



## SPDM系统在核电数字化设计仿真验证平台的应用研究

祁蔚, 胡旭鹏, 鲁星言, 张大志, 曲鸣

### Research on the Application of SPDM System in the Simulation and Verification Platform of Nuclear Power Digital Design

Qi Wei, Hu Xupeng, Lu Xingyan, Zhang Dazhi, and Qu Ming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2024.S1.0052>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### [小堆结构材料全生命周期数据管理系统设计研究](#)

Design and Research of Data Management System for the Whole Life Cycle of Small Modular Reactor Structural Materials  
核动力工程. 2022, 43(5): 119–125

##### [基于大数据和关系型数据相融合的反应堆远程运维数据管理系统开发](#)

A Remote Operation and Maintenance Data Management System for Nuclear Reactors Based on Integration of Big Data and Relational Data  
核动力工程. 2020, 41(2): 202–206

##### [数字孪生技术在浮动核电站设计阶段中的应用研究](#)

Application of Digital Twin Technology in the Design Phase of Floating Nuclear Power Plants  
核动力工程. 2022, 43(1): 197–201

##### [核反应堆设计软件验证数据库系统的研制](#)

Development of Nuclear Reactor Design Software Verification Database System  
核动力工程. 2019, 40(1): 135–139

##### [基于PSA技术的核电厂数字化仪控系统可靠性设计及应用](#)

Reliability Design and Application of NPP Digital I&C System Based on PSA  
核动力工程. 2019, 40(2): 99–104

##### [安全级DCS仿真验证平台技术方案研究](#)

Research on Technical Scheme of Safety Level DCS Simulation Verification Platform  
核动力工程. 2020, 41(1): 89–92



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2024)S1-0052-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2024.S1.0052

# SPDM系统在核电数字化设计仿真验证平台的应用研究

祁蔚<sup>1,2</sup>, 胡旭鹏<sup>1</sup>, 鲁星言<sup>1,2</sup>, 张大志<sup>1,2</sup>, 曲鸣<sup>1,2</sup>

1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 武汉, 430223; 2. 中核核工业仿真技术重点实验室, 武汉, 430223

**摘要:** 随着核电数字化设计范式的不断发展, 对于核电设计任务中跨部门、跨专业、跨领域之间的协同设计工作变得愈发困难。针对核电数字化设计仿真验证流程中存在的普遍问题, 本文对企业级仿真流程与数据管理 (SPDM) 技术进行研究, 开发适用于核电数字化设计场景下的核电数字化设计仿真验证平台, 实现不同领域下的设计软件、建模软件、仿真软件、测试软件的软件集成与数据管控, 为核电场景设计验证数字化转型奠定了基础。

**关键词:** 仿真流程数据管理; 设计验证; 模型管理

**中图分类号:** TL334 **文献标志码:** A

## Research on the Application of SPDM System in the Simulation and Verification Platform of Nuclear Power Digital Design

Qi Wei<sup>1,2</sup>, Hu Xupeng<sup>1</sup>, Lu Xingyan<sup>1,2</sup>, Zhang Dazhi<sup>1,2</sup>, Qu Ming<sup>1,2</sup>

1. China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan, 430223, China;  
2. CNNC Key Laboratory on Nuclear Industry Simulation, Wuhan, 430223, China

**Abstract:** As the digital design paradigm of nuclear power evolves, the complexity of collaborative design tasks across departments, disciplines, and domains escalates. Aiming at the common problems existing in the simulation verification process of digital nuclear power design, this paper studies the enterprise-level simulation process and data management (SPDM) technology, and develops a simulation verification platform for digital nuclear power design. The system achieves software integration and data control in various domains, including design, modeling, simulation, and testing software. This development has laid the foundation for the digital transformation of design verification in nuclear power scenarios.

**Key words:** Simulation process and data management, Design verification, Model management

### 0 引言

核电数字化设计仿真验证平台是为了核电数字化设计验证而开发的工程仿真系统, 用于核电机组控制逻辑、人-机界面和事故导则策略等方面的验证。该平台的研制与应用过程涵盖了从整体设计到子系统详细设计, 再到仿真建模与验证

的多个关键阶段<sup>[1]</sup>。由于各阶段使用不同的专业软件, 不同专业间的数据可能需要修正或进行格式转换, 这将导致数据流转困难, 延长了平台研制周期, 并且需要定制开发数据转换软件来识别和映射元数据。针对这些问题, 本研究提出仿真流程与数据管理 (SPDM) 系统, 旨在综合管理

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-05-05

作者简介: 祁蔚 (1982—), 男, 高级工程师, 现主要从事仿真验证与系统工程方面的研究, E-mail: qiwei@cnp.com.cn

数据模型和设计验证流程，通过提供数据进行源追溯、安全监管以及数据转换映射等功能应用，以提高数据利用效率并加快设计验证效率。

### 1 核电数字化设计体系概述

核电数字化设计参考国家核安全局发布的相关核动力厂设计导则<sup>[2-3]</sup>进行实际设计工作，流程上包括总体设计、系统设计和设备设计 3 个主要层次，涵盖了从项目策划、需求分析、设计开发、实施构建、系统集成到后续维护修改的全生命周期活动，以确保设计的系统性和连贯性，流程如图 1 所示。

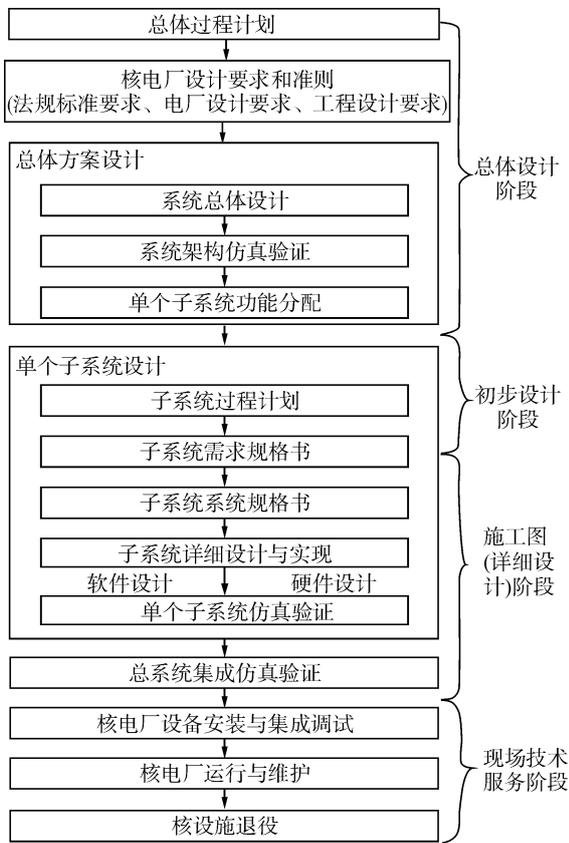


图 1 核电设计简单流程  
Fig. 1 Simple Flowchart of Nuclear Power Design

在总体方案设计中，需进行系统总体设计工作。对复杂系统的设计、仿真、测试和生产等所涉及的技术、组织和流程进行总体规划设计，对于适应新型数字化转型要求时还需结合复杂系统基于模型的系统工程（MBSE）数字化设计理念建立以模型为核心，通过系统建模语言（SysML）方式进行总系统各个子模块系统功能的拆解表达，

再将系统架构设计模型转换为仿真模型，执行仿真验证任务以初步验证总体功能设计的正确性，完成后进行分项子系统功能的设计任务分配。

单个子系统（如电气系统、工艺系统、仪控系统）的数字化设计流程步骤为：①编制过程计划，明确设计目标和步骤；②编写需求规格书，列出功能项的需求条目清单和分项描述并定版；③选择适用的设备物项，进行适用性分析，编制系统规格书，并映射需求；④进行详细设计，使用专业设计软件进行领域设计，并构建单系统仿真模型，开展仿真验证工作，确认设计正确性，并进行子系统相关软、硬件的采购。子系统设计工作同步开展，待全部完成后进行仿真模型集成联调，明确各个子系统的内外部交互接口，集成联调形成统一仿真模型，并执行分项和总体规程测试，验证详细设计是否满足总体设计要求，并进行系统确认流程。

完成系统确认后进入现场技术服务阶段，主要包括设备安装与集成调试、日常运行与维护、偏差修正、适应性技改和核设施退役等环节。在设备安装与集成调试阶段，对核电厂各种设备系统进行安装和调试，确保设备正常运行和集成。进入日常运维阶段后，进行核电厂日常运行、维护以及故障检修工作；根据需求，对系统和设备进行技改或适应性修改；以及在收到上级部门的退役任务后，执行核设施退役流程。

### 2 SPDM 系统概念

SPDM 系统涵盖了对仿真活动全生命周期中产生的数据和流程进行系统化管理的方法和技术。相对于产品生命周期管理（PLM）系统，SPDM 系统专注于仿真阶段的数据和流程管理，其针对的是在 PLM 系统中难以处理的复杂仿真分析数据和流程。SPDM 系统通过集成仿真流程、管理仿真数据与仿真模型、执行仿真实验，并提供仿真评估和优化的数据分析支持，能够应对仿真活动中仿真工具多样化、仿真结果文件容量大、格式异构以及仿真流程复杂等问题。SPDM 系统能够为复杂的产品设计和仿真验证提供一个全面、集成、高效的解决方案，不仅优化了仿真活动，还为整个产品开发流程的高效运作提供了强有力的数据支持和流程保障。

### 3 仿真流程数据管理现状

在早期仿真实验中，仿真验证工具链未有效建立，仿真数据通常驻留在各个工程师的个人工作台上，且往往由离散的表格或 word 文档进行管理，数据传递是点对点的直接传递，有效性得不到保证。在管理仿真活动过程中仍旧存在诸多问题：①过程数据量大：在仿真过程中生成了大量临时数据，该类数据生命周期短，仅用于迭代计算周期中的参考或者决策，定稿后即被删除；②数据类型多且体量庞大：仿真时会涉及诸多类型结构的数据，如各类专业（力、热、电、控制等）仿真软件生成的结果数据，且一个设备往往需要由多种类型的复杂数据来表示，占用大量存储资源；③仿真数据位置分散：在进行高复杂性或高精度仿真计算时，需要采用分布式仿真，如将仿真模型配置在多台高性能计算机（HPC）上进行仿真，大量的仿真结果记录在不同的物理介质中而未集中存储，从而影响后续的分析处理工作；④结果数据展示不直观：仿真数据多以二维表格的形式存储，在仿真流程数据传递中仅能传递原始数据或预渲染图形，二次渲染过程繁琐；⑤仿真流程复杂：仿真场景下需要灵活调整仿真工具或参数，精细化控制数据创建、删除、查阅等权限。⑥数据源追溯困难：在对仿真结果数据进行分析时，需要了解其上下游边界条件，分析仿真过程中产生异常数据的根本原因，然而数据的起源和流转路径往往不明确。

### 4 核电数字化设计仿真验证平台下的 SPDM 系统关键技术

仿真验证在整个核电厂数字化设计中发挥着至关重要的作用，不仅可以用于确认设计概念的有效性和可行性，通过模拟核电系统在各种运行状况下（满功率工况、瞬态过程、故障状态等）的运行特征与动态响应还可以评估系统的性能指标。这种方法使得工程师在设计阶段就能够识别和纠正潜在的设计偏差，从而提高核电厂的安全性和可靠性。为应对核电设计仿真验证工作中的挑战，并满足数字化转型的需求，基于 PLM 系统并结合核电仿真设计验证的实际工程实践，以研究核电数字化设计仿真验证平台下的 SPDM 系统，在工程实践中解决了以下关键技术难题。

#### 4.1 面向业务对象建模

业务对象建模采用模型驱动架构，为复杂的业务数据管理提供了一个统一的模型封装方案。这一方法不仅简化了数据管理，而且为应用系统打造了一个安全、高效且易于扩展的通用数据管理底座，其允许开发团队集中精力于业务领域模型的设计与实现，显著提升了开发效率，并快速适应业务需求变化。通过使用建模工具，业务应用的可复用性、可扩展性、可移植性、可靠性及安全性得到了保障，同时在开发和运维阶段均维持了高标准的软件质量。此外，业务对象建模支持动态建模，涵盖了一系列功能特性，如：

（1）动态业务对象建模：详细定义了对象的属性、关系和物理存储等元数据信息，支持管理实体间的引用、组合和关联关系，并提供了开发态和运行态 2 种建模应用场景，可支撑上层应用系统在运行时对对象模型进行动态灵活的调整。

（2）通用对象操作：提供一系列基于业务对象的操作功能，包括对象关系映射（ORM）、对象版本控制、对象权限鉴权以及对象全生命周期状态管理。

（3）对象搜索与复杂模型关系分析：利用分布式搜索引擎和模型标签实现对象的快速检索。同时，基于业务对象模型动态生成关系图谱，结合图数据库和图计算引擎对复杂模型关系进行快速分析和检索。

#### 4.2 业务流程与仿真流程定制

流程分为业务流程与仿真流程，业务流程涉及项目管理的核心环节，如项目启动、需求收集、评审、实施以及测试验收等。仿真流程与仿真技术密切相连，涵盖操作分析、系统分析、逻辑架构设计、物理架构设计等关键阶段。每个仿真流程阶段都各自包含了一系列特定的建模流程工序，要求实现仿真流程不同阶段之间模型数据的精确传递，以确保数据一致性和可追溯性。由于仿真流程的复杂性和对细节的高要求，通常需要根据项目的具体情况进行个性化调整。

在核电设计和仿真验证实际应用中，SPDM 系统提供了强大的定制化功能，允许灵活调整流程以适应不同工程特性。SPDM 系统利用先进的软件编码将流程定义抽象化，形成可灵活配置的工作流程模型。结合前沿的网页前端技术与数据

库技术，SPDM 系统开发了图形化的流程组态工具，该工具使用户能够轻松自定义流程活动节点和路径以及流程活动属性，关联触发任务，设置通知事件，以及配置状态变更、处理角色等，如图 2 所示。自定义流程功能囊括了业务流程与仿真流程的定制化需求，实现灵活自由的流程管理，还能够触发第三方系统联动，实现如邮件发送、版本控制、状态提升等高级功能。

### 4.3 大容量仿真数据存储

在仿真建模和参数调试过程中，工程师经常需要进行大量的参数迭代与批量仿真。SPDM 系统必须具备一种能够处理和容纳大量且分散数据的存储机制。

传统 PLM 系统通常使用关系型数据库（如 MySQL、SQLServer 等）来存储结构化数据，这些数据库在处理二维表数据方面表现出色，但在仿真领域，由于工具的多样性和数据格式的复杂性，其难以满足需求。仿真工具如 Fluent、REL-AP、Flowmaster 等软件，产生的数据格式各异，属性字段频繁变动，这些都是单一关系型数据库难以适应的。为了克服这一挑战，在 SPDM 系统引入了非关系型数据库 MongoDB、时序数据库 InfluxDB，以及分布式文件系统 HDFS，为 SPDM 系统提供强大的底层数据存储能力。MongoDB 具备灵活的文档存储结构，能够轻松容纳复杂的仿真数据；InfluxDB 专为处理时序数据而设计，适用于存储仿真过程中产生的大量时间序列数据；

HDFS 提供了高吞吐量的数据访问，适合于大规模数据集的存储和处理。SPDM 系统数据库架构如图 3 所示。

仿真计算时，SPDM 系统通过高效的网络通信接口将过程数据实时写入，根据数据结构特性，系统自动将数据分散存储到不同的数据库中，确保数据的高效管理和快速访问。此外，SPDM 系统还封装了统一的接口，不仅便于仿真数据的传递，还支持第三方数据的实时调度，进一步优化了仿真数据的管理流程。

### 4.4 业务集成框架

SPDM 系统集成框架遵循总线型松耦合的架构设计思想，通过统一的集成总线实现数据、消息和服务的抽象化交互，极大地简化了应用之间的集成拓扑结构，降低了集成复杂度，并支持功能的动态扩展。

消息集成是实现异步通信、构建松耦合系统的关键。其允许不同功能模块，如统一门户中的待办任务、消息（审批、提醒等）、邮件信息等，实现自由组网和就近接入。这一特性使消息集成不仅支持大规模、高并发的数据处理，还能动态调整路由策略以适应不同的业务需求。此外，高吞吐量、高可用性的消息中间件服务为构建实时数据管道、流式数据处理、第三方解耦以及流量管理等场景提供强有力的支持。这一服务具有大规模、高可靠性、高并发处理能力，并且完全托管，是分布式应用迁移至云端的关键组件。

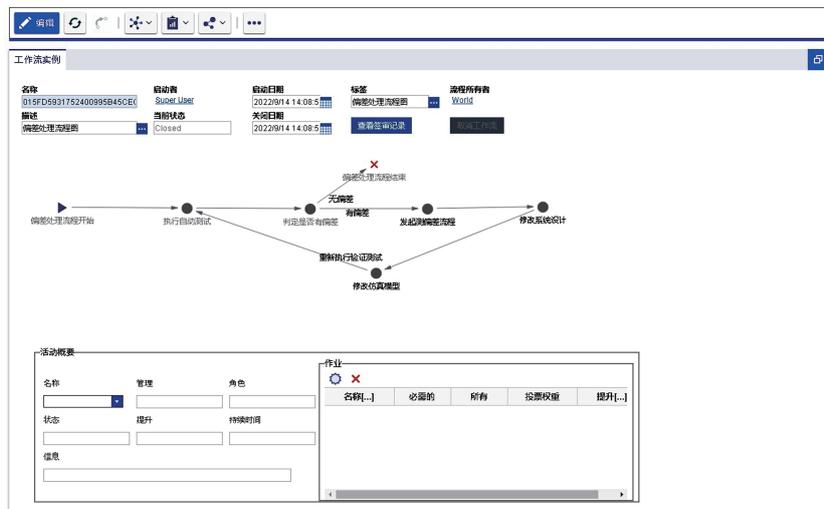


图 2 自定义流程功能界面  
Fig. 2 Custom Process Features

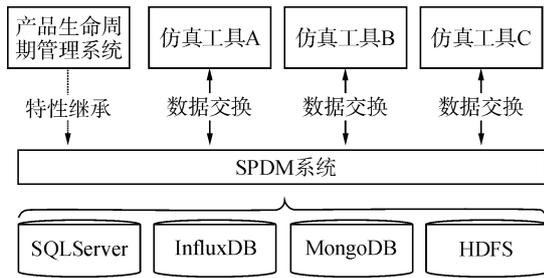


图3 SPDM系统数据库架构  
Fig. 3 SPDM Database Composition

数据集成关注于数据层面的整合。其通过一系列灵活的读写数据插件，支持多种数据源的读取和写入操作，包括分片数据的处理和任务中断后的续读。此外，数据集成还支持元数据转换，具备可靠的数据传输通道，提供灵活的任务调度机制以及跨网络、跨数据中心、跨机房的数据同步能力。

服务集成聚焦于服务的整合和流程的打通，涵盖了应用程序接口（API）从设计、开发、测试、管理到发布的全生命周期管理。服务集成对系统间服务调用关系进行规范管理，提供统一的监控、接入、服务目录，确保统一对外提供服务。

#### 4.5 MBSE 融合

数字工程作为一种全面的集成化数字化方法，关键在于创建并维护系统的权威模型源和数据源。这种方式依赖于跨专业和跨组织的模型与数据的无缝整合，以支持系统在其全生命周期中的各种活动。MBSE系统由系统模型驱动，贯穿整个生命周期，其基于系统模型实现数字样机的构建、演化，以及在各个研制阶段中实现持续的验证闭环和数字化交付，形成统一的架构、流程、平台，具备高效的新型研制模式。为了深化MBSE系统与SPDM系统的融合，本研究在SPDM系统中构建了与MBSE系统层次对应的模块，包括需求管理、系统架构、设计管理与仿真管理等关键功能架构。SPDM系统在此扮演支撑核心数据的角色，通过自定义类的方式为MBSE系统各个流程阶段提供数据承载能力，如图4所示。

MBSE系统中使用的系统建模工具作为客户端独立完成特定阶段的建模工作，并通过网络平台或本地接口与SPDM系统进行数据交换，过程遵循SPDM系统的总线型接口标准。变更的数据



图4 SPDM系统中MBSE系统的映射  
Fig. 4 Mapping of MBSE in SPDM

实时更新并同步到SPDM系统中，SPDM系统负责详细记录并提供版本、数据的跟踪信息，包括需求、设计、测试版本的追踪、逻辑上下游关系等。此外，SPDM系统能够生成清晰的拓扑结构图，直观展示系统架构。

#### 4.6 集约化仿真模型库建立

仿真建模工作的核心之一在于模型库的支撑，通过集中存储与分类管理，集约化仿真模型库能够实现模型资源的高效管控，从而提高生产研发效率，并为模型库的商业化运作提供支持。在本研究中，SPDM系统对仿真模型库进行集中管控，结合GIT与SVN等版本控制工具，并利用数据库中的二维表信息，构建了一套完整的仿真模型库数据架构。这一架构不仅实现了模型库的版本控制，而且保证了模型历史的有效追溯和有序管理。

更进一步地，SPDM系统内嵌的数据对比工具能够清晰地识别不同版本模型库之间的差异，以及模型功能的演化历程。这一工具的引入极大地提升了模型变更的可追踪性，增强了模型库的透明度和可信度。通过这种集约化管理，SPDM系统优化了仿真模型的利用效率，并强化了对模型版本的精细控制，为仿真建模工作提供了坚实的数据支撑。

#### 4.7 仿真业务流程驱动建模

SPDM系统核心是模型驱动式建模引擎，通

过一系列接口和服务对数据模型及基于模型的数据进行精细管理。在 SPDM 系统数据管理生命周期中，设计阶段专注于数据模型的定制与扩展，而运维阶段则涉及业务数据的创建、修改、查询和处理。业务模型是 SPDM 系统数据管理和集成的基石，统一数据建模和动态模型扩展是实现模型驱动的关键和难点。通过基于仿真业务流程的建模，SPDM 系统为各级用户提供了标准化的元数据模板和统一的数据类型（Item Type），极大地简化了系统的开发、扩展和运维工作，提升了整体效率。

## 5 结 论

在本研究中，针对核电数字化设计仿真验证平台的特定业务需求，研究了 SPDM 系统，该系统采用模型驱动架构，实现了设计软件与仿真工具的高效整合，显著优化了数据流转与处理流程。SPDM 系统的关键技术创新在于动态业务对象建

模、大容量数据存储解决方案，以及与 MBSE 系统的深度融合，这些技术的应用不仅提升了设计验证的自动化水平和数据的可追溯性，而且支持集约化仿真模型库建立，为模型资源的高效管控提供了支持。SPDM 系统的应用提高了核电设计验证工作的效率和可靠性，同时为核电行业的数字化转型提供了坚实的技术基础，也为其他复杂工程领域的数字化发展提供了宝贵的经验和参考。

### 参考文献：

- [1] 邱建利, 刘培邦, 田波. 设计验证平台在核电厂 DCS 设计中的应用 [J]. 科技创新导报, 2015, 12(30): 23-24.
- [2] 国家核安全局. 核动力厂仪表和控制系统设计: HAD102/10-2021[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2021: 2-10.
- [3] 国家核安全局. 核动力厂反应堆堆芯设计: HAD102/07-2020[S]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020: 8-12.

(责任编辑: 邱 彦)