

面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用

唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 刘刚, 李梦诗, 李立涅

(华南理工大学电力学院, 广州 510641)

摘要: 智慧能源战略为能源行业转型提供互联互通、透明开放、互惠共享的能源共享平台, 数字孪生技术将助力解决智慧能源发展所面临的技术与市场壁垒问题。当前数字孪生技术在智慧能源行业应用仍处于起步阶段, 相关的技术拓展和应用场景研究仍不充分, 尚未形成系统性的研究框架。本文旨在总结国内外面向智慧能源系统的数字孪生技术的发展经验并探讨其未来发展思路, 以期促进数字孪生技术在智慧能源行业中的深化应用。通过比较国内外不同领域对数字孪生技术的定义和应用, 探讨了面向智慧能源系统的数字孪生技术的定义, 对其通用架构、关键技术和生态构建分别进行了阐述。据此进一步分析了数字孪生技术在智慧能源行业的部署和应用案例。从技术发展、生态构建和政策建立三方面给出了对策建议, 以期为数字孪生技术在智慧能源行业的工程应用提供参考。

关键词: 智慧能源系统; 数字孪生; 通用架构; 能源系统生态

中图分类号: TK01 **文献标识码:** A

Technologies and Applications of Digital Twin for Developing Smart Energy Systems

Tang Wenhui, Chen Xingyu, Qian Tong, Liu Gang, Li Mengshi, Li Licheng

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The smart energy strategy can provide an energy sharing platform that is interconnected, transparent, and mutually beneficial. The digital twin technology can help break technical and market barriers associated with the development of smart energy. However, the digital twin technology is still in its infancy within the smart energy industry and lacks research on its development and application; a systematic research framework has not yet been formed. This study aims to promote the application of digital twin technology to the smart energy industry by summarizing the development experience of the technology in China and abroad and discussing its future development paths. After comparing the definitions and applications of digital twin technology in different fields, the definition of digital twin for smart energy systems is established, and its general architecture, key technologies, and ecological construction are discussed respectively. Moreover, application cases are briefly analyzed. Furthermore, countermeasures are proposed from three aspects: technology development, ecological construction, and policy establishment. This study is hoped to provide a reference for engineering applications of the digital twin technology in the smart energy industry.

Keywords: smart energy system; digital twin; general architecture; energy ecosystem

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-06-22

通讯作者: 唐文虎, 华南理工大学电力学院教授, 研究方向为可再生能源发电系统建模、控制及其并网方法, 计算智能方法及其在电力系统运行中的应用; E-mail: wenhutang@scut.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+'行动计划发展战略研究”(2018-ZD-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

全球能源行业顺应数字化时代不断发展,我国电力体制改革深入推进,在这一背景下加快能源转型已成为行业共识。但能源行业存在着体制、技术与市场壁垒,使得能源转型面临挑战。国家能源局提出智慧能源战略,建设互联互通、透明开放、互惠共享的能源共享平台,以期解决能源行业普遍存在的壁垒问题 [1]。数字孪生技术可在物理世界和数字世界之间建立精准的联系,有助于解决智慧能源发展所面临的技术难题,支持从多角度对能源互连网络进行精确仿真和控制。然而,数字孪生技术在智慧能源行业的定义和应用架构仍有待深入研究,对于能源系统的数字孪生技术应用试验也仅处于初步的验证探索阶段,涉及能源系统变电设备、电力传输网和热电厂的数字孪生模型研究 [2~4]。

本文以面向智慧能源系统的数字孪生技术为研究对象,重点梳理智慧能源领域对数字孪生技术的需求和国内外研究现状及趋势,探究数字孪生技术在智慧能源系统中的定义和通用架构,据此分析面向智慧能源系统的数字孪生关键技术和生态构建。在此基础上开展数字孪生技术在智慧能源行业的部署和应用案例研究,进而展望数字孪生技术在智慧能源行业的发展方向和应用趋势。

二、面向智慧能源系统的数字孪生技术需求分析

(一) 宏观需求分析

2019 年 11 月,《中共中央关于坚持和完善中国特色社会主义制度 推进国家治理体系和治理能力现代化若干重大问题的决定》要求,推进能源革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系。《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》提出,培育基于智慧能源的新业务、新业态,建设新型能源消费生态与产业体系。我国能源产业生态正在发生深刻变革。

目前新型冠状病毒肺炎疫情给我国经济发展和能源行业带来了冲击,煤炭、天然气、电力、新能源等行业均遭受到一定程度的影响。这并不能改变我国能源体系实现能源转型的目标,能源生产和利

用方式的根本性改变亟需以新一代数字化技术为关键支撑。

(二) 技术需求分析

我国能源供应朝着分散生产和网络共享的方向转变,但能源行业仍普遍存在体制、技术和市场壁垒,能源供应侧、传输侧和消费侧都存在大量信息不透明、不共享的问题。国家能源局提出的“互联网+”智慧能源战略,将借助现代信息技术提供互联互通、透明开放、互惠共享的信息网络平台,打破现有能源“产、输、配、用”之间的不对称信息格局,推进能源生产与消费模式革命,重构能源行业生态。该战略的落地实施要求能源系统实施数字化深度转型,运用新的技术手段助力数字化转型成为亟需。

云计算、人工智能(AI)、大数据、数字孪生等新兴热点技术,为能源行业的创新与变革带来了新发展动力,为加速能源系统的数字化转型提供了技术支撑。

构建智慧能源生态系统是我国能源行业的发展趋势,而融合物联网技术、通信技术、大数据分析技术、高性能计算技术和先进仿真分析技术的数字孪生技术体系,成为解决当前智慧能源发展面临问题的关键抓手。在现有能源系统的建模仿真和在线监测技术的基础上,数字孪生技术体系进一步涵盖状态感知、边缘计算、智能互联、协议适配、智能分析等技术,为智慧能源系统提供更加丰富和真实的模型,从而全面服务于系统的运行和控制。

三、面向智慧能源系统的数字孪生技术研究现状与趋势

近年来,国外对数字孪生技术的理论层面和应用层面研究均取得了快速发展 [5]。美国通用电气公司(GE)和辛辛那提大学应用涵盖从设计到维护全过程的数字化来优化产品生产,但尚未实现数字孪生的统一建模技术 [6]。美国 ANSYS 公司提出 ANSYS Twin Builder 技术方案,创建数字孪生并可快速连接至工业物联网,用于改善产品性能、降低意外停机风险、优化下一代产品 [7]。文献 [8] 提出了数字孪生参考模型,在概念层面实现了对产品生

命周期的全面描述。文献 [9] 提出了一种多模式数据采集方法，将生产系统与数据库耦合，为数字孪生提供了状态感知与分析的基础能力。

与国外的快速发展势头相比，国内在数字孪生技术方面的研究仍处于萌芽阶段 [5]。文献 [10] 提出了一种描述复杂产品的数字孪生设计框架，探索了开发过程中的关键技术。文献 [11] 提出了数字孪生五维模型概念，展望了该模型在 10 个不同领域中的应用前景。文献 [12] 多角度分析了大数据和数字孪生技术之间的异同以及如何促进实现智能制造。文献 [13] 总结了信息物理系统中数字孪生的关键技术，描绘了数字孪生技术在产品全生命周期的实现途径。

数字孪生技术在各领域的应用迅速发展，而无论国内还是国外，有关数字孪生技术在能源行业的应用大都处于探索验证阶段。法国达索公司致力于电气设备的数字孪生仿真建模研究，搭建了用户和设计师之间的交互平台 [14]。上海交通大学研究团队建立了数字孪生电网的潮流模型，验证了数字孪生电网的技术可行性 [2]。安世亚太数字孪生体实验室基于 Flownex 设计软件建立了数字孪生热电厂模型 [3]，为热电厂的工程设计和维护提供了技术参考。清华大学研究团队利用数字孪生 CloudIEPS 平台，建立了数字孪生综合能源系统模型，达到了降低能源系统运行成本的目标 [4]。

一般认为，数字孪生技术特别适用于资产密集型且可靠性需求高的复杂系统。该技术已逐渐应用到诸多工业领域，又以制造业领域为典型。智慧能源系统是融合多能源的综合复杂系统，与数字孪生技术的应用方向高度契合。然而，当前数字孪生技术在智慧能源领域应用发展比较零散，没有建立数字孪生技术在智慧能源领域的应用实施框架。

四、面向智慧能源系统的数字孪生定义和架构

（一）面向智慧能源系统的数字孪生技术定义

数字孪生技术早期被运用在国防军工及航空航天领域，其基本理念是由 Grieves 教授 2003 年在产品生命周期管理课程上提出 [15]。对数字孪生技术概念给出定义，则要追溯到 2009 年美国空军研究实验室（AFRL）提出的飞机机身数字孪生定义。2009—2019 年科研机构对数字孪生技术所给出的定义见表 1。

综合各类定义描述，本文面向智慧能源工程应用，概括数字孪生的定义如下：数字孪生技术充分利用精细化物理模型、智能传感器数据、运维历史等数据，集成电、磁、热、流体等多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成对智慧能源系统的映射；数字孪生实例反映对应智能设备的全生命周期过程，能够实时更新与动态演化，进而实现对智慧能源系统的真实映射。

（二）面向智慧能源系统的数字孪生架构及特点

结合数字孪生的通用架构，本文给出了数字孪生在智慧能源系统中的架构，针对智慧能源系统的特点该架构分为五部分（见图 1）：物理层、数据层、机理层、表现层和交互层。数据层首先从物理层中收集大量数据，然后进行预处理并传输；机理层从数据层接收多尺度数据（包括历史数据和实时数据），通过“数据链”输入仿真模型后进行数据整合和模拟运算；表现层获得机理层仿真的结果，以“沉浸式”方式展现给用户；交互层可以实现精准的人机交互，交互指令可以反馈至物理层对物理设备进行控制，也可以作用于机理层实现仿

表 1 数字孪生定义的比较

组织机构（时间）	具体定义
AFRL（2009 年）	机身数字孪生是一个由数据、模型和分析工具构成的集成系统，不仅可以在整个生命周期内描述飞机机身状态，还可以依据非确定信息对整个机队和单架机身进行运维决策（包括实时诊断和未来预测）
GE（2015 年）	数字孪生体是资产和过程的软件表达，用于理解、预测和优化性能以改进业务生产。数字孪生体由数据模型、分析方法和知识三部分组成
IBM（2017 年）	数字孪生体是对物理对象或系统在全生命周期内的虚拟表达，通过使用实时数据实现理解、学习、推理
安世亚太科技股份有限公司（2019 年）	数字孪生体针对现有或将有的物理实体对象的数字模型，通过实测、仿真和数据分析来实时感知、诊断、预测物理实体对象的状态，通过优化和指令来调控物理实体对象行为，应用相关数字模型间的相互学习来进化自身，同时改进利益相关方在物理实体对象生命周期内的决策

注：IBM 为国际商业机器公司。

真模型的更新和迭代生长。相应层次的特点具体阐述如下。

1. 物理层

常规的能源系统状态监测，首先在能源设备上安装传感器，然后由数据采集软件汇总，但分散的数据采集系统交互困难。物理层基于能源物联网平台，在各智能设备中应用先进传感器技术收集系统运行的多模异构数据，集成了物理感知数据、模型生成数据、虚实融合数据等海量数据；支持跨接口、跨协议、跨平台交互，可实现能源系统中各子系统的互联互通。

2. 数据层

常规的能源系统状态监测只关注传感器本身数据，而数字孪生更关注贯穿智能设备全生命周期的多维度相关数据。数据层在各智能设备本地侧对数据进行实时清洗和规范化，采用高速率、大容量、低延迟的通信线路进行数据传输；同时依托云计算和数据中心，动态地满足各种计算、存储与运行需求。

3. 机理层

数字孪生所构建的智慧能源系统仿真模型使用了“模型驱动+数据驱动”的混合建模技术，采用基于模型的系统工程建模方法学，以“数据链”为主线，结合 AI 技术对系统模型进行迭代更新和优化，以实现真实的虚拟映射。这一模型对智能设备的选型、设计和生产制造都有指导价值，而不仅限于根据数据变化来决定能源设备是否需要检修或更换。

4. 表现层

数字孪生技术应用虚拟现实（VR）、增强现实（AR）以及混合现实（MR）的 3R 技术，建立可视化程度极高的智慧能源系统虚拟模型，提升了可视化展示效果 [16]。利用计算机生成视、听、嗅等感官信号，将现实与虚拟的信息融为一体，增强用户在虚拟世界中的体验感和参与感，辅助技术人员更为直观、高效地洞悉智能设备蕴含的信息和联系。

5. 交互层

基于数字孪生的智慧能源系统虚拟模型不再

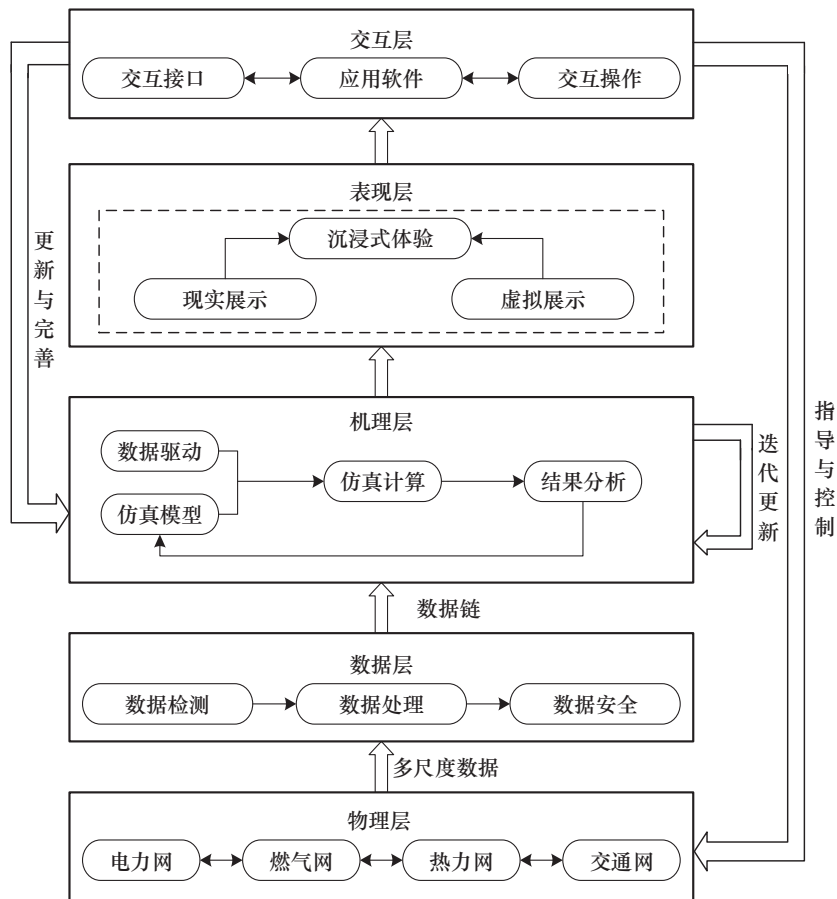


图 1 面向智慧能源系统的数字孪生架构

仅仅是传统的平面式展示或简单三维展示，而是实现用户与模型之间的实时深度交互。利用语音、姿态、视觉追踪等技术，建立用户与智能设备之间的通道，实现多通道交互体系来进行精准交互，以支持对电力网、燃气网、热力网、交通网、供水网等多能耦合的能源系统的高效精准控制和交互。

整体来看，数字孪生既不是对物理系统进行单纯的数值模拟仿真，也不是进行常规的状态感知，更不是仅仅进行简单的 AI、机器学习等数据分析，而是将这三方面的技术都有机整合于其中。数字孪生对能源系统进行数字化建模，并在数字空间与物理空间实现信息交互；首先应用完整信息和明确机理预测未来，再发展到基于不完全信息和不确定性机理推测未来，最终实现能源系统的数字孪生体之间共享智慧、共同进化的孪生共智状态 [2]。

五、面向智慧能源系统的数字孪生关键技术

(一) 云端 - 边缘端协同的数字孪生服务平台

智慧能源系统包含了众多领域的物理设备，数据采集向多样化发展，且数据量呈指数级增长。常规的数据服务平台已无法满足对数据进行快速准确处理的要求，亟需构建云端 - 边缘端协同的数字孪生服务平台。边缘端需要利用智能设备进行一部分

本地计算，云端则要求将各设备的数据整合后进行运算。通过建立“数据链”、通用算法库和模型库，实现多源异构数据分析任务的高效协同分工，从而为数字孪生的应用奠定基础。

1. 智慧能源系统的“数据链”设计

智慧能源系统各个设备组件的设计结构、制造工艺、性能参数、运行参数等，对系统运行服务均会产生影响。基于数据采集、传输、分析和输出的全过程“数据链”设计，需要挖掘“数据链”与全生命周期过程的映射关系，通过研究“数据链”与设计云、生产云、知识云、检测云、服务云中的实体与虚体关联关系，利用数据库和机器学习智能算法，形成全生命周期“数据链”的描述与设计方法。图 2 给出了“数据链”中设备数据的采集、传输和分析的过程，用于实现数据的纵向贯通和知识的闭环精准交互。

2. 云端和边缘端服务的通用智能算法库

建立精确、可动态拓展的云端和边缘端服务的智能算法库，以加快智慧能源系统分布式计算的速度，实现对网络、计算、存储等计算机资源的高效利用。该算法库是一个体系合理、测试完整且验证充分的智慧能源系统通用智能算法库，包括数据清洗算法子库、性能退化特征提取算法子库和状态趋势预测算法子库等。尤为核心的是，基于边缘端 -

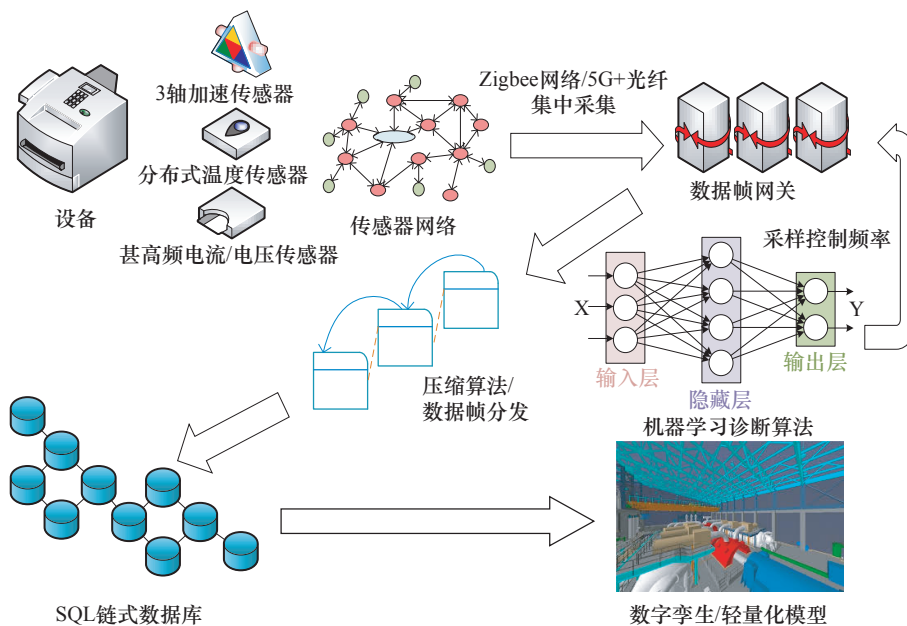


图 2 “数据链”中设备数据的采集、传输和分析

注：Zigbee 代表紫蜂协议；SQL 代表结构化查询语言。

云端协同体系的专业算法应用部署, 可实现专业算法的实例化验证和迭代生长。

3. 智慧能源系统设备的通用精细化模型库

智慧能源系统设备的精细化模型库将有助于实现对模型的精细化和个性化建模。构建云端-边缘端的数据交互机制, 为数字孪生模型提供所要求的数据及交互接口, 实现数据的纵向贯通。研究云端和边缘端多维数据约简合并技术, 设计复杂事件处理引擎, 开发能源系统模型库, 实现服务的横向融合。

(二) 智慧能源系统的高效仿真与混合建模技术

智慧能源系统由机械、电气和信息等多系统组成, 需要从多物理场和多尺度的角度进行全面、综合、真实地建模和仿真。通过虚实信息的传递并加载到数字孪生模型上, 构建“模型驱动+数据驱动”的混合驱动方式进行高逼近仿真, 在虚拟环境中实现能源系统复杂工况下部件级及系统级性能的预测与分析。

1. 基于多物理场和多尺度的建模与仿真技术

鉴于智慧能源系统的复杂性, 技术人员不能只考虑单个物理场效应或一维尺度数据, 不能忽略多物理场和多尺度之间的耦合关系。应用有限元仿真软件构建包括电、热、磁、力在内的多物理场和体现历史、实时和未来效应的多尺度的仿真模型, 支持技术人员从不同的角度对智慧能源系统的仿真模型进行分析与评价。

2. 基于“模型驱动+数据驱动”的建模技术

智慧能源系统的不确定性和复杂化现象突出, 而现有状态分析一般采用事先建立的简化机理模型, 在实际应用中引入简化的约束, 由此导致在复杂环境下无法获得满足性能要求的模型。常规的数据驱动方法不能描述客观物理规律约束, 故单独运用模型驱动或数据驱动的方法均不能满足能源系统的智能化和时效性需求。基于“模型驱动+数据驱动”的混合建模技术, 通过类别均衡算法、策略网络和价值网络数据学习, 克服原始数据类别不均衡和缺失的问题。基于代价敏感学习和机器学习的反演和参数识别方法, 克服机理模型难以建模且忽略部分特征的缺点。运用混合建模技术的集成学习算法, 提高系统运行状态评价方法

的泛化能力。

(三) 数字孪生技术的信息安全防御机制

智慧能源系统是一个由信息网络连接各子系统的复杂系统, 具有高度网络依赖性。信息交流的可靠与否决定了系统能否正常运行, 任何设备的安全问题都可能引发系统数据泄露。针对智慧能源系统面临的恶意解析和篡改风险, 需要研究网络攻击检测与防御技术, 增强智慧能源系统运行的安全性。

1. 基于底层分类模块的多模型检测技术

基于智慧能源系统终端传输的多源传感信息, 提升 AI 算法对量测信息攻击行为特征的挖掘能力, 并强化模型的泛化能力。针对多种分类模型的底层增量式分类器库, 构建分类结果集成输出模块, 实现对数据完整性攻击的精准检测。

2. 构建与数据完整性攻击相关的特征属性集

挖掘面向智慧能源系统的数字孪生模型及参数时空耦合物理特征, 针对智能终端传输的包含多源异构信息的网络数据, 研发基于 AI 的特征提取算法, 动态优化选取与数据完整性攻击相关的最优特征属性集, 进而提取其深层次模型特征。

3. 建立安全风险评估准入机制

基于 AI、统计学和信息论的方法, 建立安全风险评估准入机制。对接入智慧能源系统的各子系统进行大数据分析, 对各子系统的信息安全进行风险量化。当子系统的风险数值高于某个设定的阈值时, 限制该子系统的准入, 从而实现基于安全风险评估的访问控制。

(四) “沉浸式”智慧能源系统可视化和交互技术

有别于常规数学仿真模型, 数字孪生模型强调虚实之间的交互, 能实时更新与动态演化, 从而实现对物理世界的动态真实映射。“沉浸式”可视化技术, 可以帮助用户更清晰、更透彻、更丰富地认识世界, 分为算法可视化和模型可视化。

1. 智慧能源系统算法应用结果的可视化技术

数据孪生模型的可视化技术既包括典型的可视化技术, 如图形化展示、查询、参数更新接口等, 也包括图形化展示组件属性数据、状态数据、预测与评估数据。通过组件属性和组件间关联的图形界

面与组件模型接口进行可视化和交互。

2. 基于 3R 技术的人机交互技术

常规仿真模型的展现方式偏向于平面式的展示，局限于通过大量的图表来向用户展现物理实体的状态。基于 3R 交互技术，运用可视化展示组件，可模拟三维虚拟空间，将智慧能源系统中的物理设备以近乎真实的状态展现在用户面前。通过对虚拟体的操作与控制，间接实现对物理实体、信息网络、仿真模型的操作与控制，极大扩展用户的感官体验，获得系统运行的真实反馈。

(五) 可扩展数字孪生技术的应用新模式

数字孪生交互技术的实现，提升了人机之间的交互能力。该技术可以结合虚拟体的仿真结果，为物理实体增加或扩展新的能力，实现对设计端和运维端的反馈与控制，最终完成对设备物理实体和虚拟仿真体的精确描述与行为预测；在此基础上可以提供一系列数字孪生技术的应用新模式。

1. 基于数字孪生的智慧能源系统运维新模式

在可扩展的“虚实同步”智慧能源系统运维服务平台基础上，梳理典型智慧能源系统全生命周期运维需求；针对个性化需求，研发定制化运维服务的移动应用程序（APP），形成多种远程运维新模式。例如，针对智慧能源系统中的新产品研发周期长、试验费用高的问题，研发远程虚拟仿真试验技术，探索试验检测服务新模式。

2. 面向智慧能源系统应用的 APP

智慧能源系统具有多领域、多层次、多单元的多维异构特点，深度交互式的 APP 应用能提高智慧能源系统设备的管理和优化控制能力。

3. 智慧能源系统设备管理 APP

智慧能源系统设备管理 APP 包括设备设置、地图、数据管理、维保管理等模块，具有设备的注册、参数配置，设备定位、设备状态展示，设备历史数据查询、警报查询，设备维保历史记录、维保单分派、服务质量管理，系统报警设定、系统日志等功能，从而实现设备的全生命周期管理。

4. 智慧能源系统设备优化控制 APP

设备优化控制 APP 包括设备数据源模块、设备资产分析模块、状态检修智能辅助决策模块、设备状态评估模块和控制指令下发模块。APP 根据能

源设备的负荷情况进行实时控制，实现智能增效，提高设备利用率和系统稳定性；同时以能源设备为对象，使用集群管理来提供寿命健康预测、故障预测和诊断等增值服务。

六、智慧能源系统的数字孪生生态构建

面向智慧能源系统的数字孪生技术贯穿于能源生产、传输、存储、消费、交易等环节，有助于打破能源行业的时间和空间限制，促进各种业务的全方位整合与统一调度管理；横向联合能源行业参与主体之间的业务，提高能源利用效率。梳理形成智慧能源行业的数字孪生技术生态圈（见图 3），按照能源系统的全生命周期过程将之划分为六部分：能源生产、能源传输、能源分配、能源消费、能源存储和能源市场。随着各部分之间交互的不断加深，逐步实现基于数字孪生技术的智慧能源行业可持续发展。针对数字孪生技术应用，对智慧能源行业的 6 个参与主体概括阐述如下 [17,18]。

(一) 能源生产

借助云端-边缘端协同的数字孪生服务平台，能实现能源生产高效转换。通过建立虚实映射的仿真模型，实时对能源生产机组的运行状态和运行环境等进行监控和模拟仿真运行，及时制定各能源生产机组的最优运行策略；同时应用运行数据中提取的特征来优化设备生产设计方案，包括数字孪生风机、多物理场光伏模型和数字化电厂等。

(二) 能源传输

由于能源空间分布失衡，我国部分区域能源资源匮乏，需要依赖能源传输以保障能源安全。数字孪生技术可以提升能源传输过程中的控制和优化能力 [19]。应用数字孪生技术，对直流输电网中的柔直模块化多电平换流器进行数字孪生建模，以实现能源传输的优化和升级。针对用于电能传输的电缆等设备，应用数字孪生技术进行虚实映射的数字孪生建模，指导电缆设备的全生命周期设计，以提高设备的运行性能和增长设备的使用寿命。数字孪生电网在虚拟实体中可以实现多物理场和多尺度的仿真，使管理人员更真实地了解输电设备的运行状况

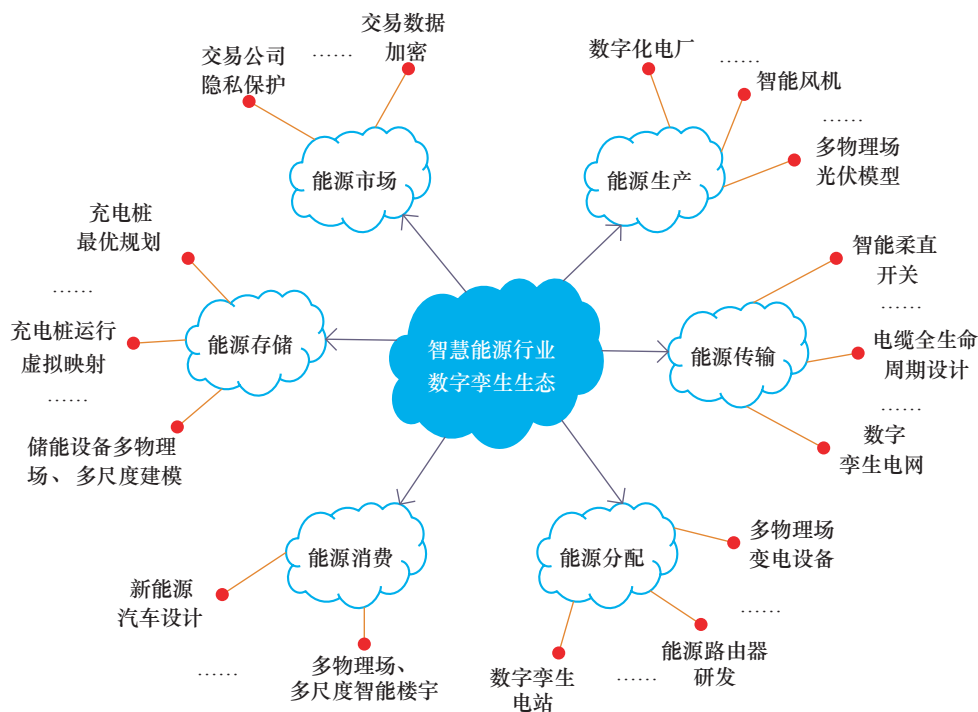


图 3 智慧能源行业的数字孪生技术生态圈

和各节点的负荷状况，通过大数据和智能算法实时监控电网并及时对电网可能出现的问题进行预警。

（三）能源分配

能源路由器的研发尚处于起步阶段，运用数字孪生技术对能源路由器建立虚拟模型并进行大数据模拟分析，进而指导设备的生产设计，大大缩短设备的研发周期。针对能源分配环节存在的大量变电设备，采用数字孪生技术将变电站设备实例化，在智能机器人与智能安全监测设备的辅助下，实现海量数据与物理设备的关联映射，在可视化平台进行实时展现，形成数字孪生变电站，提升能源分配的经济性和安全性。

（四）能源消费

数字孪生由虚到实的理念，将助力设计师突破传统的制造工艺限制来实现全新设计，如建立新能源汽车的数字孪生模型，形成数字孪生映射，对新能源汽车的设计模型进行更新以完善其性能。智能楼宇作为智慧能源系统中的重要部分之一，是典型的产销者。数字孪生技术对智能楼宇中的智慧家具、供冷供热系统等建立多物理场和多尺度的仿真

模型，对楼宇的温度、湿度、人员数量和位置等信息进行采集；在可视化平台中，管理人员基于物联网技术可以轻松实现对智能楼宇各子系统的智能化控制，运用 AI 算法实现智能楼宇的运行趋势预测和最优运行策略制定。

（五）能源存储

在电动汽车充电桩的规划阶段，基于数字城市模型对充电桩的布局进行模拟规划，在满足用户充电需求和市政规划要求的条件下，实现充电桩的最优分布。在充电桩建成后，对每个充电桩进行仿真建模，在虚拟场景中呈现其状态信息，及时监测并反馈到实际运维管理中指导故障的及时处理。对储能设备（如电池、超级电容等）进行多物理场、多尺度数字孪生建模，将这些模型应用于监控和预测储能设备的运行情况，从而实现优化配置。

（六）能源市场

能源产业的迅猛发展产生了多元化的新型金融市场服务需求，各能源交易公司参与能源市场交易难免存在大量的隐私数据。运用数字孪生技术的信息安全防御机制，对网络信息攻击行为进行特征挖

掘, 构建与数据完整性攻击相关的最优特征属性集; 建立安全风险评估准入机制, 联合将能源交易信息的安全风险降到最低。

七、数字孪生技术的应用前景

(一) 部署策略

随着云计算、大数据、物联网、AI、区块链等为代表的新一代数字化技术的快速发展与应用, 数字孪生技术在智慧能源行业有广阔的发展前景。根据智慧能源系统的运行需求, 研发智慧能源系统的数字孪生 APP。随着 5G 和大数据时代的到来, 智慧能源系统的数字孪生 APP 将为我国能源领域的转型升级提供坚实灵活的应用技术支撑。

智慧能源系统的数字孪生 APP 率先支持常用部署配置, 可按照浏览器 / 服务器 (B/S) 或客户端 / 服务器 (C/S) 架构进行部署, 支持手机、平板电脑、个人计算机等访问终端。如果部署于云平台, 可实现多人同时访问、协同作业和远程专家指导等服务。通过服务和模式创新, 显著提升智慧能源生态系统的工作效率, 降低能源产销成本, 实现智慧能源系统规划、运行和控制方面的提质增效。

(二) 应用案例

面向智慧能源系统的数字孪生技术的研究尽管处于起步阶段, 但是从细化到智慧能源系统的单个

设备, 再扩展到多主体复杂能源系统, 都具有广阔的应用前景。

1. 数字孪生变电设备

大型泵站设备用于抽提水资源, 是一个融合电气、信息和控制的综合系统, 涉及的子系统包括变电系统、水泵系统、监控系统等。基于数字孪生的泵站设备运行平台, 采用数字孪生的“数据链”技术, 建立多种部件耦合的多物理场、多尺度数字孪生仿真模型; 利用数字孪生泵站可视化管理系统, 实现虚拟环境中的仿真与现实的运维无缝衔接, 提高企业管理与运维的透明化程度。以变电设备为例 (见图 4), 构建电、磁、热耦合的多物理场和考虑多时间尺度的数字孪生仿真模型, 为大型泵站的设备选型和系统运行提供精细化模型。

2. 数字孪生电网

数字孪生电网首先对电力网络中的智能设备进行数据采集, 随后建立电网的数字孪生模型, 实现对电网运行状态的实时感知, 进而对电网的健康状态进行评估和预测 (如异常检测、薄弱环节分析、灾害预警等)。上海交通大学研究团队通过潮流方程 (有导纳信息) 和数据驱动 (无导纳信息) 两种驱动模式进行对比, 分析验证了数字孪生电网的可行性, 证明了当机理模型存在不足时, 数据驱动模式仍能得到满足实际运行需求的结果, 对数字孪生电网的可行性开展了有益探索 [2]。相应数字孪生电网的框架设计图如图 5 所示。

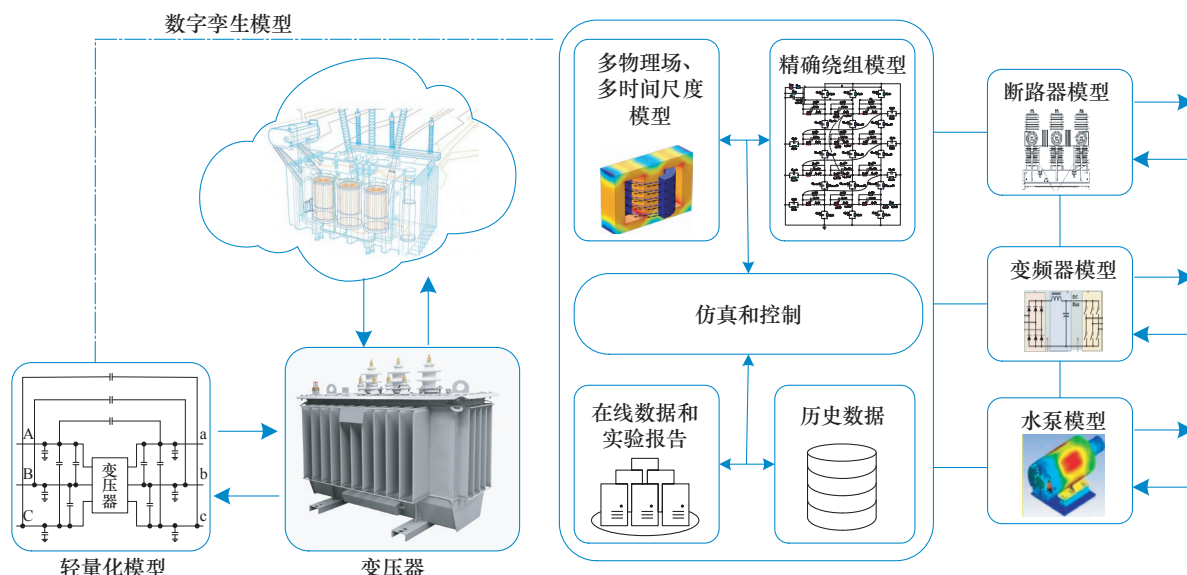


图 4 变电设备的数字孪生模型

3. 数字孪生综合能源系统

综合能源系统的概念最早起源于热电协同运行领域，目前已发展为整合一定区域内多种能源的一体化能源系统 [20]。安世亚太数字孪生体实验室构建了热电厂的数字孪生应用案例 [3]，相应模型能准确预测热电厂的运行性能；基于系统约束解决管理故障和系统瓶颈问题，为日常维修或更换提供前瞻性指导，对停机后的工作优先顺序进行评估。该案例以评估冷凝器内结构影响为例，判断积垢对主冷凝器背压有负面影响的概率，为相关设备的设计与运维提供了有效参考。清华大学研究团队借助数字孪生 CloudIEPS 平台，建立了包含电负荷、冷负荷、热负荷、燃气发电机、吸收式制冷机、燃气锅炉、光伏、蓄电池、蓄冰空调系统等设备在内的数字孪生综合能源系统模型 [4]，利用该模型对系统内各装置的容量进行优化来降低系统运行成本。

总之，数字孪生综合能源系统通过工业互联网实现能源系统“源-网-荷”各环节设备要素的连接，采用多物理场、多尺度建模仿真和工业大数据方法构建能源系统的数字孪生模型，进而基于数字孪生模型进行能源系统的状态监测、故障诊断、运行优化，实现综合能源系统的“共智”。

八、对策建议

在能源转型和“互联网+”背景下，应打破各能源行业的政策壁垒，贯通各能源系统物理连接和交互，建立多种能源优化协调的智慧能源系统。数字孪生技术首先需要构建具有端和云双向数据、信息交互的闭环反馈、优化和决策的支撑平台。该平台是数字孪生技术在智慧能源系统应用的核心环节，有助于解决智慧能源系统发展所面临的技术壁垒和市场壁垒问题，是实现服务的持续创新、需求的即时响应和产业升级优化的有益探索。基于以上背景和思考，本文从技术发展、应用生态和政策建立三方面出发，对数字孪生技术在智慧能源行业的发展提出应用建议。

(一) 建设技术资源共享平台，联合攻坚技术发展难题

智慧能源行业的各参与方（如企业、高等院校和科研院所等），不仅需要加快开展面向智慧能源系统的数字孪生技术的体系架构与支撑平台的关键技术研发，还需要加强各方之间的交流合作。建设技术资源共享平台，发挥研究实力较强单位的带头引领作用，分享数字孪生技术应用发展过程中的突

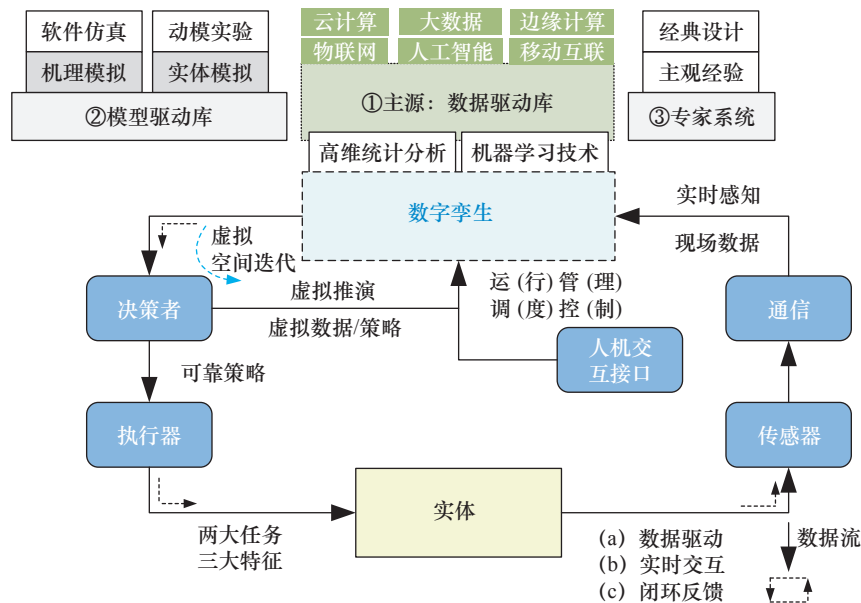


图 5 数字孪生电网框架设计图 [2]

破性进展和发展瓶颈判断；加强高等院校和企业之间的合作，联合攻克数字孪生技术实施过程中的关键性技术要素和难点。

（二）融合能源生态圈各领域的学科特色，构建数字孪生综合应用系统

为了更好地推进数字孪生技术在能源行业全生命周期中的应用，应加快能源行业的价值创造、信息增值、业务革新与效益挖掘。组织智慧能源生态圈中各领域的力量，结合智慧能源系统多学科融合交叉的特点，研发综合不同领域的、具有较强普适性的数字孪生综合应用系统，包括“数据链”设计技术、数字孪生建模技术和动态交互技术等。通过建立先期试点工程，再逐步推进至整个智慧能源行业的方式，减少各领域之间的壁垒，发挥数字孪生技术在构建数字孪生智慧能源生态中的综合效应。

（三）促进数字孪生技术发展的标准建设

数字孪生标准建设正处于起步阶段，已有国际标准组织发起了数字孪生标准编制工作。我国的数字孪生标准制定尚处于初级阶段，缺乏数字孪生相关术语和适用准则等标准参考，影响了数字孪生技术在智慧能源领域的落地应用，亟需启动开展数字孪生相关标准的制定。同时，教育和科研机构尽快制定相关人才培养方案，鼓励相关资源向智慧能源行业的数字孪生技术方向倾斜，增强技术推广过程中的应用型人才培养；以全球视野和格局进行人才培养和技术交流，逐步缩小与发达国家的差距，为实现我国能源系统的数字化转型提供坚强的基础支撑。

参考文献

[1] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战 [J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009–2019.
He X, Ai Q, Zhu T Y, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications [J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009–2019.

[2] 安世亚太科技股份有限公司数字孪生体实验室. 数字孪生体技术白皮书 (2019) [R]. 北京: 安世亚太科技股份有限公司数字孪生体实验室, 2019.
Laboratory of Digital Twins, Pera Global Technology Co., Ltd. White paper on digital twin technology (2019) [R]. Beijing:

Laboratory of Digital Twins, Pera Global Technology Co., Ltd., 2019.

[3] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用 [J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1–13.
Shen C, Jia M S, Chen Y, et al. Digital twin of the energy Internet and its application [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1–13.

[4] 李立涅, 张勇军, 徐敏. 我国能源系统形态演变及分布式能源发展 [J]. 分布式能源, 2017, 2(1): 1–9.
Li L C, Zhang Y J, Xu M. Morphological evolution of energy system and development of distributed energy in China [J]. Distributed Energy, 2017, 2(1): 1–9.

[5] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生十问: 分析与思考 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(1): 1–17.
Tao F, Zhang H, Qi Q L, et al. Ten questions towards digital twin: analysis and thinking [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 1–17.

[6] Todorovic M H, Datta R, Stevanovic L, et al. Design and testing of a modular SiC based power block [C]. Nuremberg: International Exhibition and Conference for Power Electronics, 2016.

[7] Pitchaikani A, Prölss K, Strandberg M, et al. Liquid cooling applications in twin builder-industrial paper [C]. Tokyo: The 2nd Japanese Modelica Conference, 2018.

[8] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 141–144.

[9] Uhlemann T H J, Lehmann C, Steinhilper R. The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0 [J]. Procedia CIRP, 2017, 61: 335–340.

[10] 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 H, Tao F, Wang H Q, 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.

[11] 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 F, Liu W R, Zhang M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18.

[12] Qi Q, Tao F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison [J]. IEEE Access, 2018, 6: 3585–3593.

[13] 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 C B, Liu J H, Xiong H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753–768.

[14] Boschert S, Rosen R. Mechatronic futures: Digital twin—The simulation aspect [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.

[15] Grieves M W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises [J]. International Journal of Product Development,

- 2005, 2(1/2): 71–84.
- [16] Rebenitsch L, Owen C. Review on cybersickness in applications and visual displays [J]. *Virtual Reality*, 2016, 20(2): 101–125.
- [17] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架 [J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(15): 1–11.
Dong Z Y, Zhao J H, Wen F S, et al. From smart grid to energy Internet: Basic concept and research framework [J]. *Automation of Electric Power System*, 2014, 38(15): 1–11.
- [18] 蔡泽祥, 孙宇嫣, 郭采珊. 面向泛在电力物联网的支撑平台与行业生态构建 [J]. *机电工程技术*, 2019, 48(6): 1–4.
Cai Z X, Sun Y Y, Guo C S. Construction of supporting platform and industry ecosystem towards electric Internet of things [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(6): 1–4.
- [19] 韩奇. 能源传输方式比较研究 [D]. 北京: 华北电力大学(硕士学位论文), 2013.
Han Q. Comparative study on energy transmission mode [D]. Beijing: North China Electric Power University(Master's thesis), 2013.
- [20] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1): 1–13.
Yu X D, Xu X D, Chen S Y, et al. A brief review to integrated energy system and energy Internet [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(1): 1–13.