

智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用

王成山¹, 董博¹, 于浩^{1*}, 吴建中², 严晋跃³, 李鹏¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072; 2. 卡迪夫大学工程学院, 英国 卡迪夫 CF24 3AA; 3. 梅拉达伦大学工商、社会与工程学院, 瑞典 韦斯特罗斯 72123)

Digital Twin Technology and Its Application in the Integrated Energy System of Smart City

WANG Chengshan¹, DONG Bo¹, YU Hao^{1*}, WU Jianzhong², YAN Jinyue³, LI Peng¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education(Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;

2. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK;

3. School of Business, Society and Engineering, Mälardalen University, 72123 Västerås, Sweden)

ABSTRACT: The transition of traditional cities to smart cities has put forward new requirements for the development of energy systems. The construction of a digitalized and interactive integrated energy system (IES) has become one of the important solutions to face the challenge. Driven by advanced information technology, the level of digitalization and informatization of IES has been constantly improving, but the realization of its technological value still needs to be explored. This paper focused on the digital twin (DT) technology of IES, analyzing the demand, value and significance of DT in the development of smart cities. Moreover, the basic framework and challenges of DT were described, and the related key technical issues were discussed. Finally, the application of DT in the stages of planning, operation, control and multi-domain collaborative interaction of IES was prospected. It is hoped that this paper could provide some ideas and references for the future development and application of the DT technology in IES.

KEY WORDS: smart city; integrated energy system; digital twin; data driven; cyber-physical system

摘要:传统城市向智慧城市的转型发展对能源系统提出了新的要求,建设数字化、互动化的综合能源系统是重要的应对思路之一。在先进信息技术的驱动下,综合能源系统的数字化与信息化水平不断提升,但如何充分发挥其技术价值仍需要探索。该文围绕综合能源系统的数字孪生技术,对其在智慧城市发展中的需求、价值与意义进行了分析,对其基本技术框架和技术挑战进行了探讨,对相关的关键技术问题进行了阐述,并围绕综合能源系统数字孪生在系统规划、运行、控制以及与城市多领域协同交互等方面的应用进行了展望,

希望能够为综合能源系统数字孪生技术的未来发展与应用提供一些思考和借鉴。

关键词:智慧城市;综合能源系统;数字孪生;数据驱动;信息-物理系统

0 引言

随着全球范围内城市规模的不断增长,以及居民生活品质要求的日益提升,城市发展与空间、资源、环境等要素间的矛盾越发凸显。21世纪以来,各种先进信息技术与城市的融合不断加深,城市建设与运行的信息化、数字化水平快速提升^[1]。以此为基础,进一步在横向打通能源、交通、市政等城市各领域间的信息壁垒,在纵向实现城市从上层规划建设到底层公众服务的整体协调统一,构建更加高效、绿色和共享的智慧城市高级形态,已成为国内外广泛关注的问题和未来城市的重点发展方向^[2]。

能源系统是与城市生产生活紧密关联的重要基础设施,也是构建智慧城市的关键环节之一^[3]。打破冷、热、电、气等供能系统独立规划、建设、运行与服务的既有模式,构建高度协同的综合能源系统(integrated energy system, IES),是面向智慧城市能源发展的一种典型实践^[4-5]。综合能源系统与城市的关联体现在多个方面。例如,从能源系统角度,在能源管廊的规划建设过程中,需要综合考虑城市空间约束和整体城建规划的影响^[6];电动汽车的分布和移动特征既属于城市交通系统的一部分,同时也会通过充放电行为改变能源系统的负荷需求^[7];城市建筑的智能管理不仅能够有效降低建筑能源消耗,还可以聚合形成能源系统重要的需求侧可控

基金项目:国家自然科学基金项目(51961135101, 51907139)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51961135101, 51907139).

资源^[8]。

而从城市发展角度,能源的清洁、高效、可定制供应是满足社会生产生活多样化需求、提升资源利用效率、优化城市环境的重要举措^[9]。以此为目标,智慧城市综合能源系统需要着重关注三方面属性:一是物理能源属性,即需要作为基本的物理载体承载多种能源的生产与配用全过程,为各种分布式能源的接入与消纳、多类型能源的协调分配、用户侧安全优质能源消费等提供支撑;二是工业生产属性。新型工业化是智慧城市的核心特征之一,而能源是社会生产的基础,能源供应品质将显著影响工业生产成本、效率和质量,通过能源系统与上下游产业的充分信息交互和共享能够有效提升社会生产效率;三是公众服务属性。系统化的能源消费活动开始越来越多地出现在城市的各个方面,如电气化交通、市政服务、智慧园区、能源金融交易等,这使消费侧对综合能源系统的影响日益显著,需要对能源从生产到消费的全过程进行有效管理和充分优化,通过能源的定制化供应和供需互动来全面提升消费侧能效和服务品质。

因此,未来综合能源系统的发展目标将不仅仅局限于满足社会能源需求,还需要将视角提升到支撑城市全局发展层面^[10]。先进信息化与数字化技术的进步为面向智慧城市的综合能源系统提供了发展契机,各种高级传感、量测、通信、控制技术与装备的应用创造了全面的信息连接和海量的数据基础。但现有的数据应用体系大多面向特定业务类型构建,相互之间缺少协调和共享,数据壁垒和信息孤岛等问题突出,与外部系统的交互缺少途径。导致数据与连接的价值没有得到充分发掘,同时重复建设的冗余数据体系也耗费了大量的计算资源。对于智慧城市综合能源系统而言,既要实现系统内物理能源与多源数据的有机融合,又要实现与城市不同领域的协调交互;既要保证能源供应的安全性与可靠性,又要以开放共享的形态支撑城市高水平发展,由此带来了多方面的科学与技术挑战。

本文立足于未来智慧城市建设对能源系统提出的新需求,以数字孪生(digital twin, DT)技术理念作为能源系统与城市系统广泛融合、交互、协调和优化的重要基础,围绕综合能源系统数字孪生的基本理念、发展驱动、价值特征、发展挑战、应用场景等问题进行了分析,希望能够为未来智慧城市综合能源系统的发展提供一些借鉴。

1 综合能源系统数字孪生的基本内涵

1.1 发展理念与驱动力

数字孪生又称为数字镜像、数字双胞胎,旨在构建复杂物理实体从现实空间到虚拟数字空间的全息映射,通过虚-实信息链接,刻画和模拟出物理系统实时状态和动态特征,从而可在虚拟环境中完成真实世界难以开展的各种分析研究,并支撑各种高级应用^[11]。数字孪生的应用始于对复杂装备的状态刻画,用于航空器设计^[12]、复杂产品制造^[13]等;此后,随着传感量测和信息通信水平的提升,以及硬件计算能力的不断增强,数字孪生开始向具备一定空间规模的系统扩展,如用于油田产能预测与调度等^[14],目标是通过多源数据的汇集融合、分析计算与可视化,实现上至系统全景、下至关键装置的状态呈现和分析应用。

数字孪生理念对智慧城市与综合能源系统的协调发展同样具有重要意义^[15-16]。在未来智慧城市中,希望能够将能源系统整体嵌入到城市的运行管理当中,进而既能够与其他领域进行灵活信息交互,又能够面向城市不同需求提供可定制的能源服务和支撑^[17]。考虑到综合能源系统的复杂性,能源与其他多领域的协调交互、在大规模复杂城市层面的协同优化等都需要在数字空间中完成,人工智能等先进信息技术的应用也需要依赖数字空间提供的融合数据基础和高效执行环境。

对综合能源系统自身来说,受多种能源形式在产-配-储-用全过程中深度耦合的影响,其运行特征将与传统独立能源系统显著不同,并体现出多物理系统耦合、多时间尺度动态特性关联、强非线性和不确定性等混杂特征,导致综合能源系统的规划设计^[18]、能量管理^[19]、检修维护^[20]等问题十分复杂,必须依赖于对系统运行状态和特性的深层次理解和掌控。此时,多源量测的融合、系统特性的分析、发展态势的预测、控制决策的优化等都需要在数字空间中更加高效地完成。

总的来看,数字孪生已成为当前复杂系统数字化和信息化发展的共性目标之一,不仅可为系统自身建设运行水平的提升提供手段,同时也为传统领域与“大云物移智”前沿技术成果融合后的潜力释放创造了有利条件。在内部需求发展和外部技术进步的双重驱动下,数字孪生逐步发展成为综合能源领域的热点问题。

1.2 实现路径与基础

数字孪生是融合了传感、通信、仿真、控制等多领域技术成果的系统性工程,虽然其概念仍处于发展阶段,但在相关领域已有一定的技术基础。其核心目标在于,利用基于机理和数据的多元化建模方法,实现复杂综合能源系统动态在数字空间中的全景镜像,并可通过多尺度分析计算模拟出系统在不同场景下的动态行为,以及支撑与外部要素的灵活交互,技术框架如图1所示。

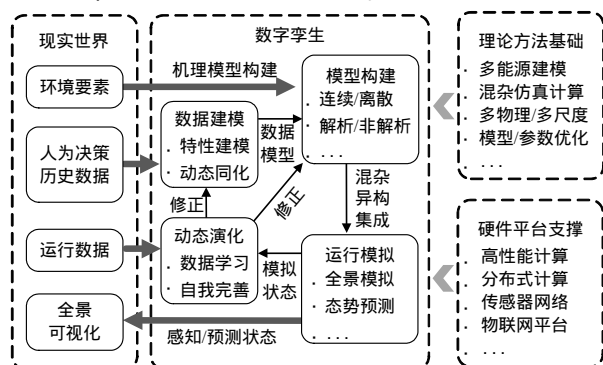


图1 综合能源系统数字孪生技术构成示意图

Fig. 1 Digital twin in integrated energy systems

物理能源系统的建模仿真理论和方法为综合能源系统数字孪生核心功能构建奠定了基础。通过基于机理或数据的针对性建模方法,各种能源环节可被抽象为时域/频域、解析/非解析、连续/离散、代数/微分/偏微分等多样化的适宜模型形式,从而以高保真度刻画出各构成环节的复杂动态特征。现有研究针对不同时间尺度动态下的电、气、热多能流统一建模与仿真方法已经开展了一些研究。例如,通过将气、热流体的偏微分方程转化为常微分方程,可实现对气、热网络动态特性的联合仿真^[21];通过将时域中的气、热网络模型映射至频域,可实现气网、热网与电网的统一建模^[22-23];从电路的角度出发,可将气网和热网中的元件类比为电路元件,从而提出与电路分析方法相统一的综合能源系统分析方法^[24];通过将多能源网络在时域的复杂特性转换为复频域的代数问题,可建立电、气、热多系统相统一的分布参数电路和网络模型等^[25]。

多源数据的融合利用是构建综合能源系统数字孪生的关键^[26]。其一,考虑到综合能源系统构成的复杂性,大量机理不明确、状态不透明环节难以构造解析数学模型,将更加依赖于数据驱动方法来揭示其运行特性;其二,多源运行数据作为物理系统状态和特征的直接反映,能够用于驱动数字孪生模型及参数的不断完善以及虚-实系统的同步演

化。对相关问题,现有研究一方面从稳态特性入手,采用数据驱动方法实现了电、热网络潮流计算等^[27];另一方面着眼于动态特性,基于数据驱动方法对微型燃气轮机等关键能源转换装备的多时间尺度特性等进行了建模^[28]。

先进传感、量测、通信、可视化等技术为综合能源系统数字孪生的构建与实现提供了外在保障⁰。以全面覆盖系统各层次的传感通信网络为支撑,综合能源系统数字孪生能够实现深入底层能源装备的精细化感知和控制;借助边缘计算、云计算等先进架构下不断增长的算力资源,可实现数据在不同层次的汇集和利用,支撑综合能源系统数字孪生的多层级模块化构建、动态演化和灵活交互。在此基础上,通过数字孪生与虚拟现实、增强现实等技术的结合,将实现能源系统外在形态与内在状态的统一呈现,为更加便利的分析应用与人机交互创造条件。现有研究已在上述方面开展了一些工作,实现了智能城市建筑能效管理^[30]、基于信息物理系统的能源互联网监控等典型应用^[31]。

当前,数字孪生技术理念在智慧园区、数字变电站等系统中已开展了初步实践,为其进一步的扩展应用积累了技术基础和经验。在未来,随着能源系统和城市系统的信息化水平继续提升,以及物联网、信息物理系统等新兴技术的快速进步,综合能源系统乃至整体城市的数据和连接基础将更加完备,从而为数字孪生在城市与能源等大规模系统中的实现提供必要条件。

2 技术特征与挑战

2.1 技术特征

仿真技术是数字孪生核心功能构建的基础。但与传统仿真模拟技术相比,数字孪生更强调“拟实”,即注重与现实系统的关联一致,强调对真实物理系统的感知、呈现、跟随和控制等。因此,对综合能源系统来说,数字孪生在一定意义上可视为常规仿真技术在特定需求场景下的发展和外延,将具有如下的典型特征,包括:

1) 精准镜像能力。构建真实系统的精准虚拟镜像是数字孪生的最核心功能,这进一步包括两个层次:一是对真实系统实时状态的深层次准确数字化呈现,即状态镜像;二是对系统运行行为特征的准确捕捉,即特征镜像。以此为基础,能够进一步面向规划设计、运行调度等不同场景需求,刻画出

相应尺度下的系统动态过程与特性；

2) 全景可观能力。首先在时间上,对于综合能源系统设计、维护、运行等阶段产生的碎片化数据信息,可以通过数字孪生加以关联、融合、集成与一体化呈现,进而提供了时间和空间上更加完整的观测视角;其次在空间上,对真实系统中难以观测或求解的复杂环节状态,能够通过融合多源数据与机理等信息,逆向求解不可观环节状态,进而支撑系统运行状态的深层次观测;

3) 动态演化能力。数字孪生需要作为真实系统在全生命周期中的伴生体,除了捕捉真实系统的初始特征,数字孪生还能够与真实系统同步演变。随着运行时间的推移,综合能源系统的行为特征可能受多方面因素影响而改变,这其中既包括系统设备维护、更新、替换、增减等显性因素,也包括设备老化、管网阻塞、能效变化等隐性因素^[32-33]。数字孪生能够通过运行信息的反馈,准确捕捉真实系统特征的积累性变化,从而确保虚-实系统特性的动态一致;

4) 虚-实交互能力。数字孪生将构建起物理世界和数字空间的双向沟通渠道。首先,数字孪生可集成真实系统多源、多尺度数据信息并将其融合为可利用形式,进一步支撑各种分析、决策、优化与可视化呈现;其次,利用数字孪生的镜像与模拟能力,各种设计方案或运行决策能够在虚拟空间中得到测试验证,并随时下发到真实物理系统的对应环节,实现数字空间与物理空间平行的感知-决策-控制闭环交互;

5) 模块化集成能力。综合能源系统数字孪生的发展目标之一是拥有灵活可变的模块化结构。对内而言,供能装备、能源站等各种环节都能够作为模块个体,支持灵活可扩展的分析应用;对外而言,综合能源系统数字孪生本身也可以作为一个整体,与城市其他领域在数字空间中进行交互,进一步为智慧城市数字孪生等更高层次、更大规模复杂系统应用提供支撑。

以上述功能特征为基础,数字孪生将赋予城市综合能源系统诸多新的内涵。例如,以综合能源系统规划、建设、运行、维护等多阶段数据链条为基础,可构成其数字孪生的核心“遗传基因”,真实的系统特征及其演化过程能够由数字孪生完整地记录和表达,并支持时间维度的剖分、溯源和预测,为同类型系统发展积累丰富知识经验。此外,利用

数字孪生创造出与真实世界平行的虚拟伴生环境,能够支持能源系统各种分析应用在真实环境和虚拟环境中灵活转移和无缝切换,这种“虚实结合”能力将使数字孪生的适用性和应用价值显著提升。

2.2 技术挑战

综合能源系统涉及多样化能源形式,覆盖从生产到消费的全过程,拥有复杂的内部物理构成和技术组合特征,其数字孪生还面临着许多特性问题有待解决。例如,综合能源系统在物理层面打通了多种能源的耦合通道,但仍然面临着信息与数据层面的壁垒^[34];针对电力、热力、燃气等能源形式的量测大多基于各自领域的常规技术手段,在数据结构、时间尺度、误差精度等方面具有诸多差异,多源数据间缺乏有效的相互关联、印证与融合利用机制,导致实现整体系统运行态势的准确感知与分析应用存在困难;系统规划、调度、运维等不同场景中,数字孪生所需要重点刻画的内容不同,对模型的颗粒度和集成计算能力提出了多方面要求。在这些因素的共同作用下,无论是综合能源系统数字孪生的构建,还是其在多场景中的应用,都面临着许多困难与挑战,如图2所示。

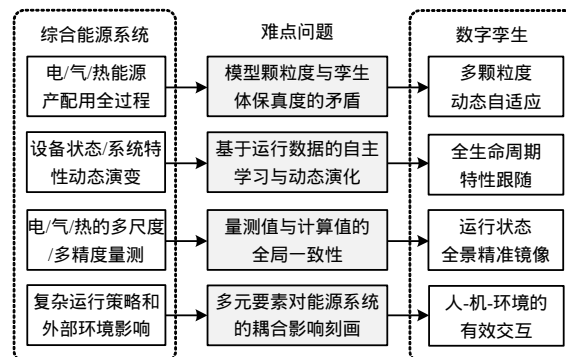


图2 综合能源系统数字孪生技术挑战

Fig. 2 Technical challenges of digital twin in IES

1) 如何平衡综合能源系统数字孪生模型保真度与计算复杂度之间的矛盾。准确的系统模型是保证数字孪生精准镜像能力的前提,但由于综合能源系统产-配-用全过程涉及的混杂特性,电、气、热各环节模型物理本质差异较大,给有效的模型接口与集成求解带来了困难。同时,在全系统层面无差别地采用精细模型虽然可以在理论上提高模型保真度,但由此带来的计算量和求解难度往往是不可接受的。这就要求数字孪生必须能够根据研究对象和场景的变化,通过模型等值等手段建立多颗粒度模型,并支持自适应动态匹配和无缝切换,以实现在有限计算资源约束下的高效求解;

2) 如何构建物理系统运行数据驱动下的数字孪生自主学习与进化机制。真实的综合能源系统时刻处于演变当中,其动态特征与变化趋势隐含在运行数据中,可为数字孪生模型校验、颗粒度切换、特性演变等提供依据。但由于系统构成的复杂性,由多源异构运行数据逆向构建系统模型属于极具挑战性的高维数学物理反问题,求解难度较大。同时,实现自主演化需要融合机理与数据两类模型,但常规机理模型大多相对固化,缺乏利用运行数据驱动模型演化的能力;而数据模型的构建依赖于历史数据集,如何准确计及运行数据实时扩展和动态更新等影响仍面临挑战;

3) 如何基于真实系统有限量测构建数字孪生镜像状态的边界约束。综合能源系统中存在大量量测困难或运行状态无法直接获取的环节,如热管网的温度分布、热泵的运行能效等,在镜像中需要利用多源数据逆向求解其状态。但由于量测配置的不均衡性,以及电、气、热环节采样速率、量测误差等因素的影响,以不同颗粒度模型、不同数据集为基础求解得到的系统状态之间,以及求解结果与真实物理量测之间可能存在矛盾冲突,最终导致偏离系统的真实运行状态。对此,需要通过模型机理、关键量测和历史数据等有价值信息融合,建立数字孪生镜像状态的边界约束,以确保镜像状态与系统量测的全局一致性;

4) 如何在数字孪生中刻画外部信息、环境、人为决策等要素与综合能源系统的耦合影响。智慧城市背景下的综合能源系统属于信息-物理耦合系统,能源调度运行策略、多领域信息交互是影响系统运行状态的重要因素,因此同样需要在数字孪生中进行镜像。而信息环节具有离散化数学本质和事件驱动特征,与物理能源动态过程差异巨大;外部环境、人为决策等要素的准确数学表达困难,对综合能源系统源、荷特征的影响机理复杂;实现人-机-环境在数字孪生中的交互机制设计和耦合特征刻画面临挑战。

3 综合能源系统数字孪生构建关键技术

从技术角度看,综合能源系统数字孪生是感知、通信、计算、控制、人工智能等技术的体系化融合与创新,几乎与迄今为止所有的先进信息科技成果相关。本节聚焦于数字孪生核心功能的构建,围绕其关键技术进行阐述,如图3所示。

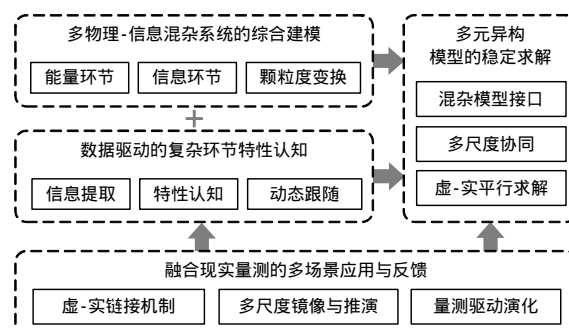


图3 综合能源系统数字孪生关键技术

Fig. 3 Key technologies of digital twin in IES

3.1 多物理-信息混杂系统的综合建模

面向多种能源形式与信息环节在产、配、用全过程中的耦合特征,构建综合能源系统多颗粒度系统模型,满足不同技术阶段与场景下的建模需求,是综合能源系统数字孪生的首要关键,这具体包括以下内容:

1) 复杂能量环节的耦合建模。从电力/热力/流体等过程的微观机理出发,构建满足多颗粒度分析需求的多能流融合模型架构,并充分计及各种能源转换装置带来的多物理动态耦合特征,形成综合能源系统物理能源动态的数字孪生综合建模框架;

2) 信息-物理系统的关联建模。信息环节特性对综合能源系统感知、决策、控制等具有重要影响,基于事件驱动的离散化建模方法构造信息环节模型,并刻画其与物理能源的耦合交互特征,支撑数字孪生对真实系统行为的高保真度镜像;

3) 物理-信息混杂模型的降阶化简。综合能源系统数字孪生模型呈现出明显的高维度、多尺度特征,需要在统一规则下科学地对不同子系统选取繁简相适、彼此配合的表达模型,通过空间投影变换、自适应模型化简等方式降低模型规模、数学复杂度和参数获取难度,确保数字孪生的灵活适用能力。

3.2 数据驱动的复杂环节特性认知

对综合能源系统中难以观测或基于机理分析计算的不可观环节,利用多源数据逆向重建其内部状态与复杂行为特征^[35],具体包括以下几点:

1) 多源异构数据的价值信息提取。通过对规划、运行、维护、实时量测等多阶段多源数据的融合利用,挖掘提取其中的有价值信息,降低数据规模与复杂度,建立面向不同研究对象的关联数据集,为数据驱动的特性认知提供基础;

2) 数据驱动的多类型环节复杂特征认知。通过特性拟合、机器学习等数据驱动的建模手段,实现机理模型关键参数的有效辨识、不可观环节动态

响应特征与行为模式的准确构建,从而支撑数字孪生的全息透明镜像与模拟等需求;

3) 考虑量测信息的不可观环节模型动态优化。通过综合能源系统运行数据的动态注入与反馈,将历史数据和实时量测信息结合,通过多尺度数据同化实现数据驱动模型的滚动优化,不断提高不可观环节特性认知与模型构建的准确度。

3.3 多元异构模型的稳定求解

综合能源系统中多类型能源动态相互交织,耦合关系复杂,针对数字孪生混杂模型组分带来的求解复杂性,其关键在于构建兼容多种模型属性的一致性求解框架,具体包括以下方面:

1) 混杂模型的接口与交互。由于各种能源环节的模型差异显著,需要基于模型组分数学特征,构建机理解析模型、数据驱动模型、量化/非量化模型等模型形式的异构接口以及数据交互机制;

2) 混杂异构模型的多尺度协同求解。针对综合能源系统数字孪生的混杂异构模型特征,构建基于先进数学算法的高适应性求解方法框架,计及模型组分的多时间尺度和多颗粒度特征,在统一框架下实现不同模型组分的同步或异步求解;

3) 虚-实系统的平行稳定求解。与现实系统平行求解是数字孪生的重要需求之一,而一些现实场景中的突发扰动可能使系统状态发生巨大变化,需要建立数字孪生在多场景下的求解算法与稳定性分析方法,并根据具体应用需求对模型接口与求解机制进行科学设计和充分优化。

3.4 融合现实量测的多场景应用与反馈

利用数字孪生的全息镜像能力和虚-实交互能力,为面向不同时空尺度的综合能源系统高透明度、高置信度分析应用提供支撑,并在此基础上实现数字孪生在全运行周期中的自我演化与自我完善,具体包括以下方面:

1) 面向实时运行镜像的虚-实信息链接机制。以数字孪生与真实系统实时运行状态一致性为目标,建立数字孪生与真实量测的信息链接机制,基于历史数据与实时量测构建虚拟镜像边界约束,保证数字镜像状态与真实量测状态一致性;

2) 考虑不确定性的运行轨迹的前瞻模拟。受综合能源系统多种不确定性因素影响,其数字孪生的前瞻模拟也将具有概率化特征。对此,通过将真实系统的实时运行状态信息融入数字孪生的前瞻预测当中,能够不断缩减信息不确定性区间,为数

字孪生更加准确的前瞻模拟能力提供支撑;

3) 基于运行数据反馈的数字孪生自我演化。真实系统运行信息是数字孪生自我演化与完善的重要依据。对此,需要以真实量测为基础,对数字孪生状态模拟偏离度进行动态校正,实现关键模型和参数的动态修正与自我演化,从而确保数字孪生在系统全生命周期中的虚-实一致性与应用性。

4 综合能源系统数字孪生技术应用

与传统的运行仿真、模拟与分析工具相比,数字孪生在技术功能和技术水平方面都有了进一步的提升,将给综合能源系统的规划、运行、控制、优化等技术应用带来新的发展。

4.1 基于数字孪生的综合能源系统规划设计

综合能源系统规划设计目的是在求取目标规划周期内能够满足负荷需求的最优系统配置与结构,是综合能源技术应用的首要环节^[36-37],而数字孪生将给综合能源系统规划设计理念与实践带来新的内涵,如图4所示。

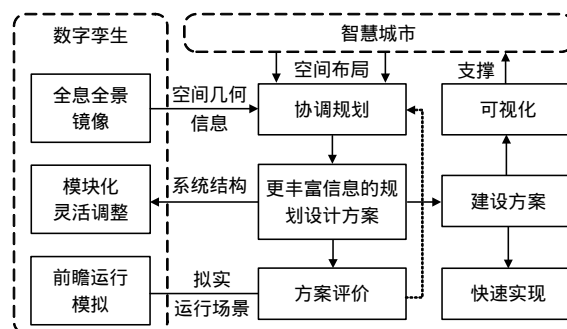


图4 基于数字孪生的综合能源系统规划设计

Fig. 4 Planning and design of IES based on DT

数字孪生的模块化思想既体现为对综合能源系统的灵活配置能力,又体现为对其优化规划数学问题的模块化组合能力,这使基于数字孪生的系统规划设计更为简便。特别是随着未来更加统一的数字孪生标准规范的建立,以及在制造业中的广泛应用,各种能源生产、转换、消费环节和装置的数字孪生可能在出厂阶段便已经建立,并作为一种附加产品功能或服务提供给用户。这将极大地提升综合能源系统作为一种复杂产品模块化组合的规划设计效率。

此外,通过数字孪生实现包括能源系统空间结构特征在内的全息镜像,能够支持规划设计方案和建设实施方案的一体化,即在规划设计阶段即考虑规划方案与能源管廊、建筑空间、城市布局等的匹配关系,使规划方案在现实环境中的可实现性、以

及与城市整体建设方案的协调性能够作为规划设计的重要约束。进一步的,将数字孪生技术与3D打印建筑等技术结合,实现综合能源站、配电房等基础设施的快速建设,将大大缩短从规划设计到建设运行的周期。

最后,数字孪生为规划方案的评价提供了更加拟实的测试环境。综合能源系统运行环节的源、荷不确定性将显著影响规划方案的实际性能。数字孪生一方面能够提供更加完备的运行模拟能力,支持考虑与外部风、光资源与环境温度等各种真实要素的交互;同时还能够聚集相似系统在全生命周期中得到的运行经验,使规划方案的性能评价更加客观和准确,为贴近现实的最优规划决策奠定了基础。

4.2 基于数字孪生的故障预警与预测性维护

运行维护环节是影响综合能源系统运行成本、能效与可靠性的重要因素^[38]。在现阶段,对综合能源系统运行风险诊断能力仍有不足,特别是对城市地下电、气、热管线的状态监测更加困难,定期检查仍然是能源系统运维的主要方式,这意味着很难找到系统运维成本与安全可靠水平之间的最佳平衡^[39],甚至可能导致严重故障损失。数字孪生在运维阶段的应用体现在两个层面:在设备层面,大量专用的传感量测数据可和设备历史运行数据等共同用于设备级数字孪生的构建,满足关键设备健康度评价等应用需求;在系统层面,各关键设备的风险特征信息可在系统级数字孪生中融合,利用同类型设备故障特征数据、历史运维数据、能源系统量测数据等共同完成对系统风险状态的刻画,从而为更加完备的状态监测、故障预警与预测维护提供支撑,如图5所示。其应用价值与意义体现在3个方面:

第一,借助数字孪生提供的全息数字镜像与可视化能力,常规手段难以获取的复杂环节内部状态信息能够通过虚拟现实、增强现实等技术手段直观呈现给运维人员,这给综合能源系统的快速异常发现、故障检测与诊断提供了重要手段,现场人员可以基于数字孪生提供的信息快速定位故障点并实施修复;

第二,利用数字孪生的多源数据集成利用能力,可基于系统运行历史、发展态势、设备状态、同类型设备故障统计等信息进行综合研判,预测供能环节运行寿命和故障概率,支持更加精准的预测性维护;并为各种运维方案提供灵活高效的虚拟测试与评估环境;

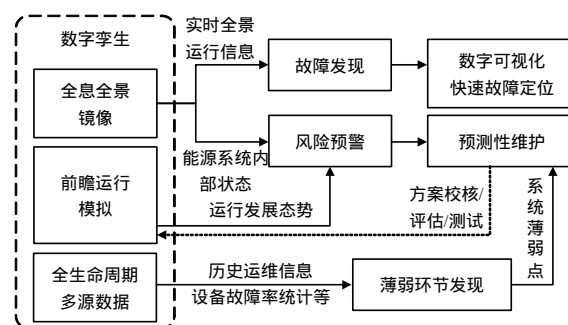


图5 综合能源系统故障预警与预测维护

Fig. 5 Fault alarm and predictive maintenance of IES based on DT

第三,数字孪生可从系统层面描述个体装备状态对整体系统运行水平的影响,能够将装置级的能效、可靠性等数据融合为整体系统级运行性能指标,进而可从全局视角下确定系统运行的薄弱点和关键环节,根据各环节影响作用不同灵活确定运维周期和运行方案,对降低系统运维成本、提升运维效率有着重要意义。

4.3 基于数字孪生的综合能源协调控制与优化

当前,对综合能源系统的运行优化大多基于特定的稳态模型实现。然而,实际系统中多类型能源的生产、传输、转换与消费特征难以采用简单模型刻画,而是与系统运行环境、工况等因素密切相关^[40-41],实现考虑不同装置真实状态的精细化运行调度对综合能源系统运行实践有着重要意义。对此,利用数字孪生对真实系统实时状态的全景镜像与行为特征刻画能力,能够将各种能源的调度响应速度、转换效率、装备状态、管线阻塞、传输耗散等复杂因素都在数字空间中呈现,从而能够将更全面的信息纳入到优化调度问题中来,实现多种能源形式生产、传输、消费全过程的精细化调度与管控,有效提升优化策略的实用价值,如图6所示。

借助数字孪生的精细化虚-实交互能力,优化得到的运行控制策略能够通过数字空间到现实空间的关联映射快速部署至底层装备,反馈至数字空间中的状态数据又能够用于综合判断控制效果和修

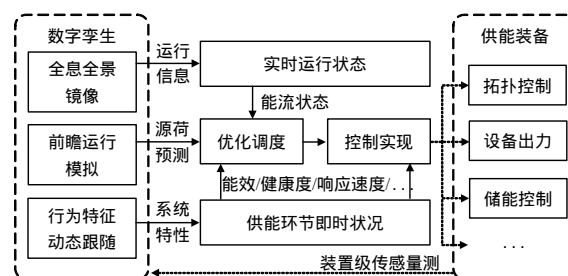


图6 基于数字孪生的综合能源系统运行优化

Fig. 6 Operation optimization of IES based on DT

正控制策略,由此可实现各种供能装置协调的精细化闭环控制,提升系统整体调控水平。

4.4 基于数字孪生的能源-城市多领域协同

未来智慧城市将具备更高的信息化和数字化水平,从而在整体上形成数字孪生城市的概念。此时,综合能源系统数字孪生可以作为其中的关键组成部分,在支撑城市发展与高效运行中发挥重要作用^[42],如图7所示。

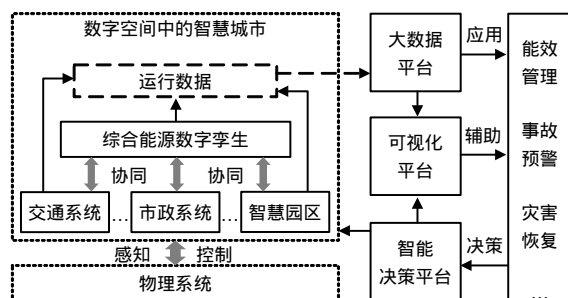


图7 综合能源系统数字孪生支撑下的智慧城市

Fig. 7 Smart city supported by IES DT

利用综合能源系统数字孪生的数据融合与利用能力,可形成城市发展的能源大数据基础,支撑各种高级数据分析应用^[43]。例如,通过数字孪生汇聚的电力、水力、热力、燃气等能源消费数据,并与城市人口、气象、地理等信息相结合,可用于研判城市经济发展态势,为城市规划建设提供更加丰富和准确的决策依据;利用数字孪生提供的用户侧模型与数据,能够刻画用户的生活与消费习惯,辅助形成新的城市管理与商业运营模式等^[44]。

能源安全是城市安全的重要内容。综合能源系统数字孪生的全景感知能力使其能够用于发现系统运行风险、判断故障位置,提升能源供应的安全性与可靠性^[45]。而进一步通过综合能源系统数字孪生与城市管理系统的结合,一方面能够有效计及城市环境灾害对能源安全的影响,同时也能在城市遭受极端灾害时及时恢复关键负荷能源供应,更好地发挥城市管理与调度功能。

综合能源系统数字孪生可以作为关键模块嵌入到智慧城市当中,通过与其他城市领域的统一数据接口,支撑与不同领域的协调和互动,实现城市全局运行优化^[46]。例如,随着电动汽车的普及,能源网与交通网将通过大规模的电动汽车紧密耦合在一起。交通系统将通过影响电动汽车充电需求分布,进而影响电力系统;反之,电力系统将通过影响充电站的服务能力和价格,影响电动汽车的出行行为,继而影响交通系统。未来智慧城市中,综合

能源系统数字孪生能够进一步与先进控制和人工智能等技术结合,使其能够基于对城市交通状态等信息的理解形成自身优化运行策略,并利用虚-实闭环实现能流和价格的实时调度控制,从而实现能源与城市各领域的有效互动。

5 结论

数字孪生可以作为数字化城市中海量数据与广泛连接的重要融合利用手段,将使能源系统与城市各领域在数字空间中的互联互通和协同运行成为可能,是未来智慧城市能源系统发展的重要方向。综合能源系统数字孪生核心功能的实现需要以有效的建模与仿真方法为基础,新的应用场景和功能目标则要求对传统仿真模拟技术进行新的发展和外延,突破包括多物理-信息混杂系统综合建模、数据驱动的复杂环节特性认知、多元异构模型求解、融合量测的多场景应用与反馈等多方面技术问题。分析表明,借助综合能源系统数字孪生的实时全息全景镜像、模块化集成、前瞻运行模拟、动态特性跟随等能力,其在规划设计、运行优化、预测维护、以及与城市的多领域协调互动等方面具有显著的发展潜力与应用价值。

从整体城市范畴来看,数字孪生在电力、交通、市政等领域已经开展了一些初步尝试,但其从理论方法到技术实践的过渡还需要经历一定的发展历程,依赖于大量的研究工作,以解决相关技术方法、标准架构、接口规范等方面的诸多难题。因此,开展综合能源系统的数字孪生技术研究,不仅是能源领域前沿理论技术探索所面临的迫切需求,同时也是未来数字中国建设实践的必要基础,具有重要研究意义。

参考文献

- [1] NEIROTTI P, DE MARCO A, CAGLIANO A C, et al. Current trends in smart city initiatives: some stylised facts[J]. Cities, 2014, 38: 25-36.
- [2] MOSANNENZADEH F, BISELLO A, VACCARO R, et al. Smart energy city development: a story told by urban planners[J]. Cities, 2017, 64: 54-65.
- [3] 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 Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13(in Chinese).

- [4] WANG Chengshan, LV Chaoxian, LI Peng, et al. Modeling and optimal operation of community integrated energy systems: a case study from China[J]. *Applied Energy*, 2018, 230: 1242-1254.
- [5] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5669-5681.
- WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).
- [6] GIRARDIN L, MARECHAL F, DUBUIS M, et al. EnerGis: a geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas[J]. *Energy*, 2010, 35(2): 830-840.
- [7] 张津珩, 王旭, 蒋传文, 等. 计及交通流量不确定性的多网耦合综合能源系统优化调度方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3081-3089.
- ZHANG Jinhui, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Optimal scheduling method of multi-network regional integrated energy system based on traffic Flow uncertainty[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3081-3089(in Chinese).
- [8] SHAO Changzheng, DING Yi, SIANO P, et al. A framework for incorporating demand response of smart buildings into the integrated heat and electricity energy system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(2): 1465-1475.
- [9] VAN BEUZekom I, MAZAIRAC L A J, GIBESCU M, et al. Optimal design and operation of an integrated multi-energy system for smart cities[C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Energy Conference*. Leuven, Belgium: IEEE, 2016: 1-7.
- [10] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(7): 198-207.
- JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(7): 198-207(in Chinese).
- [11] BOSCHERT S, ROSEN R. Digital twin-the simulation aspect[M]//HEHENBERGER P, BRADLEY D. *Mechatronic Futures*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016: 59-74.
- [12] GLAESSGEN E H, STARGEL D S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]//*Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. Honolulu: AIAA, 2012.
- [13] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 154798.
- [14] TAO Fei, ZHANG He, LIU Ang, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [15] 中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告(2019年)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2019.
- China Academy of Information and Communications Technology. Research report on digital twin city[R]. Beijing: China Academy of Information and Communications Technology, 2019.
- [16] SUN Hongbin, GUO Qinglai, ZHANG Boming, et al. Integrated energy management system: Concept, design, and demonstration in China[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2018, 6(2): 42-50.
- [17] BAČEKOVIC I, ØSTERGAARD P A. Local smart energy systems and cross-system integration[J]. *Energy*, 2018, 151: 812-825.
- [18] 刘洪, 郑楠, 葛少云, 等. 考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 52-64.
- LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 52-64(in Chinese).
- [19] GAO Shuang, CHAU K T, LIU Chunhua, et al. Integrated Energy management of plug-in electric vehicles in power grid with renewables[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(7): 3019-3027.
- [20] 王灿, 别朝红, 潘超琼, 等. 考虑期望损失的综合能源系统故障智能筛选和排序方法[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(21): 44-53.
- WANG Can, BIE Zhaozhong, PAN Chaoqiong, et al. Contingency intelligent screening and ranking approach for integrated energy system considering expected loss[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(21): 44-53(in Chinese).
- [21] ZHOU Yongzhi, GU Chenghong, WU Hao, et al. An equivalent model of gas networks for dynamic analysis of gas-electricity systems[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4255-4264.
- [22] 陈彬彬, 孙宏斌, 陈瑜玮, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(一): 气路[J]. *中国电机工程学报*, 2020,

- 40(2): 436-443.
- CHEN Binbin, SUN Hongbin, CHEN Yuwei, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(I): Gaseous circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 436-443(in Chinese).
- [23] 陈彬彬, 孙宏斌, 尹冠雄, 等. 综合能源系统分析的统一能路理论(二): 水路与热路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2133-2142.
- CHEN Binbin, SUN Hongbin, YIN Guanxiong, et al. Energy circuit theory of integrated energy system analysis(II): hydraulic circuit and thermal circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2133-2142(in Chinese).
- [24] 陈皓勇, 李明, 邱明, 等. 时变能量网络建模与分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(3): 243-254.
- CHEN Haoyong, LI Ming, QIU Ming, et al. Modeling and analysis of time-varying energy network[J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(3): 243-254(in Chinese).
- [25] 杨经纬, 张宁, 康重庆. 多能源网络的广义电路分析理论——(一)支路模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 21-32.
- YANG Jingwei, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Analysis theory of generalized electric circuit for multi-energy networks —Part one branch model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 21-32(in Chinese).
- [26] 赵俊华, 董朝阳, 文福栓, 等. 面向能源系统的数据科学: 理论、技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 1-11, 19.
- ZHAO Junhua, DONG Zhaoyang, WEN Fushuan, et al. Data science for energy systems: theory, techniques and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 1-11, 19(in Chinese).
- [27] XING Lining, JIAO Bo, DU Yonghao, et al. Intelligent energy-saving supervision system of urban buildings based on the internet of things: a case study[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4252-4261.
- [28] CHENG Lefeng, YU Tao, JIANG Haorong, et al. Energy Internet access equipment integrating cyber-physical systems: concepts, key technologies, system development, and application prospects[J]. IEEE Access, 2019, 7: 23127-23148.
- [29] 杨挺, 赵黎媛, 王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2-14.
- YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14(in Chinese).
- [30] 卫志农, 仲磊磊, 薛滨枫, 等. 基于数据驱动的电-热互联综合能源系统线性化潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 31-37.
- WEI Zhinong, ZHONG Leilei, XUE Mingfeng, et al. Linearization flow calculation for integrated electricity-heat energy system based on data-driven[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 31-37(in Chinese).
- [31] XU Xiandong, LI Kang, JIA Hongjie, et al. Data-driven dynamic modeling of coupled thermal and electric outputs of microturbines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1387-1396.
- [32] WU Jianghong, YANG Zhaoguang, WU Qinghao, et al. Transient behavior and dynamic performance of cascade heat pump water heater with thermal storage system[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 187-196.
- [33] GRAF S, LANZERATH F, SAPIENZA A, et al. Prediction of SCP and COP for adsorption heat pumps and chillers by combining the large-temperature-jump method and dynamic modeling[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 900-909.
- [34] KOTZUR L, MARKEWITZ P, ROBINIUS M, et al. Impact of different time series aggregation methods on optimal energy system design[J]. Renewable Energy, 2018, 117: 474-487.
- [35] GONZÁLEZ-VIDAL A, RAMALLO-GONZÁLEZ A P, TERROSO-SÁENZ F. Data driven modeling for energy consumption prediction in smart buildings[C]//2017 IEEE International Conference on Big Data(Big Data). Boston, MA, USA: IEEE, 2017: 4562-4569.
- [36] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3828.
- SHAO Chengcheng, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3828(in Chinese).
- [37] 沈欣炜, 郭庆来, 许银亮, 等. 考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 34-41.
- SHEN Xinwei, GUO Qinglai, XU Yinliang, et al. Robust planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 34-41(in Chinese).
- [38] CIVERCHIA F, BOCCHINO S, SALVADORI C, et al.

- Industrial internet of things monitoring solution for advanced predictive maintenance applications[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2017, 7: 4-12.
- [39] 刘云鹏, 许自强, 李刚, 等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 337-348.
- LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in condition based maintenance of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 337-348(in Chinese).
- [40] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电力-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678.
- ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678(in Chinese).
- [41] HUO Da, GU Chenghong, MA Kang, et al. Chance-constrained optimization for multienergy hub systems in a smart city[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1402-1412.
- [42] FONSECA J A, NGUYEN T A, SCHLUETER A, et al. City Energy Analyst(CEA): integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts[J]. Energy and Buildings, 2016, 113: 202-226.
- [43] ALLAM Z, DHUNNY Z A. On big data, artificial intelligence and smart cities[J]. Cities, 2019, 89: 80-91.
- [44] MARINAKIS V, DOUKAS H, TSAPELAS J, et al. From big data to smart energy services: An application for intelligent energy management[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 110: 572-586.
- [45] FAN Chao, ZHANG Cheng, YAHJIA A, et al. Disaster city digital twin: A vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management[J]. International Journal of Information Management, 2021, 56: 102049, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.102049>.
- [46] ZAHRAEE S M, ASSADI M K, SAIDUR R. Application of artificial intelligence methods for hybrid energy system optimization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 66: 617-630.



王成山

在线出版日期: 2021-01-20。

收稿日期: 2020-09-25。

作者简介:

王成山(1962), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统安全性分析、城市电网规划、分布式发电系统与微电网方面的研究工作, cswang@tju.edu.cn;

董博(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统建模与分析计算, dong.bo@tju.edu.cn;

*通信作者: 于浩(1988), 男, 博士, 讲师, 研究方向为智能配电网与综合能源系统运行仿真与优化, hao.yu@tju.edu.cn。

(责任编辑 乔宝榆)

Digital Twin and Its Application in Integrated Energy Systems of Smart Cities

WANG Chengshan¹, DONG Bo¹, YU Hao^{1*}, WU Jianzhong², YAN Jinyue³, LI Peng¹

(1. Tianjin University; 2. Cardiff University; 3. Mälardalen University)

KEY WORDS: smart city; integrated energy system; digital twin; data driven; cyber-physical system

The transition of traditional cities to smart cities has put forward novel and challenging needs for energy systems in energy supply, industrial production, and public services. Driven by information and communication technologies (ICT), conventional energy systems are undergoing profound transformation to integrated energy systems (IES). The construction of a digitalized and interactive IES with the concept of digital twin (DT) becomes feasible and critical for the operation, planning, market trading, and development of smart cities.

The DT is designed as a virtual replica for IES in the real world. It can be utilized as the digital representation in different stages such as planning, operation, and maintenance to enhance the performance in cost, efficiency, accuracy, etc. To fully capture the characteristics of IES, DT needs to consider the complexities due to the multi-time-scale, multi-energy-vector, high nonlinearity, and strong uncertainties. Therefore, the DT of IES requires a significant leap from conventional modeling and simulation methods to realize the following capabilities: 1) High-fidelity mirroring to satisfy multiple resolution analysis, 2) global observability to demonstrate the inner states of IES, 3) dynamic evolution to adapt to the changes in structure and parameters of IES, and 4) virtual-real interaction to synchronize the modification and control strategy that made in digital space to the real IES.

New technologies in sensors, communication, computation, modeling, and simulation of IES are promising to support the realization and application of DT, as shown in Fig. 1.

1) Novel modeling methods for IES. Unified models for the physical and cyber components of IES are required for DT. Considering the temporal and spatial scales, it is impractical to totally adopt detailed models. Coarse-to-fine-grained modeling and model order reduction methods should be considered.

2) Data-driven state recognition and analysis of the unobservable components in IES. Multi-source data from the stages of manufacturing, system planning and

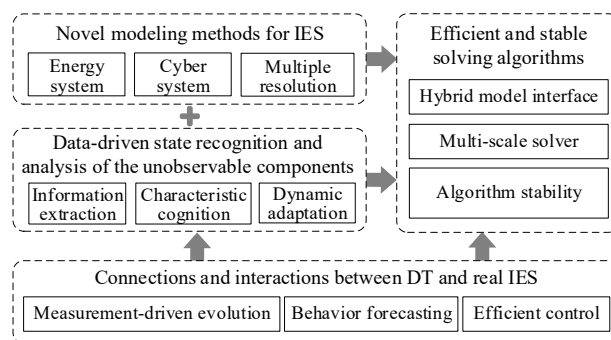


Fig. 1 Key technologies of DT in IES

construction, and operation and maintenance can be utilized to reconstruct the inner states and characteristics of IESs. The data also provides the resources to improve the accuracy of modeling and parameters during the IES's operation.

3) Efficient and stable solvers for DT. The DT is composed of heterogeneous models of electricity, heating, cooling, gas, etc. The stability issue can be resolved via novel solving algorithms or the combination of conventional methods for individual energy systems. Interfaces should be properly designed to accommodate the data-driven and multiple-mechanism-driven models.

4) Connections and interactions between the digital space and the real world. The critical measurements can be utilized to construct the boundary, constraint, and reference for the DT, guaranteeing the global and continuous consistency between digital and real IES. The real environment can be established for DT to forecast the behaviors of IES. The decisions obtained in DT also need to be fed back to the real world to perform efficient control.

The DT can bring benefits for the life-time development of IES including planning and design, maintenance and operation, coordinated control, and city-level collaboration. This paper emphasizes the demand, value, and significance of the DT technology in IES. Some instructive perspectives of driven forces, challenges, key technologies, and application scenarios are discussed for future studies.