

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2018.03.002

作为研究设计工具的数字化反应堆

李 庆,宫兆虎,方浩宇,柴晓明,卢宗健

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术重点实验室,四川 成都 610213)

摘 要:数字化技术的快速发展变革了相关行业原有的发展模式,推动了相关行业的进步,而核行业目前对数字化技术的应用尚未达成有效共识及形成系统化.针对数字化技术在核工程领域的应用,简要介绍了国内外相关行业领域数字化技术发展现状,重点阐述了数字化反应堆技术在核反应堆研究设计中的应用研究情况及未来的研发实施构想.研究表明:灵活可扩展的数字化基础平台框架、基于系统工程的三维协同设计和设计验证系统、基于知识工程的大数据管理是数字化反应堆技术作为反应堆研究设计工具的重要研究内容,可为后续数字化技术在核反应堆研究设计中的应用提供顶层思路的构建参考.

关键词:数字化反应堆;云计算;协同设计;MBSE;知识工程

中图分类号:TL46 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2018)03-0008-05

The Digital Reactor Applied as a Research and Design Tool

LI Qing, GONG Zhaohu, FANG Haoyu, CHAI Xiaoming, LU Zongjian

(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, Sichuan 610213, China)

Abstract: The rapid development of digitalization technology has revolutionized industries from their original developing patterns and pushed forward the progresses of them. Nevertheless, the difference of the digitalization technical roadmap has a big gap in nuclear fields, and the systematized application in them has not initiated so far. For the application of digitalization technology in nuclear engineering, this thesis briefly introduces the current development status of digitalization technology both domestic and abroad, and it focuses illustrating the application and future development of digital reactor as a nuclear reactor R&D tool. Research result shows that a flexible & expandable framework of digitalized basic platform, a three-dimension collaborative design and design confirmation system based on

收稿日期:2018-03-18

基金项目:中核集团“龙腾 2020”科技创新计划“数字化核电厂综合研发平台(第二阶段)”

作者简介:李 庆(1971-),男,高级工程师,博士,主要从事方面核电软件、数字化反应堆、先进燃料、模块化小型堆、核电工程等方面的研究.E-mail:liqing-npic@126.com

system engineering, and the big data management based on knowledge engineering could be the most paramount research contents during the application of digitalization technology in nuclear reactor R&D, and these could help establish the top ideas of digital application for the nuclear reactor R&D in the future.

key words: digital reactor; cloud computing; collaborative design; model based system engineering; knowledge engineering

0 引 言

数字化反应堆是目前国际核工业届的一个研究热点,是数字化技术发展及核反应堆需求发展到现阶段的必然趋势和产物.当前,不同国家甚至不同主体单位对数字化反应堆内涵的理解各有不同,重点研究方向也有差异.

行业内最著名的是美国能源部 2010 年启动的数字反应堆计划 (consortium for advanced simulation of light water reactors, CASL). 该计划主要模拟和研究美国现有轻水堆电厂提升效率、降低成本、增强安全性和延长寿期所碰到的一些问题^[1]. 随后美国能源部又启动了新的数字反应堆计划 (nuclear energy advanced modeling and simulation, NEAMS), 该计划是面向中长期发展的、针对美国新一代核电厂和未来核电厂,包括铅铋堆等多种四代堆、小型模块化反应堆和其它创新理念. NEAMS 使用的关键技术与 CASL 类似,不同的是 CASL 注重使用已有的程序, NEAMS 注重开发新的程序或改写已有的程序^[2].

欧洲几乎与美国同期陆续策划了针对核电反应堆的高性能模拟计划,它包含三个连贯性的项目 NURESIM/NURESP/NURENEXT. 该计划的总目标是:1) 整合欧洲的力量发展一个属于欧洲的反应堆多物理、多尺度耦合模拟平台;2) 耦合模拟平台使用的专业程序超越世界现有水平,而且是经过严谨的验证,并具有和其它程序连接的功能;3) 耦合模拟平台将用于第三代至第四代反应堆研发^[3].

相比于欧美国家,中国的数字反应堆技术发展起步稍晚.国内三大核电集团及相关高校均对数字反应堆展开了一系列研究.在民用核电领域,中核、国电投、中广核三大集团竞相启动相关研发工作,内容除了类似欧美那种利用多物理、多尺度耦合技术建立具有预测反应堆性能的虚拟仿真环境外,还包括以三维数字电厂为核心展开的研发、设计、工程、管理及建造的协同设计和一体化流程设计,比如中核集团的“数字核工业”、国电投集

团的“数字化电厂”、中广核集团的“智能电站”.

作为设计单位,中国核动力研究设计院对数字化反应堆的研发主要定位于打造先进的研究设计工具.近几年在中核集团和国家相关部委的支持下,围绕数字化技术在反应堆研究设计领域的应用,中国核动力院从协同设计、仿真验证到项目管理等方面进行了研究.本文主要从研究设计工具的角度介绍中国核动力院的数字化反应堆技术图景和相关内容.

1 基于虚拟化技术的云计算平台

目前,各核电设计单位都建有自己的数据中心,它是企业的信息中心,通过网络向用户提供信息服务.数据中心在逻辑上包括硬件和软件,硬件是指数据中心的基础设施,包括支撑系统和计算机设备等,软件是指数据中心所安装的程序和提供服务.由于数字化反应堆技术应用的综合性和全面性,需要底层提供一个统一的平台环境为核反应堆的研究设计服务,需要构建新一代数据中心提供基于虚拟化技术的云计算平台.

计算机系统分为若干层次,从下至上包括底层硬件资源、操作系统、操作系统提供的应用程序编程接口,以及运行在操作系统之上的应用程序.虚拟化技术可以在这些不同层次之间构建虚拟化层,向上提供与真实层次相同或类似的功能,使得上层系统可以运行在该中间层之上.这个中间层可以解除其上下两层间原本存在的耦合关系,使上层的运行不依赖于下层的具体实现,可以在下层资源发生变化时将其对用户的影响降到最低.新一代数据中心的构建首先是对服务器虚拟化,此外还包括网络虚拟化、存储虚拟化、桌面虚拟化和应用虚拟化等^[4].

在云计算中,硬件和软件都是资源,可根据需要进行动态扩展和配置,以分布式的共享方式存在,但最终在逻辑上以单一整体的形式呈现,并通过网络以服务的方式提供给用户.用户按需使用云中的资源,而无需管理它们.用户本地不必再配置个人计算机.云架构通过虚拟化、标准化和自动

化的方式有机地整合云中的硬件和软件资源,并通过网络将云中服务提供给用户.云架构可分为三个基本层次:基础设施层(基础设施即服务,infrastructure as a service, IaaS)、平台层(平台即服务,platform as a service, PaaS)和应用层(软件即服务,software-as-a-service, SaaS),如图1所示.基础设施层是经过虚拟化后的硬件资源和相关管理功能的集合,实现了内部流程自动化和资源管理

优化,向外部提供动态、灵活的基础设施层服务.平台层是具有通用性和可复用性的软件资源的集合,是优化的“云中间件”,为云应用提供开发、运行、管理和监控的环境,能够更好地满足云的应用在可伸缩性、可用性和安全性等方面的要求.应用层是云上应用软件的集合,既可以是标准应用,也可以是定制的服务应用,还可以是用户开发的多元应用^[4-5].

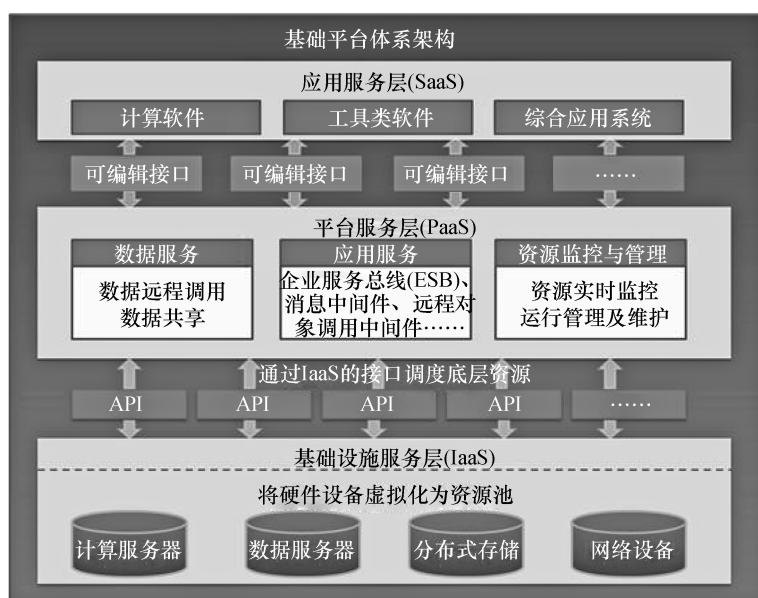


图1 基础平台体系架构

Fig.1 Framework of foundation platform

2 基于三维模型的协同设计

基于虚拟化技术的云计算平台可以使得项目设计工作被放置一个共享平台上,为所有设计专业及人员在一个统一的平台上进行协同设计提供了条件保障.协同设计为目前设计行业技术更新的一个重要方向,也是核反应堆设计技术发展的必然趋势.

在基于三维模型的协同设计中采用基于模型的定义技术(model based definition, MBD),利用共同的三维实体模型完整表达设计对象的定义信息,并把所有专业的设计都建立到一个模型中进行分工协同^[6].基于三维设计规范,建立以三维信息模型为基础的自顶向下的设计,即设计由总体布局、总体结构、部件结构到部件零件的逐步细化的设计过程.各个专业将CAD或CAE模型链接到统一的三维协同软件平台模型上,利用三维协同软件提供的复制与监视功能,对设计者需要关注

的元素进行监视,如果发现链接文件发生变化能体现在模型中,并进行自动提醒,从而及时调整自己的设计.

基于三维模型的协同设计,不是简单地将二维图纸转换成三维模型,而是要充分利用三维模型的特征表现力,探索同时满足用户与计算机都能够理解且沟通效率更高的设计信息表达方式.同时,也需要核反应堆工程设计人员转变从基于二维图纸及文件传递的传统设计思维模式,研究基于三维模型的新的信息表达方式,能够贯穿方案设计、初步设计、概要设计及详细设计整个设计阶段,从真正意义上实现反应堆工程的协同设计.

另外,基于一体化平台的协同设计也对项目的规范化管理起到了重要作用,比如工作分解、进度监控、校审流程管理、人员负荷管理等.这为项目组合管理、项目集管理提供了条件,便于对项目进行优先排序以及提供必要的资源,对有依赖关系的项目之间进行协调控制.

3 基于系统工程的设计验证

核反应堆作为高度复杂综合的产品,在新堆型研发过程中几乎无法完全考虑清楚在不同场景下整个系统中各部分间的相互影响,研发人员只是从自己理解的视角去描述一个目标.在新堆型设计中,基于系统工程的设计验证能在早期就对系统进行验证,及时发现问题并予以纠正,可节约大量设计变更成本,有效提高产品质量并缩短产品开发周期.

基于模型的系统工程(model-based systems engineering, MBSE)是现代系统工程的最新发展.核反应堆的设计通过构建需求模型、功能模型、架

构模型,实现需求、功能到架构的分解和分配,通过对同一模型在不同软件之间的数据交换,实现整个研发过程的计算、分析和优化,系统需求和功能逻辑也得到了相关的验证与确认,进而系统性地驱动了核反应堆相关子系统和系统的设计.MBSE 模型传递了包括需求、结构、行为和参数在内的动态信息,使整个组织中各专业技术人员能够更加直观地理解和表达核反应堆相关的子系统和系统.基于模型的系统工程方法能有效地解决复杂系统工程设计中涉及的关于设计对象复杂关联关系的建立、全系统仿真,以及数据一致性等方面的问题^[7-8].具体的基于模型的系统工程研发流程如图 2 所示.

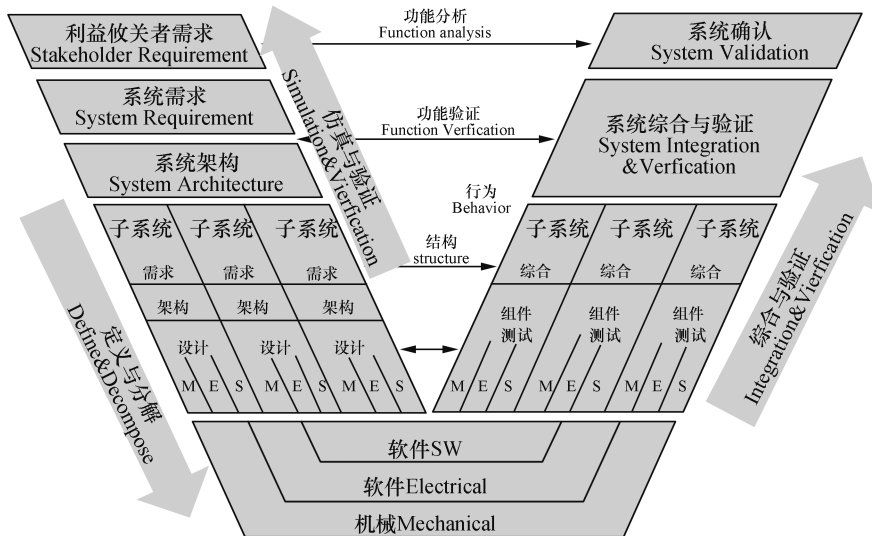


图 2 基于模型的系统工程研发流程

Fig.2 Flow diagram of MBSE

数字化反应堆在虚拟化的云计算平台中对反应堆物理、热工水力、燃料性能、流体系统等在运行与事故工况下的特性进行耦合计算,并能够与控制保护、结构设备等相关参数进行模拟和行为交互,实现基于系统工程的设计验证.同时,设计验证系统具备较强的扩展性和灵活性,可在已有的环境中方便地添加新的工具和模块,以及能够实现与硬件设备(如分布式控制系统(distributed control system, DCS))进行半实物仿真验证等.

4 基于知识工程的大数据管理

在核反应堆工程设计过程中会产生大量的研发和设计数据,在传统的核反应堆工程设计模式中,这些数据大多是静态和孤立的,数据之间建立

的关系较少,且较为抽象.如何将这此数据更好地联系起来,并与设计对象相关联,分类形成知识库,伴随在整个研发和设计活动中,根据不同用户的不同需求进行信息的自动推送,这是数字化反应堆相关数据管理技术所需研究的重要内容.

知识工程(knowledge engineering, KBE)是基于已有相关研发和设计数据的基础上通过数据处理软件而建立的专家系统,系统的研发首先需要的相关分散独立系统(如:产品数据管理(product data management, PDM)、产品生命周期管理(product lifecycle management, PLM)、资料库、标准库等)进行数据集成和抽取,通过对相关数据关联关系的梳理研究,建立核反应堆研究设计所适用的数据模型,利用数据清洗技术对数据进行

过滤、拆分、合并、去重、补齐等操作,实现对数据归类整合,并形成核反应堆研究设计的知识库。同时,它还将经历知识获取、知识验证、知识表示、推论等过程才能真正被用户所利用。知识工程系统在研发平台建立的各个项目的实施过程中,平台内部必须共享单一的数据源、共用相同的知识积累和进化,管理、设计、分析、反馈迭代等设计活动中涉及到的标准、规范、建议、经验等可以在后续或其他项目中得以进化、沉淀和重用,从而使工程设计有效地借鉴了之前项目经验成果,真正地基于之前项目的工作基础上开展更高水平的设计工作,同时,也避免了人员流动带来的工程设计经验的流失。另一方面,这也需要在这个过程中不断补充大量的相关数据进一步完善其系统的完整性,并提升其在核行业的应用水平^[9-10]。

5 结 论

在数字化飞速发展的今天,核行业充分利用数字化技术是大势所趋。作为设计院,在核反应堆研究设计中,基于我们的现实需求定义和打造数字化反应堆。首先,在异构的软硬件环境中搭建基于虚拟化技术的云计算平台,为研究设计提供便捷、高效、可靠的环境;然后,基于系统工程的方法建立三维协同设计系统和设计验证系统,以提升核反应堆研究设计的能力、质量和效率;最后,逐步建立统一的核反应堆工程设计专家知识库,加强知识经验与研究设计过程活动之间的关联与推送能力,提升数据深加工和知识服务水平。后续如何更好地利用数字化技术,完善数字化反应堆的内涵和软硬件体系,加速推进核反应堆研究设计

技术的发展,值得相关领域的专家学者进一步开展更加深入的探讨和研究。

参考文献:

- [1] KOTHE D B. CASL: The consortium for advanced simulation of light water reactors [C] // 52nd annual meeting of the APS division of plasma physics american physical society. Washington DC: American physical society, 2011.
- [2] FERENCZ R M. Nuclear energy advanced modeling and simulation (NEAMS) structural mechanics module development plan [R]. Colifornia: Technical report, 2013: 1-15.
- [3] CHRISTIAN C, ARAGONES J M, BESTION D, et al. A european simulation platform for nuclear reactor safety: multi-scale and multi-physics calculations, sensitivity and uncertainty analysis [J]. Nuclear engineering and design, 2011, 241(9): 3416-3426.
- [4] 王庆波, 金涛, 何乐, 等. 虚拟化与云计算 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [5] 吴吉义, 平玲娣, 潘雪增. 云计算: 从概念到平台 [J]. 电信科学, 2009, 12(1): 23-30.
- [6] 周秋忠, 樊庆春. MBD 支持的产品协同设计及协同信息表达 [J]. 制造业自动化, 2011, 33(1): 55-59.
- [7] 毛寅轩, 袁建华. 基于模型系统工程方法研究与展望 [J]. 电脑开发与应用, 2014, 27(4): 71-75.
- [8] HOFFANN H P. System engineering best practices with the rational solution for systems and software engineering [M]. New York, United State: IBM Corporation, 2011.
- [9] 屠立, 张树有. 面向可重用的复杂产品设计知识表达与建模 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(7): 777-781.
- [10] 袁国铭, 李洪奇, 樊波. 关于知识工程的发展综述 [J]. 计算技术与自动化, 2011, 30(1): 138-142.

(责任编辑: 龙威)