

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2021.08.013

工业锅炉数字化设计与数字孪生综述

程浙武^{1,2}, 童水光², 童哲铭², 张钦国^{1,2}

(1. 浙江大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315100; 2. 浙江大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 概述工业锅炉设计的特点和引入数字孪生技术的必要性. 通过对工业锅炉数字化设计技术的发展和研究现状的综述, 提出以设计过程优化为核心、以数字孪生为基础的新一代工业锅炉数字化设计技术是提升工业锅炉设计能力和综合性能的关键. 分析数字孪生技术在工业锅炉设计中的应用特点, 总结数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计的三大关键技术问题: 面向设计过程多元信息表达的工业锅炉数字孪生建模技术; 基于人机交互与虚拟现实智能验证的设计过程优化技术; 面向全生命周期的工业锅炉数字孪生数据管理技术. 在此基础上, 提出数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计技术框架, 以为面向高性能工业锅炉的数字化设计技术研究和应用提供思路和有价值的参考.

关键词: 工业锅炉; 数字化设计; 数字孪生; 设计过程优化; 全生命周期管理

中图分类号: TH 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-973X(2021)08-1518-11

Review of digital design and digital twin of industrial boiler

CHENG Zhe-wu^{1,2}, TONG Shui-guang², TONG Zhe-ming², ZHANG Qin-guo^{1,2}

(1. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;

2. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The characteristics of industrial boiler design and the necessity of introducing digital twin technology were summarized. The development and research status of digital design technology for industrial boilers were comprehensively summarized, and it was proposed that the digital design technology of a new generation of industrial boilers, with the design process optimization as the core and the digital twin as the foundation, was the key to improve the design capability and comprehensive performance of industrial boilers. The application characteristics of digital twin technology in industrial boiler design were analyzed, and three key technical problems of digital twin driven industrial boiler design were summarized: digital twin modeling technology for the expression of multiple information in the design process of industrial boiler; design process optimization technology based on human-computer interaction and virtual reality intelligent verification; industrial boiler digital twin data management technology for the full life cycle. On this basis, a digital twin driven digital design technology framework for industrial boilers was proposed, which was expected to provide ideas and valuable references for the research and application of digital design technology for high-performance industrial boilers.

Key words: industrial boilers; digital design; digital twins; design process optimization; full lifecycle management

锅炉是重要的能量转换装备, 需求量巨大, 广泛用于能源、化工、轻纺、交通运输及军工等各主要工业部门, 在国民经济中起着基础支撑作用^[1]. 其中, 以生产供气和发电为主的工业锅炉体积庞大、结构复杂, 一般由燃烧煤、油、气等燃料产热

的燃烧系统、包括各种受热面部件的烟气换热系统、水循环系统以及辅机系统组成, 属于高温高压的特种装备, 在设计时须兼顾安全性和经济性要求. 工业锅炉的设计过程涉及大量分析计算和各种设计知识的综合运用, 具有经验性强、设计

收稿日期: 2020-07-29. 网址: www.zjujournals.com/eng/article/2021/1008-973X/202108013.shtml

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708493, 51821093); 浙江省自然科学基金资助项目(LR19E050002).

作者简介: 程浙武(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 从事机械产品数字化设计、先进物理储能技术研究. orcid.org/0000-0002-4479-7467.

E-mail: chengzw@zju.edu.cn

通信联系人: 童哲铭, 男, 研究员, 博士. orcid.org/0000-0003-1129-7439. E-mail: tzm@zju.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

难度大、设计周期长的特点^[2]. 由于用户需求的差异化, 工业锅炉产品的通用性差, 通常须按需定制, 对设计工作的依赖度极高. 因此, 以计算机技术和信息技术的集成应用为基础的数字化设计一直是工业锅炉领域的主要发展方向和研究重点之一^[3].

数字孪生概念由 Grieves 在 2002 年首次提出^[4], 定义为以复制现实中物理系统为目标, 使用动态集成的模型与数据, 实现优化决策目的的各种技术方案构成的技术集群^[5]. 数字孪生技术与常规的仿真模拟、虚拟样机技术的主要区别在于其对数据信息的依赖和利用程度都更高, 数字模型对物理实体的描述精度要求也更高, 尤其强调数字空间与物理空间的动态交互与虚实融合. 伴随着全球信息技术的快速发展, 近年来数字孪生技术受到越来越多的关注, 并成为主要国家数字化转型的新着力点. 在美国的工业互联网落地应用框架、德国工业 4.0 参考架构以及中国制造 2025 战略中, 数字孪生都是不可或缺的重要环节^[6]. 此外, 以美国通用电气、德国西门子为代表的领先工业企业也十分重视数字孪生技术的应用, 投入了大量资源开展相关技术研发.

在数据成为重要生产要素的当下, 数字孪生理念为复杂产品的数字化设计提供了新的方向, 不仅有助于实现对产品全生命周期中多源异构动态数据的有效管理, 而且能够在产品研发生产中各种活动的优化与决策方面发挥重要作用^[7]. 此外, 数字孪生也为人工智能、大数据分析、云计算等先进信息技术服务于复杂产品的数字化、智能化设计制造提供了重要基础^[8]. 因此, 将数字孪生技术引入工业锅炉数字化设计中, 建立数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计理论和技术体系, 在工业锅炉朝着高参数(温度、压力、蒸发量)、高可靠性、高效以及清洁环保方向发展的大背景下对辅助高性能新产品的研发具有重要意义.

本研究首先对工业锅炉数字化设计的发展、研究现状以及数字孪生技术在产品设计中的研究现状进行综述, 接着对数字孪生技术应用于工业锅炉设计优化的特点和关键技术进行分析, 并在此基础上描述数字孪生驱动的工业锅炉设计优化技术框架和全生命周期管理模式.

1 工业锅炉的数字化设计研究现状

用, 工业锅炉数字化设计研究主要包括三方面的内容: 分析计算的数字化、设计过程的智能化以及设计过程优化.

1.1 分析计算的数字化

典型的工业锅炉系统如图 1 所示, 为了实现复杂系统的合理设计, 须进行大量的设计计算工作. 利用计算机代替人工完成复杂繁琐的设计过程分析计算工作(见图 2), 包括热力计算、水动力计算、汽水阻力计算、烟风阻力计算、结构强度计算以及辅助工程制图, 是工业锅炉数字化设计的基础. 设计过程分析计算的数字化主要依赖确定的过程性知识的应用, 对工业锅炉设计的辅助主要体现在提高分析计算的速度和效率上.

欧美和日本的锅炉制造企业一般专门生产特定类型的锅炉, 技术积累深厚, 普遍拥有各自成熟的专用锅炉设计计算软件, 可以较好地满足工业锅炉的工程设计需求, 因此针对工业锅炉数字化设计研究的公开文献并不多^[9-11]. 与国外相比, 国内锅炉制造企业具有锅炉类型多样的需求特点, 对实现工业锅炉数字化分析计算的要求相对更高. 因此, 许多高校和研究机构开展了大量的相关研究, 包括锅炉钢架设计^[12]、热力性能分析^[13-14]、水动力分析^[15-16]以及锅炉设计系统的开发^[17]等. 此外, 在辅助工程设计方面, 哈尔滨工业大学的秦裕琨院士团队较早自行开发了较为完善的锅炉热力计算程序^[18]; 东南大学的研究者开发了针对电站燃煤锅炉的热力计算通用软件^[19]; 西安交通大学车得福教授团队研发了适用于小容量、低压力层状燃烧及锅壳式燃油燃气锅炉热力计算、宽广压力范围内的 CFB 锅炉热力计算、多种炉型的电站锅炉热力计算等一系列专用工业锅炉热力计算软件^[20]; 浙江大学童水光教授团队研发了通用工业锅炉的数字化设计 BESS 系统^[21];

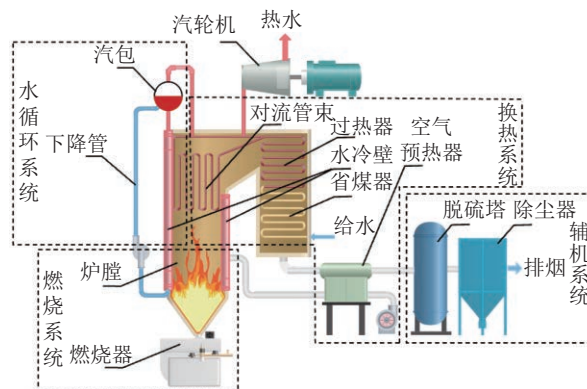


图 1 典型的工业锅炉系统示意图

Fig.1 Typical industrial boiler system diagram

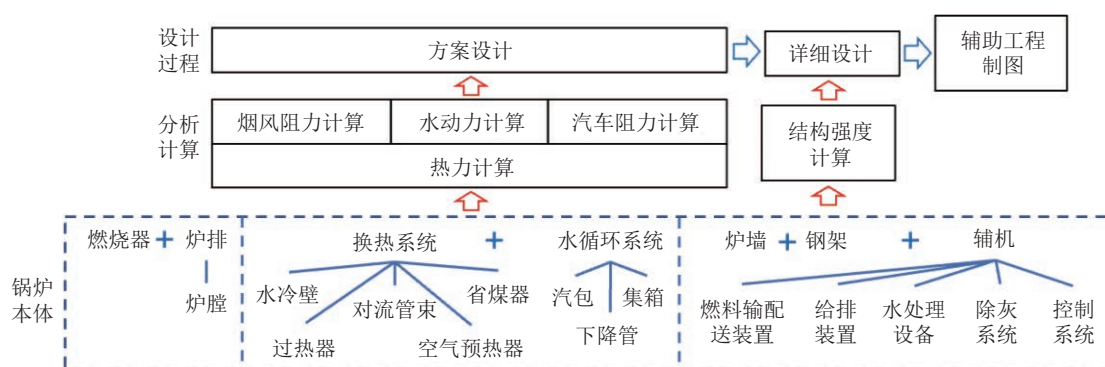


图 2 工业锅炉设计过程的分析计算

Fig.2 Analysis and calculation of industrial boiler design process

天津大学的研究者开发了将热力计算、换热器设计、管道设计、工质参数设计等模块功能分离的锅炉排烟余热利用计算软件^[22]；国内锅炉龙头企业哈尔滨锅炉厂针对超临界锅炉运行调整和设计优化的需求，也开发了一款基于 Visual Basic 的热力计算程序^[23]。

整体而言，以计算机辅助分析计算为主的工业锅炉数字化设计技术已经较成熟，并且在工业锅炉的工程设计中得到了广泛应用。

1.2 设计过程的智能化

赋予计算机一定的智能，协助人类设计者完成须综合运用标准手册、规则约束、设计经验以及设计案例等多种锅炉设计知识的非确定性推理和决策，解决工业锅炉设计工作对设计者的经验、知识以及运用知识的能力过度依赖的难题，是工业锅炉数字化设计更高层次的目标，即锅炉智能设计。

Mitra 等^[24]较早对循环流化床锅炉设计知识的分类和表达进行研究，并建立了针对 CFB 锅炉初步设计的知识组件专家系统。Lu^[25]最早提出建立锅炉智能设计系统的初步设想，并提出智能设计的 3 个层次：基于数学模型的设计、基于优化的设计、基于知识的设计。钟巍^[26]最早深入开展了锅炉“系统级”智能设计的研究，提出了基于多 Agent 的通用锅炉智能设计模型。周鸿波^[27]将知识工程与循环流化床锅炉的计算机辅助设计方法相融合，提出能支持整个循环流化床锅炉方案设计进程的智能设计技术。Yu 等^[28]结合规则推理和实例推理，提出基于推理和模糊决策的锅炉智能设计方法。鲁刚等^[29]阐述了基于知识融合技术的智能化锅炉零部件设计系统的开发过程及其关键技术。夏仁康等^[30-31]提出了现代化、智能化技术条件下余热锅炉的设计思路和基于知识工程的

余热锅炉总体设计框架。孙双成^[32]提出基于群体智能优化理论求解锅炉辐射换热腔体的几何反设计问题的方法。程慧慧等^[33]在分析成功锅炉实例的关键参数与模型之间的关联关系的基础上构建了锅炉产品知识库，并基于知识驱动方法实现了超临界锅炉空间复杂管道快速设计。

由于工业锅炉的工作原理明确、设计技术相对成熟和稳定，日常设计工作中一般不涉及技术原理和结构的创新，目前以实例推理为核心的锅炉智能设计研究也已经较为成熟。然而，受限于构建完备工业锅炉设计知识库和丰富实例库的技术经济性，工业锅炉智能设计技术在工程设计中的应用水平还有待提高。

1.3 设计过程优化

工业锅炉设计过程的各种信息相互关联，具有强耦合、多目标、多约束变量、多影响因素的特点。随着工业锅炉设计要求的不断提高，比如电站锅炉向高效宽负荷率以及高参数方向发展，在以垃圾焚烧和生物质为代表的新型环保锅炉中，燃料成分复杂多变导致燃烧热值不稳定。然而，以满足设计要求和约束条件为主要目标的传统锅炉数字化设计技术已经难以满足上述高性能工业锅炉产品研发的需求。为了提高面向复杂工况条件的工业锅炉产品综合性能，以设计过程优化为核心的工业锅炉数字化设计技术研究成为全面提升工业锅炉设计能力的关键。

在现有研究中，樊泉桂等^[34]针对超临界锅炉垂直管屏水冷壁运行的特点，开展超临界“W”火焰锅炉水冷壁的优化设计研究。钟巍等^[35]以优化结构降低锅炉制造成本为目标，提出基于遗传算法的锅炉对流受热面优化设计方法。王永堂等^[36]从具体设计案例的角度对燃气轮机余热锅炉过渡烟道的优化设计进行研究。马凯等^[37]通过对对流

受热面尺寸、烟气体积流量、烟气侧传热系数和压降等参数的分析计算,对增压富氧燃煤锅炉省煤器的设计结构进行优化.赵晴川等^[38]对电站锅炉烟风道的空气和烟气流动以及数值模拟方法在烟风道设计优化中的应用进行分析.李皓宇^[39]采用熵产分析方法对锅炉对流传热受热面的优化设计进行研究.Gulotta等^[40]基于生命周期评估的思想对生物质锅炉不同设计方案的能源和环境性能进行分析,提出优化过程中辅助决策的方法.Yushkova等^[41]采用夹点法对锅炉系统进行焓分析,并得出改变省煤器和空气预热器的表面积可以提高锅炉能效的结论.可以发现,上述关于工业锅炉的设计优化研究主要针对特定炉型及部件层面展开,在锅炉系统的整体设计及性能优化方面的系统研究还较少,严格意义上的设计过程优化仍处于相对空白状态.

2 数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计

工业锅炉属于典型的过程型机械系统,其设计过程的复杂性主要体现在零部件组织结构复杂导致的多方案优化问题和涉及多物理过程耦合带来的性能分析和评价问题上.目前,通过数字孪生打通设计、制造以及运维的全生命周期管理已经成为工业锅炉领域的重要发展趋势^[42],同时也为实现以锅炉系统整体设计优化为核心的设计过程优化提供了可行的新思路.因此,开展数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计研究对满足不断提高的性能设计需求和提高工业锅炉的设计效率都具有重要意义.

2.1 数字孪生技术在产品设计中的研究现状

整体而言,数字孪生技术的发展仍处于起步阶段,相关研究主要针对产品的制造装配^[43-44]、运行维护^[45-46]、健康管理^[47-48]等方面,在新产品的设计、优化方面的研究仍处于探索阶段.

如何针对产品设计需求和特点进行数字孪生建模是将数字孪生技术应用于产品设计阶段的首要问题.在这方面,Benjamin等^[49]针对物理产品在设计和制造过程中的数字孪生建模需求,提出基于表面造型概念的综合参考模型,详细介绍了相关概念、表达方法以及在产品生命周期中的应用;于勇等^[50]探讨基于数字孪生模型的产品构型管理方法和产品数字孪生模型本体表达;周有城

等^[51]针对智能产品设计需求提出基于数字孪生体表述的智能产品功能模型构建方法;张鹏等^[52]将数字孪生引入复杂机电系统创新设计的概念设计中,开展物理实体对象特征、行为、形成过程以及性能等的数字孪生建模研究.

围绕特定产品或广义产品的数字孪生体建模,基于数字孪生的产品设计研究重点体现在对设计过程的重新定义.在这方面,李浩等^[7]对基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发方法进行讨论,提出基于数字孪生的复杂产品环形设计框架;李琳利等^[53]将数字孪生的理念引入到复杂机械产品多学科协同设计中,提出产品数字孪生多学科协同设计建模参考架构;肖飞等^[54]建立数字孪生驱动的固体发动机总体设计系统5层架构模型,并探讨数字孪生驱动的固体发动机总体设计系统的运行机制;Havard等^[55]提出将数字孪生的精确模拟能力与VR技术的交互能力结合的交互式设计理念,建立协同仿真与通信体系结构.

因此,本研究针对数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计特点及关键技术的讨论将同样以工业锅炉数字孪生体的建模为核心,同时重点突出数字孪生技术如何破解涉及多物理场耦合和多样性解的工业锅炉设计过程优化问题.

2.2 数字孪生技术应用于工业锅炉设计的特点

数字孪生技术的核心是建模,通过构建数字孪生模型实现对物理实体形状和规律的映射、隐性信息的呈现以及数据的传递^[56].对应产品生命周期的不同阶段,数字孪生体通常可以分为设计数字孪生体、制造数字孪生体和运维数字孪生体3种形态.对于工业锅炉设计而言,由于设计对象的结构复杂而且涉及多物理场耦合优化问题的求解,锅炉数字孪生体的构建既是实现面向全生命周期管理的工业锅炉数字化设计的基础,也是难点所在.如图3所示为工业锅炉设计中以数字孪生模型为核心的数字孪生技术的应用特点,其主要体现在以下2个方面:1)工业锅炉的数字孪生建模强调几何信息、过程数据和对象机理的集成表达,以满足方案设计的多目标需求;2)数字孪生驱动的工业锅炉设计过程优化通过设计知识-实例数据的多源输入和设计方案虚拟验证相结合的方式实现.

文献调研表明,针对工业锅炉系统数字孪生体构建的研究目前仍是空白,较相关的是颜龙晚^[57]对数字化锅炉的概念以及数字化交付的概念进行

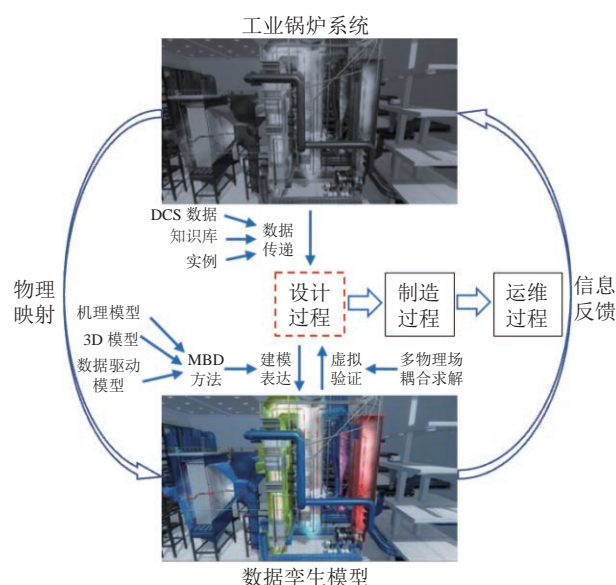


图 3 数字孪生技术在工业锅炉设计中的应用特点

Fig.3 Application characteristics of digital twin technology in industrial boiler design

了阐述,指出数据关联性是数字化锅炉的重要特点.因此,面向工业锅炉的数字孪生建模,首先须寻求一种自然、准确、高效,能够支持不同设计阶段的数据定义和传递的数字化表达方法,实现设计过程中对结构、材料、性能、工艺等各类孪生数据的灵活、有序、高效管理.另一方面,为了满足工业锅炉设计方案的迭代优化与涉及多物理场耦合仿真的设计验证对数字孪生模型的差异化需求,开展工业锅炉系统的机理抽象表达研究和物理特性映射机制设计也是工业锅炉数字孪生建模的重要内容.在此基础上,针对工业锅炉系统结构复杂的特点,其数字孪生建模还应满足对物理实体描述的精确性、设计过程优化的适应性、全生命周期演化的可扩展性以及不同类型工业锅炉设计的通用性等要求.基于模型的定义(model-based definition, MBD)是实现产品设计制造协同的重要方法,主要通过将产品数据嵌入到3D模型实现数据与模型的一体化集成,为面向全生命周期管理的产品数字孪生建模提供了有力工具^[58].因此,基于MBD方法实现设计过程中设计方案的几何信息、过程数据和对象机理的集成表达,从而为数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计提供模型基础,是数字孪生技术在工业锅炉设计中应用的重要特点.

数字孪生技术应用于设计阶段的最终目的是实现基于虚实交互的闭环优化^[43].在这方面,数字孪生对设计阶段的支撑主要体现在对产品设计方

案的精准数字化建模和虚拟验证,并结合人工智能技术实现产品设计过程的智能优化和决策.因此,数字孪生驱动的设计过程优化的核心是将传统的完全基于虚拟环境的设计优化过程升级为物理与虚拟融合的协同交互设计优化过程.具体到数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计中,设计过程优化的依据一方面来源于对已有工业锅炉实例的DCS数据及数字孪生数据的挖掘得到的隐性设计规则,另一方面则通过对数字孪生模型表征的设计方案进行虚拟验证和综合评价获取.基于上述虚实融合的设计过程优化思想,可以实现利用有限的锅炉设计知识和成功锅炉设计实例数据达到提高锅炉设计性能的目的,从而更好地满足工业锅炉不断提高的设计需求.

2.3 数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计关键技术

数字孪生驱动的广义产品设计过程通常由需求分析、概念设计、方案设计、详细设计和虚拟验证5个环节组成^[59].目前,面向全生命周期管理、智能化、人机交互式的三维设计已经成为以工业锅炉为代表的复杂装备数字化设计的发展方向.因此,将数字孪生技术应用于工业锅炉设计的重点就是针对工业锅炉的特点,构建能够全方位表达设计方案,同时又能满足设计过程数据管理要求的工业锅炉数字孪生模型,并建立基于人机协同与虚拟现实智能验证的设计过程优化机制.数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计亟须在以下3个方面进行突破.

2.3.1 面向设计过程多元信息表达的工业锅炉数字孪生建模 为了满足工业锅炉设计过程中多元信息的集成表达需求,设计数字孪生体由表征锅炉系统物理特性映射机制的机理模型、管理设计过程数据的数据驱动模型以及描述锅炉系统结构特征的几何模型3个基本单元组成.相应地,面向工业锅炉设计的数字孪生体建模须解决的关键技术问题包括:1)针对方案设计阶段的快速性能计算和迭代优化需求,基于过程型机械系统理论开展工业锅炉系统部件的抽象定义和模型描述研究,结合“单元-部件-系统”的层次化分析方法和系统拓扑网络对象关联描述方法开展锅炉物理特性映射机制设计,从而构建具有多层嵌套结构、通过单元节点连接、满足序贯模块迭代快速求解的工业锅炉设计数字孪生体机理模型;2)为了满足数据类型多元、数据构成复杂的工业锅炉设计过程数据的统一管理和全生命周期过程中数字孪生

数据的灵活扩展需求,引入数据本体定义方法解决异构数据间的匹配映射问题,采用元模型技术实现对各种异构数据的统一描述,并根据锅炉系统的物理映射网络进行不同数据之间的关联策略设计,从而构建具有完整网络结构、支持数据有序传递的模块化数据驱动模型;3)综合考虑基于热-流-固多物理场耦合仿真的性能分析模型精细化和人机交互背景下工业锅炉设计方案可视化的模型轻量化的需求差异,通过对自主设计的工业锅炉设计系统与成熟商业三维建模软件的集成应用和二次开发实现包含机理模型和3D模型的工业锅炉设计方案的多尺度表达以及不同表达形式之间的智能转化。

2.3.2 基于人机交互与虚拟现实智能验证的设计过程优化 以锅炉系统整体设计优化为核心的设计过程优化是数字孪生技术在工业锅炉数字化设计中应用的主要目的。针对设计过程优化需求,在数字孪生驱动的工业锅炉设计阶段须解决的关键技术问题包括:1)基于人机协同的交互式设计过程优化理念实现对计算机和人类设计者各自优势的充分利用,以更好地满足以工业锅炉设计为代表的涉及大规模计算、非线性方程求解同时又具有隐性目标的复杂装备设计优化问题的需求;2)将虚拟现实技术引入具有复杂结构的工业锅炉系统的设计验证,为基于人机协同的交互式设计过程优化提供更灵活、全面、多元的复杂产品设计过程及结果信息的表达和观察视角,从而更好地辅助设计决策;3)针对作为典型过程型机械系统的工业锅炉方案设计的多样性解问题,构建综合性能评价模型对设计方案的虚拟验证结果进行评估,采用自适应的迭代优化方法实现设计方案及对应的设计数字孪生体的智能优化更新。

2.3.3 面向全生命周期的工业锅炉数字孪生数据管理 面向全生命周期管理是数字孪生技术在产品数字化设计中应用的最大特点。针对全生命周期管理的需求,在数字孪生驱动的工业锅炉设计阶段须解决的关键技术问题包括:1)建立基于机理模型、数据驱动模型和几何模型三元表达的工业锅炉数字孪生体内部信息的智能融合机制,重点研究设计方案生成和优化过程中机理模型和数据驱动模型之间信息的反馈式传递机制、设计验证阶段设计方案的机理模型表达与几何模型之间的动态映射机制,以及上述涉及数字孪生体操作时数据驱动模型中大量静态/动态参数的调用和

更新机制,从而为实现数字孪生驱动的工业锅炉设计过程迭代优化和设计验证提供支撑;2)建立工业锅炉数字孪生体实例库,包含工业锅炉实例的数字孪生体模型数据和数字孪生数据,为工业锅炉新产品设计过程中的数字孪生体建模提供系统级、单元级以及零件级的快速模板,以提高设计过程中的数字孪生体建模效率;3)构建允许工业锅炉生命周期各阶段数字孪生体(对应设计数字孪生体、制造数字孪生体以及运维数字孪生体)的关键信息进行双向同步的交互框架,以实现工业锅炉数字孪生模型的本构数据继承、状态数据更新以及孪生数据传递。

2.4 数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计技术框架

数字孪生为工业锅炉设计提供了一种全新的设计表达方式和过程信息载体——工业锅炉数字孪生体,是基于人机交互的设计优化、虚拟现实智能验证、自适应迭代优化等先进设计优化方法在工业锅炉数字化设计中应用的重要基础。

基于2.3节总结的数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计关键技术,提出如图4所示的数字孪生驱动的工业锅炉设计优化技术框架。首先,建立由锅炉设计知识库和数字孪生体实例库组成的工业锅炉设计基础数据库,为实现数字孪生驱动的工业锅炉设计优化提供支撑。然后,采用实例推理方法实现工业锅炉方案的智能生成,得到包含整体布局信息和主要参数的设计方案,通常是多个可行设计方案;同时,基于规则推理技术实现对应工业锅炉方案的详细设计,得到参数驱动的零部件设计方案。在此基础上,通过锅炉数字孪生实例库与设计方案的智能匹配实现由设计方案快速生成基于机理模型、数据驱动模型和几何模型三元表达的工业锅炉设计数字孪生体。进一步地,针对基于数字孪生模型表达的多样性设计方案的优化求解需求,开展虚拟现实智能验证设计,主要包括以下3个方面的内容:1)结合仿真分析和综合性能模糊评价模型,对设计方案进行评估;2)基于交互式优化设计方法对设计方案进行优化,并通过自适应迭代优化策略对迭代优化过程进行控制;3)通过数字孪生和VR技术的结合实现锅炉设计方案及其性能分析结果的可视化表达,以更好地辅助人类设计者进行设计决策。最终,通过上述虚拟现实智能验证设计过程与从工业锅炉实例数据中挖掘获得的隐性设计规则的虚实交互,实现工业锅炉设计数字孪生体的更新

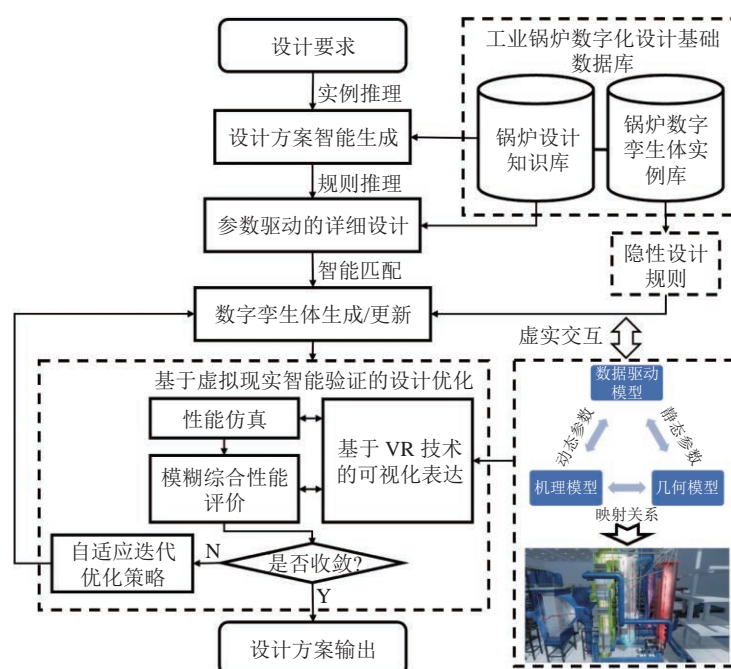


图 4 数字孪生驱动的工业锅炉设计优化技术框架

Fig.4 Digital twin driven industrial boiler design optimization technology framework

与设计方案的优化。

除了为虚实交互的设计优化提供基础,通过设计阶段、制造阶段以及运维阶段之间的全方位多尺度信息交互和数据传递实现复杂装备的全生命周期管理,是建立工业锅炉数字孪生模型的另一重要意义。如图 5 所示,在数字孪生驱动的工业锅炉设计优化技术框架的基础上,将工业锅炉数字孪生模型的应用延伸到制造阶段和运维阶段,

描绘数字孪生驱动的工业锅炉全生命周期管理框架。作为连接物理世界和数字世界的媒介,工业锅炉数字孪生体首先在设计阶段生成,主要根据方案设计和详细设计环节的设计输入得到对应设计方案的工业锅炉设计数字孪生体——由机理模型、数据驱动模型和几何模型三部分构成;基于工业锅炉设计数字孪生体开展针对设计方案的虚拟验证和设计优化,并在迭代优化过程中同步更

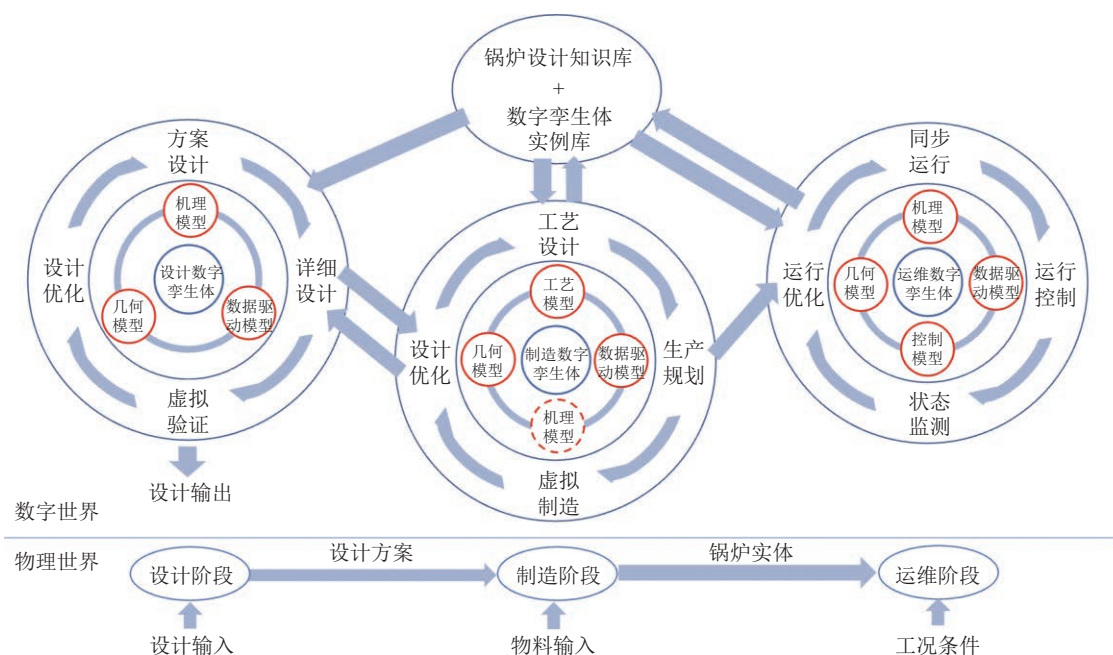


图 5 数字孪生驱动的工业锅炉全生命周期管理框架

Fig.5 Full life cycle management of digital twin driven industrial boiler

新工业锅炉设计数字孪生体.在制造阶段,通过在工业锅炉设计数字孪生体的三元模型中增加描述工业锅炉制造工艺流程和技术方案的工艺模型,得到基于四元表达的工业锅炉制造数字孪生体;在此基础上可以开展工业锅炉的数字化工艺设计和生产规划,结合数字孪生模型进行虚拟制造仿真,对工艺设计方案和生产规划的合理性进行分析、评价和优化,为工业锅炉实体的制造提供指导.在运维阶段,通过在工业锅炉设计数字孪生体的三元模型中增加描述工业锅炉运行控制方案的控制模型,得到基于四元表达的工业锅炉运维数字孪生模型;在此基础上可以开展与工业锅炉实体的同步运行仿真,与工业锅炉实体形成虚实融合和数据交互,实现对运行控制方案的验证、运行状态的监测、健康状况的预测以及运行优化等目的.综上所述,在工业锅炉数字孪生模型随着生命周期不同阶段的需求变化而演变的过程中,数据驱动模型承担着过程信息和数字孪生数据的存储、交互、更新的功能,是实现数字孪生驱动的工业锅炉全生命周期管理的核心.

3 结 语

在工业锅炉向着高参数、高可靠性、高效以及清洁环保方向发展的大背景下,以满足设计要求和约束条件为主要目标的传统锅炉数字化设计技术已经难以满足高性能工业锅炉产品研发的需求.以设计过程优化为核心的新一代工业锅炉数字化设计技术成为提升工业锅炉设计能力和综合性能的关键,而数字孪生为其提供了一套可行的数字化技术方法论.深入开展数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计研究,不仅可以为提高工业锅炉数字化设计水平和设计质量提供理论和技术支持,而且通过数字孪生技术向设计过程延伸的探索,对实现贯通设计、制造和运维的产品全生命周期管理具有重要的价值.

基于对数字孪生技术在工业锅炉设计中的应用特点分析,数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计的三大关键技术问题概括如下:1)面向设计过程多元信息表达的工业锅炉数字孪生建模技术,包括针对热-流-固等多物理场融合过程的机理模型表达、工业锅炉数字孪生数据的统一建模方法以及通用工业锅炉的智能3D模型技术;2)基于人机交互与虚拟现实智能验证的设计过程优化技

术,包括人机协同的交互式设计过程优化方法、虚拟现实设计验证技术以及多样性解的自适应迭代优化方法;3)面向全生命周期的工业锅炉数字孪生数据管理技术,包括工业锅炉数字孪生模型内部信息的智能融合机制、工业锅炉数字孪生模型实例库的构建以及不同阶段数字孪生模型信息的双向同步交互.在此基础上,进一步提出数字孪生驱动的工业锅炉数字化设计技术框架,分别从工业锅炉的设计优化和全生命周期管理2个角度进行描述,以期为相关研究的深入开展和应用实施提供思路和有价值的参考.

参考文献 (References):

- [1] 樊泉桂. 锅炉原理 [M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 钟巍, 童水光. 锅炉智能 CAD 的技术和方法研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2006, 40(4): 572–576.
ZHONG Wei, TONG Shui-guang. Research on technologies and methods of intelligent boiler CAD [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2006, 40(4): 572–576.
- [3] 郑树, 周怀春. 三维、动态、实时数字化锅炉技术发展探讨 [J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(1): 20–35.
ZHENG Shu, ZHOU Huai-chun. Discussion on the development of a 3D, dynamic and real-time digital boiler [J]. *Scientia Sinica: Technologica*, 2016, 46(1): 20–35.
- [4] GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises [J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1/2): 71–84.
- [5] TAO F, QI Q. New IT driven service-oriented smart manufacturing: framework and characteristics [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 49(1): 81–91.
- [6] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 11–23.
TAO Fei, QI Qing-lin. Service-oriented smart manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(16): 11–23.
- [7] 李浩, 陶飞, 王昊琪, 等. 基于数字孪生的复杂产品设计制造一体化开发框架与关键技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1320–1336.
LI Hao, TAO Fei, WANG Hao-qi, et al. Integration framework and key technologies of complex product design-manufacturing based on digital twin [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1320–1336.
- [8] LEE J, AZAMFAR M, SINGH J, et al. Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: towards smart manufacturing [J]. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 2020, 2: 34–36.

- [9] SCHUHBAUER C, ANGERER M, SPLIETHOFF H, et al. Coupled simulation of a tangentially hard coal fired 700 °C boiler [J]. **Fuel**, 2014, 122: 149–163.
- [10] BELYAKOV I I, BREUS V I, POPOV M S. Analysis of the hydraulic regimes of vertical waste-heat boilers of combined-cycle gas-turbine units [J]. **Power Technology and Engineering**, 2019, 53(4): 466–472.
- [11] MADEJSKI P, YMEŁKA P. Calculation methods of steam boiler operation factors under varying operating conditions with the use of computational thermodynamic modeling [J]. **Energy**, 2020, 197: 117221.
- [12] 陈晓霞. 基于 I-DEAS 的锅炉钢架有限元分析系统 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- CHEN Xiao-xia. A system of boiler steel frame with fem by I-DEAS [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [13] 全营, 钟巍, 吴燕玲, 等. 基于流体网络方法的超临界电站锅炉性能分析平台 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(5): 748–755.
- TONG Ying, ZHONG Wei, WU Yan-ling, et al. Performance analysis platform of supercritical power station boilers based on the fluid network method [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2014, 34(5): 748–755.
- [14] 万丛, 王恩禄, 徐煦, 等. 锅炉热力计算中烟气导热系数的数字化计算方法研究 [J]. 锅炉技术, 2016, 47(2): 1–4.
- WAN Cong, WANG En-lu, XU Xu, et al. The digital calculation of the flue gas thermal conductivity for boiler thermodynamic calculation [J]. **Boiler Technology**, 2016, 47(2): 1–4.
- [15] TANG G, ZHANG M, Gu J, et al. Thermal-hydraulic calculation and analysis on evaporator system of a 660 MW supercritical CFB boiler [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2019, 151: 385–393.
- [16] 董乐, 辛亚飞, 李娟, 等. 660 MW 超超临界循环流化床锅炉水动力及流动不稳定性特性计算分析 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1545–1554.
- DONG Le, XIN Ya-fei, LI Juan, et al. Computational analysis on thermal-hydraulic characteristics and flow instability of a 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2020, 40(5): 1545–1554.
- [17] 闫广远. 基于 NX 锅炉三维设计系统主框架的开发 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- YAN Guang-yuan. Development of main frame of boiler 3D design system based on NX [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [18] 王擎, 秦裕琨, 刘辉, 等. 循环流化床锅炉热力计算通用程序编制 [J]. 热力发电, 2000(6): 9–11.
- WANG Qing, QIN Yu-kun, LIU Hui, et al. General program for thermal calculation of circulating fluidized bed boiler [J]. **Thermal Power Generation**, 2000(6): 9–11.
- [19] 陈有福. 电站燃煤锅炉热力计算通用性的实现与研究 [D]. 南京: 东南大学, 2004.
- CHEN You-fu. Research and realization of universal power plant coal-fired boiler thermodynamic calculation [D]. Nanjing: Dongnan University, 2004.
- [20] 黄中, 杨娟, 车得福. 大容量循环流化床锅炉技术发展应用现状 [J]. 热力发电, 2019, 48(6): 1–8.
- HUANG Zhong, YANG Juan, CHE De-fu. Application and development status of large-scale CFB boilers [J]. **Thermal Power Generation**, 2019, 48(6): 1–8.
- [21] 谢金芳. 基于管网计算理论的通用锅炉水动力计算系统的研究与应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- XIE Jin-fang. Research and application of general-purpose software for boiler hydrodynamic calculation based on the theory of pipe network calculation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [22] 张钧泰. 锅炉排烟余热利用计算及在线优化软件设计 [D]. 天津: 天津大学, 2016.
- ZHANG Jun-tai. Calculation and on-line optimization software design of waste heat utilization of boiler exhaust smoke [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [23] 郭森. 基于 VB 的常规超临界 π 型锅炉热力计算程序的研究 [J]. 锅炉制造, 2020(2): 19–21.
- GUO Sen. Research of thermal calculation software for supercritical π -boiler based on visual basic [J]. **Boiler Manufacturing**, 2020(2): 19–21.
- [24] MITRA S, BASU P, GHOSHAL T K. Classification and representation of design knowledge for circulating fluidized bed boiler [J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 1993, 6: 457–464.
- [25] LU S. Towards intelligent systems for boiler design [J]. **Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A**, 1997, 211(A5): 399–410.
- [26] 钟巍. 锅炉智能 CAD 的技术、方法和模型研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- ZHONG Wei. Research on the technologies, methods and models of boiler intelligent CAD [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [27] 周鸿波. 基于知识的循环流化床锅炉方案设计技术 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- ZHOU Hong-bo. Research on knowledge-based scheme design technologies of circulating fluidized bed boiler [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [28] YU Y X, LIAO H K, ZHOU Y, et al. Reasoning and fuzzy comprehensive assessment methods based CAD system for boiler intelligent design [J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2015, 29(3): 1123–1130.
- [29] 鲁刚, 朱文华, 黄夫理. 省煤器智能设计系统的开发及其关键技术 [J]. 现代制造工程, 2013(2): 68–72.
- LU Gang, ZHU Wen-hua, HUANG Fu-li. The development and key techniques of economizer intelligent design system [J].

Modern Manufacturing Engineering, 2013(2): 68–72.

- [30] 夏仁康, 仲梁维, 洪亮. 基于知识工程的余热锅炉智能设计系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(1): 34–36.
XIA Ren-kang, ZHONG Liang-wei, HONG Liang. Heat recovery steam generator intelligence design system based on knowledge engineering [J]. **Mechanical Engineering and Automation**, 2015(1): 34–36.
- [31] 黄政, 陈彩凤, 仲梁维. 基于 CBR 的余热锅炉模块化设计研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(2): 84–86.
HUANG Zheng, CHEN Cai-feng, ZHONG Liang-wei. Research on modular design of heat recovery steam generator based on CBR [J]. **Telecom Power Technology**, 2016, 33(2): 84–86.
- [32] 孙双成. 基于群体智能优化理论的辐射换热腔体几何反设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
SUN Shuang-cheng. Inverse geometry design of radiative enclosures using swarm intelligence optimization algorithms [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [33] 程慧慧, 何玉安, 何亚飞. 基于知识库的超临界锅炉空间管路快速设计研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2017, 34(4): 270–276.
CHENG hui-hui, HE Yu-an, HE Ya-fei. Knowledge based fast design research for space complex pipelines used in supercritical boiler [J]. **Journal of Shanghai Polytechnic University**, 2017, 34(4): 270–276.
- [34] 樊泉桂, 阎书耕. 超临界“W”火焰锅炉水冷壁的优化设计[J]. 中国电力, 2010, 43(8): 13–17.
FAN Quan-gui, YAN Shu-geng. Optimized design of water wall in supercritical boiler with W-shaped flame [J]. **Electric Power**, 2010, 43(8): 13–17.
- [35] 钟崑, 吴燕玲, 童水光, 等. 基于遗传算法的锅炉对流受热面优化设计[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(12): 2291–2296.
ZHONG Wei, WU Yan-ling, TONG Shui-guang, et al. Optimal design of convection heating surface of boiler based on genetic algorithm [J]. **Journal of Zhejiang University: Engineering Science**, 2010, 44(12): 2291–2296.
- [36] 王永堂, 陈明, 王艳滨, 等. 燃气轮机余热锅炉过渡烟道的优化设计[J]. 热能动力工程, 2010, 25(1): 65–68.
WANG Yong-tang, CHEN Ming, WANG Yan-bin, et al. Optimized design of the transition flue duct of a gas turbine-based waste heat recovery boiler [J]. **Journal of Engineering for Thermal Energy and Power**, 2010, 25(1): 65–68.
- [37] 马凯, 阎维平, 高正阳, 等. 增压富氧燃煤锅炉省煤器的设计与优化[J]. 动力工程学报, 2013, 33(3): 165–171.
MA Kai, YAN Wei-ping, GAO Zheng-yang, et al. Design and optimization for economizer of pressurized oxy-fuel coal-fired boilers [J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2013, 33(3): 165–171.
- [38] 赵晴川, 郝军, 李洪泉, 等. 数值模拟在电站锅炉烟风道优化设计中的应用[J]. 锅炉技术, 2014, 45(6): 12–16.
ZHAO Qing-chuan, HAO Jun, LI Hong-quan, et al. Numerical simulation of flow field for wind-box and selective catalytic reduction system in utility boiler [J]. **Boiler Technology**, 2014, 45(6): 12–16.
- [39] 李皓宇. 基于熵产分析的锅炉对流传热受热面优化分析设计[J]. 华北电力技术, 2017(5): 44–48.
LI Hao-yu. Research on geometrical optimization design of boiler's convective heating surface using entropy generation [J]. **North China Electric Power**, 2017(5): 44–48.
- [40] GULOTTA T M, GUARINO F, CELLURA M, et al. A constructal law optimization of a boiler inspired by life cycle thinking [J]. **Thermal Science and Engineering Progress**, 2018, 6: 380–387.
- [41] YUSHKOVA E A, LEBEDEV V A, YAKOVLEV P V. Optimization of the boiler using the pinch method and exergy method [J]. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2019, 378: 12052.
- [42] 范海东. 基于数字孪生的智能电厂体系架构及系统部署研究[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 241–248.
FAN Hai-dong. Research on architecture and system deployment of intelligent power plant based on digital twin [J]. **Chinese Journal of Intelligent Science and Technology**, 2019, 1(3): 241–248.
- [43] 郭飞燕, 刘检华, 邹方, 等. 数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(17): 110–132.
GUO Fei-yan, LIU Jian-hua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2019, 55(17): 110–132.
- [44] 王安邦, 孙文彬, 段国林. 基于数字孪生与深度学习技术的制造加工设备智能化方法研究[J]. 工程设计学报, 2019, 26(6): 666–674.
WANG An-bang, SUN Wen-bin, DUAN Guo-lin. Research on intelligent method of manufacturing and processing equipment based on digital twin and deep learning technology [J]. **Chinese Journal of Engineering Design**, 2019, 26(6): 666–674.
- [45] 刘蔚然, 陶飞, 程江峰, 等. 数字孪生卫星: 概念、关键技术及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(3): 565–588.
LIU Wei-ran, TAO Fei, CHENG Jiang-feng, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2020, 26(3): 565–588.
- [46] 王春晓. 基于数字孪生的中科院 SAMP 平台运维分析系统设计与实现[D]. 沈阳: 中国科学院大学, 2019.
WANG Chun-xiao. Design and implementation of SAMP platform operation and maintenance analysis system of CAS based on digital twin [D]. Shenyang: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [47] 李凯, 钱浩, 龚梦瑶, 等. 基于数字孪生技术的数字化舰船及其

- 应用探索 [J]. 船舶, 2018, 29(6): 101–108.
- LI Kai, QIAN Hao, GONG Meng-yao, et al. Digital warship and its application exploration based on digital twin technology [J]. **Ship & Boat**, 2018, 29(6): 101–108.
- [48] TAO F, ZHANG M, LIU Y S, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment [J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2018, 67(1): 169–172.
- [49] BENJAMIN S, NABIL A, LUC M, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering [J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2017, 66(1): 141–144.
- [50] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨 [J]. 航空制造技术, 2017(7): 41–45.
- YU Yong, FAN Sheng-ting, PENG Guan-wei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management [J]. **Aeronautical Manufacturing Technology**, 2017(7): 41–45.
- [51] 周有城, 武春龙, 孙建广, 等. 面向智能产品的数字孪生体功能模型构建方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1392–1404.
- ZHOU You-cheng, WU Chun-long, SUN Jian-guang, et al. Function model construction method based on digital twin for intelligent products [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2019, 25(6): 1392–1404.
- [52] 张鹏, 冯浩, 杨通达, 等. 数字孪生与 TRIZ 集成迭代参数演化创新设计过程模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1361–1370.
- ZHANG Peng, FENG Hao, YANG Tong-da, et al. Innovative design process model of TRIZ and digital twin integration iterative evolution based on parameter deduction [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2019, 25(6): 1361–1370.
- [53] 李琳利, 李浩, 顾复, 等. 基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1307–1319.
- LI Ling-li, LI Hao, GU Fu, et al. Multidisciplinary collaborative design modeling technologies for complex mechanical products based on digital twin [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2019, 25(6): 1307–1319.
- [54] 肖飞, 张为华, 王东辉, 等. 数字孪生驱动的固体发动机总体设计体系架构与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1405–1418.
- XIAO Fei, ZHANG Wei-hua, WANG Dong-hui, et al. System architecture and applications for overall design of solid rocket motor based on digital twin [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2019, 25(6): 1405–1418.
- [55] HAVARD V, JEANNE B, LACOMBLEZ M, et al. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations [J]. **Production & Manufacturing Research**, 2019, 7(1): 472–489.
- [56] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1–18.
- TAO Fei, LIU Wei-ran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2019, 25(1): 1–18.
- [57] 颜龙晚. 锅炉的数字化交付初探 [J]. 锅炉技术, 2019, 50(1): 70–75.
- YAN Wan-long. Discussion on digitization of boiler and digital transfer platform [J]. **Boiler Technology**, 2019, 50(1): 70–75.
- [58] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753–768.
- ZHUANG Cun-bo, LIU Jian-hua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2017, 23(4): 753–768.
- [59] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1–18.
- TAO Fei, LIU Wei-ran, LIU Jian-hua, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2018, 24(1): 1–18.