

数字孪生在电力装备领域中的应用与实现方法

杨帆¹, 吴涛¹, 廖瑞金¹, 江金洋², 陈涛², 高兵³

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;
2. 国网重庆市电力科学研究所, 重庆 401123; 3. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 数字孪生(digital twin, DT)是推动电力装备领域数字化、智能化发展的关键技术之一, 相关研究处于初期起步阶段, 如何实现电力装备数字孪生成为亟需解决的问题。该文首先阐述了数字孪生的内涵及应用; 从数字孪生框架与实现方法、其在装备全寿命周期的应用、主流厂商及其平台方面总结了装备领域数字孪生的研究与应用进展; 其次分析了电力装备数字孪生实现所需的关键技术; 最后以变压器为例给出了基于 Microsoft Azure 和 ANSYS Twin Builder 的电力装备多物理场数字孪生实现方法, 并指出实现电力装备数字孪生在数据采集、模型构建与求解、平台使用方面的挑战。该文建议下一步开发高性能传感装置并构建合理的传感网络提升数据采集的深度与广度; 开展电力装备全尺度多物理场模型的构建与实时求解算法研究; 开发面向电力装备性能分析的国产化数字孪生平台。

关键词: 数字孪生; 电力装备; 多物理场; 物联网; 全寿命周期

Application and Implementation Method of Digital Twin in Electric Equipment

YANG Fan¹, WU Tao¹, LIAO Ruijin¹, JIANG Jinyang², CHEN Tao², GAO Bing³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China; 3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Digital twin is the key technology to promote the development of digitization and intelligence in the field of electric equipment. The relevant research is in initial stage, and how to achieve digital twin of electric equipment is an urgent problem to be solved. This paper describes the intension and applications of digital twin and then summarizes the research and application progress of digital twin in the field of equipment from the aspects of digital twin framework and implementation method, application in equipment life cycle, mainstream manufacturers and their platforms. Secondly, the key technologies of digital twin in the field of electric equipment are analyzed. Finally, an electric transformer is taken as an example, and the implementation method of the electric equipment multiphysics digital twin based on the Microsoft Azure and ANSYS Twin Builder is given. This paper also points out the challenges faced by the digital twin of electric equipment in data collection, model building and solution, and platform use. The recommendations are as follows: developing high-performance sensors and building a reasonable sensor network to enhance the depth and breadth of data collection; developing a full-scale multi-physical field model and real-time solving algorithm for electric equipment; and developing a national digital twin platform for electric equipment performance analysis.

Key words: digital twin; electric equipment; multi-physics; Internet of Things; life-cycle

0 引言

全球正处于信息化大背景下工业化加速发展的历史时期, 新型传感、5G、大数据、云计算、人工智能、物联网等技术正深刻影响着各行业的发

展^[1-2]。数字孪生融合了众多前沿信息技术, 通过虚实交互, 实现了物理实体全寿命周期状态的虚拟映射以及行业运营绩效的改善, 正成为推动各行业数字化、网络化、智能化发展的强大动力。

自 2010 年起, 全球 50 多个国家、1 000 多个机构、上千名学者开展了关于数字孪生的研究, 形成了众多白皮书^[3-7]、报告^[8]、专著^[9-12]、工业解决方案^[13-15]等研究成果。数字孪生广泛应用于航空航

基金资助项目: 国家电网公司科技项目(SGCQDK00NYJS000063; 5500-202017468A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGCQDK00NYJS000063, 5500-202017468A-0-0-00).

天^[16]、智能制造^[17]、建筑建设^[18]等行业^[19-23]，但不同行业对数字孪生的理解与研究存在差异，如航空航天侧重于建立仿真模型用于性能分析；建筑建设侧重于建立三维实景模型进行可视化。电力行业，数字孪生在电网调度和电力装备领域有着广阔应用前景^[24]。电网调度领域关于数字孪生的研究成果已取得良好应用效果，清华大学沈沉团队开发了基于数字孪生的能源互联网规划平台 CloudPSS^[25]，可指导能源互联网的规划与决策；中国电科院周二专团队开发了基于数字孪生的电网实时在线分析平台^[26]，实现了电网在线分析周期由 10 分钟到秒级的突破；上海交通大学艾芊团队也进一步验证了基于数字孪生进行电力系统潮流分析的可靠性^[27]。在电力装备领域，北京航空航天大学陶飞团队利用数字孪生完成了风力发电机状态预测和健康管理^[28]，但数字孪生模型无法实时更新；北卡罗来纳大学 Biglarbegian M 利用数字孪生结合先进的硬件和算法实现了高频功率变换器中氮化镓器件可靠性的感知^[29]，但未与处理数据及模型的物联网(internet of things, IoT)平台相结合，实际应用难度较大；上海浦东供电公司在蔡伦站基于建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术、公司内部 IoT 平台等建设了电网设备的数字孪生系统^[30]，实现了在 IoT 上基于智能算法处理实时监测数据、发现设备异常并报警，可视化较强但不能进行仿真及场计算，无法进一步对设备状态进行了解。总体上，由于电力装备建模及计算的复杂性，电力装备数字孪生的研究与应用处于初期起步阶段，需关注装备领域数字孪生的研究与应用进展、电力装备数字孪生实现所需的关键技术、电力装备数字孪生实现方法这三大问题。

鉴于此，本文概述了数字孪生技术，介绍了装

备领域数字孪生的研究与应用进展，分析了电力装备数字孪生实现所需关键技术，并给出电力装备多物理场数字孪生实现方法与面临的挑战。

1 数字孪生概述

1.1 数字孪生内涵

数字孪生是一组虚拟信息结构，可以从微观原子级别到宏观几何级别全面描述现有或将有的物理产品，在最佳状态下可从数字孪生模型中获得物理实体的全部信息^[31]。数字孪生体是物理实体全空间尺度、全生命周期的映射，二者完全相同且同步运行于物理与数字世界。基于孪生体可以全寿命跟踪物理实体的实时状态、模拟及预测物理实体在特定环境下的状态，进一步加强对物理实体的理解与认知。完整的数字孪生应具有对物理实体的定义能力、展示能力、交互能力、服务能力、伴随物理实体进化能力^[32]。

1.2 数字孪生应用

表 1 归纳了数字孪生广泛应用的领域及所取得的应用效果。

基于表 1 可看出数字孪生可服务于装备/部件级的性能分析、产线/流程级的生产方案验证及生产过程可视化、工厂/城市级的三维场景可视化与沉浸式体验。

2 装备领域数字孪生研究及应用进展

2.1 数字孪生框架与实现

论文重点阐述可服务于装备级数字孪生的框架与各项特性的实现方法，代表性成果见表 2。

2.1.1 数字孪生框架

1) 通用类框架

北京航空航天大学陶飞团队提出了数字孪生

表 1 数字孪生应用领域及效果

Table 1 Application fields and effects of digital twin

应用层级	应用领域	孪生对象	机构/平台	应用效果
装备/部件级	航空航天 ^[33]	SpaceX 猎鹰九号	3DEXPERIENCE	基于孪生模型开展了大量静力、动力、强度、疲劳等虚拟测试。
	能源电力 ^[34]	汽轮机叶片	ANSYS	基于实时仿真得到难以直接测量到的数据，服务于状态评估算法。
	船舶航运 ^[35]	舰船	DNV GL	结合传感数据与数字孪生，有效提高船体状态预测精度。
	医疗健康 ^[36]	心脏、大脑	3DEXPERIENCE	基于孪生模型开展心脏手术预演，寻找大脑施加信号的位置及强度。
产线/流程级	智能制造 ^[37]	产线及动态机器	贝加莱	结合输送系统 ACOPOStraK 和数字孪生实现产线设计虚拟验证与可视化。
	油气开采 ^[34]	石油开采系统	ANSYS	利用采油系统数字孪生模型，辅助其采油策略的制定。
	环境保护 ^[38]	污水处理单元	GE Predix	构建涵盖微生物、化学等属性的孪生模型，实现可视化及污水处理预测。
工厂/城市级	汽车行业 ^[39]	汽车试验场地	IDIADA	构建了数字化试验场，可模拟各种真实汽车行驶场景。
	建筑建设 ^[40]	京雄高铁	自研平台	为自研平台植入 BIM 技术，并完成铁路的数字化场景设计与交付。
	城市管理 ^[41]	新加坡	3DEXPERIENCE	构建了城市的动态三维实景模型，辅助新加坡城市的规划与决策。

表 2 数字孪生框架与实现方法代表性研究成果

Table 2 Representational research results of digital twin framework and implementation approach

类型	应用领域	所属机构	成果	评述
通用		北京航空航天大学 ^[42]	提出由物理实体、虚拟实体、连接、数据、服务组成的数字孪生五维模型。	给出了各行业数字孪生通用的构成框架。
		美国工业互联网联盟 ^[5]	提出数字孪生在工业应用的框架。	明确了数字孪生在工业应用中需要的数据、模型以及可提供的服务。
构成框架	性能分析	中国电子技术标准化研究院 ^[6]	提出由基础支撑层、数据互动层、模型构建层、仿真分析层、功能层组成的数字孪生架构	基于装备的设计、运行等数据, 开展计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)等仿真, 用于装备设计、运维阶段的性能分析。
	生产制造	北京航空航天大学 ^[44]	提出了包含生产要素建模、生产过程动态建模、生产系统仿真建模的数字孪生架构。	基于产线、车间数据, 开展基于 Modelica 的多领域仿真及可视化仿真, 用于生产过程优化与监控。
	场景可视	中国信息通信研究院 ^[8]	提出了由模型数据采集、模型平台构建、数据呈现与渲染的三层架构。	基于倾斜摄影、激光点云等数据, 开展三维实景仿真与渲染, 用于三维实景可视化。
数据交互		斯泰伦博斯大学 ^[47]	提出了包含传感层、控制层、本地数据层、网关层、基于云的数据库、仿真模型层的数字孪生数据交换方法。	解决物理实体和数字孪生模型间的信息交互问题。
		中国石油大学 ^[48]	建立包含初始建模、定义更新参数、基于优化算法完成数字孪生模型更新的方法。	解决数字孪生模型的参数更新问题。
特性实现	模型更新	天津大学 ^[49]	利用输入、输出参数对多物理场模型进行拟合, 实现多物理场数字孪生模型的实时计算。	解决多物理场数字孪生模型的实时求解问题。
	故障诊断	华南理工大学 ^[50]	结合深度迁移学习提出了在故障诊断领域应用数字孪生的方法。	基于数字孪生模型扩充物理实体的故障诊断方法。
		比勒陀利亚大学 ^[51]	提出用正常样本训练得到深度数字孪生模型, 检测运行结果与正常状态的偏离情况。	解决少量故障样本难以满足诊断算法对样本量需求的问题。

五维模型如图 1 所示,完整的数字孪生由物理实体、虚拟实体、连接、数据、服务五部分构成。

数字孪生五维模型受到各行业的广泛认可与应用,中国电科院蒲天骄团队基于该框架,进一步针对能源互联网的实际需求提出了能源互联网数字孪生框架^[43]。

美国工业互联网联盟提出了数字孪生在工业应用的框架,并指出数字孪生在工业应用中需要获取的数据和构建的模型以及可开展的服务。

2) 性能分析类框架

中国电子技术标准化研究院提出用于开展性能分析的数字孪生框架如图 2 所示。基于数字孪生开展性能分析时,框架主要包括传感数据获取、数据互动、建模仿真、功能应用四部分。

图 2 框架中,基础支撑层包括装备设计数据、运行数据、工作环境数据;数据互动层完成数据的采集、传输、处理;模型构建层包括基于知识、工业机理、数据的建模方式;仿真分析层包括离散时间仿真及 CAE 仿真两大类;最终服务于装备研发与维护过程中的性能分析。

3) 生产制造类框架

陶飞团队及南京理工大学柳林燕团队均提出了车间数字孪生建模方法^[44-45],其核心如图 3 所示。

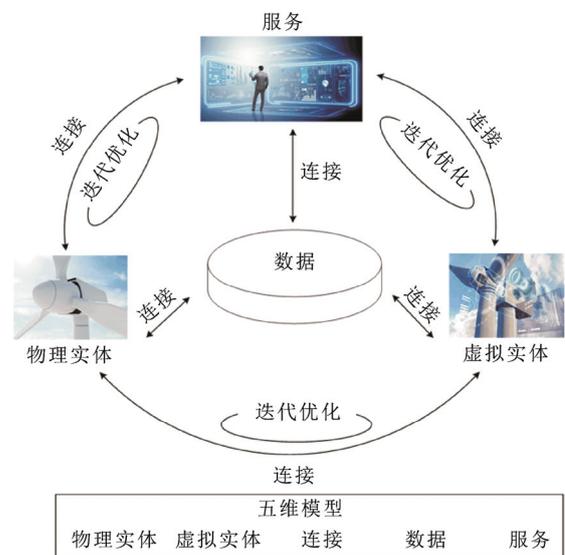


图 1 数字孪生的五维模型

Fig.1 Five dimensional model of digital twin

图 3 框架中,数据采集层对车间内的运动驱动数据、动作信号、状态数据、指令数据等进行全面采集;孪生模型构建层完成车间内的生产要素建模、生产过程建模、生产系统建模;功能实现层将物理空间的数据向数字空间进行映射实现数字空间与物理空间的同步运行。

基于数字孪生的生产制造领域,在毫秒级的数



图2 基于数字孪生的性能分析框架

Fig.2 Performance analysis framework based on digital twin

据采集方面，在物理车间建立统一架构(unified architecture, UA)服务器以获取产线及车间的各类数据，在数字空间通过现场控制系统的工业标准(OLE for process control, OPC)接口与 UA 服务器进行连接，可完成毫秒级的数据采集。车间建模、可视化及仿真方面，芬兰工业软件 Visual Components 可服务于数字模型构建及可视化，并驱动数据对设备、生产过程等进行多维实时映射，以实现车间的数字孪生^[45]。

4) 场景可视类框架

基于数字孪生开展场景可视化在数字孪生城市中应用较为成熟，可为装备领域提供借鉴。图 4 为中国信息通信研究院提出的用于场景可视的数字孪生框架。

图 4 框架中，基础层采集的数据类型包括：BIM 数据、倾斜摄影数据、激光点云数据、IoT 数据等。平台层对基础层获取的各类数据进行融合，构建出三维实景模型并进行单体化及语义化处理，形成目标对象的数字孪生模型。应用层包括各类静态、动态数据在模型上快速加载以及真实场景效果渲染与可视化最终还原出物理世界。

基于数字孪生的场景可视领域，实景建模厂商 Bentley 基于基础层获取的数据，在平台层利用 ContextCapture 软件对所有数据进行整合，快速形成对建模对象的三维实景表达，构建出基于场景的数字孪生模型。进一步利用 Context Capture Insight 对场景中的同类对象进行提取即单体化处理。在应用层基于 LumenRT 软件进行更直观的渲染及可视化^[46]。

2.1.2 数字孪生实现

1) 数据交互

文献[47]提出了用于物理实体和数字孪生模型间交互数据和信息的方法，如图 5 所示。

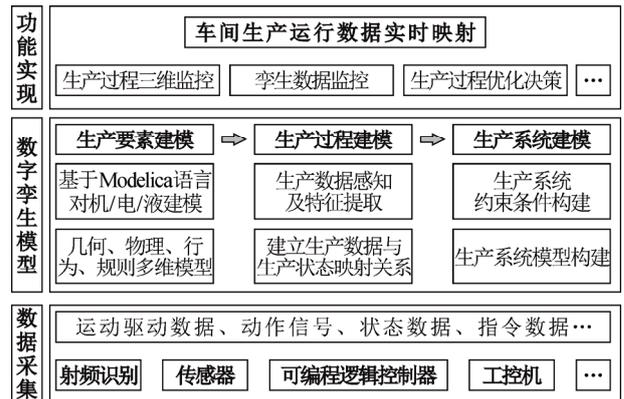


图3 基于数字孪生的生产制造框架

Fig.3 Manufacturing framework based on digital twin

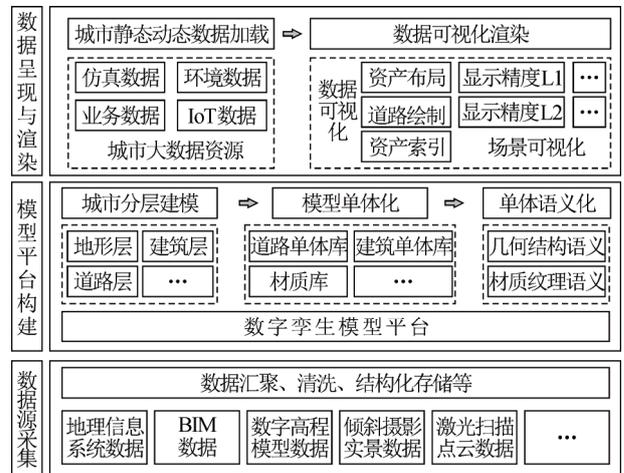


图4 基于数字孪生的场景可视框架

Fig.4 Scene visualization framework based on digital twin

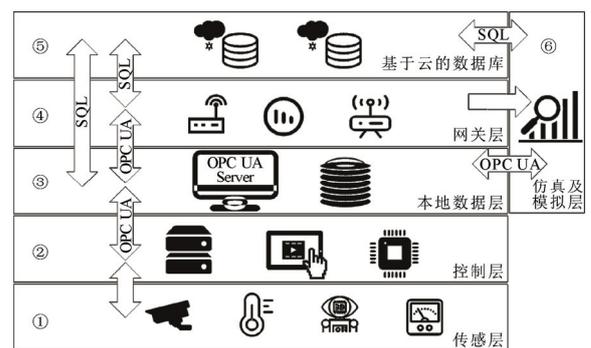


图5 数据交互实现方法

Fig.5 Implementation method of data interaction

图 5 中，第 1、2 层为完成传感与控制的物理层；第 3 层采用 OPC UA 服务器(如 Kepware 公司的 KERServerEX)作为物理空间与信息空间通信的工具；第 4 层使用 ClientAce OPC 客户端工具包开发 C#作为物联网网关；物联网网关通过使用

MySQL 通信协议连接到第 5 层的 SQL 数据库。第 6 层为仿真及模拟层, 既可从基于云的数据库检索数据又可从 OPC UA 服务器读取实时数据。

2) 模型更新

文献[48]提出了基于优化算法实现数字孪生模型更新的方法, 如图 6 所示。

该数字孪生模型更新方法核心在于将从物理和信息世界两个来源的输出数据进行比较, 基于粒子群算法以二者差距最小为目标函数, 以建模参数为寻优参数, 完成对数字孪生模型的更新。

针对多物理场数字孪生实施过程中场计算耗时过长导致多物理场数字孪生模型更新难度大的问题, 文献[49]提出了基于神经网络利用输入、输出参数对多物理场模型进行拟合, 为多物理场数字孪生模型的快速计算与实时更新问题提供了解决思路。

3) 故障诊断

为实现装备状态评估与故障诊断领域的数字孪生, 文献[50]提出了联合数字孪生与深度迁移学习的故障诊断方法, 如图 7 所示。

在孪生模型中考虑各种故障后训练得到诊断模型, 利用深度转移学习将训练好的诊断模型从虚拟空间迁移到物理空间服务于评估和预测维护, 并基于数字孪生模型扩充了物理实体的故障诊断方法。文献[51]提出了“Deep Digital Twin”解决了故障数据样本量少导致传统基于深度学习的健康管理方法精度不高的问题, 其构建的数字孪生模型是基于健康数据来建立的, 可以检测出运行是否偏离正常以及对偏离的模式进行分类来确定故障类型。

2.2 数字孪生在装备全寿命周期的应用

数字孪生可服务装备的设计、制造、运维的全寿命周期过程。数字孪生在装备寿命周期各阶段的典型应用情况如表 3 所示。

SIEMENS 应用数字孪生技术基于 AWS 云平台

打造了 Sensformer 数字化变压器。Sensformer 状态采集更为全面, 其运行数据被进一步传输到基于云的计算服务平台。基于数字孪生模型, 用户可实时掌握可视化变压器运行状态, SIEMENS 可以高效地收集变压器在不同运行地区及不同工况下运行的海量数据。

PTC 联合 ANSYS 建立了水泵的数字孪生体, 展示了如何利用数字孪生开展故障诊断与预测性维护工作。水泵的运行数据以 20 kHz 的频率被采样, 并发送到 PTC 的 Thingworx 物联网平台, 在平台上开展初步的数据处理与分析后将数据发送到

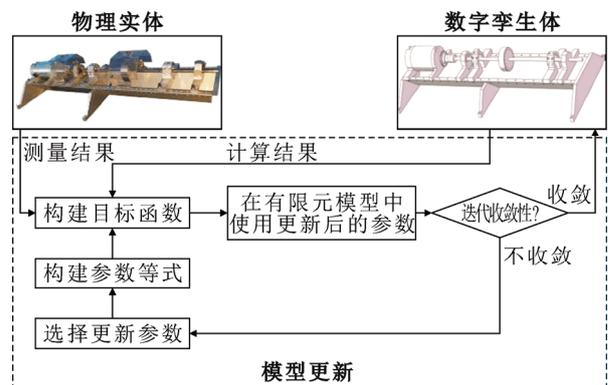


图 6 数字孪生模型更新方法

Fig.6 Updating method of digital twin model

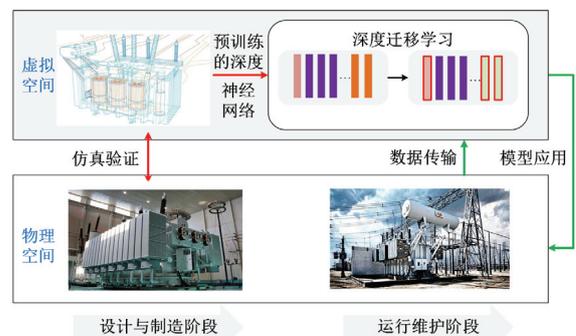


图 7 基于深度迁移学习的数字孪生

Fig.7 Digital twin based on deep transfer learning

表 3 数字孪生在装备全寿命周期的典型应用

Table 3 Typical application of digital twin in equipment life cycle

机构	应用情况	应用场景	应用阶段
武汉科技大学 ^[52]	基于数字孪生实现了装备设计阶段材料的优化选择。	方案迭代优化	设计阶段
SIEMENS ^[53]	电力装备制造企业可以获得变压器的海量运行数据。	提供完备的参考数据	
坎帕尼亚大学 ^[54]	使用数字孪生实现装配线在投运前进行虚拟测试。	虚拟评估与测试	
奥克兰大学 ^[55]	结合数字孪生与增强现实, 实现对机床制造过程的监控。	制造过程实时监控	制造阶段
北京科技大学 ^[56]	利用数字孪生模型基于钢水中碳含量的预测值控制终吹点, 降低成本。	制造过程控制和优化	运维阶段
亚琛工业大学 ^[57]	利用物联网、数字孪生、机器学习算法构建了电池的状态监测系统。	状态监测及故障诊断	
ANSYS、PTC ^[58]	联合 PTC Thingworx 和 ANSYS 构建了泵的数字孪生, 完成预测性维护。	预测性维护及剩余寿命估计	

ANSYS 仿真平台,开展水泵的各项多物理场实时仿真工作,最后将 ANSYS 的实时仿真结果输出至 Thingworx 平台上开展故障诊断与预测性维护工作。此外,用户还可以基于 Thingworx 平台结合平板电脑、VR 眼镜等将泵的运行信息及仿真结果叠加到泵的图像上,加强可视化。

2.3 数字孪生厂商及平台现状

目前各企业纷纷推出各自的数字孪生平台及解决方案。主流厂商包括: ANSYS、ALTAIR、ABB、Maplesoft、SIEMENS、Unity、Dassault、Bentley 等,其平台特点及适用场景如表 4 所示。

1) ANSYS-Twin Builder

建模阶段,基于模型降阶技术得到可实时计算的装备多物理场降阶模型;支持 VHDL-AMS、Modelica 等语言构建复杂电路及多领域物理系统模型。部署阶段,孪生模型可部署至 IoT 平台及边缘设备。

适用场景:用于构建装备的多物理场数字孪生模型,并联合 IoT 平台驱动及可视化实时仿真结果,从多物理场维度开展装备状态监测与性能分析工作。

2) Altair-Altair

平台同时支持模型驱动与数据驱动,集成众多功能模块支持 CAE 仿真、模型降阶、机器学习、数据分析、物联网、FMU 接口功能。

适用场景:用于以模块化的形式构建装备的数字孪生模型并以实时参数的形式展示仿真结果。对 IoT 数据及孪生模型运行数据开展分析,服务于装备的设计优化及预测性维护。

3) ABB-PickMaster Twin

基于该软件可以在虚拟环境中对机器人进行安装、模拟和测试,无需真实产线建成就可以在平台的虚拟线上对机器人配置进行测试。此外,进一步基于 ABB Ability Zenon 可将产线和机器人的工

作过程及数据可视化。

适用场景:用于构建数字孪生模型开展生产机器人操作及产线在投运前的虚拟调试,减少其调试和转换时间并实现生产过程的可视化。

4) Maplesoft-MapleSim

平台可基于 Modelica 语言及 CAD 模型导入创建部件或产线的多领域系统数字孪生模型,通过连接 PLC 指令完成其投运前的虚拟调试,调试不涉及有限元计算,只涉及位移、角度等的计算。

适用场景:用于构建部件或产线的数字孪生模型,开展运动学、动力学等仿真及参数优化,服务于部件的选型及产线的虚拟调试。

5) SIEMENS-PlantSight

SIEMENS 基于其 IoT 平台 Mindsphere 与 Bentley 的三维实景建模技术联合开发,其将工厂全部信息(数据、文件、图纸等)在 IoT 平台上汇总,通过进一步与所建立的工厂及设备实景模型进行融合,最终可形成一个完整工厂的数字孪生。

适用场景:构建物理工厂的数字孪生模型,反映物理工厂在整个寿命周期内的变化,并使用户能够实时访问到工厂的设备状态与运营信息。

6) Unity-Unity Pro

Unity 基于核心平台 Unity Pro 及一系列附带工业软件共同实现数字孪生。该平台在建模方面支持几何建模及导入、材质属性、实时渲染等;在行为描述方面支持精确物理模拟、控制逻辑等;在交互方面支持控制器接口、VR/AR、人机界面等。

适用场景:构建数字孪生模型用于对实时渲染及交互有较高需求的情况,应用在智慧城市、产品仿真模拟、销售演示及培训维护等场景。

7) Dassault-3DEXPERIENCE

平台采用完全基于云的架构,把其旗下各类软件工具均集成到同一平台,实现了产品协同设计、

表 4 常用的数字孪生平台对比

Table 4 Comparison of commonly used digital twin platforms

平台	特点	适用场景	应用层级
Twin Builder	支持多种多物理场模型降阶方法及建模语言。	实现装备的多物理场数字孪生	装备/部件
Altair	融合了设计仿真、物联网、数据分析功能。	在实现装备级孪生的同时对数据分析有较高需求的情况	装备/部件
PickMaster Twin	内置数字孪生,支持虚拟调试。	在虚拟产线上对机器人配置进行测试	产线
MapleSim	仿真只涉及位移、角度等的计算。	产线投运前的虚拟调试及产线运行数据的监测	部件/产线
PlantSight	实现工厂全部建设、运营信息与数字化模型的融合。	构建数字化工厂了解工厂运营状况和工厂装备健康状态	工厂
Unity Pro	涉及建模、行为描述、人机交互全流程。	对实时渲染要求较高的情况	装备、工厂、城市
3DEXPERIENCE	将达索旗下所有工具集成到平台	对装备自身及装备运行环境都有孪生需求的情况	装备、工厂、城市
iTwin	可提供三维实景建模的一体化解决方案	基于三维实景模型开展数字孪生的情况	装备、工厂、城市

仿真、数据管理等的全周期服务。3DEXPERIENCE 可实现数字世界中装备及其运行环境与物理世界中的高度统一。

适用场景: 构建装备及其运行环境的数字孪生模型, 用于对装备自身及其运行环境均有较高孪生需求的场景; 对协同设计以及数字化交付有需求的场景。

8) Bentley-iTwin

Bentley 的 iTwin 集成了数据管理平台 Orbit、三维实景建模工具 ContextCapture、可视化工具 LumenRT、可集成地理信息系统(geographic information system, GIS)数据及激光点云等数据并进行设计方案优化的 OpenCities Planner 等工具。

适用场景: 用于基于三维实景建模技术构建装备、工厂到城市级别的数字孪生模型且只涉及可视化仿真的场景。

3 电力装备数字孪生关键技术

电力装备数字孪生技术架构如图 8 所示。

1) 基础支撑层: 依托电力物联网边缘层的感知装置、传感网络、电力物联网网关等提供电力装备数字孪生实现所需数据源, 包括基于三维实景采集工具与技术获取的电力装备实景数据; 基于传感与巡检装置获取的表征电力装备运行状态及运行环境的各类电气量、非电气量。

2) 数据互动层: 基于基础设施即服务(infrastructure as a service, IaaS)层提供的云基础设施, 通过平台即服务(platform as a service, PaaS)层的数据管理工具, 管理基础支撑层提供的数据及孪生模型产生的数据。

数据互动层具有对电力装备多类型数据和网

络通信方式的灵活接入能力; 对电力装备海量数据的高速传输、存储、处理及分析能力。

3) 建模仿真层: 依托 PaaS 层提供的建模组件、开发工具实现数字孪生建模、仿真及可视化。

模型驱动方面涉及电力装备的实景化建模与可视化仿真、电力装备的多物理场建模与实时仿真; 数据驱动方面涉及基于电力装备全寿命周期数据的建模与分析。

4) 功能应用层: 依托在软件即服务(software as a service, SaaS)层的数字孪生软件平台, 落地数字孪生技术在电力装备全寿命周期的应用。

软件的形成依赖于 IoT 平台, 可服务于设计制造阶段的复杂电力装备的协同设计、制造管控、数字化交付; 运维阶段的高价值电力装备深度状态监测与预测性维护。

3.1 基础支撑层关键技术

基础支撑层需要对电力装备的三维实景建模数据与状态数据开展更为全面的获取与感知。

3.1.1 三维实景建模数据获取技术

开展三维实景建模需要获取 BIM 数据^[59]及三维实景数据。获取实景数据的测绘方法包括倾斜摄影测量技术^[60]、三维激光扫描技术^[61]、基于即时定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)的移动测量技术等^[62]。

1) 建筑信息模型(BIM)技术

原理: 将建筑工程所有信息包括几何信息、构件信息、过程信息等全部综合到一个模型。

特点: 建模精度分 LOD100—LOD500 五个等级, 包含完整的建筑空间信息和语义信息, 可视化强, 但数据量大且可视化预处理时间长。

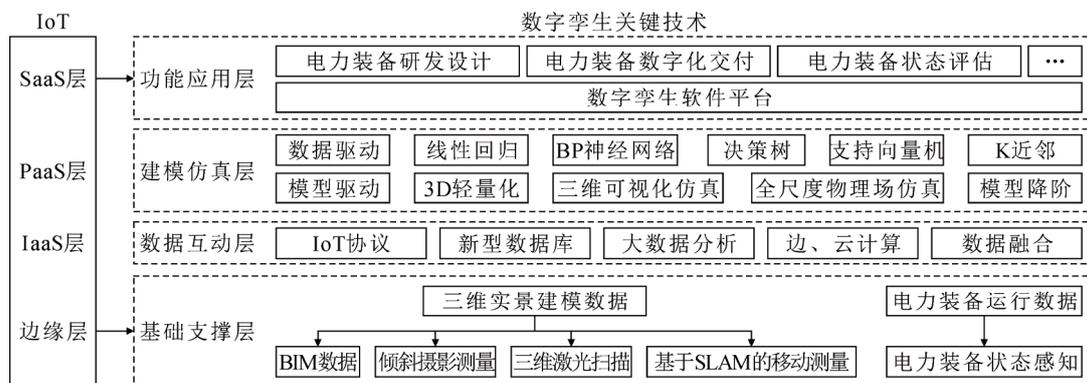


图 8 电力装备数字孪生技术架构

Fig.8 Digital twin technology architecture for electric equipment

适用场景：对建筑、装备级别的复杂结构三维建模。

2) 倾斜摄影测量技术

原理：利用搭载在无人机上的多台相机从多角度进行摄像。

特点：能够高分辨率的获取具有真实纹理的三维场景数据且极大地降低了获取实景数据的时间成本。采用可见光进行测量，对天气要求较高，对有遮挡及细小物体的建模能力不足。

适用场景：适合大范围三维建模以及对细节精度要求稍低的三维场景。

3) 三维激光扫描技术

原理：基于高速激光扫描测量方法和激光测距原理，通过激光扫描获取建模对象的点云数据，建立三维模型。

特点：测量速度和精度高，最高速度达到 120 万点/s、精度优于 1 mm，但不能获取被测物体的颜色纹理。

适用场景：适用于对测量精度要求很高的测量及建模场景。

4) 基于 SLAM 的移动测量技术

原理：在 SLAM 设备上同步安装影像相机和激光扫描仪，同时获取三维激光点云数据和高分辨率影像数据。

特点：可以通过点云和影像的融合自动构建实景三维可视化模型，与静态站式三维激光扫描仪相比，扫描效率提高 30 倍以上。

适用场景：构建包含真实视觉体验和完整空间结构的三维实景模型。

各项实景数据获取技术也在融合使用，如某设计研究院基于 Bentley 产品，采用了三维实景数据

加 BIM 模型的三维实景建模方式，完成了高速公路工程规划^[46]。文献^[62]结合无人机倾斜摄影与基于 SLAM 的移动测量技术建立了某变电站的实景三维模型，并基于 Web 图形库(Web graphics library, WebGL)技术开发了以三维实景为基础的变电站教学培训与设备管理平台。

3.1.2 状态数据感知技术

表 5 给出目前常用的电力装备状态感知技术，包括：电气量感知技术、声振感知技术、光电感知技术、化学感知技术、热学感知技术。

基于各种新型功能材料和先进传感机理等的新型传感技术是未来行业趋势，目前新型传感技术包括：磁阻电流传感技术、液态金属传感技术、光声光谱传感技术、分布式光纤传感技术、法拉第磁光传感技术等^[64]。

现阶段对于电力装备运行数据采集的广度、深度难以支撑起数字孪生对海量运行数据的需求。以换流变为例，其监测量包括：顶层油温、绕组温度、油位、油压、铁芯和夹件接地电流等，对其内部监测存在盲区。另一方面，输变电领域状态量采样周期多为数 10 min^[64]，而数字孪生较为理想的数据采样周期在秒级。

3.2 数据互动层关键技术

数据互动层涉及到数据传输、数据存储、数据处理、数据融合等各项关键技术。

1) 数据传输

数据传输方式有多种^[65-67]，电力装备数字孪生对于数据传输需要更大的带宽和更低的时延，5G 的低延时、大带宽、低功耗等特点，可以很好的满足数字孪生对数据传输的需求。

通信协议方面，几大 IoT 通信协议的特点及适

表 5 电力装备状态感知技术^[63]

Table 5 State sensing technology for electric equipment

状态感知技术	感知量	特点
电气量感知技术	容性设备相对介损及电容量	用相对介损反映套管等电容性设备的状态，绝对介损在 0.001~0.01 rad 之间。
	避雷器泄露电流	使用谐波法等对电流进行分析，感知避雷器内部受潮、阀片劣化等情况。
	变压器铁芯接地电流	电流值一般不大于 0.1 A，监测装置量程 10 mA~5 A，精度为 1%。
声振感知技术	高频局部放电	通过带宽为 3~30 MHz 的高频电流传感器监测设备接地引下线上的放电脉冲电流信号。
	局部放电超声波	利用压电效应监测设备内部局放产生的 20~200 kHz 声信号，对局放定位精度在 10 cm。
光电感知技术	振动声纹	采用加速度传感采集变压器等的振动信号用于故障诊断，频率响应范围 20 Hz~1 MHz。
	红外成像	利用红外热成像仪获取设备表面温度，精度±1 °C，直接或结合人工智能算法分析设备状态。
化学感知技术	紫外成像	利用紫外成像仪进行设备电晕及表面放电检测。
	油中溶解气体	检测方法有气相色谱、光声光谱、红外光谱、拉曼光谱、阵列气敏传感器等。
热学感知技术	SF ₆ 气体状态	通过检测设备 SF ₆ 气体湿度、分解参数、泄漏情况等来反映设备状态。
	温度信号	小型芯片温度传感技术、光纤测温技术等应用前景较广。

用范围如表 6 所示。高级消息队列协议(advanced message queuing protocol, AMQP)、表述性状态传递/超文本传输协议(representational state transfer/hyper text transfer protocol, REST/HTTP)工作在以太网, 受限应用协议(constrained application protocol, COAP)适用于资源受限的设备及无线传感网络, 面向实时系统的数据分布服务(data distribution service for real-time systems, DDS)协议和消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)协议的兼容强。在电力装备数字孪生领域, 对于数据传输过程中强调可靠性与实时性的数据可以使用 DDS 协议; 对于数据传输过程存在资源受限的物联网设备及低带宽、不可靠网络的场景, 可以使用 COAP 协议和 MQTT 协议来完成。各种移动式采集设备的数据可以使用 AMQP 协议将其传输到云端进行分析。可扩展通讯和表示协议(extensible messaging and presence protocol, XMPP)通过 TCP 传输与及时通信相关的指令, 适合一些操作指令的下达; 最后如果想把相关数据发布到互联网上被分析和调用, 可以使用 REST/HTTP 协议开放 API 服务来完成。

2) 数据存储

孪生数据的存储与读取需要借助数据库, 数据库分为关系型数据库和非关系型数据库。关系型数据库是以二维表存储数据及其之间关系的数据存储系统。非关系型数据库是非关系型、分布式、不保证遵循原子性、数据一致性、数据隔离和持久性即 ACID 原则的数据存储系统。

表 7 给出了数据库产品分类。数字孪生产生的数据量和异构性不断增加, 传统的关系型数据库技术不再可行, 非关系型数据库正倍受关注。

3) 数据处理

数据处理相关技术包括数据清洗、数据集成、数据规约、数据变换、数据离散化等^[69]。对缺失数据进行填充时, 相关技术包括^[13]: 主成分分析、多维插值技术、限制玻尔兹曼机、生成对抗网络, 最终提高数据质量并进行压缩。

云计算引入效用模型来远程供给可扩展和可测量的资源^[70], 为数字孪生所需的大数据提供了可靠的分析能力。云计算厂商方面亚马逊 AWS 云和微软 Azure 云以及国内华为云、阿里云、腾讯云等受到越来越多企业的青睐。边缘计算在网络边缘侧就近处理采集到的数据, 而不需要将大量数据上传

表 6 主流 IoT 协议对比

Table 6 Comparison of mainstream IoT protocols

协议名称	特点	适用范围
消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT) 协议	使用基于代理的发布/订阅消息模式, 实时性在秒级。	在低带宽、不可靠的网络下提供基于云平台的远程设备的数据传输和监控。
受限应用协议 (constrained application protocol, COAP)	非常的小巧, 最小的数据包仅为 4 字节。	使用在资源受限的物联网设备上。
面向实时系统的数据分布服务 (data distribution service for real-time systems, DDS) 协议	高可靠性、实时传输。	工作在有线网络, 广泛用于国防、民航、工业控制等领域。
高级消息队列协议(advanced message queuing protocol, AMQP)	是一个网络协议, 描述在网络上传输的数据的格式, 可靠性强、安全。	适用于移动设备与后台数据中心的通信和分析。
可扩展通讯和表示协议(extensible messaging and presence protocol, XMPP)	即时通信、客户端-服务器-客户端的通信模式、分布式网络、简单的客户端、XML 的数据格式。	用在即时通信的应用程序等。
表述性状态传递/超文本传输协议 (representational state transfer/hyper text transfer protocol, REST/HTTP)	简化互联网中的系统架构, 快速实现客户端和服务端之间交互的松耦合, 降低了客户端和服务端之间的交互延迟。	适合在物联网的应用层面, 通过 REST 开放物联网中资源, 实现服务被其他应用所调用。

表 7 数据库产品分类^[68]

Table 7 Database product classification

数据库类型	优缺点	主流代表
关系型	优点: SQL 语言通用, 使用方便, 可用于复杂查询; 缺点: 读写性能较差, 尤其是海量数据的高效率读取。	Oracle, Microsoft SQL Server, MySQL, PostgreSQL, DB2, Microsoft Access 等。
非关系型	优点: 存储格式灵活, 可以是 key value、文档、图片形式等。 缺点: 不适合存储及查询较为复杂的数据及持久存储海量数据。	文档型数据库: CouchDB、MongoDb; Key-value 型数据库: Redis、Voldemort、Oracle BDB; 列式数据库: Cassandra、Hbase、Riak; 图形数据库: Neo4J、InfoGrid、Infinite、Graph。

到云端的平台进行处理, 解决了数字孪生实现过程中数据量和时延的问题^[71-72], 边缘计算和云计算相互配合能够高效的完成电力装备数字孪生中的数据

处理任务。

4) 数据融合

多信息融合技术可以对多传感数据以及孪生数据进行优化组合以产生更多有用的信息。常用的信息融合方法主要有以下几种^[73-74]：

(1) 贝叶斯公式及卡尔曼滤波器：在信号级的融合中普遍应用，缺点是需要已知数据的先验概率及精确的数学模型。

(2) 证据理论：是一种决策理论，不但能够处理不确定信息，而且能够处理不知道的信息，是决策级融合中一个广泛应用的理论。

(3) 模糊集理论：用于对模糊的、自然语言的表达和描述进行操作和利用，在信息融合领域，主要用于与特征联系起来，进行特征的融合与判断。

(4) 神经网络：通过学习和训练可以有效地逼近输入、输出的未知关系。

(5) 小波分析：在时间域-频域充分检测信息的基本特征，用于研究多分辨率信息的融合。

3.3 建模仿真层关键技术

构建数字孪生模型的方法有基于模型驱动和基于数据驱动两类。两种建模方法各有利弊和适用场景，共同服务于数字孪生模型的构建。

3.3.1 基于模型驱动的数字孪生模型构建

模型驱动建模方法可从物理机理和过程上反映物理实体。实现流程是：首先构建装备的三维几何模型结合实景数据实现出实景化的数字孪生模型。涉及的关键技术包括：模型轻量化技术和三维可视化仿真技术。另一方面，需要融合实体的物理参数，以及对物理实体的行为与规则^[75]进行表征，实现装备的全尺度多物理场数字孪生模型，涉及到的关键技术包括：全尺度多物理场仿真及基于模型降阶的多物理场实时计算技术。

1) 模型轻量化技术和三维可视化仿真技术

三维模型要在数字孪生系统中流畅运行，需要借助 3D 轻量化技术，该技术能够在保留完整三维模型基本信息且保证精确度的前提下，将原始的三维模型进行最高上百倍的压缩，实现模型的流畅操作^[76]。软件 EV3Dvue 在轻量化技术、接收实时数据基于 Web 的动态可视化方面较成熟^[77]。目前三维可视化仿真采用三维图像、三维声响、人机交互界面等使仿真人员有更加直观的逼真体验。常用的有基于 OpenGL、DirectX、VR-Platform、OSG、Web 等的可视化仿真^[78]。

2) 全尺度多物理场仿真及模型降阶技术

模型驱动的数字孪生分为面向场景的数字孪生和面向性能分析的数字孪生，后者需要重点进行仿真分析，尤其会涉及全尺度的多物理场仿真。通常三维模型的多物理场仿真时长为分钟到小时级别，这一特征与数字孪生实时性的要求形成了明显冲突，因此需要引入模型降阶技术来解决该问题^[79]，牺牲可接受范围内的精度以获得计算时间的显著提高。目前模型降阶技术被广泛应用于各类偏微分方程的数值求解过程，如：流体模型、电磁场模型等^[80]。已有汽车发动机外部冷却空气流场仿真案例^[81]，基于模型降阶方法实现了计算性能由 16 核工作站计算 2 h 提高到笔记本电脑计算 3 s，且最大计算偏差为 1.2%，由此可见，模型降阶技术在满足数字孪生时效性要求的过程中可发挥重要作用。现有的模型降阶方法主要可分为以下三类，见图 9。

简化模型法是在对所研究问题的物理和数学本质有充分认知的基础上开展的，在有限元计算中对数值模拟方程进行近似、忽略模型的非线性项、网格剖分粗化等。投影法基于数学推导，该类方法一般是选取合适的基进行截断后形成低阶子空间，再将原问题投影到子空间实现降阶，常用的方法有特征正交分解方法(proper orthogonal decomposition, POD)，如文献^[83]利用 POD 方法完成了对换流变压器极性反转电场的降阶计算。数据拟合方法是在拥有物理模型大量输入与输出数据的基础上，建立黑箱模型对原物理模型进行拟合。常见的有响应面、高斯回归、支持向量回归、神经网络等。响应面方法需要先建立复杂的高精度仿真模型并进行大量计算以产生数据，然后根据这些数据对之前的高精度复杂模型进行拟合，并利用拟合所得的模型替代原有高精度复杂模型完成降阶。

3.3.2 基于数据驱动的数字孪生模型构建

数据驱动可以绕过复杂的物理建模过程并利用输入输出数据很好地描述物理过程。实现流程为：

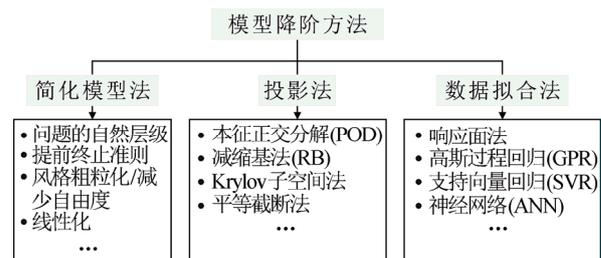


图 9 常用的模型降阶方法^[82]

Fig.9 Common model order reduction methods

结合电力装备的监测数据、试验数据等, 利用机器学习方法构造出输入数据与输出数据之间的数据模型, 实现电力装备运行的物理现象和机理用数据模型来表征, 完成对装备的孪生。

机器学习中的有监督学习可以在数据驱动建模中发挥重要作用^[15]。有监督学习是基于系统已有的输入输出进行训练得到一个最优模型, 拟合系统的工作过程, 再将新的输入利用这个模型映射出相应的输出。常见的有监督算法有: 线性回归算法、BP神经网络算法、决策树、支持向量机、K近邻算法等。基于数据驱动的建模方法中, 神经网络能够在大数据量的情况下很好地拟合高复杂性和非线性的输入输出关系。支持向量机能够在有限的样本容量下很好地实现模型复杂性和泛化之间的折中。数据驱动建模的优点是: 随着输入的数据或经验越来越多, 模型会不断改进与完善。数据驱动建模的训练部分可能会遇到与不稳定性相关的问题, 然而一旦完成训练, 这些模型在进行使用时是稳定的。另一方面, 基于数据驱动的建模的缺点为其固有的分析精度无法达到 100% 的问题。对比基于模型驱动的建模方法和基于数据驱动的建模方法如表 8 所示。

3.4 功能应用层关键技术

IoT 平台是数字孪生功能实现及落地应用的关键, 数字孪生功能应用的开展需要 IoT 平台作为载体。

IoT 平台包括边缘层、IaaS 层、PaaS 层、SaaS 层^[84]。边缘层完成从边缘设备如传感器、控制系统等的数据采集、传输和处理; IaaS 层提供基于云的网络、计算、存储等基础设施; PaaS 层涵盖了复杂的算法与建模工具, 如利用深度学习方法进行数据挖掘和图像分析, 利用建模及仿真技术开展装备的性能仿真等; SaaS 层基将诸多研究成果以 APP 和工业软件的形式进行封装与固化。IoT 平台边缘层接入、存储及管理的海量工业数据为数字孪生提供了数据源; PaaS 层部署的建模类、仿真分析类、可视化展示类等工具组件, 为数字孪生建模仿真及可视化提供了实现工具; 进一步在 SaaS 层建设数字孪生软件平台, 服务于电力装备研发设计、数字化交付、状态评估等全生命周期过程。国际 IoT 平台方面^[85], 装备自动化企业, 如 GE、SIEMENS 等是其发展的有力推动者且拥有成熟的一体化解决方案, 这些方案包括: GE-Predix、SIEMENS-Mindsphere、PTC-Thingworx、Microsoft-Azure 等。PTC 的 Thing-

表 8 模型驱动与数据驱动对比^[13]

项目	基于模型驱动的建模	基于数据驱动的建模
模型理解	可以从物理机理和运行过程上进行理解	基于算法建立的是黑盒模型
可纳入数据	很难将历史数据纳入物理模型的仿真过程	可以将长期的历史数据和经验积累纳入考虑
模型稳定性	受初始条件与边界条件的影响, 仿真易出现不收敛的情况。	模型训练完成后就可以非常稳定不受影响的使用
误差和不确定性限制	误差和不确定性可以被控制与限制	不能限制误差和不确定性
受偏置影响	所建立的模型不容易受到数据偏置的影响	数据偏置情况会直接影响到所建立的模型
推广应用	可以很好的推广到具有类似物理本质的问题	对未学习的样本适用性很差

worx 平台联合 Kepware 公司的 Kepware OPC Server 可完成工业协议转换和数据采集, 实现各类第三方工业设备的快速方便接入。国产的 IoT 平台^[86]同样性能优异, 包括: 华为云、阿里云、浪潮-M81、东方国信-Cloudiip、树根互联、海尔-COSMOPlat 等。华为云开发者生态更为友好, 拥有丰富的开发工具和开发接口, 可为数字孪生平台开发提供支撑。

4 电力装备数字孪生实现

数字孪生可服务于复杂电力装备的协同设计与数字化交付、高价值电力装备的预测性维护, 具有广阔的研究与应用价值。同时实现电力装备数字孪生也面临着诸多挑战, 亟需开展研究。

4.1 变压器数字孪生实现方法

感知变压器铁芯和绕组实时温度并了解其温度最高点位置对于其安全运行非常重要, 光纤测温无法在布置前预先了解温度最高点位置, 测红外及测油温等方式则实时性较差。针对该问题, 本文提出了基于 Microsoft Azure IoT 及 ANSYS Twin Builder 的变压器多物理场数字孪生实现方法, 利用孪生体的实时仿真结果, 可了解变压器铁芯和绕组实时的温度场分布。

图 10 为本文所提出基于 IoT 平台的电力装备多物理场数字孪生实现框架, 实现过程分三个阶段, 包括: 监测数据上云、多物理场仿真平台建立孪生模型并部署至 IoT 平台、在 IoT 平台将监测数据与孪生模型集成以实现数字孪生。

阶段 1: 基于 Azure IoT 平台将数据上云。

该阶段完成将各类监测数据及非结构化数据上云, 为实现电力装备数字孪生提供数据源。



图 10 电力装备多物理场数字孪生实现框架

Fig.10 Implementation framework of multiphysics digital twin for electric equipment

针对监测装置数据传输协议各异，以直连或通过网关转换为 MQTT 等协议后将监测数据发送到 Azure 的 IoT Hub。对于非结构化数据，如红外图谱及各类文档等，通过 SDK 将文件上传到 Azure 的 IoT Hub。并进一步在 Azure 上进行部署，开展数据的存储、融合、分析、可视化等工作。

阶段 2：基于 Twin Builder 构建数字孪生模型。

该阶段在 Twin Builder 上构建能够基于实时数据进行多物理场实时仿真的多物理场数字孪生模型，并将孪生模型以 Azure 支持的数字孪生建模语言形式的文件导出。

参考 ANSYS 案例^[87]给出了基于 Twin Builder 建立变压器多物理场数字孪生模型的实施过程如图 11 所示。

图 11 模型的输入为变压器高压侧电压、低压侧电流、环境温度、泵的流速，输出为铁芯和绕组实时温度场分布。所构建的数字孪生模型由基于响应面方法形成的变压器电磁部分降阶模型、铁芯及绕组的热容热阻 Modelica 模型、基于 POD 的变压器

流体部分降阶模型、变压器换热部分的 Modelica 模型共同组成。电磁计算部分的降阶模型基于电压、电流得到了变压器的损耗作为后续计算的热源。铁芯和绕组的 Modelica 模型基于该热源计算了由铁芯和绕组对绝缘油的传热情况。变压器换热部分的 Modelica 模型与变压器流体计算部分的降阶模型构成数据闭环，完成了对铁芯和绕组温度的计算。最终将变压器数字孪生模型以.twin 文件的形式导出并结合由 Twin Deployer 生成的 SDK 进一步部署至 Azure 平台。

阶段 3：Azure 上集成数据与孪生模型实现数字孪生。

该阶段基于 Azure 上的一系列部署完成数据与模型的集成，实现数据驱动数字孪生模型，进一步将得到的仿真结果由 Azure 进行调用及实时显示，最终实现数字孪生，其流程如图 12 所示。

4.2 面临挑战

电力装备领域实现与应用数字孪生面临着来自数据、模型、平台三个方面的挑战。

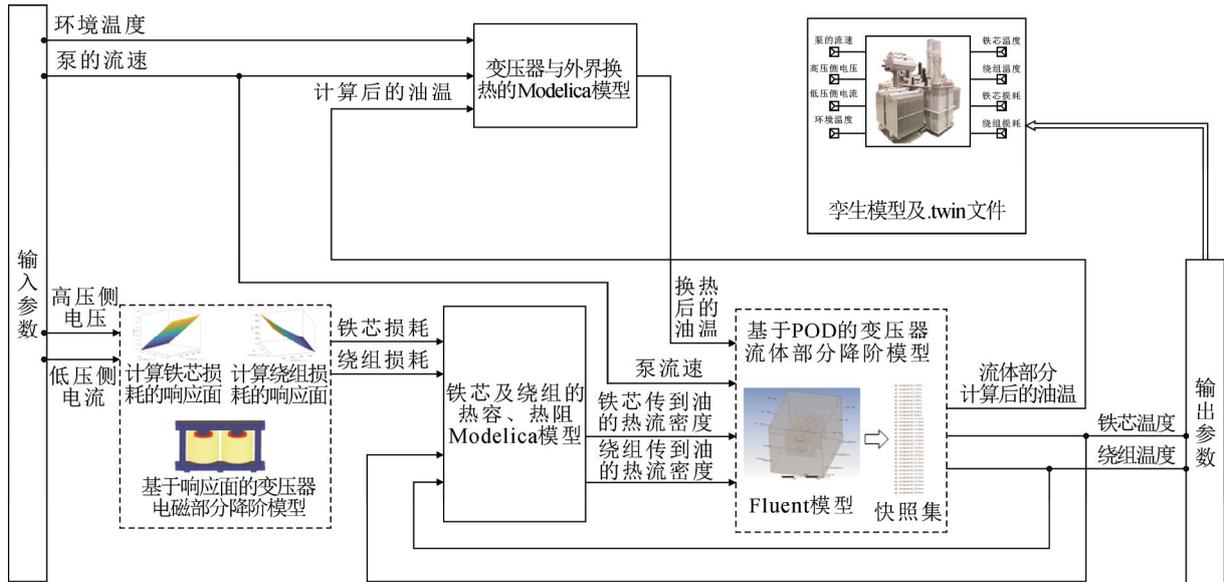


图 11 基于 Twin Builder 构建变压器多物理场数字孪生模型

Fig. 11 Building transformer multiphysics digital twin model based on Twin Builder

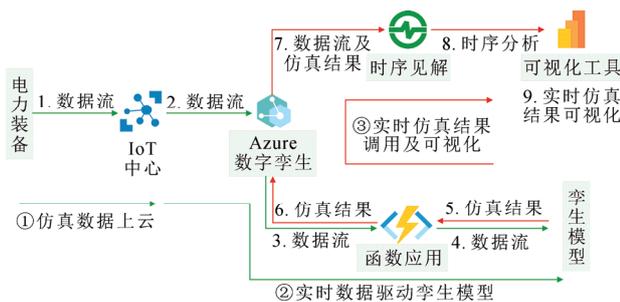


图 12 Azure 上数据与模型集成

Fig. 12 Data and model integration on Azure

1) 数据方面

在电力装备状态感知阶段, 当前的数据监测量不足以支撑起全尺度数字孪生模型的构建, 对装备内部状态监测存在“盲区”。简单增加传感装置将带来新的安全问题, 因此未来需要开展集成微纳、柔性、多元、感传一体等特性的传感器件研究, 实现对现有装备影响最小、测量参数最多、涵盖边缘计算功能, 并合理选择监测点构建出传感网络提升数据采集深度和广度, 且以标准化的协议与数据格式将数据发送到 IoT 平台。

2) 模型方面

在电力装备数字孪生模型构建阶段, 全尺度多物理场耦合模型的建立及实时求解是实现电力装备数字孪生的一大难点。需关注如何基于模型降阶方法解决电力装备多场耦合情况下的实时计算, 最终建立起服务于电力装备多物理场实时求解的算法。

3) 平台方面

国外为 CAE 企业与 IoT 平台企业联合打造数字孪生平台的发展模式, 实现从工业数据接入到装备全生命周期内的性能分析。我国目前拥有一批性能处于世界一流水平的 IoT 平台, 但是由于国产多物理场仿真平台与国外尚存差距, 导致现阶段服务装备性能分析的数字孪生平台被国外垄断。未来亟需开发出自主知识产权的服务于电力装备性能分析的数字孪生平台。

5 结论

1) 电力装备数字孪生关键技术中, 融合倾斜摄影技术与基于 SLAM 的移动测量或 BIM 模型、模型降阶技术、神经网络分别在构建三维实景模型、实现模型驱动中的多物理场实时计算、构建数据驱动模型方面具有重要价值。

2) 电力装备多物理场数字孪生实现过程为: 首先将电力装备的数据接入 IoT 平台, 实现数据上云; 其次建立电力装备的全尺度多物理场模型并利用模型降阶算法完成降阶; 最后将降阶后的模型部署至 IoT 平台, 利用监测数据驱动电力装备的数字孪生模型, 最终实现电力装备多物理场数字孪生。

3) 当前实现与应用电力装备数字孪生所面临的挑战在于: 集成微纳、柔性、多元、智能、感传一体等特性的传感装置开发及传感网络的构建; 电力装备全尺度多物理场模型的构建与实时求解; 国

产自主知识产权的多物理场数字孪生平台开发。

参考文献 References

- [1] 雷万云, 姚峻. 工业4.0概念技术及演进案例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 15-20.
LEI Wanyun, YAO Jun. Industry 4.0 concept technology and evolution case[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2019: 15-20.
- [2] Deloitte Insights. Tech trends 2020[EB/OL].[2020-07-19]. https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cz/Documents/technology/DI_TechTrends2020.pdf.
- [3] 安世亚太数字孪生体实验室. 数字孪生体技术白皮书[R/OL].[2020-06-01]. <https://www.vzkoo.com/doc/9482.html>.
Pera Global Digital Twin Lab. Digital twin technology white paper[R/OL].[2020-06-01]. <https://www.vzkoo.com/doc/9482.html>.
- [4] 中国电子信息产业发展研究院. 数字孪生白皮书[R/OL].[2020-06-01]. <https://www.innovation4.cn/library/r46064>.
China Center for Information Industry Development. Digital twin white paper[R/OL].[2020-06-01]. <https://www.innovation4.cn/library/r46064>.
- [5] Industrial Internet Consortium. Digital twins for industrial applications, definition, business values, design aspects, standards and use cases[R/OL].[2020-06-01]. https://www.researchgate.net/publication/339460951_Digital_Twins_for_Industrial_Applications_Definition_Business_Values_Design_Aspects_Standards_and_Use_Cases.
- [6] 中国电子技术标准化研究院, 树根互联技术有限公司. 数字孪生应用白皮书[R/OL].[2020-11-23]. <http://www.cesi.cn/202011/7002.html>.
China Electronics Standardization Institute, ROOTLOUD Technology Co., Ltd. White paper on digital twin application[R/OL].[2020-11-23]. <http://www.cesi.cn/202011/7002.html>.
- [7] GRIEVES M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[R/OL].[2020-06-01]. https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication.
- [8] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告[R/OL].[2020-06-01]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/t20181218_190859.htm.
China Academy of Information and Communications Technology. Digital twin cities research report[R/OL].[2020-06-01]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201812/t20181218_190859.htm.
- [9] KHALED N, PATTEL B, SIDDIQUI A. Digital twin development and deployment on the cloud: developing cloud-friendly dynamic models using Simulink®/SimScape™ and Amazon AWS[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2020.
- [10] TAO F, ZHANG M, NEE A Y C. Digital twin driven smart manufacturing[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019.
- [11] TARKHOV D, VASILYEV A N. Semi-empirical neural network modeling and digital twins development[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2019.
- [12] TAO F, LIU A, HU T L, et al. Digital twin driven smart design[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2020.
- [13] RASHEED A, SAN O, KVAMSDAL T. Digital twin: values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. IEEE Access, 2020, 8: 21980-22012.
- [14] ARMENDIA M, GHASSEMPOURI M, OZTURK E, et al. Twin-control: a digital twin approach to improve machine tools lifecycle[M]. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2019.
- [15] LIU M, FANG S, DONG H, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 58: 346-361.
- [16] 刘亚威. 美国洛马公司利用数字孪生提速 F-35 战斗机生产[EB/OL].[2019-06-01]. https://www.sohu.com/a/212980157_613206.
LIU Yawei. Lockheed Martin uses digital twin to speed up F-35 fighter production[EB/OL]. [2019-06-01]. https://www.sohu.com/a/212980157_613206.
- [17] 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 Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Ten questions towards digital twin: analysis and thinking[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(1): 1-17.
- [18] CHATHA A. Smart cities sparking innovation in digital twin visualization platforms[EB/OL].[2019-06-01]. <https://www.arcweb.com/blog/smart-cities-sparking-innovation-digital-twin-visualization-platforms>.
- [19] GE Renewable Energy. Digital wind farm-the next evolution of wind energy[EB/OL]. [2020-06-01]. <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-launches-next-evolution-wind-energy-making-renewables-more-efficient-economic>.
- [20] MENARD S. 3 ways digital twins are going to help improve oil and gas maintenance and operations[EB/OL].[2020-06-01]. <https://www.linkedin.com/pulse/3-ways-digital-twins-going-help-improve-oil-gas-sophie-menard>.
- [21] SCOLE S. A digital twin of your body could become a critical part of your health care[EB/OL].[2020-06-01]. <https://slate.com/technology/2016/02/dassaults-living-heart-project-and-the-future-of-digital-twins-in-health-care.html>.
- [22] SMOGELI O. Digital twins at work in maritime and energy[EB/OL].[2020-06-01]. https://www.dnv.com/Images/DNV%20GL%20Feature%20%2303%20ORIG2b_tcm8-85106.pdf
- [23] VERDOUW C N, KRUIZE J W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals[C]//7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture Digital. Hamilton, New Zealand: Precision Agriculture Association New Zealand, 2017: 1-5.
- [24] 唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 等. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 74-85.
TANG Wenhui, CHEN Xingyu, QIAN Tong, et al. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 74-85.
- [25] 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 Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy internet and its application[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13.
- [26] 周二专, 冯东蒙, 严剑峰, 等. 秒级响应电网在线分析软件平台[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3474-3480.
ZHOU Erzhuang, FENG Donghao, YAN Jianfeng, et al. A software platform for second-order responsiveness power grid online analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3474-3480.
- [27] 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 Xing, AI Qian, ZHU Tianyi, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [28] TAO F, ZHANG M, LIU Y, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. Cirp Annals, 2018,

- 67(1): 169-172.
- [29] BIGLARBEKIAN M. High frequency GaN power converters digital twin[D]. Charlotte, USA: The University of North Carolina, 2018.
- [30] 汤蓄. 一文领略国内首个电网设备数字孪生系统风采[EB/OL].[2020-12-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/GydpXfQm-QWp1s0oCoCXow>.
- TANG Lei. This paper introduces the first digital twin system of power grid equipment in China[EB/OL].[2020-12-01]. <https://mp.weixin.qq.com/s/GydpXfQm-QWp1s0oCoCXow>.
- [31] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. New York, USA: Springer, 2017: 85-113.
- [32] 数字孪生体实验室. 数字孪生系统的技术支撑体系及理论基础[EB/OL].[2021-01-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/HmOys2AdiZMGpN-7hFzQw>.
- Digital Twin Laboratory. The technical support system and theoretical basis of the digital twin system[EB/OL].[2021-01-19]. <https://mp.weixin.qq.com/s/HmOys2AdiZMGpN-7hFzQw>.
- [33] 阿里研究院. 从波音 777、飞豹到 Space X: 数字孪生的过去与未来[EB/OL].[2020-08-01]. https://www.sohu.com/a/408702226_384789?_trans_=000014_bdss_dkmgyhd.
- Ali Research. From Boeing 777, Flying Leopard to Space X: the past and future of digital twin[EB/OL].[2020-08-01]. https://www.sohu.com/a/408702226_384789?_trans_=000014_bdss_dkmgyhd.
- [34] 杨帆. 联合仿真在数字样机建设中的应用与数字孪生介绍[EB/OL].[2020-01-10]. <http://event.31huiyi.com/1727649807/index?c=simol>.
- YANG Fan. The application of co-simulation in the construction of digital prototypes and the introduction of digital twin [EB/OL].[2020-01-10]. <http://event.31huiyi.com/1727649807/index?c=simol>.
- [35] 中国航海学会. DNV GL 开发数字孪生技术监测船体状况[EB/OL].[2020-06-01]. http://www.eworldship.com/html/2018/classification_society_1212/145369.html.
- China Institute of Navigation. DNV GL develops digital twin technology to monitor hull conditions[EB/OL].[2020-06-01]. http://www.eworldship.com/html/2018/classification_society_1212/145369.html.
- [36] 阿里研究院. 数字孪生, 从细胞、心脏到新药研发[EB/OL].[2020-08-01]. https://www.sohu.com/a/405540203_100191018.
- Ali Research. Digital twin, from cells and heart to new drug development[EB/OL].[2020-08-01]. https://www.sohu.com/a/405540203_100191018.
- [37] 杨霞. 柔性电驱与数字孪生助力智能制造[EB/OL].[2020-08-01]. <http://article.cechina.cn/19/0125/11/20190125113234.htm>.
- YANG Xia. Flexible electric drive and digital twin help smart manufacturing[EB/OL].[2020-08-01]. <http://article.cechina.cn/19/0125/11/20190125113234.htm>.
- [38] 通用电气(中国)有限公司. 数字孪生模型优化水厂污水处理效率[EB/OL].[2020-06-01]. <http://www.iianews.com/tv/ca/detail.jsp?id=2961>.
- GE China. Digital twin model optimizes wastewater treatment efficiency in water plants[EB/OL].[2020-06-01]. <http://www.iianews.com/tv/ca/detail.jsp?id=2961>.
- [39] ApplusIDIADA. Applus+IDIADA 试验场的“数字孪生”-为自动驾驶车辆实地试验创造条件[EB/OL].[2020-06-01]. <https://www.auto-testing.net/news/show-97832.html>.
- ApplusIDIADA. The “digital twin” of Applus+IDIADA proving ground creating conditions for field trials of autonomous vehicles[EB/OL].[2020-06-01]. <https://www.auto-testing.net/news/show-97832.html>.
- [40] 中国铁路设计集团有限公司. 京雄城际铁路工程建设 BIM 技术应用汇报[EB/OL].[2020-11-03]. <http://www.chinarevit.com/revit-67741-1-1.html>.
- China Railway Design Group Co., Ltd. Report on the application of BIM technology in the construction of Beijing-Xiong Intercity Railway[EB/OL].[2020-11-03]. <http://www.chinarevit.com/revit-67741-1-1.html>.
- [41] 汤颖颖. 数字孪生技术的城市应用[EB/OL].[2020-12-01]. <http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=12966>.
- TANG Yingying. Application of digital twin technology in city [EB/OL].[2020-12-01]. <http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=12966>.
- [42] 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 Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1-18.
- [43] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2029.
- PU Tianjiao, CHEN Shen, ZHAO Qi, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [44] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 1-15.
- TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital modeling and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 1-15.
- [45] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1536-1545.
- LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Hui fen, et al. Construction and application of digital twin system for production process in workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1536-1545.
- [46] Bentley. 实景建模一体化解决方案——助力基础设施解决方案[EB/OL].[2020-12-02]. <https://v.qq.com/x/page/o32087rd3e4.html>.
- Bentley. Integrated solution for real-world modeling-assisting in-frastructure solutions[EB/OL].[2020-12-02]. <https://v.qq.com/x/page/o32087rd3e4.html>.
- [47] REDELINGHUYS A J H, BASSON A H, KRUGER K. A six-layer architecture for the digital twin: a manufacturing case study implementation[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 31(6): 1383-1402.
- [48] WANG J, YE L, GAO R X, et al. Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3920-3934.
- [49] WANG B, ZHANG G, WANG H, et al. Multi-physics-resolved digital twin of proton exchange membrane fuel cells with a data-driven surrogate model[J]. Energy and AI, 2020, 1: 1-31.
- [50] XU Y, SUN Y, LIU X, et al. A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning[J]. IEEE Access, 2019, 7: 19990-19999.
- [51] BOOYSE W, WILKE D N, HEYNS S. Deep digital twins for detection, diagnostics and prognostics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106612-106637.
- [52] XIANG F, ZHANG Z, ZUO Y, et al. Digital twin driven green material optimal-selection towards sustainable manufacturing[C]// 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Ljubljana, Slovenia: Procedia Cirp, 2019: 1290-1294.
- [53] SIEMENS. Sensformer®: born connected[EB/OL].[2020-06-01]. <https://www.siemens.com/press/en/2020/06/01/sensformer-born-connected>.

- //www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/transformers/sensformer.html.
- [54] CAPUTO F, GRECO A, FERA M, et al. Digital twins to enhance the integration of ergonomics in the workplace design[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2019, 71: 20-31.
- [55] ZHU Z, LIU C, XU X. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality[C]//52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Ljubljana, Slovenia: Procedia Cirp, 2019: 898-903.
- [56] 徐钢, 黎敏, 徐金梧, 等. 基于函数型数字孪生模型的转炉炼钢终点碳控制技术[J]. 工程科学学报, 2019, 41(4): 521-527.
- XU Gang, LI Min, XU Jinwu, et al. Control technology of end-point carbon in converter steelmaking based on functional digital twin model[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 521-527.
- [57] LI W, RENTEMEISTER M, BADEDA J, et al. Digital twin for battery systems: cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30: 101557.
- [58] MACDONALD C. 为泵创建数字孪生体[EB/OL].[2020-06-01]. <https://www.ansys.com/zh-cn/about-ansys/advantage-magazine/volume-xi-issue-1-2017/creating-a-digital-twin-for-a-pump>.
- MACDONALD C. Create a digital twin for the pump[EB/OL].[2020-06-01]. <https://www.ansys.com/zh-cn/about-ansys/advantage-magazine/volume-xi-issue-1-2017/creating-a-digital-twin-for-a-pump>.
- [59] 叶雯, 路浩东. 建筑信息模型(BIM)概论[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2017.
- YE Wen, LU Haodong. An overview of building information models[M]. Chongqing, China: Chongqing University Press, 2017.
- [60] 李莲, 郭忠磊, 张琼. 无人机倾斜摄影测量技术在城市基础测绘中的应用[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(6): 72-74.
- LI Lian, GUO Zhonglei, ZHANG Qiong. Application and exploration of UAV tilt photogrammetry technology in urban basic surveying and mapping[J]. Journal of Geomatics, 2020, 45(6): 72-74.
- [61] 张强, 马海燕. 三维激光扫描技术在快速建模中的研究与应用[J]. 建筑技术开发, 2019, 46(22): 69-70.
- ZHANG Qiang, MA Haiyan. Application and research of three-dimensional laser scanning technology in rapid modeling[J]. Engineering and Technology, 2019, 46(22): 69-70.
- [62] 马益平, 朱元彪, 陈玄俊, 等. 基于实景三维模型的变电站应用研究[J]. 地理信息世界, 2019, 26(4): 117-123.
- MA Yiping, ZHU Yuanbiao, CHEN Xuanjun, et al. Substation application based on real 3D model[J]. Geomatics World, 2019, 26(4): 117-123.
- [63] 李鹏, 毕建刚, 于浩, 等. 变电设备智能传感与状态感知技术及应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3097-3113.
- LI Peng, BI Jiangang, YU Hao, et al. Technology and application of intelligent sensing and state sensing for transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3097-3113.
- [64] 王继业, 蒲天骄, 仝杰, 等. 能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(4): 1-14.
- WANG Jiye, PU Tianjiao, TONG Jie, et al. Intelligent perception technology framework and application layout of energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(4): 1-14.
- [65] QI Q, TAO F, ANWER N, et al. Enabling technologies and tools for digital twin[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 58: 3-21.
- [66] 谢慧玲. 无线传感器网络数据传输可靠性研究[J]. 通信电源技术, 2019, 36(2): 44-45.
- XIE Huiling. Survey of data transmission reliability in wireless sensor networks[J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(2): 44-45.
- [67] 乔丹, 温朝凯, 高飞飞, 等. 基于低精度量化的无线传输理论最新研究进展[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 21-33.
- QIAO Dan, WEN Chaokai, GAO Feifei, et al. An overview of low resolution quantization in wireless communication system[J]. China New Telecommunications, 2017, 33(6): 21-33.
- [68] 施伯乐, 汪卫. 数据库技术研究进展[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 442-451.
- SHI Bole, WANG Wei. The research development of database technology[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science), 2015, 38(3): 442-451.
- [69] 王鹏, 张利. 大数据处理系统的研究进展与展望[J]. 高技术通讯, 2015, 25(1): 793-801.
- WANG Peng, ZHANG Li. Review and outlook of large scale data processing system for big data[J]. Chinese High Technology Letters, 2015, 25(1): 793-801.
- [70] ERL T, MAHMOOD Z, PUTTINI R. 云计算: 概念、技术与架构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- ERL T, MAHMOOD Z, PUTTINI R. Cloud computing: concept, technology and architecture[M]. Beijing, China: Machinery Industry Press, 2014.
- [71] 任梦璇, 薛淼, 刘千仞, 等. 区块链+边缘计算应用研究与探讨[J]. 邮电设计技术, 2020(11): 24-29.
- REN Mengxuan, XUE Miao, LIU Qianren, et al. Discussion on application scenarios of blockchain in edge computing[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(11): 24-29.
- [72] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, 等. 边缘计算: 平台、应用与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 327-337.
- ZHAO Ziming, LIU Fang, CAI Zhiping, et al. Edge computing: platforms, applications and challenges[J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(2): 327-337.
- [73] 金学波, 苏婷立. 多传感器信息融合估计理论及其在智能制造中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018.
- JIN Xuebo, SU Tingli. Multi-sensor information fusion estimation theory and its application in intelligent manufacturing[M]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology Press, 2018.
- [74] 何友. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- HE You. Multi sensor information fusion and its application[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [75] 刘青, 刘滨, 王冠, 等. 数字孪生的模型、问题与进展研究[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(1): 68-78.
- LIU Qing, LIU Bin, WANG Guan, et al. Research on digital twin: model, problem and progress[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(1): 68-78.
- [76] 韩亮亮. 基于3D EXPERIENCE平台的铁路设备BIM模型轻量化技术研究[J]. 科技创新与应用, 2020(5): 19-22.
- HAN Liangliang. Research on lightweight technology of BIM model for railway equipment based on 3D EXPERIENCE platform[J]. Technology Innovation and Application, 2020(5): 19-22.
- [77] DASSAULT. EV3DVue[EB/OL].[2020-06-01]. <https://blog.csdn.net/danffer1985/article/details/16986753>.
- [78] 贾连兴. 三维可视化仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- JIA Lianxing. 3D visual simulation[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2017.
- [79] 蒋耀林. 模型降阶方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- JIANG Yaolin. Model order reduction method[M]. Beijing, China: Science Publishing & Media Ltd., 2010.
- [80] SCHILDERS W H A, van der VORST H A, ROMMES J. Model order

reduction: theory, research aspects and applications[M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.

- [81] 杨帆, 张旭. ANSYS 系统仿真与数字孪生解决方案[EB/OL]. [2020-06-01]. <http://event.31huiyi.com/1837945542/index?c=jishulink>.
- YANG Fan, ZHANG Xu. System simulation and digital twin solution of ANSYS[EB/OL]. [2020-06-01]. <http://event.31huiyi.com/1837945542/index?c=jishulink>.
- [82] 董雷霆, 周轩, 赵福斌, 等. 飞机结构数字孪生关键建模仿真技术[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 113-141.
- DONG Leiting, ZHOU Xuan, ZHAO Fubin, et al. Key technologies for modeling and simulation of airframe digital twin[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 113-141.
- [83] 谢裕清, 李琳. 基于本征正交分解的换流变压器极性反转电场降阶模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6544-6551.
- XIE Yuqing, LI Lin. A reduced order model via proper orthogonal decomposition for polarity reverse electric fields in converter transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6544-6551.
- [84] 工业互联网产业联盟. 工业互联网白皮书[R/OL].[2020-06-01].

<http://www.aii-alliance.org/bps/20200302/827.html>.

- Alliance of Industrial Internet. White paper of industrial internet of things[R/OL]. [2020-06-01]. <http://www.aii-alliance.org/bps/20200302/827.html>
- [85] 李颖, 尹丽波. 虚实之间工业互联网平台兴起[M]. 中国工信出版集团, 2019.
- LI Ying, YIN Libo. The rise of industrial internet platform between reality[M]. Beijing, China: China Industry Information Technology Publishing & Media Group, 2019.
- [86] 杨春丽, 孙会峰. 工业互联网创新实践[M]. 北京: 中国工信出版集团, 2019.
- YANG Chunli, SUN Hui Feng. Industrial internet innovation practice[M]. Beijing, China: China Industry Information Technology Publishing & Media Group, 2019.
- [87] 张旭. ANSYS 基于仿真数字孪生解决方案[EB/OL].[2020-06-01]. <https://v.ansys.com.cn/play/3a9951a2067d42be965d54b8c8cad8ee>.
- ZHANG Xu. ANSYS based on simulation digital twin solution[EB/OL]. [2020-06-01]. <https://v.ansys.com.cn/play/3a9951a2067d42be965d54b8c8cad8ee>.



杨帆(通信作者)

1980—, 男, 博士, 教授, 博导
主要从事输变电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作

YANG Fan

Ph.D., Professor

Corresponding author



吴涛

1993—, 男, 博士生
主要从事输变电设备多物理场计算、电力装备数字孪生方面的研究工作

WU Tao

Ph.D. candidate



廖瑞金

1963—, 男, 博士, 教授, 博导, 长江学者特聘教授
主要从事电气设备绝缘在线监测与故障诊断研究和高压测试技术工作

LIAO Ruijin

Ph.D., Professor



江金洋

1994—, 男, 硕士
主要从事全数字超声无损检测技术及系统方面的研究工作

JIANG Jinyang



陈涛

1972—, 女, 博士, 教授级高工
主要从事电气设备状态监测与故障诊断方面的研究工作

CHEN Tao

Ph.D., Professor



高兵

1987—, 男, 博士, 讲师, 硕导
主要从事电工装备多物理场计算方面的研究工作

GAO Bing

Ph.D.

收稿日期 2021-03-24 修回日期 2021-04-26 编辑 卫李静