

电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望

刘亚东, 陈 思, 丛子涵, 姜 骞, 严英杰, 江秀臣

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 数字孪生技术是电力装备行业数字化转型的关键技术。为此分析了电力装备行业数字化转型的研究现状, 并提出了电力装备数字孪生通用架构。结合行业的发展情况指出与仿真建模方面相关的四大关键技术: 统一信息建模技术、多层级仿真建模技术、多物理场多参数反演技术及复杂多维信息合成与可视分析技术。根据产业链不同环节的特点描述了数字孪生技术在智能设计、智能制造、供应链动态管理及运维管理等方面的典型应用场景, 并分析了现阶段研究不足与未来研究重点。最后展望了数字孪生技术应用后为行业带来的变革, 为电力装备行业的数字化转型提供了借鉴和参考。

关键词: 数字孪生; 电力装备; 全生命周期; 智能管理; 数字化转型

Key Technology and Application Prospect of Digital Twin in Power Equipment Industry

LIU Yadong, CHEN Si, CONG Zihan, JIANG Qian, YAN Yingjie, JIANG Xiuchen

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Digital twin is the key technology of digitalization transformation in power equipment industry. In this paper, a general digital twin architecture of power equipment is proposed after analyzing current research status. Based on industrial development, four important technologies in simulation and modeling are defined, such as unified information modeling, multi-level simulation modeling, multi-parameter multi-physics inversion, and multi-dimensional complex information synthesis and visualization analysis. In addition, typical applications, current deficiencies, and future focus of this technology, in the aspect of intelligent design and manufacturing, dynamic management of supply chain, and operation and maintenance, are also discussed. Moreover, the prospects in the changes of the relevant industries brought by digital twin technology are presented, which can serve as a good reference for digitalization transformation of power equipment industry.

Key words: digital twin; power equipment; life cycle; intelligent management; digital transformation

0 引言

数字经济已成为全球经济增长的关键动力, 2019 年全球 47 个国家的数字经济规模达到 31.8 万亿美元, 占 GDP 的比重平均值达 41.2%^[1]。十九届四中全会首次将数据与劳动、资本、土地、知识、技术、管理等并列, 列为重要的生产要素^[2]。我国十四五规划中提出要坚定不移地建设数字中国, 推进产业基础高级化、产业链现代化^[3]。2020 年 8 月 21 日国资委出台文件《关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知》, 指出要推进 5G、物联网、大数据、人工智能、数字孪生等技术的规模化集成应用, 实现作业现场全要素、全过程的自动感知、实时分析和自适应优化决策, 提高生产质量、效率和资产运营水平, 赋能企业提质增效^[4]。而电力装备设计制造和运行作为制造和能源类企业中重要的工

程应用场景^[5], 其数字化转型可为电力装备制造业和能源运行数字化转型提供技术保障, 是我国经济数字化转型的重要支撑。

数字孪生技术, 作为数字化转型的关键技术, 从最初应用于航空航天和军事领域, 逐渐扩展到工业和民生各个领域^[6-9]。2003 年, 美国密歇根大学的 Michael Grieves 教授在产品全生命周期管理课程上首次提出了镜像空间模型, 其被称为数字孪生最早的概念模型^[10-11]。但由于支撑技术的限制, 这一设想在当时并未得到重视。直到 2009 年, 美国空军研究实验室为了预测军用飞机的结构性维修需求, 降低维修成本, 以实现军用飞机的结构健康管理, 才明确提出了数字孪生体的概念^[12]。随后, 美国国家航空航天局、美国国防部门等机构以及通用电气、西门子、达索公司、ABB 集团、空客等工业巨头很快意识到数字孪生技术的发展潜力, 将数字孪生技

术和自身业务相结合,开展了数字孪生技术的早期研究与应用^[13-16]。

近几年数字线程、边缘计算、物联网、云计算、机器学习、大数据、区块链、人工智能等技术的快速发展,为数字孪生技术的应用提供了更多的技术支持^[17-21],数字孪生技术迎来了在各行业中的大规模扩展应用期。各行业的专家和学者们致力于推进数字孪生技术在产品制造^[22-23]、卫星工程^[24]、智慧城市^[25]、医疗、建筑等领域的应用,该技术在各行业的开创式应用,推动了各行业的快速发展,同时也展现了其广阔的应用价值和前景。

在电力装备行业,一些设备生产公司或电网公司也已经开展了数字孪生技术应用的案例。如上海浦东供电公司临港地区 110 kV 博艺数字变电站,首次实现了实体变电站与数字变电站的同步建设和同步移交;乌镇“互联网之光”10 kV 配电房构建了与真实场景无缝匹配的虚拟场景;西门子公司为满足能源装备制造商对高可靠性、较短交付周期、低廉产品开发成本以及理想总拥有成本的需求,基于数字孪生技术推出了机电一体化协同设计平台,助力能源装备制造商实现数字化转型,提升竞争优势^[26];安世亚太公司成立了数字孪生体实验室,致力于推进数字孪生技术的研究和发展,在其应用在电力装备行业的案例中,有基于 Flownex 软件提出的数字孪生电厂解决方案,通过量化评价不同因素对燃煤电厂内发电设备安全运行的影响,从整体上提升了电厂的效率和安全性^[27]。电力装备数字孪生技术可广泛应用于装备的设计、生产制造、运行维护和报废回收等全生命周期的所有环节,实现对装备全生命周期信息的闭环管理。总体上来说,数字孪生技术在电力装备行业的应用处于初级阶段,采用该技术来解决电力装备行业中存在的问题仅处于理论研究和试点应用阶段,仍需要投入更多的研究与实践。

实际上电力行业经过多年的发展,已经具备数字孪生技术应用的政策环境和技术条件^[28-32]。2019 年国家电网有限公司提出建设泛在电力物联网与传统电网融合发展,形成强大的价值创造平台,共同构成能源流、业务流、数据流“三流合一”的能源互联网,以应对电网形态发生变化、企业经营遇到瓶颈和社会经济形态发生变化等挑战。中国南方电网有限责任公司提出了数字南网建设行动方案,旨在通过对电网的数字化,实现能源产业链上下游的

互联互通,使公司具备智能电网运营、能源价值链整合和能源生态服务的能力。特变电工、西电集团等装备制造企业也在积极布局数字化转型工作。上述宏观政策的实施为数字孪生技术的应用提供了政策环境。

从技术储备上看,随着我国智能电网的建设,电力装备制造企业和电网运营企业在数据感知手段、通信方式、数据处理、结果展示以及业务支撑维度等方面都得到了大幅提升^[33-36]。如国家电网有限公司开展了 SG-186 工程^[37]、公布了“智能电网”发展计划^[38]、发布了《泛在电力物联网白皮书 2019》^[39],中国南方电网有限责任公司发布了《数字化转型和数字南网建设行动方案(2019 年版)》^[40]以及《数字电网白皮书》^[41]。上述项目的实施为物理实体的数字镜像提供了数据来源和通信支撑,各个业务的智能化分析手段也得到了大幅提高。

当前关于电力装备全生命周期过程中的设计、制造、安装、运维等环节呈现离线、开环、缺少在线反馈的特点,如何打破产业链各环节之间的技术隔阂,实现各环节的衔接与融合,是电力装备领域实现数字化转型面临的难题。数字孪生技术作为一项联系物理世界和信息世界的关键技术,可以实现物理实体与数字孪生体之间的双向映射、动态交互和实时连接,通过实时测量、动态感知物理实体的实际状态,并使用相关数字模型进行优化与决策,来调控物理实体的动作,以达到对物理实体全生命周期监测与控制的目标,给电力装备制造和运行的全行业产业链的数字化转型升级提供了技术手段。本文根据数字孪生的核心思想,结合电力装备制造和管理组织方式,提出了电力装备全产业链的数字孪生框架,总结了电力装备领域数字孪生技术应用所涉及的关键技术,分析了数字孪生技术典型的应用场景,展望了数字孪生技术在电力装备商业模式、管理模式、生产组织方式等方面所带来的变革,为数字孪生技术在电力装备行业的应用提供了借鉴和参考。

1 电力装备数字孪生技术架构

1.1 电力装备数字孪生框架

电力装备数字孪生框架包含电力装备的全生命周期各环节,为电力装备的数字化管理提供了整体的结构支撑。根据数字孪生技术的核心思想,电力装备行业数字孪生技术框架总体上可分为物理层、通信层、虚拟层和应用层 4 个层次,见图 1。

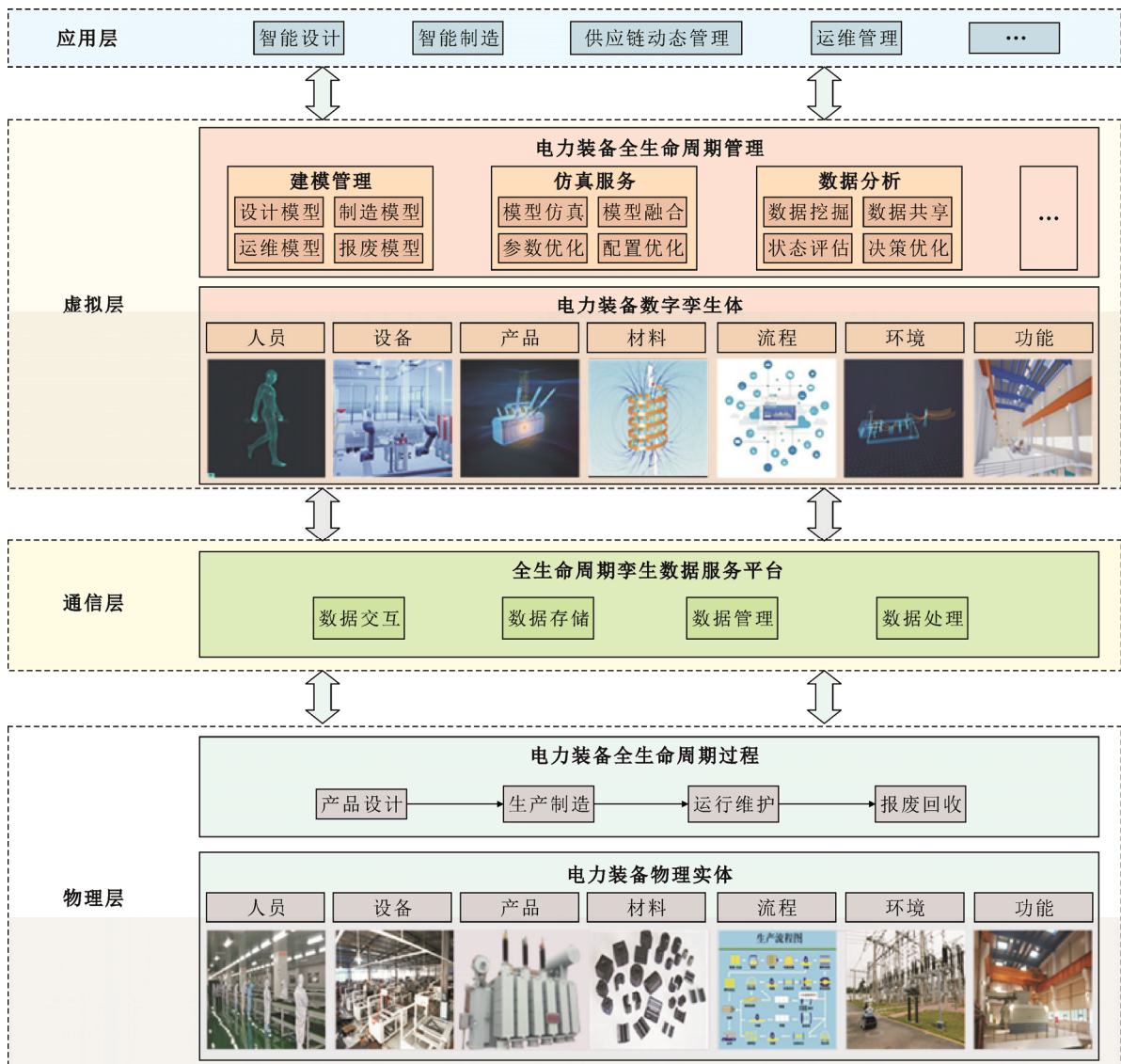


图1 电力装备数字孪生通用框架

Fig.1 Digital twin general framework of electric power equipment

1.1.1 物理层

物理层是指电力装备的产品设计、生产制造、运行维护和报废回收等全生命周期过程中所涉及的人、机、料、法、环等不同方面的物理实体、生产流程、运行环境、功能实现等所有要素的集合,具有数据采集、状态感知等功能,是实现电力装备基本功能的实体保障。当前坚强智能电网和泛在电力物联网的建设为电力装备数字孪生的物理层应用提供了基础条件,多参量传感器集成技术可实现对电力装备本体及其周围物理域的全面感知。

1.1.2 通信层

通信层是为物理层和虚拟层提供数据支撑服务的。物理层采集到的数据通过通信层实时传递给虚拟层,虚拟层发布的控制指令通过通信层实时传

递给物理层,以实现物理层与虚拟层之间的同步传输。通信层同时具有存储、管理与处理孪生数据的功能。电力系统的专用通信方式、通信一体化协议的制定以及5G技术的快速发展使得电力装备的多源异构信息流可以安全、高效的传输。

1.1.3 虚拟层

虚拟层指信息空间内与电力装备物理实体相互映射的数字孪生体的集合。虚拟层包含建模管理、仿真服务、数据分析等模块,可以实现对电力装备全生命周期数字化管控的高精度要求。建模管理包括电力装备的设计模型、制造模型、运维模型和报废模型的建立和优化;仿真服务包含对电力装备模型的多尺度仿真、模型融合和参数优化等功能;数据分析包括反演计算、数据挖掘、状态评估和决策

优化等功能。随着支撑技术的快速发展与电力装备行业需求的不断改变，虚拟层对电力装备全生命周期的管理也将持续完善与扩展，最终实现对电力装备进行全数字化管理的终极目标。

1.1.4 应用层

应用层为在数字孪生建模仿真的基础上，支撑电力装备全生命周期过程中不同环节的业务，包括设计制造、基建、供应链动态管理、智能运维等。数字孪生技术可以有针对性地为电力装备不同的需求进行相应的功能服务，如：订单管理服务；性能优化服务；电力装备物理实体生产质量的精准把控服务；健康状态评估服务；故障预测、诊断和定位服务；寿命预测服务等。

1.2 电力装备数字孪生关键技术

电力装备数字孪生的应用涉及到信息感知、通信、建模、仿真、数据分析等众多技术。

1.2.1 统一信息建模技术

统一的信息模型是电力装备生产制造产业链中上下游企业的产品之间数据交互的基础^[42]。电力装备的类型多种多样，包含变压器、气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal enclosed switchgear, GIS)、换流阀等，不同的电力装备包含的零部件个数也不尽相同，少则成百上千，复杂的电力装备如特高压变压器的零部件个数甚至可达数十万个，并且每个部件都有不同的数据集对其进行描述。如何有效地记录电力装备从部件生产组装到安装运行过程中的生产运行数据和属性数据，并将数据随装备零部件一起移交至下一个生产或使用环节，是数字孪生技术与行业深度融合面临的首要问题。

电力装备投运后还有人工巡视、带电检测、机器人巡视、检修试验等不同来源的运维数据，包括了电压、电流、红外温度、声音成像、可见光等多源异构数据。上述数据的多源异构和时空特征明显，因此电力装备数字孪生的信息模型需满足系统性、可扩展性、兼容性等要求。

IEC61968/970 标准中定义了抽象的电网统一信息模型(common information model, CIM)，使用统一建模语言(unified modeling language, UML)的表达方法，以图形方式展示建模所涉及的所有类及它们之间的关系，并以类的形式来定义电力企业运行各方面所需要的主要对象。当前的 CIM 模型需对上述两个方面进行扩展才能更全面的描述电力装备。

图 2 为电力装备从生产制造到运维检修整个过

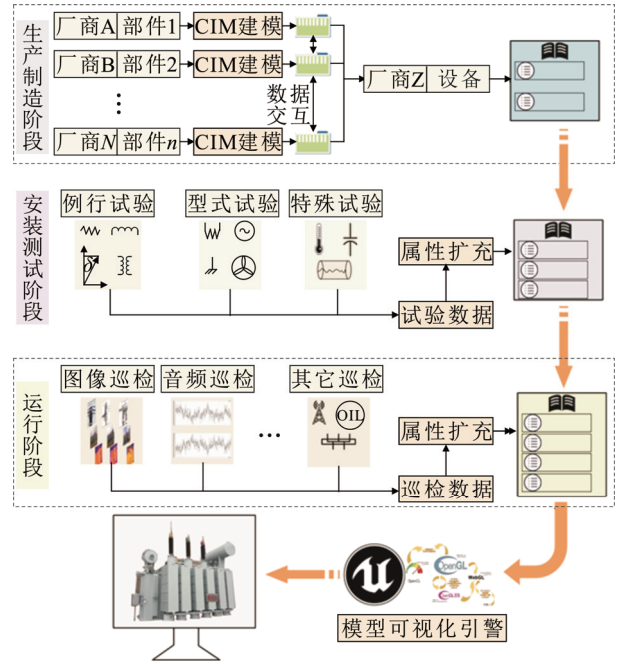


图 2 电力装备统一信息建模技术

Fig.2 Unified information modeling technology of electric power equipment

程抽象化描述的思路。在生产制造阶段，上游厂商遵从标准的 CIM 建模方法对出厂的零部件进行建模，集成厂商结合不同部件供应商的部件模型和生产制造过程数据和试验测试数据，生成装备生产制造模型；在安装测试阶段，建设单位将安装过程中的交接试验过程数据进一步扩充到装备模型中；在运行阶段，将不同的巡视、检修、试验等方式获得的电力装备运行多源异构数据扩充到装备模型中，建立最终的电力装备数字孪生信息模型，最大程度地兼容现有的标准协议，以便电力装备行业相关环节之间的数据交互；同时，对图像、三维等非结构化数据的兼容，可更好地实现数字孪生模型的建立和展示。

1.2.2 多层次仿真建模技术

数字孪生技术是实现电力装备物理实体与数字孪生体之间实时互动，多个电力装备数字孪生体之间智慧共享的关键技术。电力装备全生命周期过程的数字孪生体构建是一个在线的闭环过程，涉及到物理实体的仿真建模、在线优化及多模型之间的协同技术支持。多层次仿真建模技术作为其中必不可少的环节，以组件、装备层级的多物理场仿真分析和生产、装配、安装层级的数字孪生车间技术为主要支撑，是实现电力装备物理实体和数字孪生

体有效闭环运行的核心保障。多层次仿真建模的不同阶段涉及不同的核心技术。

1) 多物理场仿真技术

变压器、GIS 等电力装备具有承载电流或者耐受电压的作用, 从其结构设计、材料选取、流水制造, 到安装调试、运行维护, 直至报废退役的全生命周期各环节中, 涉及到电、磁、热、力、光、声、流体、绝缘等多种理化性能的考量^[43-44]。各种物理场和现象之间存在着复杂的耦合关系^[45], 见图 3。

在电力装备运行的过程中, 各物理场的变化过程遵循质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律等, 且物理场的变化过程可通过(偏)微分方程(组)进行描述, 如各类守恒方程的归一化形式可描述为式(1)

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \text{div}(\rho \Phi V_1) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \Phi) + S_{\Phi} \quad (1)$$

式中: Φ 为守恒方程的场变量; ρ 为密度; V_1 为速度; Γ_{Φ} 为扩散系数; S_{Φ} 代表源项。因此求解多物理场问题实际上就是对耦合物理场的偏微分方程组进行求解。

多物理场仿真的优势在于可以实现多场、多尺度、多区域 3 个维度的仿真, 如图 4 所示。

其中, 多区域指对由多个具有不同特征的连续体组成的研究对象进行研究, 连续体之间通过边界直接或间接相连。多场指研究的目标中同时存在多个物理场的激励和响应, 如管道中液体的流动问题为典型的单场单区域问题, 只需分析管内区域液体的流场变化过程; 而变压器油中气泡运动分析则为典型的多场多区域问题, 其涉及变压器油域以及气泡空气域, 气泡又将在液体驱动下发生移动, 在温度、压力作用下膨胀缩小, 并影响变压器油中的电场分布^[46], 故需同时对流场、热场、电场等进行分析。

多尺度指的是针对研究对象从微观到宏观的多尺度行为进行分析。在微观层级, 通过对粒子的运动、碰撞、反应、产生等过程的仿真模拟, 可为材料的理化特性、物性参数的形成等提供原子、分子层级的机理, 可对气体、液体和固体放电过程进行精细化的模拟计算。中观层级的零部件是宏观电力装备的构成基础, 其导磁能力、耐压水平、散热速率、结构强度等特性都将决定电力装备整体的投运性能。基于实际工况对零部件的电场、磁场、热场、应力场等进行仿真, 分析其老化、劣化过程, 以选取导电性、导热性、导磁性、强度、延展性等

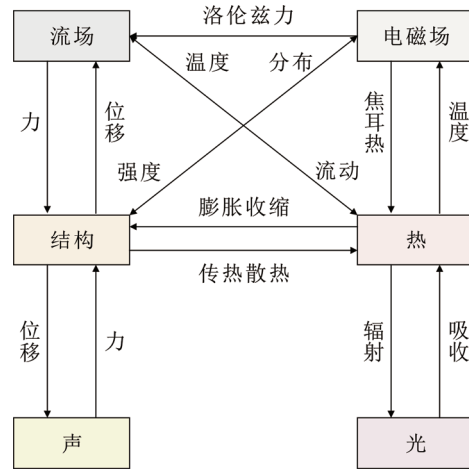


图 3 多物理场耦合关系

Fig.3 Coupling relation of multiple physical fields

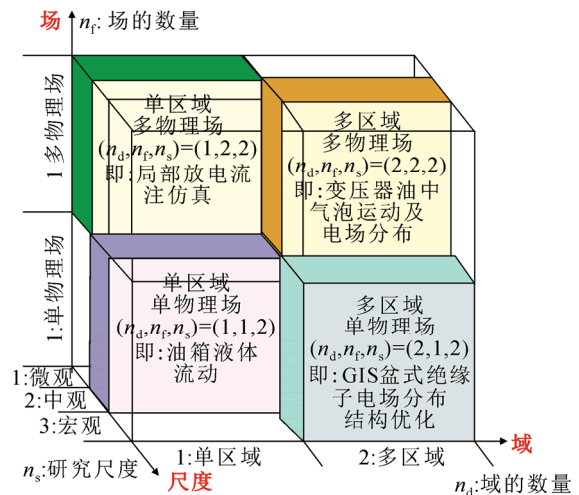


图 4 多物理场仿真应用特点

Fig.4 Application characteristics of multiphysics simulation

均适配的零部件材料, 并对零部件的结构、形状进行优化, 可提高宏观电力装备整体的运行可靠性, 延长其检修周期及使用寿命。

2) 数字孪生车间技术

制造领域未来的发展目标之一是实现制造的物理世界和信息世界的互联互通和智能化操作, 进而实现智能制造。数字孪生车间技术的应用有望解决装备制造的物理世界和信息世界之间的交互与共融这一瓶颈, 进而建立真实物理车间与镜像虚拟车间之间的双向映射与实时交互。

真实物理车间需要在传统生产车间的基础上, 具备感知、决策、数据采集与传输等功能。一方面通过各类传感、测量装置建立材料、装置、生产流程的实时数据库, 作为构建镜像虚拟车间模型的基础, 另一方面则接收由镜像虚拟车间发送的指导信

息。虚拟车间则是对物理车间从材料至成品的生产加工全流程进行数字化所得到的物理模型。基于这些与真实车间高度近似的模型，对生产的全流程进行模拟，可以对原材料选取、结构设计、加工过程、装配过程进行全面评估，对可能存在的问题进行调整和优化。数字孪生车间技术的原理图如图 5 所示。

综上，可建立如图 6 所示的电力装备多层次仿真建模分析的框架图。

电力装备的结构模型是多物理场仿真的基础。作为仿真的计算域，各物理场的演变、发展过程均以装备模型及其周围空间为载体，模型的准确度与精细水平将直接决定仿真结果的可靠性，故须对电力装备实体进行准确的剖析和测量。

微观尺度上，通过对装备制造、生产材料的微观结构、粒子组分等进行建模分析，可建立材料理化特性、物性参数的数据库。此外通过对大规模粒子相互作用过程(如泊松方程)的求解可建立如流柱模型，电弧模型，电荷积聚模型等放电模型，与建立的电力装备故障仿真模块相结合，对气体、液体和固体放电的精细化物理过程进行研究。

在中观尺度上，主要对装置和配件的多物理场行为进行分析。此时微观尺度的仿真结果以及温度、湿度等初始条件，电压、电流、流速等边界条件将共同作为中观尺度仿真分析的前置条件，以获取电

力装备在不同时间尺度和空间维度下的多物理场时空分布特征。同时可根据不同的研究目的，选择多场、多域或简化的单场、单域进行分析。

在宏观尺度上，配件、装备的多物理场分析结果一方面可为装备整体长期运行下的温度、应力积聚、绝缘老化等过程的分析提供依据。通过设置故障类型、故障场景、故障持续时间等条件，研究不

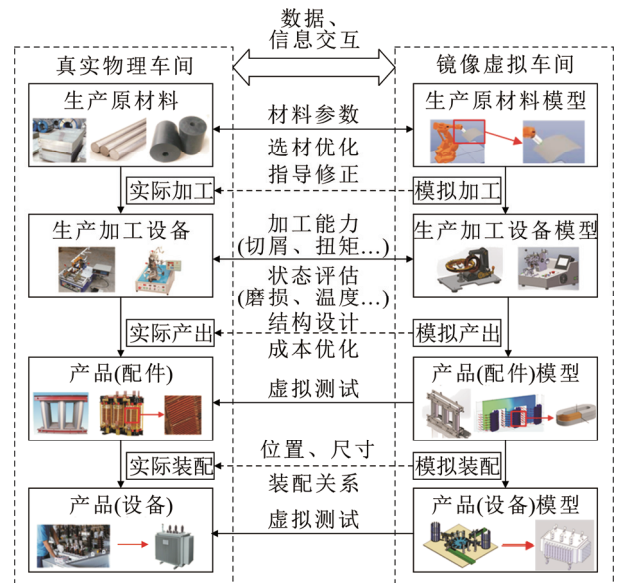


图 5 物理车间与虚拟车间之间的双向映射与实时交互

Fig.5 Bidirectional mapping and real-time interaction between physical workshop and virtual workshop

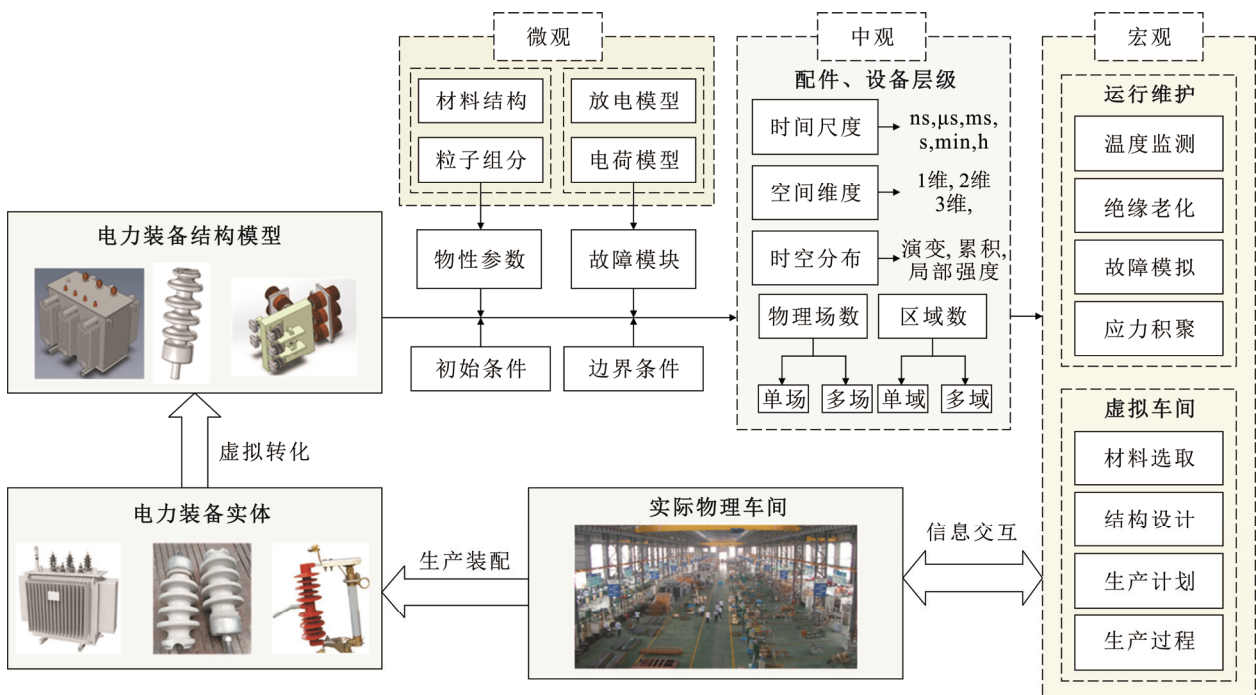


图 6 电力装备多层次仿真建模分析框架图

Fig.6 Framework diagram of multi-level simulation modeling and analysis for power equipment

同类型的电力装备故障对内部温度、结构强度、绝缘强度等物理参数的影响, 从而对装备的运行状态进行评估、分析、预测。另一方面也可作为镜像虚拟车间的建立基础, 根据仿真分析结果分析相关物理量在电力装备中的分布情况, 在保证装备可靠性的前提下, 选取合适的制造材料, 设计合理的装备结构, 充分发挥材料的导电、导磁、绝缘等的物理性能, 实现对产品性能与成本等的精确预测, 提高产品设计的成功率。同时, 通过与实际物理车间进行信息交互, 采用实际车间的信息对虚拟车间信息进行迭代更新, 可对实际车间的生产计划、生产过程进行规划。

1.2.3 多物理场多参数反演技术

电力装备的结构通常是完整且密封的, 如油浸式电力变压器、GIS 等。由于绝缘、密封等问题, 变压器的内部发热、匝间短路等内部状态只能通过外部振动、放电等间接感知手段取得。电力装备内部故障与其可观测现象之间并非一一对应关系, 如何通过不同的检测数据, 构建装备内部状态的高效表征、建模和评估方法一直是装备运维的难题^[47-48]。

反演方法在地球物理勘探领域的应用较为成熟^[49-53], 通过利用可观测到的地球物理场(如电场、磁场、重力场等), 反推地球介质的物性参数如速度、密度、磁化率、电阻率等的变化规律^[54], 可对地球内部的物理状态进行分析与解释。故可借鉴地勘领域的反演思想, 提出多物理场多参数反演技术, 通过外部可观测参数对电力装备内部不可观测的运行参数进行反演计算, 获得电力装备内部的缺陷和位置信息, 以实现对其内部状态的精确评估。

反演问题是典型的反问题, 其解的唯一性和稳定性是反演技术实现工程应用的关键^[55]。在电力装备内部状态反演问题中可充分利用装备设计、运行和检测等先验信息来缩小解搜索空间。实现反演解的唯一性和稳定性, 其技术框架如图 7 所示。

首先根据电力装备的设计参数对其尺寸和内部结构进行建模, 再对电力装备内部各单物理场进行正演仿真计算, 然后逐步增加物理场之间的耦合关系, 建立电力装备的多物理场耦合正演计算模型, 再以正演计算模型为基础, 建立电力装备内部多物理场多参数反演模型。采用外部可观测参数如温度、振动、电压、电流、负荷等作为反演计算模型的输入, 对电力装备的内部各单物理场进行参数反演, 并将单场反演的结果作为多物理场多参数反演寻优

的初始值, 以达到缩小解空间的目的, 最后对电力装备的内部参数分布进行反演计算, 根据计算结果来对电力装备进行运行状态监测、故障定位和识别。

图 8 为油浸式变压器内部热点温度反演流程图, 其详细步骤如下:

1) 建立变压器内部温度场的正演计算模型。

在进行温度场分析时, 需要同时考虑流体、固体以及传热等多方面因素对温度的影响, 满足质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律, 基于多物理场仿真方法建立变压器内部温度场的正演计算模型。

多物理场仿真计算式如式(2)

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho_1 dV = -\oint_V \rho_1 (\mathbf{n} \cdot \mathbf{U}) dS \\ \int_V \frac{\partial(\rho_1 \mathbf{U})}{\partial t} dV + \oint_S (\mathbf{n} \cdot \mathbf{U}) \rho_1 \mathbf{U} dS = \int_V \rho_1 \mathbf{f} dV + \oint_S \Pi \cdot \mathbf{n} dS \\ \rho_1 c \left(\mathbf{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T + Q \end{cases} \quad (2)$$

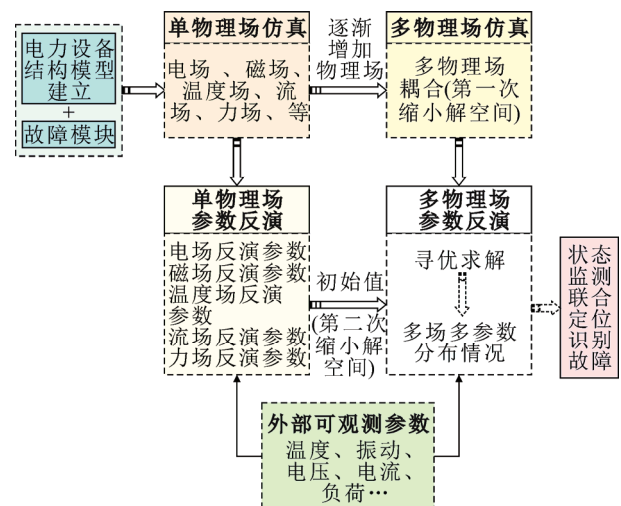


图 7 电力装备多物理场多参数反演技术框架

Fig.7 Framework of multiphysics and multi-parameter inversion technology for electric power equipment

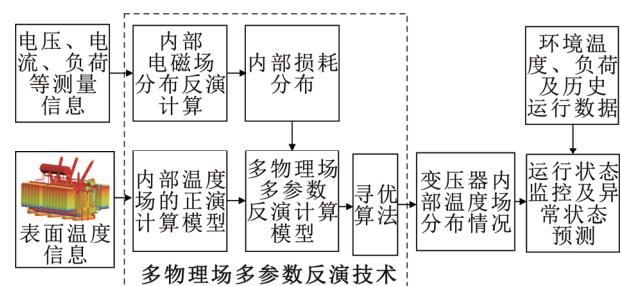


图 8 油浸式变压器内部热点温度反演流程图

Fig.8 Flow chart of hot spot temperature inversion in oil-immersed transformer

式中： ρ_l 为流体密度； \mathbf{n} 为微元面积矢量 dS 外法线的单位矢量； \mathbf{U} 为流体速度； f 为单位质量流体所受到的质量力； Π 为微元面积矢量 dS 的应力张量； c 为流体的比热容； T 为控制体的温度； k 为导热系数； Q 为对应微元的生热量； ∇ 为调和算子； x, y, z 表示空间坐标系的三个轴； $\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$ 分别为流体速度 \mathbf{U} 在 x, y, z 方向上的速度分量； dV 为微元体积。

2) 变压器内部损耗分布计算。

根据监测系统测量到的电压、电流以及负荷等参数信息，反演计算得到变压器的内部电磁场分布参数，进而计算出变压器内部的损耗分布。

电磁反演计算采用的麦克斯韦方程组如式(3)

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times D = \sigma \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： E 为电场强度； D 为电通量密度； H 为磁场强度； B 为磁通量密度； J 为电流密度； σ 为电荷密度。

第一类边界条件

$$\Phi|_{\Gamma} = g(\Gamma) \quad (4)$$

式中： $g(\Gamma)$ 为边界区域势的分布； Γ 为诺伊曼边界。

第二类边界条件

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{m}}|_{\Gamma} + f(\Gamma)\Phi|_{\Gamma} = h(\Gamma) \quad (5)$$

式中： \mathbf{m} 为边界处的外法线矢量； $f(\Gamma)$ 、 $h(\Gamma)$ 为一般或者常量函数，当 $h(\Gamma)=0$ 时，公式表示齐次诺伊曼边界。

3) 建立多物理场多参数反演模型。

为了保证反演计算的准确性，将变压器内部的损耗分布导入温度场正演模型，并建立目标函数和约束条件，获得变压器多物理场多参数反演模型。

目标函数和约束条件如式(6)

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & h_i(\mathbf{x}) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m) \\ & g_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, p) \\ & \mathbf{x} \in D_s \end{aligned} \quad (6)$$

式中： \mathbf{x} 为设计变量； $f(\mathbf{x})$ 为目标函数； D_s 为求解域； $h_i(\mathbf{x})$ 为线性约束条件； $g_i(\mathbf{x}) \geq 0$ 为非线性约束条件。

4) 变压器内部温度参数反演计算。

将变压器表面温度信息作为反演模型的输入数据，采用寻优算法对变压器内部各部件的多点温

度进行反演计算，得到变压器内部的温度场参数分布情况。

5) 变压器运行状态监控与预测。

计算获得变压器内部温度场的参数分布情况后，可在线观测变压器运行特征，并采用有效的变压器健康状态评估方法对其内部温度变化进行评估，实现变压器的运行状态监控，当监测到其温度变化超过了警戒值，可在第一时间发出报警信号，通知工作人员进行应急处理。

根据电力装备的历史运行数据以及内部温度场反演数据，采用预测精度高且适用于时滞特性预测的算法对电力装备的未来几小时或几天的内部运行状态进行预测分析，及时预测异常现象及异常部件的位置并发出预警信息，为运维人员处理异常现象提供重要的依据，并为故障的提前处理创造了宝贵的时间。

1.2.4 复杂多维信息合成与可视分析技术

电力装备故障定位是快速处理故障的重要基础。随着先进感知技术的发展，电力装备的检测手段已经由传统的温度点测量、接地电流测量等一维测量方法转变为红外、紫外、可见光、X射线、声音成像等多个光谱二维成像技术与传统检测手段共存的局面。不同检测方式获得的检测信息呈现出多源、多维、多类、多量、多尺度等特征，基于3D技术的电力装备三维尺寸精确建模技术为三维立体空间的故障点自动诊断定位提供了条件。

构建电力装备精细的全空间信息三维模型，先在三维空间和时间维度上对不同类型的高维数据进行融合合成，再根据不同检测信号的时空关联特征，结合其检测信号的传变特征对故障点进行定位和诊断分析，是电力装备故障点快速精确定位的前提。电力装备三维空间高精度自动重建和高维异源数据在高维空间的精确配准技术是解决上述问题的基础。

三维自动重建技术可利用单个或多个成像传感器拍摄的多视角图像重建出电力装备的三维可视化模型。如图9所示，该技术由运动恢复结构技术(structure from motion, SfM)和多视角立体技术(multi view stereo, MVS)两部分技术组成。其中，SfM技术主要负责从多视角图像序列中恢复出精确的相机拍摄位姿，并获得电力装备的稀疏点云；MVS技术则将原始图像序列和SfM技术恢复出的相机位姿作为输入，重构出具有纹理细节的电力装备稠密点云以及纹理映射模型。

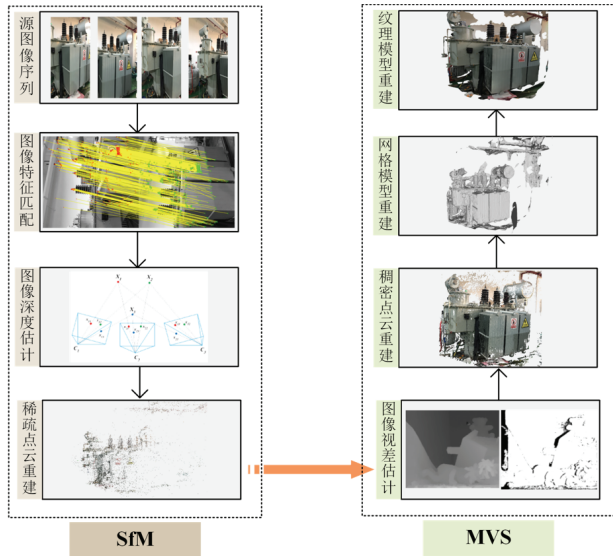


图9 三维自动重建技术流程
Fig.9 Three-dimensional automatic reconstruction technology process

异源数据配准技术是以不同类型图像中的特征点为目标构建图像之间的映射关系, 进一步在三维空间中对同一目标不同类型检测参量的特征点云进行匹配, 构建三维点云之间的位姿变换映射, 最终实现点云模型对齐, 为电力装备异源检测数据在高维空间的合成提供技术支撑。其技术流程见图 10。

对于变电站设备检测而言, 机器人巡检产生的红外、可见光、紫外图像, 在线监测系统产生的接地电流、局部放电、振动等数据, 带电检测系统产生的声音成像、三维激光点云等数据可以以电力装备的空间位置为坐标合成不同检测手段的数据, 构建电力装备高维数据的合成框架, 如图 11 所示。

以激光点云或可见光构建的三维空间为基础, 在三维空间中逐步叠加紫外、红外、视频振动、声音等异构的检测参量, 实现空间维度的信息合成, 可将以点测量和二维面测量为主的装备感知方式提升为三维立体的测量方式, 进一步在三维坐标系中, 结合不同检测参量的传播特性对设备内部状态进行可视化分析评估和诊断。

1.2.5 其他关键技术

关于信息感知技术, 文献[56]详细介绍了电力行业涉及的先进传感理论与技术、智能感知技术以及基于全景信息的智能分析运行控制的研究现状和发展趋势; 文献[57]在通信网网络、边缘计算和深度感知方面提出了创新思路和技术发展方向。电力装备数字孪生对于通信技术的要求体现在开放互

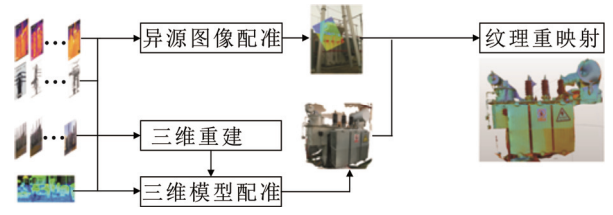


图 10 异源数据配准技术流程
Fig.10 Technical process of heterogeneous data registration

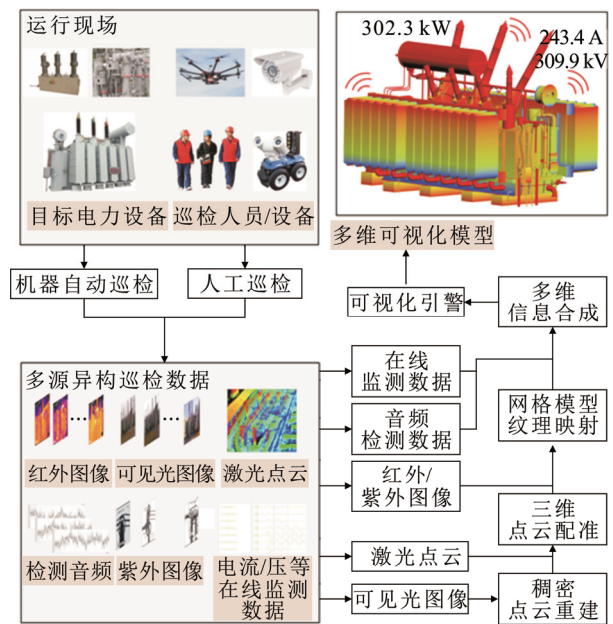


图 11 电力装备数据高维可视化分析技术框架
Fig.11 High dimensional visualization analysis technology framework of electric power equipment data

联、对等分享以及智能高效等特点上, 5G 通信技术的快速发展则为电力装备数字孪生的实现提供了可能, 其高带宽、低时延、低功耗等优势使得其可与电力装备行业深度融合, 满足电力装备数字孪生的通信要求[58-59]。在数据分析技术方面, 近年来日渐完善的电力信息化平台实现了设备状态、电网运行和环境气象等大量相关数据的获取。数据挖掘、机器学习、深度学习以及知识发现等大数据分析和处理技术的快速发展, 为电力装备数字孪生技术的应用提供了支撑[60-62]。以上关键技术发展快速, 应用广泛, 且已有了较多的研究成果, 本文重点阐述了与仿真建模相关的四项关键技术。

2 电力装备数字孪生应用分析

数字孪生技术以构建物理世界的数字镜像为特征, 在电力装备行业全链条都会有广泛的应用。本文提出了基于数字孪生技术的电力装备全生命周

期过程管理架构，如图 12 所示。

电力装备数字孪生技术可广泛应用于装备的设计、生产制造、运行维护和报废回收等全生命周期中的所有环节，可对装备的全生命周期信息实现闭环管理。通过数字孪生体模型的建立以及物理实体和数字孪生体之间的双向映射、动态交互和实时连接，可实现各环节之间信息的有效交互，打破全产业链条之间的隔阂，促进整个行业全链条的数字化和智能化，提高全行业的生产效率和管理水平。其典型的应用场景主要有设计、制造、供应链管理和运维管理等。

2.1 智能设计

电力装备的运行涉及力、热、电等多个物理场的耦合运行，设计时需要综合计算和考虑不同场域的限值。数字孪生技术的建模和仿真可为电力装备多场作用下的运行仿真提供有效的工具，助力设计的便捷化和精确化。

随着国家电网公司和南方电网公司标准化工程的实施，两网公司对电力装备的需求将呈现规模

化和标准化的趋势，电力装备全生命周期各环节涉及到的流程、技术等都将实现标准化管理。在大量标准化需求的带动下，电力装备的设计也将呈现标准化和精细化的特点。在行业主管部门或者龙头企业的主导下，以大量的现场运行数据和行业设计经验为基础，在虚拟空间建立电力装备的数字孪生体模型，并对虚拟产品的性能进行测试，针对性能薄弱的部件加以改进和优化，形成标准化的设计制造工艺，以缩短装备制造商的研发周期，极大地降低了装备开发成本。

针对特定用户的特定需求，数字孪生技术亦可在标准化数字孪生体的基础上，对特定的指标和参数进行修改。并根据大量标准化产品的应用经验来指导定制化产品的设计，以提高定制化产品的研发速度和质量。

2.2 智能制造

2.2.1 生产工艺流程再造

数字孪生技术可对电力装备生产流程中的每个环节进行建模，在装配约束条件下，对电力装备

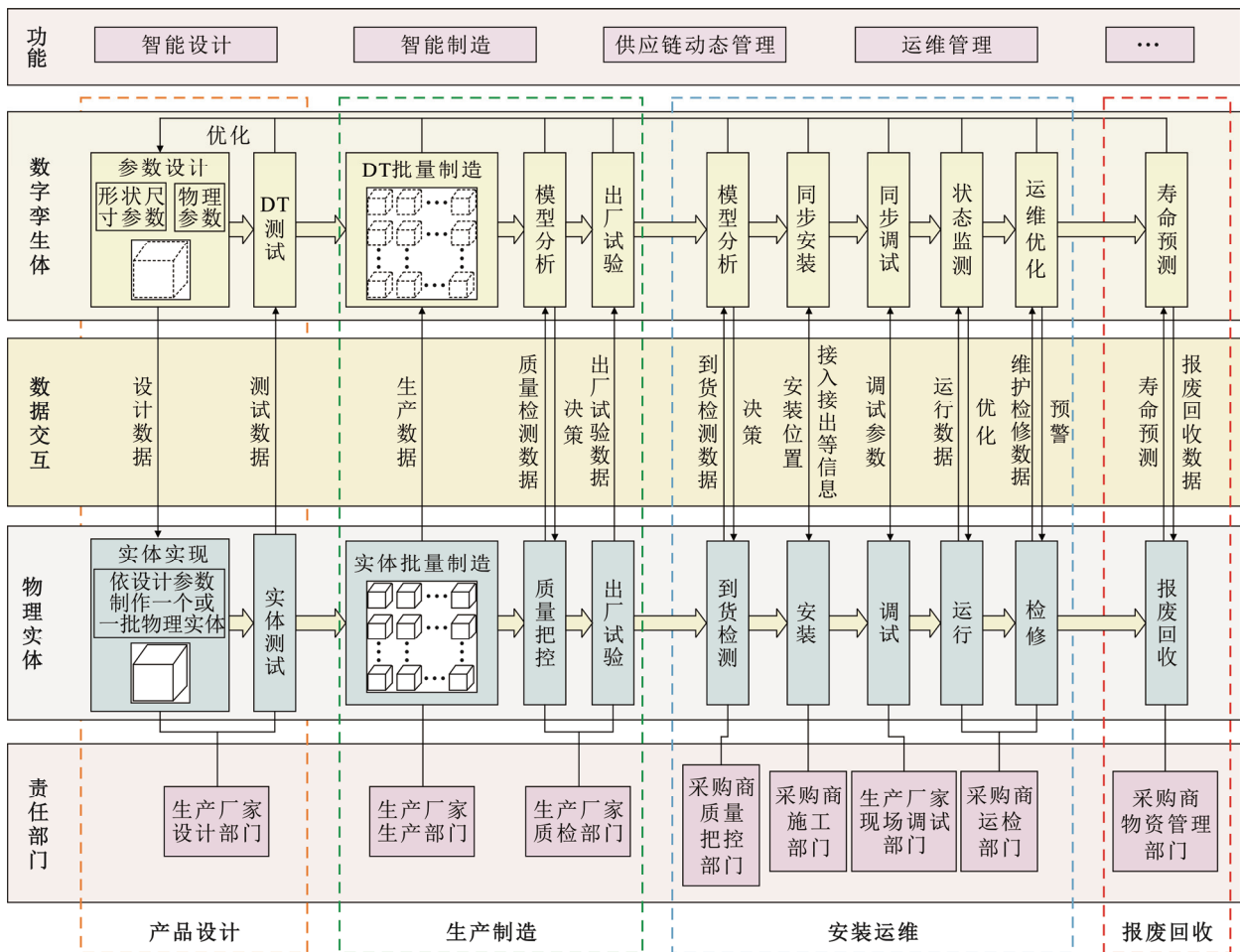


图 12 基于数字孪生技术的电力装备全生命周期过程管理架构

Fig.12 Life cycle process management structure of power equipment based on digital twin technology

的生产和装配工艺进行仿真, 模拟不同生产工序的配合情况, 预测加工后的电力装备物理实体的形态和装配效果。通过对生产工艺和装配流程的重新组合和优化, 再造特定环境和目标条件下的生产工艺, 实现电力装备生产制造的智能化。

2.2.2 产能预测

数字孪生技术可在虚拟空间中构建数字化的电力装备生产线, 数字产线可以根据产线装备的状态、原材料的供应情况、产线工人的配备情况及外界环境等多种生产要素的配备情况, 对工厂产能进行预测。同时也可以根据产能需求对人员、原材料、产线装备的配置和检修等要素资源进行分析, 实现生产管理的智能化。

2.2.3 生产质量把控

根据电力装备数字孪生模型, 可以在虚拟空间中通过电力装备或部件的数字孪生体对运行过程中的故障临界状态进行参数仿真。在实际生产中根据生产过程的检测数据与仿真的计算数据进行对比分析, 采用虚拟测试和实体测试相结合的方式, 扩展常规实体测试无法完成的试验, 最终保证装备制造质量和不同批次产品的一致性。

2.3 供应链动态管理

电力装备的生产制造和运行涉及到产业链上下游不同环节, 实现产业链上各个环节生产要素的及时流转将提高整个行业的生产效率。

对电力装备制造商和零部件供应商而言, 可采用数字孪生技术进行电力装备的订单管理和物料管理: 根据历史订单数据以及在线更新资料(如产品的更新迭代、竞争对手价格、买方需求等信息)来预测未来订单量; 依据物料种类和规格、生产厂家、批次、不同性能产品批次对应的物料清单等历史信息, 以及所预测的订单量来管理场内物料, 可以实现物料采购和消耗的动态平衡, 避免物料的短缺降低生产进度, 同时避免物料采购不合理造成的闲置, 从而降低制造商的周转资金。

对于电网公司来说, 物资管理部门可利用数字孪生技术对在役电力装备的性能进行评估, 并对其运行寿命进行预测。各区域电网可根据预测情况结合区域建设情况、外部环境等因素, 合理估算出季度、年度的需求情况, 以指定合理的采购、招标和仓储计划, 实现电网公司物资资源的优化利用。

2.4 运维管理

数字孪生技术构建了电力装备及运行环境的

数字化镜像, 可以在孪生系统中按照现有的管理规定, 设置虚拟的巡视策略, 并采集巡视人员、检测人员在日常巡视/检测过程中所关注的所有参量, 自动报警电力装备的异常状态, 实现数字化技术与现有管理规定的无缝匹配, 大幅降低巡视工作对于人力的依赖。

数字孪生技术应用后, 电力装备不同种类、不同时间尺度、不同部位的检测参量都将以时空主线进行信息合成, 实现高维异构数据的可视化展示和分析。结合电力装备的数字孪生模型可对电力装备状态进行精确评估, 对故障位置、故障类型、故障严重程度等问题进行精确诊断, 同时对装备寿命进行准确预测。

3 数字孪生应用展望

3.1 未来研究重点

数字孪生的概念从提出至今不过经历了短短十几年时间, 其大规模应用更是近几年才广泛开展。在电力装备领域, 数字孪生的应用处于初级研究阶段, 存在大量技术和方法上待解决的问题。本节从通用化建模方法、海量多源异构数据融合、故障发生及演变机理、运行状态监测 4 个方面对未来研究重点进行分析, 如图 13 所示。

3.1.1 电力装备通用化建模方法

电网中的电力装备种类多样且型号各异, 如何对不同种类、不同原理、不同工作机制的设备建立统一的数字模型, 使得不同的电力装备在统一的框架下进行建模, 并且具备可扩展性, 是数字孪生技术在电力装备行业应用的难点之一。

针对上述问题, 未来的研究重点应放在:

1) 在现有国标规范的基础上, 完善电力装备行业数字孪生技术应用的标准与规范, 如统一模型架构、通信协议、规范接口等, 建立具有系统性、可扩展性和兼容性的通用信息模型。

2) 提升电力装备的数字化设计、虚拟建模及过程仿真技术水平, 使数字模型具备对电力装备运行状态进行建模仿真、推演、预测的能力。

3) 研究多领域多尺度融合的建模技术, 实现电力装备内部不同尺寸、不同种类部件模型的融合以及多种电力装备模型的融合。对设备之间的连接、联动、耦合关系进行建模, 实现真实系统中所有电力装备之间运行状态的数字化建模与运行模拟。

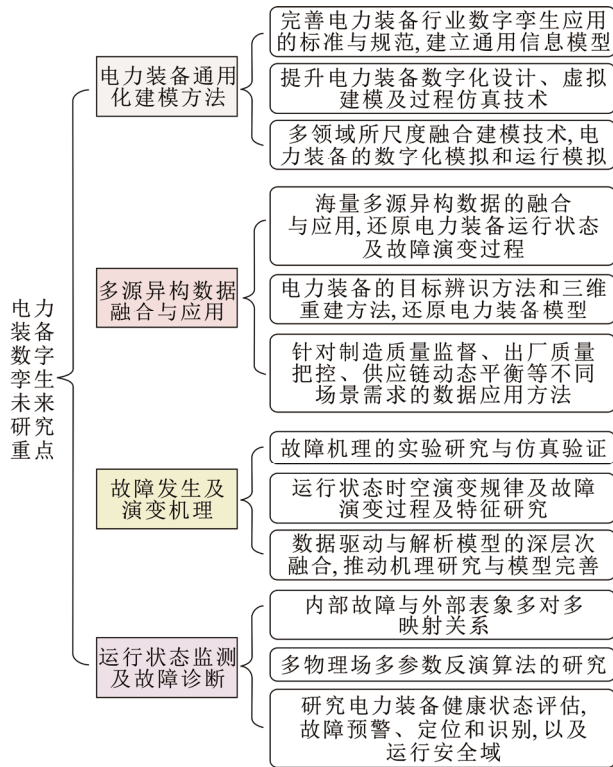


图 13 电力装备数字孪生未来研究重点

Fig.13 Future key research of panoramic information perception and intelligent grid

3.1.2 海量多源异构数据融合与应用

数字孪生平台内的多源异构数据呈现海量、多时空尺度及多维度等特点, 数据融合方法以及多源异构数据的信息挖掘与应用仍处于研究之中。

为了解决上述问题, 未来应重点研究:

1) 研究多源异构数据的采集、传输、清洗、关联、聚类、挖掘及融合等操作, 还原电力装备运行状态及故障演变过程的规律和相关关系, 实现多源异构数据的融合与应用。

2) 研究电力装备的目标辨识方法, 实现对多种电力装备的高准确率辨识; 研究基于红外监测、可见光监测等检测技术的三维重建方法, 精确地还原电力装备模型。

3) 研究针对不同场景需求的数据应用方法, 如将电力装备制造质量监督、出厂质量把控、供应链动态平衡等过程所需要的数据分析结果作为决策优化的指导。

3.1.3 故障发生及演变机理

电力装备实际上是在力、热、磁、电等多物理场耦合作用下的复杂的工作体, 当前对电力装备内部故障的发生机理以及故障的演变规律认识不足。

针对上述问题, 未来应重点研究:

1) 加强对复杂电力装备的系统构成和运行机理的实验研究, 并采用有限元仿真及多物理场耦合等计算方法辅助验证研究结论。

2) 研究电力装备内部运行状态特征及时空演变规律, 以及电力装备的故障早发期、稳定期和永久故障期的演变过程及特征。

3) 结合大数据分析, 推动机理研究设想的认证, 对数字模型不断修正和完善, 实现数据驱动和解析模型的深层次融合, 发挥数字孪生技术的数据分析功能在电力装备机理研究中的价值。

3.1.4 电力装备运行状态监测

电力装备的内部故障与其可观测表象之间关系复杂, 呈现多对多映射的特点, 关于其外部多种特征与内部多种故障之间的映射关系研究尚不明确。如何通过外部监测参量建立设备内部多物理场的时空演变模型, 准确评估设备内部的运行状态, 是当前电力装备状态评估碰到的最大瓶颈之一。

因此, 以下问题应作为未来的研究重点:

1) 研究设备不同运行环境及运行工况对正常运行现象和故障现象的影响规律; 采用抗噪性能更好的检测仪器及滤波效果更好的信号处理方法来分析检测数据, 得到电力装备外部现象与内部故障的多对多映射关系。

2) 研究多物理场多参数反演计算方法, 采用寻优速度更快且不易陷入局部最优的寻优算法, 基于海量多源异构数据增加更多的有效信息, 减小寻优计算的解空间, 最终提高反演计算的精度。

3) 研究基于海量多源异构监测数据的电力装备健康状态评估方法及故障预警方法; 研究基于电力装备故障与表象映射关系的内部故障定位和识别算法; 基于数字孪生体对电力装备的运行安全域进行评估, 获得电力装备健康运行的参数阈值。

3.2 电力装备行业变革展望

随着数字孪生技术在电力装备领域的推广和应用, 电力装备行业的生产组织方式、装备管理方式和商业模式将会发生改变。

3.2.1 生产组织方式

数字孪生技术以标准化的方式推动产业链上各个环节的信息化, 实现了产业链上各个环节信息的便捷交互。其进一步建立了整个行业生产和经营活动的多尺度仿真模型, 通过对实际生产活动的在线计算和推演, 实现了对物理世界的精确描述。在

此基础上的行业生产组织将呈现如下特点:

1) 供需动态平衡化。在准确的数据采集和精确的预测模型的帮助下, 电网企业的物资需求会更加精准, 由此带动产业链上游厂商的市场预期也将更加明确, 最终实现全行业的供需动态平衡, 整个行业的生产效率将大幅提高。

2) 竞争有序化。数字孪生技术应用后, 不同厂商产品质量的好坏、服务水平的高低可直接用数据建模分析进行评估, 并可溯源。以数据为支撑的质量评价方法将引导装备制造投入更多的资源来提高产品质量, 同时淘汰技术管理落后的企业, 通过有序的竞争, 引导全行业水平的不断提升。

3.2.2 装备管理方式

数字孪生技术构建了电力装备生产制造和运行过程的物理数据到仿真模型的实时映射, 使得装备历史状态信息被完整纪录, 当前信息被实时采集与展示, 将来的状态信息可被精确预测。上述功能将给装备管理方式带来如下变化:

1) 巡视/巡检虚拟化。数字孪生技术应用后, 会大大降低对电力装备运维人员的需求, 传统的人工现场巡视/检测工作都将在数字孪生系统内自动完成, 信息的获取也将变得更加多元、全面与精确。

2) 管理智能化。随着对装备感知手段的丰富, 更多的电力装备状态信息被获取, 在大量数据的基础上, 装备数字孪生体的建模将会更加精确。通过对多源检测信息的融合分析, 建立设备内部全景信息感知网络, 对电力装备的状态评估、故障诊断和寿命预测将会更加准确, 最终真正实现电力装备从计划性检修到状态检修的转变, 实现电力装备的智能化。

3.2.3 商业模式

数字孪生技术应用后, 电力装备行业商品将由传统的电力装备实物转变为电力装备实物和其对应的数字孪生体, 行业的商业模式也将呈现两个不同的变化:

1) 装备智能化。电力装备的状态感知数据是数字孪生体的仿真基础, 因此数字孪生技术的发展将推动电力装备的智能化发展, 传感、通信、存储等为智能化提供支持的行业将得到大力发展。

2) 产品服务化。电力装备数字孪生体的构建涉及生产制造过程中的不同环节和运行过程中不同阶段所有数据的有效建模和分析。针对设计、制造、运维等不同方面的应用, 数字孪生体的建模尺度各

不相同, 内嵌算法模块的种类、复杂程度也不同。因此伴随电力装备的生产和运维, 将产生大量的数字孪生体建模和分析工作, 以孪生服务为主要特征的行业特征将更加明显。

4 结论

1) 数字孪生技术是实现电力装备行业数字化转型的重要手段。基于电力装备行业数字孪生通用框架, 可以实现电力装备的全生命周期数字化管理以及电网系统内所有电力装备数字孪生体信息的互通互联共享。

2) 统一信息建模技术、多层级仿真建模技术、多物理场多参数反演技术以及复杂多维信息合成与可视分析技术等关键技术, 为数字孪生技术在电力装备行业的应用的实现提供了技术支持。

3) 数字孪生技术在电力装备行业全产业链条的应用场景有智能设计、智能制造、供应链动态管理及运维管理等, 在场景实现的过程中存在通用化建模方法、海量多源异构数据融合方法、故障发生及演变机理研究、运行状态监测及故障诊断方法等未来研究重点。

4) 数字孪生技术的应用将给电力装备行业的生产组织方式、装备的管理方式和行业的商业模式带来巨大的行业变革, 增加产业链上各个环节的信息化和智能化程度, 最终提高整个行业的生产效率和竞争力。

参考文献 References

- [1] 中国信息通信研究院. 全球数字经济新图景(2020年)——大变局下的可持续发展新动能[EB/OL]. 北京: 中国信息通信研究院, [2020-10-15]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202010/P020201014373499777701.pdf>.
China Academy of Information and Communication Technology. New prospect of global digital economy (2020) -- new momentum of sustainable development under great changes[EB/OL]. Beijing: China Academy of Information and Communication Technology, [2020-10-15]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202010/P020201014373499777701.pdf>.
- [2] 张燕萍. 党的十九届四中全会《决定》(全文)[EB/OL]. 北京: 新华社, [2019-11-05]. <https://china.huanqiu.com/article/9CaKrnKnC4J>.
ZHANG Yanping. Decision of the Fourth Plenary Session of the 19th Central Committee of the Party (full text)[EB/OL]. Beijing: The Xinhua News Agency, [2019-11-05]. <https://china.huanqiu.com/article/9CaKrnKnC4J>.
- [3] 新华社. 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议[EB/OL]. 北京: 新华社, [2020-11-03]. http://www.xinhuanet.com/politics/zywj/2020-11/03/c_1126693293.htm.

- Xinhua News Agency. Suggestions of the CPC Central Committee on formulating the fourteenth five year plan for national economic and social development and the long term goals for the year 2035[EB/OL]. Beijing: The Xinhua News Agency, [2020-11-03]. http://www.xinhuanet.com/politics/zyw/2020-11/03/c_1126693293.htm.
- [4] 伍全. 关于加快推进国有企业数字化转型工作的通知[EB/OL]. 北京: 国务院国资委办公厅, [2020-09-21]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.html>.
- WU Qian. Circular on accelerating the digital transformation of state-owned enterprises[EB/OL]. Beijing: General Office of State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council, [2020-09-21]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588020/n2588072/n2591148/n2591150/c15517908/content.html>.
- [5] 白浩, 周长城, 袁智勇, 等. 基于数字孪生的数字电网展望和思考[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 18-24, 40.
- BAI Hao, ZHOU Changcheng, YUAN Zhiyong, et al. Prospect and thinking of digital power grid based on digital twin[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 18-24, 40.
- [6] 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 Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(4): 753-768.
- [7] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
- LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1-10.
- [8] 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.
- [9] TAO F, QI Q L. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573(7775): 490-491.
- [10] GRIEVES M. Virtually intelligent product systems: digital and physical twins[M]. Melbourne, USA: Complex Systems Engineering: Theory and Practice, 2019.
- [11] GRIEVES M. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1/2): 71.
- [12] 郭亮, 张煜. 数字孪生在制造中的应用进展综述[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(4): 590-598.
- GUO Liang, ZHANG Yu. Review on application progress of digital twin in manufacturing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(4): 590-598.
- [13] TUEGEL E J. The airframe digital twin: some challenges to realization[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu: AIAA, 2012.
- [14] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 6-17.
- MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 6-17.
- [15] GLAESSGEN E H, STARGEL D S. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, USA: AIAA, 2012.
- [16] GOCKEL B T, TUDOR A W, BRANDYBERRY M D, et al. Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Honolulu, USA: AIAA, 2012.
- [17] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算: 万物互联时代新型计算模型[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
- SHI Weisong, SUN Hui, CAO Jie, et al. Edge computing—an emerging computing model for the internet of everything era[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [18] 江秀臣, 刘亚东, 傅晓飞, 等. 输配电设备泛在电力物联网建设思路与发展趋势[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1345-1351.
- JIANG Xiuchen, LIU Yadong, FU Xiaofei, et al. Construction ideas and development trends of transmission and distribution equipment of the ubiquitous power internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1345-1351.
- [19] 江秀臣, 罗林根, 余钟民, 等. 区块链在电力设备泛在物联网应用的关键技术及方案[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3393-3400.
- JIANG Xiuchen, LUO Lingen, YU Zhongmin, et al. Technologies and solutions of blockchain application in power equipment ubiquitous internet of things[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3393-3400.
- [20] 吴倩红, 韩蓓, 冯琳, 等. “人工智能+”时代下的智能电网预测分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(10): 1206-1219, 1266.
- WU Qianhong, HAN Bei, FENG Lin, et al. “AI+” based smart grid prediction analysis[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(10): 1206-1219, 1266.
- [21] 张立静, 盛戈峰, 江秀臣. 泛在电力物联网在变电站的应用分析与研究展望[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 1-10.
- ZHANG Lijing, SHENG Gehao, JIANG Xiuchen. Application analysis and research prospects of ubiquitous power internet of things in substation[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 1-10.
- [22] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
- TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [23] 庄存波, 刘检华, 熊辉. 分布式自主协同制造——一种智能车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 1865-1874.
- ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui. Distributed initiative and collaborative manufacturing: new paradigm for intelligent shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 1865-1874.
- [24] 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 Weiran, TAO Fei, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin satellite: concept, key technologies and applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(3): 565-588.
- [25] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1597-1608.
- WANG Chengshan, DONG Bo, YU Hao, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1608.
- [26] 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 Haoqi, 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.
- [27] 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年12月)[M]. 北京: 安世亚太科技股份有限公司, 数字孪生体实验室, 2019.
- PERA Global, Digital Twin Lab. Dgital Twin Technology White paper (2019.12.)[M]. Beijing, China: PERA Global, Digital Twin Lab, 2019.
- [28] 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(1): 34-36.
- [29] CONG Z H, LIU Y D, FANG J, et al. Root-cause identification of single line-to-ground fault in urban small current grounding systems based on correlation dimension and average resistance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1834-1843.
- [30] 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.
- [31] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.
- YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [32] 张立静, 盛戈皞, 侯慧娟, 等. 基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J/OL]. 电网技术, 1-9 [2021-01-15]. 10.1333s/j.1000-3673.pst.2020.2054.
- ZHANG Lijing, SHENG Gehao, HOU Huijuan, et al. Detection method of interturn short-circuit faults in oil-immersed transformers based on fusion analysis of electrothermal characteristic[J/OL]. Power System Technology, 1-9[2021-01-15]. 10.1333s/j.1000-3673. pst.2020.2054.
- [33] 严英杰, 盛戈皞, 陈玉峰, 等. 基于时间序列分析的输变电设备状态大数据清洗方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 138-144.
- YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. Cleaning method for big data of power transmission and transformation equipment state based on time sequence analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 138-144.
- [34] 严英杰, 盛戈皞, 王辉, 等. 基于高维随机矩阵大数据分析模型的输变电设备关键性能评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 435-445, 600.
- YAN Yingjie, SHENG Gehao, WANG Hui, et al. The key state assessment method of power transmission equipment using big data analyzing model based on large dimensional random matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 435-445, 600.
- [35] 李臻, 罗林根, 陈敬德, 等. 基于特高频无线传感阵列的新型局部放电定位方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 418-425.
- LI Zhen, LUO Lingen, CHEN Jingde, et al. Novel localization method for partial discharge based on utral-high frequency wireless sensor array[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 418-425.
- [36] 姜骞, 刘亚东, 方健, 等. 基于轮廓特征的电力设备红外和可见光图像配准方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(11): 252-260.
- JIANG Qian, LIU Yadong, FANG Jian, et al. Registration method for power equipment infrared and visible images based on contour feature[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(11): 252-260.
- [37] 国务院国资委办公厅. 国家电网: 以“SG186”工程为重点, 全面推进信息化建设[EB/OL]. 北京: 国务院国资委办公厅[2007-10-10]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n4470081/n4475390/n4475401/c4475752/content.html>.
- General Office of State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. State Grid: focusing on "SG186" project, comprehensively promoting information construction[EB/OL]. Beijing, China: General Office of State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council,[2007-10-10]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n4470081/n4475390/n4475401/c4475752/content.html>.
- [38] 新华社. 国家电网: 2020年全面建成统一“坚强智能电网”[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国中央人民政府[2009-05-21]. http://www.gov.cn/jrzg/2009-05/21/content_1321530.htm.
- Xinhua News Agency. State Grid: complete the unified “trong smart grid” in 2020[EB/OL]. Beijing, China: The Central People’s Government of the People’s Republic of China, [2009-05-21]. http://www.gov.cn/jrzg/2009-05/21/content_1321530.htm.
- [39] 国家电网有限公司. 泛在电力物联网白皮书 2019[M]. 北京: 国家电网有限公司, 2019.
- STATE GRID Corporation of China. Ubiquitous power internet of things white paper[M]. Beijing, China: STATE GRID Corporation of China, 2019.
- [40] 中国南方电网有限责任公司. 数字化转型和数字南网建设行动方案(2019年版)[M]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2019.
- China Southern Power Grid Co., Ltd. Action plan for digital transformation and Digital South network construction (2019 edition)[M]. Guangzhou, China: China Southern Power Grid Co. Ltd., 2019.
- [41] 中国南方电网有限责任公司. 数字电网白皮书[M]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2020.
- China Souther Power Grid Co., Ltd. Digital power grid white paper[M]. Guangzhou, China: China Southern Power Grid Co. Ltd, 2020.
- [42] 王志英, 张诗军, 邓琨. 基于 CIM 的统一电网信息模型构建与管理[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 92-95.
- WANG Zhiying, ZHANG Shijun, DENG Kun. Design and management of unified power grid information model based on common information model[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 92-95.
- [43] 侯国斌, 傅明利, 邓晓峰, 等. GIS 温升的多物理场仿真与实验及热通量分布特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2322-2328.
- HOU Guobin, FU Mingli, DENG Xiaofeng, et al. Multi-physics coupling simulation and experiment of temperature rise in GIS and heat flux distribution characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2322-2328.
- [44] 谢裕清, 李琳, 宋雅吾, 等. 油浸式电力变压器绕组温升的多物理场耦合计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5957-5965, 6040.
- XIE Yuqing, LI Lin, SONG Yawu, et al. Multi-physical field coupled method for temperature rise of winding in oil-immersed power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5957-5965, 6040.
- [45] 阮江军, 张宇, 张宇娇, 等. 电气设备电磁多物理场数值仿真研究与应用[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 737-756.
- RUAN Jiangjun, ZHANG Yu, ZHANG Yujiao, et al. Numerical simulation research and applications of electromagnetic multiphysical field for electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 737-756.
- [46] 张永泽, 唐炬, 潘成, 等. 流动变压器油中气泡动力学行为及电场分布仿真[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2004-2012.
- ZHANG Yongze, TANG Ju, PAN Cheng, et al. Simulation of the bubble dynamics and electric field distribution in flowing transformer oil[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2004-2012.
- [47] 骆小满, 阮江军, 邓永清, 等. 基于多物理场计算和模糊神经网络算法的变压器热点温度反演[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 860-866.
- LUO Xiaoman, RUAN Jiangjun, DENG Yongqing, et al. Transformer

- hot-spot temperature inversion based on multi-physics calculation and fuzzy neural network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 860-866.
- [48] XIONG S H, LIU Y D, FANG J, et al. Incipient fault identification in power distribution systems via human-level concept learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5239-5248.
- [49] 刘洁, 张建中. 重震联合反演框架及应用新进展[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 743-752.
LIU Jie, ZHANG Jianzhong. New development of gravity-seismic joint inversion framework and application[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 743-752.
- [50] 彭国民, 刘展. 电磁和地震联合反演研究现状及发展趋势[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(2): 465-474.
PENG Guomin, LIU Zhan. An overview of joint electromagnetic-seismic inversion and its future development[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(2): 465-474.
- [51] 闫政文, 谭捍东, 彭淼, 等. 基于交叉梯度约束的重力、磁法和大地电磁三维联合反演[J]. 地球物理学报, 2020, 63(2): 736-752.
YAN Zhengwen, TAN Handong, PENG Miao, et al. Three-dimensional joint inversion of gravity, magnetic and magnetotelluric data based on cross-gradient theory[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(2): 736-752.
- [52] 张铭哲, 李桐林, 邓海, 等. 大地电磁、重力、磁法和地震初至波走时的交叉梯度二维联合反演研究[J]. 应用地球物理学, 2019, 62(6): 2139-2149.
ZHANG Rongzhe, LI Tonglin, DENG Hai, et al. 2D joint inversion of MT, gravity, magnetic and seismic first-arrival wave traveltime with cross-gradient constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2139-2149.
- [53] 何展翔, 胡祖志, 王志刚, 等. 时频电磁(TFEM)技术: 数据联合约束反演[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(4): 898-905.
HE Zhanxiang, HU Zuzhi, WANG Zhigang, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) technique: step-by-step constraint inversion based on artificial fish swarm algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 898-905.
- [54] 撒利明, 杨午阳, 姚逢昌, 等. 地震反演技术回顾与展望[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(1): 184-202.
SA Liming, YANG Wuyang, YAO Fengchang, et al. Past, present, and future of geophysical inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(1): 184-202.
- [55] 梁涵卿, 刘亚东, 盛戈皞, 等. 基于行波反演的输电线路单相接地故障重演方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 209-217.
LIANG Hanqing, LIU Yadong, SHENG Gehao, et al. Reproduction method for monophasic-to-ground fault of transmission lines based on wave inversion[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 209-217.
- [56] 张宁, 马国明, 关永刚, 等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4): 1274-1283, 1535.
ZHANG Ning, MA Guoming, GUAN Yonggang, et al. Panoramic Information Perception and Intelligent Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(4): 1274-1283, 1535.
- [57] 周峰, 周晖, 刁赢龙. 泛在电力物联网智能感知关键技术发展思路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 70-82.
ZHOU Feng, ZHOU Hui, DIAO Yinglong. Development of intelligent perception key technology in the ubiquitous internet of things in electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 70-82.
- [58] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [59] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.
WANG Jiye, MENG Kun, CAO Junwei, et al. Information technology for energy internet: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [60] 江秀臣, 盛戈皞. 电力设备状态大数据分析的研究和应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(4): 1041-1050.
JIANG Xiuchen, SHENG Gehao. Research and application of big data analysis of power equipment condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(4): 1041-1050.
- [61] 严英杰, 盛戈皞, 陈玉峰, 等. 基于大数据分析的输变电设备状态数据异常检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 52-59.
YAN Yingjie, SHENG Gehao, CHEN Yufeng, et al. A method for anomaly detection of state information of power equipment based on big data analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 52-59.
- [62] 费思源. 大数据技术在配电网中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 85-96.
FEI Siyuan. Overview of application of big data technology in power distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 85-96.



LIU Yadong

Ph.D.

Associate professor
Corresponding author

CHEN Si

Ph.D. candidate



JIANG Xiuchen

Ph.D., Professor

刘亚东(通信作者)

1982—, 男, 博士, 副研究员

从事输配电设备故障检测与诊断方面的工作

E-mail: lyd@sjtu.edu.cn

陈思

1994—, 女, 博士生

主要研究方向为电力设备的故障诊断

E-mail: misterrabbit@163.com

江秀臣

1965—, 男, 博士, 教授

从事电力设备状态监测及高电压技术的研究

E-mail: xcjiang@sjtu.edu.cn

收稿日期 2021-02-01 修回日期 2021-04-06

编辑 何秋萍 冉沐晨