输入内容：

“<XXX-SYS-RQ-102>当机柜门打开时，应通过机柜门灯提醒就地维护人员，同时应在控制室提供报警提醒操作人员。”

1) 用户需求分配分析：

以一份 2.5 万字，70 页，涵盖 151 个项目需求条目的“华龙一号”用户需求规格书为分析案例。智能体按照提示词要求，处理时长约为 2 h。生成了用户需求、需求分配、判定理由（若有）为固定格式，共计 60 页用户需求分配分析任务报告。

针对 4 个项目的需求规格书智能体用户需求分配分析数据，将每次的分析结果与历史专家分析数据进行比较分析，识别出差异项，结合需求项总数计算准确率。具体如表 1 所示。

各对象需求条目规模不同，采取加权平均的方式计算用户需求分配分析综合准确率（Accuracy）：

$$Accuracy = \sum_{i=1}^4 n_i a_i$$

式中， n_i 为不同项目的需求项总数， a_i 为不同项目的专家判断的平均准确率。

表 1 用户需求分配分析试验数据

项目	需求项	差异项	专家判断准确率/%
华龙一号项目	151	3	98.0
		4	97.4
		2	98.7
1 号改造项目	126	3	97.6
		2	98.4
		2	98.4
2 号改造项目	90	1	98.9
		1	98.9
		3	96.7
3 号改造项目	133	4	97.0
		2	98.5
		3	97.7

根据表 1 中的数据计算综合准确率约为 98.0%。

2) 危害性分析:

以“华龙一号”软件需求说明书为例(约 4 万字/105 页),智能体耗时约 50 min 完成危害性分析,输出 65 页报告(含 189 项危害分析、4 万余字),采用“危害项—危害分析—防范措施”的标准化格式。实践表明, AI 分析补充了 20%~30% 的有效危害项,覆盖软硬件、通信、人因等维度,不仅完善了验证程序文件和作业指导,还提升了 V&V 团队整体分析水平。具体分析结果见表 2。

基于试验数据分析,智能体在用户需求分配分析任务中展现出较好的实用性和稳定性,其分析结果置信度接近行业专家水平,仅需少量人工校对即可完成验证。而在危害性分析方面,目前仅有少量分析结果可用,且验证人员审查难度较大。

得益于需求特征的明确界定和提示词的规范约束,当前大模型能够有效辅助传统需求分配分析。但在危害性分析领域, AI 应用仍处于起步阶段,主要面临两大挑战:一是核电软件设计中的复杂原理图难以被大模型识别和推理;二是危害分析涉及多变量交互影响,其识别和量化难度较高,需要持续优化才能提升应用效果。

3.2 结构化语言分析赋能应用

本研究以“华龙一号”核电机组的 I/O 信号分配清单验证为典型案例,展示了智能化验证方案的实际应用效果,如图 9 所示。通过直观呈现每个信号的功能归属、电气特性和关联参数,赋予 AI 对信号间复杂关系的深度理解能力。验证过程中,智能分析引擎自动比对设计规范与分配清单,生成包含异常类型、位置和修正建议的完整标注报告。相比传统人工验证方法,新方案实现了显著提升:异常遗漏率降低 20%,验证周期缩短 50%。

表 2 危害性分析智能体输出结果分析

分析项	V&V 团队(人工)	危害性分析智能体
识别危害项	276 项	189 项
确认危害项	97 项	46 项
重叠危害项	14 项,重叠项主要为硬件方面,包含失电、断线、电磁干扰、模块故障等危害。	
AI 补充项	32 项, AI 补充项主要涉及以下内容:1) 硬件相关危害约占 47%,主要为模块故障、隔离、电磁干扰等方面;2) 软件相关约占 25%,主要为时序、CPU 周期、逻辑处理、参数设计等方面;3) 通信相关约占 16%,主要为通信协议、通信延迟、通信负荷等方面;4) 信息安全危害约占 10%,主要为访问控制和密码策略方面。另外针对以上内容,分析结果还同时涉及法规标准方面的约占 50%。	
AI 无效项	143 项,根据 VV 审查,无效项主要从内部重复项、当前设计或平台已满足、发生的概率极低、产生的危害很小几方面考虑,另外部分危害分析内容超出仪控和核电领域专业知识,无法判断,也暂判定为无效项。	
成本投入	7 名 V&V 人员分析半个月,技术经理审查 2 天。	AI 处理 1 h,技术经理审查 2 天。
分析内容优势	具备以往项目经验,熟悉 DCS 平台、架构、上下文间结构知识,分析内容全面,覆盖所有功能设计。	知识储量大,在法规标准、软硬件底层机制、参数设计、嵌入式设计等 V&V 团队欠缺的方面分析较深,值得借鉴。
分析内容劣势	法规标准、硬件设计、时序分析、协议和参数设计等深层次分析能力不足;且经项目迭代,分析内容基本难以分析出有效危害项内容。	不熟悉 DCS 龙鳞平台知识,上下文结合思考能力差,图像逻辑分析能力不足。

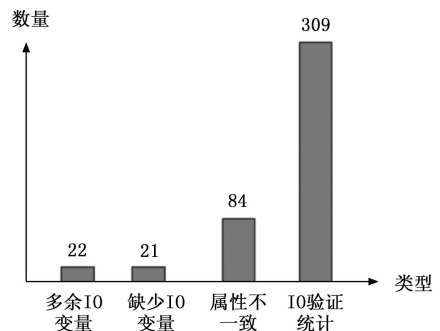


图 9 IO 分配清单智能分配分析结果图

本研究提出的仪控功能图智能比对方案以“华龙一号”仪控功能图为验证对象,实际应用数据显示,该方案使比对效率相对传统人工方式提升 3 倍以上,错误率明显下降。以漳州核电 3、4 号机组 DCS 系统仪控功能图基线变更验证为例,针对一次约 3 000 页左右的图纸变更,传统人工验证的方式需耗费约 5 人/月,采用本

方法后,可缩短至 1.5 人/月。这一方法有效提升了工程设计质量管控能力,为核电仪控变更管理提供了高效可靠的解决方案。

3.3 工业代码改造赋能应用

在核工业领域计算协同项目平台的实践中,该技术体系展现出显著成效。仅用 2 h 就完成了 614 个代码文件的智能注释,处理代码规模达 12 万行,将代码注释率从 28.31% 提升至 42.88%。整个过程完全自动化,注释准确率超过 90%,不仅大幅提升了代码可维护性,还节省了约 200 人日的人工成本。这一成功实践为工业领域遗留系统的智能化维护提供了可复制的技术方案,其应用前景广阔,有望在更多领域实现价值延伸。通过降低技术债务、提升代码质量和保障系统安全,该技术正在重塑工程领域的代码维护范式。

4 结束语

本研究系统地探索了 AI 技术在核安全级数字化控制系统 (DCS) 验证与确认 (V&V) 领域的创新应用,在 3 个核心方向取得了重要突破: 1) 在自然语言分析赋能方面,基于大模型技术构建了智能文档分析智能体,自动提取需求文档关键要素,实现用户需求分配分析和危害性分析的智能审查,审查效率较传统人工方式提升显著; 2) 在结构化语言分析赋能方面,提出了 IO 分配的自动化验证方法和 CRNN 驱动的仪控功能图智能比对方法,前者通过智能映射确保 IO 分配的准确性和一致性符合设计规范,后者可自动识别图纸差异,使设计变更验证效率大幅提升; 3) 在核工业遗留代码分析方面,基于内网单机条件,基于大模型构建了代码语义理解与自动分析框架,实现了老旧代码的智能化分析注释,同时集成核安全编码规范检查、流程图等功能,显著降低了工业遗留代码分析及改造风险和工作量。

参考文献:

- [1] 中国核能行业协会. 中国核能发展报告 2025 [R]. 北京: 中国核能行业协会, 2025.
- [2] 刘艳阳, 刘明星, 雷敏杰, 等. 安全级 DCS “龙鳞系统”研制综述及展望 [J]. 中国核电, 2019, 12 (5): 537 - 541.
- [3] 深度求索公司. DeepSeek 模型技术白皮书: 动态稀疏计算与量子化数据筛选框架 [R]. 杭州: 深度求索公司, 2023.
- [4] 中国核动力研究设计院. 深度强化学习在核反应堆事故模拟中的应用 [R]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2022.
- [5] 何伟鑫, 邓建球, 丛林虎, 等. 基于改进 CRNN 的导弹编号识别算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 128 - 134.
- [6] 杨泰波, 罗能, 李芸, 等. 基于绝对位移的核反应堆压力容器振动探测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (6): 59 - 65.
- [7] 阳惠, 曾辉, 张倬, 等. 控制棒驱动机构智能感知与自适应控制系统设计及仿真验证 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (1): 120 - 126.
- [8] 特斯拉 Autopilot 工程团队. 基于 GAN 的自动驾驶极端场景生成技术 [R]. 帕洛阿尔托: 特斯拉公司, 2023.
- [9] 华为云技术团队. CodeArtsAI: 基于时序神经网络的 5G 核心网缺陷预测 [R]. 深圳: 华为技术有限公司, 2023.
- [10] IEEE 标准协会. 安全关键系统的 AI 增强验证标准 (IEEEStd1012-2023) [S]. 纽约: IEEE, 2023.
- [11] 国际原子能机构. IAEA 安全标准系列 No. GS-R-3: 核设施管理系统 [S]. 维也纳: IAEA, 2021.
- [12] 张晨昊, 曾景晖, 郑骈垚, 等. 核安全级 DCS 设计变更过程标准化及实践研究 [J]. 自动化仪表, 2025, 46 (9): 28 - 34.
- [13] 武有光, 刘明明, 张子鹏, 等. 安全级 DCS 仿真验证平台技术方案研究 [J]. 核动力工程, 2020, 41 (1): 89 - 92.
- [14] 文景, 解保林, 马象睿, 等. 核安全级 DCS 系统响应时间测试样本量分析方法研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2025, 45 (1): 85 - 92.
- [15] 肖安洪, 田露, 曾辉, 等. 方家山核电站反应堆保护系统优化研究与应用 [J]. 核动力工程, 2019, 40 (s2): 126 - 129.
- [16] 肖安洪, 曾辉, 秦友用, 等. 基于 FPGA 的“龙鳞”通信模块跨时钟域验证实践 [J]. 上海交通大学学报, 2019, 53 (s1): 84 - 87.
- [17] 陈杰, 靳津, 肖安洪, 等. 核电厂安全级数字化仪控系统故障缺省值的验证与确认 [J]. 仪表技术, 2024, (4): 44 - 48.
- [18] 武有光, 张子鹏, 彭浩, 等. 一种智能化核安全级 DCS 设计与验证方法、系统及存储介质 [P]. 中国: CN202211122425.0, 2022-12-06.
- [19] 陈杰, 靳津, 肖安洪, 等. 基于 SCADE 的安全级 DCS 浮点数运算误差分析 [J]. 仪表技术, 2025, (3): 46 - 49.
- [20] 莫昌瑜, 金思奇, 李昊, 等. 核安全级数字化控制系统故障定位方法研究 [J]. 核动力工程, 2025, 46 (6): 224 - 234.
- [21] 李书剑, 庞天枫, 杨泰波, 等. 反应堆关键设备状态数据标准化研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (6): 198 - 203.
- [22] 蒋兆翔, 何攀, 刘才学, 等. 核反应堆压力容器密封面泄漏监测与分析诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (5): 20 - 24.
- [23] 姜颖, 祁云嵩. 面向人工智能深度学习的知识图谱补全技术与应用综述 [J]. 计算机测量与控制, 2024, 32 (5): 8 - 16.