

计算机集成制造系统
Computer Integrated Manufacturing Systems
ISSN 1006-5911, CN 11-5946/TP

《计算机集成制造系统》网络首发论文

题目: 数字孪生智慧燃气系统: 概念、架构与应用
作者: 王尚刚, 程江峰, 高顺利, 杨顺昆, 史翔, 张晓烨, 靳志军, 崔瑶, 许明, 金小辉, 邹孝付, 陶飞
收稿日期: 2021-08-30
网络首发日期: 2021-11-29
引用格式: 王尚刚, 程江峰, 高顺利, 杨顺昆, 史翔, 张晓烨, 靳志军, 崔瑶, 许明, 金小辉, 邹孝付, 陶飞. 数字孪生智慧燃气系统: 概念、架构与应用[J/OL]. 计算机集成制造系统.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20211129.0852.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

数字孪生智慧燃气系统：概念、架构与应用

王尚刚¹，程江峰²，高顺利³，杨顺昆¹，史翔⁴，张晓烨⁴，靳志军⁴，崔瑶⁴，
许明⁴，金小辉⁴，邹孝付²，陶飞²

(1. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院，北京 100191；2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191；3. 北京市燃气集团有限责任公司，北京 100035；4. 北京航天拓普高科技有限责任公司，北京 100176)

摘要：燃气作为重要的能源之一，在生活与生产中发挥着重要作用。本文首先调研分析了燃气运营呈现出的自动化、精准化、便捷化等发展趋势，并指出当前面临的数据获取不全面、信息系统不兼容、运营操作不精确、用户服务不便捷等挑战。在此基础上，将数字孪生技术与燃气供给侧、输配侧和需求侧的关键场景、关键对象、关键服务紧密结合，提出了数字孪生智慧燃气系统，从物理实体、虚拟模型、数据中心、信息系统及应用服务等五个方面阐述其体系架构和共性关键技术，并探讨分析了数字孪生智慧燃气系统中管网设计、完整性管理、巡检、应急、输配调度及用户服务的解决方案。提出的数字孪生智慧燃气系统在燃气企业中的应用实践被详细分析，以期能为智慧燃气的发展与建设提供参考。

关键词：数字孪生；智慧燃气；管网设计；完整性管理；巡检；应急；输配调度；用户服务

中图分类号：TU996

文献标识码：A

Digital twin-based smart gas system: Concepts, architecture and applications

WANG Shanggang¹, CHENG Jiangfeng², GAO Shunli³, YANG Shunkun¹, SHI Xiang⁴,
ZHANG Xiaoye⁴, JIN Zhijun⁴, CUI Yao⁴, XU Ming⁴, JIN Xiaohui⁴, ZOU Xiaofu², TAO
Fei²

(1. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Beijing Gas Group Co. Ltd., Beijing 100035, China; 4. Beijing Hangtian Tuopu Hi-Tech Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: As one of the important energy sources, gas plays an important role in production and life. The development trends in gas industry are investigated and analyzed, such as automation, precision, and convenience, at the same time, the

收稿日期：2021-08-30；修订日期：2021-09-22。Received 30 Aug. 2021; accepted 22 Sep. 2021.

基金项目：国家重点研发计划资助项目（2018YFB1500800）；国家电网有限公司科技资助项目（SGTJDK00DYJS2000148）。**Foundation items:** Project supported by the National Key Research & Development Program, China (No. 2018YFB1500800), and the Science and Technology Program of State Grid Corporation, China (No. SGTJDK00DYJS2000148).

challenges are pointed out, such as incomplete data acquisition, incompatibility of information systems, inaccurate operations, and inconvenient user services. Based on the investigation and analysis, a digital twin-based smart gas system is proposed. In the system, the digital twin technology is tightly integrated with key scenarios, key objects, and key services of the gas supply side, transmission and distribution side, and demand side. The architecture and common key technologies of this system are explained from the physical entity, virtual model, data center, information systems and application service. Furthermore, six types of service solutions in the system are discussed and analyzed, including pipe network design, integrity management, inspection, emergency response, transmission and distribution scheduling, and user service. Finally, the application practice of the proposed system solution in some gas companies is explained in detail, to provide a reference for the development and construction of smart gas.

Keywords: digital twin; smart gas network; pipe network design; integrity management; inspection; emergency response; transmission and distribution scheduling; user service

0 引言

燃气作为重要的燃料与原料，以及有效的储能手段与能源转换中枢，是生产与生活的重要基础。当前，燃气产业各方面正迅速发展，呈现多种趋势的同时也面临着诸多挑战，影响着燃气提供商、运营商、使用者等产业链中各节点的战略决策：

(1) 在**行业发展**方面，主要呈现出市场下沉化、消费结构优化、空间分布化、多能综合化等趋势：①随着一、二线城市燃气项目完成整合、“煤改气”政策的推行^[1]，乡镇与农村成为新的开发市场，使燃气**市场下沉化**^[2]。②当前我国燃气消费结构中，化工用气仍占据不小比例，但是在居民用气、发电、工业用气等方面占比渐增，**消费结构优化**^[3]。③随着分布式能源技术的发展，燃气供能方式在空间上从集中式转向集中式与**分布式**结合的方式，提升了燃气供能的安全性与灵活性^[4-5]。④随着能源互联网的发展与销售市场的逐步开放，燃气企业业务从当前单一的燃气能转向包括售电、热电联产、冷热电三联供等**多能综合化服务**^[6]。在行业发展的同时，燃气行业发展也面临着来自行业内的竞争，如何提升燃气对其它能源的竞争力，打破不同能源系统间相对隔绝的状况，以及解决分布式燃气发展中面临的技术困难等成为当前燃气行业发展中亟待解决的挑战。

(2) 在**需求**发展方面，主要呈现出运营一体化、价格市场化与服务增值化等趋势。①随着管输与销售的逐渐分离，燃气上游企业可直供燃气大用户，下游企业向上游争取气源，上下游企业双向渗透，最终实现上下游**运营一体化**的发展^[7]。②管输与销售分离、大用户直供以及燃气定价政策的改变，使燃气**价格市场化**加深^[8]。③燃气服务从单一的燃气分销

转向分销、燃气具推荐、燃气保险等增值业务共同发展的新模式，**服务增值化**为新的利润增长点^[9-10]。④燃气安全性进一步提升。能源供应安全方面，建立安全、多元化的能源体系成为紧迫议题^[11]；城市燃气运营安全方面，尤其是燃气输送、系统数据信息反馈等重点环节获得发展^[12]；用气安全方面，安全型燃气表的推广^[13]、户内用气监控能力的提升^[14]增加了户内安全性。然而，随着能源行业的发展，燃气运营商面临着行业内外更激烈的竞争，如何向用户推广并提供增值服务成为当前燃气需求方面面临的重大挑战；作为燃气运营的重点，燃气安全是燃气企业面临的重要议题。

(3)在**技术发展**方面，主要呈现出数据获取便捷化、数据中心规范化、信息系统平台化及运维管理智能化，如图 1 所示。①随着传感器、智能燃气表具、新兴通信技术等新设备、新技术的使用，提升了数据获取的**自动化、实时化、远程化**^[14]。②燃气数据的**标准化**正逐步提升对数据的定义、使用及对业务的理解；为消除燃气运营中存在的各种数据孤岛，燃气数据正实现**一体化**，整合燃气运营全要素、全流程、全业务数据；对数据进行**数据融合**，作为更深入挖掘数据价值的基础。通过数据的标准化、一体化及融合化，最终实现数据中心的**规范化**^[16-17]。③**统筹建设**各信息化系统，对相关系统**统一管理**^[18]，**自主开发**仿真、工控等核心模块^[19]，最终实现信息系统的**平台化**。④在燃气运维管理方面，基于综合多源数据进行管网可视化交互设计并仿真验证，并在施工时交互修正、优化设计方案^[20]，实现**管网设计交互化**；基于实时监测、仿真模拟等功能，实现管网三维动态可视化、故障预警、自动诊断等功能，提升完整性管理的准确度，实现**完整性管理定量化**；基于便捷式巡检设备、传感技术、无线通信技术等新设备和新技术，可实现制定巡检方案、分配巡检资源、定位巡检路线^[21]、及时采集并传输数据^[22-23]、巡检路线回顾、巡检效率分析等功能，实现**巡检在线化**；基于对燃气运维过程的实时监控、数据分析、远程感知及控制等，燃气事故发生前可实时监控、预判事故，事故发生时可自动报警、规划应急路径、调度应急资源^[24-25]，事故发生后可模拟应急方案^[2-3]、与指挥中心实时交互^[26]，实现**应急一体化**；基于更全面深入的数据分析、多气源综合供给，并结合对燃气管网的全面监控^[27-28]，实现多气源/多时段/多压力级制下的**输配调度精细化**^[29-30]；通过主动捕捉用户需求并利用线上加线下的服务形式，实现**服务主动化与线上化**^[31]。燃气技术在发展的同时也存在如部分数据难获取、难共享、数据标准混乱、信息系统兼容性差、运营操作人工经验依赖重、用户服务方式滞后等问题亟待解决。



图 1 燃气发展技术趋势

为促进燃气在行业、需求和技术方面的信息化、数字化和智能化，越来越多的新技术被应用其中。如云计算因其强扩展性，可被用于解决燃气网的测量感知、数字空间建模、仿真分析决策等关键问题^[32]；应用大数据技术整合长输管线全生命周期数据，解决管线环焊缝与空间位置对应的问题^[33]；应用物联网技术监测燃气管网，为燃气调度、管网维护、应急处理等操作提供决策依据^[34]；结合移动通信技术与地理信息系统（Geographic Information System, GIS），提高空间数据处理效率、提升管线巡检水平^[35]；针对燃气调压中存在的非线性、不确定性等特征，应用人工智能技术提高调压精度及可靠性^[36]。

新技术的应用一定程度上提高了燃气运营效率、降低了运营成本、优化了用户体验，然而这些实践往往只能解决某一方面的问题，不能成为智慧燃气在全流程、全业务、全生命周期的整体应对方案。当前燃气行业面临的数据获取不全面、数据中心不规范、信息系统不兼容、运维管理不智能等难题和挑战，其核心问题是燃气供给侧、输配侧和需求侧的物理世界与信息世界融合不充分。因此，本文结合数字孪生技术，提出数字孪生智慧燃气系统，为智慧燃气的建设提供一种方案。

数字孪生技术作为一种解决物理世界与信息世界互联与融合的方法^[37-38]，当前已被广泛应用于航空航天、医疗、城市建设等多个领域^[39]，在设计、生产、故障预测等诸多方面发挥重要作用^[40]。数字孪生技术可实现对物理世界的刻画、仿真、优化等功能^[41]，为解决

智慧燃气发展建设中面临的挑战提供了有效途径^[42]。如对物理实体的高保真映射，可用于燃气设备设施和运营操作的可视化呈现；数据整合可实现燃气运营全流程、全周期、全业务的数据集成、融合与共享；虚实交互可实现对燃气设备设施的自动化、远程化操控。在实际应用中，已有中缅油气管道利用数字恢复技术构建管道数字孪生体，实现管道的可视化运行、设备拆解培训及应急抢险等作业^[43]。

综上所述，本文结合数字孪生技术，提出数字孪生智慧燃气系统，从物理实体、虚拟模型、数据中心、信息系统及应用服务五个方面阐述数字孪生智慧燃气系统；探讨分析管网设计、完整性管理、巡检、应急、输配调度及用户服务六类应用；最后开展相关实践工作，验证本文提出的数字孪生智慧燃气系统的可行性。

1 数字孪生智慧燃气系统体系架构

数字孪生智慧燃气系统是将数字孪生技术应用于燃气运营中，与燃气系统物理实体、数据中心、信息系统等相结合，从而完成辅助管网设计、智能应急、精准输配调度等应用服务的新一代燃气系统。结合燃气系统基本架构与数字孪生五维模型^[39]，阐述数字孪生智慧燃气系统的体系架构，并分析建设数字孪生智慧燃气系统所需的一些关键技术。

1.1 体系结构

数字孪生智慧燃气系统体系架构如图 2 所示，包括物理实体、虚拟模型、孪生数据、信息系统及应用服务五部分。



物理实体是智慧燃气系统的物理承载，包括所有可连入燃气系统的终端，如供给侧的燃气门站、储气罐等，输配侧的管线、阀井等，需求侧的燃气表、燃气具等相关设备设施；以及人员、车辆等企业资源。物理实体通过传感器、人工测量等方式实现对燃气系统的感知，通过控制器实现不同部件的协同调控；物理实体与虚拟模型实时同步、交互，在迭代中不断优化。

结合本文作者团队已有工作^[39], 数字孪生智慧燃气系统虚拟模型包括燃气系统的几何 (如管网口径、走向、埋深等)、物理 (如管网材料、气质组分等)、行为 (如阀门开合、气体放散等) 及规则 (管网对气体的承载能力、土壤环境对管道的腐蚀等) 模型。从复杂度上, 从单元级、系统级与复杂系统级上逐步构建、组装、验证虚拟模型, 最终在各方面、各层级上均实现精准建模。虚拟模型接收来自物理实体的数据、更新状态, 同时根据相应的理论与方法进行仿真、优化、决策等操作, 并将结果传递到物理实体, 与物理实体保持实时同步、交互。

1.1.3 孪生数据中心

孪生数据中心是智慧燃气系统的数据集散地。一方面，数据中心集成了智慧燃气系统物理实体、虚拟模型、信息系统以及应用服务所产生的全生命周期数据；另一方面，数据中心向燃气系统的各部分提供数据，作为控制物理实体、更新虚拟模型、驱动信息系统、实现各项应用服务的数据基础。通过孪生数据中心，数据得以在燃气系统内流通与共享。

1.1.4 信息系统

信息系统是承载智慧燃气系统中各个应用服务的主体。将相关的信息系统集成到系统平台上，实现统一管理、协调运行。燃气系统中信息系统主要分为生产运营类、市场营销类及企业管理类，不同类型的智能系统各司其责，共同支撑智慧燃气系统各应用服务的执行。

（1）生产运营类。生产运营类信息系统指与燃气生产运营相关的信息系统，主要包括数据采集与监视控制（Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA）系统及地理信息系统。前者可实现实时监测、数据采集、远程控制等功能；后者是燃气运营中管网位置、周围环境指示、移动巡检地图等功能的重要载体。其他如智能巡检系统将巡检过程中路线规划、数据采集、到位监督等功能综合为一体，应急响应系统可结合 GIS 与视频，将应急现场与指挥中心实时连接。

（2）市场营销类。市场营销类信息系统主要与燃气市场营销活动相关，如用户管理系统主要处理与用户直接相关的业务，如抄表、计费、报修等；用户发展管理系统与发展用户、管理项目相关，如报装、规划、设计、施工、验收等。

（3）企业管理类。企业管理类系统主要涉及企业的资产管理及企业办公相关工作，如企业资产管理系统用于提高资产运营效率、降低维护成本；协同办公管理系统连通各办公环境，提高企业内部信息流畅度。

1.1.5 应用服务

应用服务是智慧燃气系统表现出的一系列功能和服务的总和，主要包括管网设计、完整性管理、燃气巡检、应急响应、智能输配调度、及用户服务等。

（1）管网设计。孪生数据中心集成管网规划设计相关的多源数据，提供全面的数据基础；规划设计时，通过虚拟模型进行可视化交互设计并仿真验证，确定最优方案；施工时，对比设计方案与施工结果，两者交互并及时修正。

(2) 完整性管理。在进行风险评价及完整性评价时，可利用虚拟模型进行评价结果量化，提高风险与故障预警的准确性；在进行维修维护前，通过对维护维修方案进行仿真验证，提高维修维护的效果与效率。

(3) 燃气巡检。利用虚拟模型进行巡检方案制定，实现按需巡检、精准巡检；利用虚拟模型的可视化功能向巡检人员提供虚实一体的巡检辅助，如定位辅助、操作引导、埋地管线指示等。

(4) 应急响应。基于实时监控，利用虚拟模型对管网状态进行评估，及时、主动预报燃气事故；结合报警综合信息、GIS 系统、虚拟模型仿真，及时规划应急路线、调配应急资源；现场处置时，通过虚拟模型实时仿真事故状况及应急方案，辅助现场人员及指挥中心进行决策。

(5) 输配调度。根据用户用气数据及其影响因素进行需求预测，根据供气数据进行供应预测并进行气源协调，在管网压力、温度、流量等约束条件下，利用虚拟模型仿真燃气输配调度方案，确定调度剖面、各参数设置等。

(6) 用户服务。通过对用户用气数据的分析与预测，可提前捕捉用户需求，实现主动服务；结合孪生数据、云平台、移动互联网等，实现线上+线下的服务方式，提供便捷服务；除燃气分销外，根据用户不同需求提供如燃气保险、节能减排分析等增值服务。

1.2 关键技术

为构建、运行数字孪生智慧燃气系统，需要相关关键技术的支持。结合本文提出的数字孪生智慧燃气系统体系架构，按架构中五部分划分为如下关键技术：

(1) 物理实体监测与控制技术

数字孪生智慧燃气系统中，需要对物理实体实现实时监测与控制，所需技术包括：①对燃气系统物理实体监测技术，如管网状态实时感知、气体泄漏检测、管道阴极检测等技术；②对燃气系统物理体实控制技术，如分布式控制、协同控制等技术；③物理实体与虚拟模型及数据中心间数据传输技术，可应用如北斗短报文、NB-IoT、5G 等技术。

(2) 虚拟模型构建与管理技术

虚拟模型构建与管理技术是支撑建模、仿真、优化、决策辅助等功能的技术，包括：①虚拟模型构建技术，如燃气管网几何模型、物理模型、行为模型等的构建、组装、验证

等技术；②虚拟模型管理技术，如模型的查询、复用等；③虚实交互技术；⑥虚拟模型自修正/自演化技术等。

（3）孪生数据存储与管理技术

孪生数据存储与管理技术对数字孪生智慧燃气系统中产生的全业务、全流程、全周期数据进行一体化存储与管理，实现数据的标准化、共享及融合。包括：①孪生数据存储技术，如数据自动化采集、远程自动化传输、数据标准转换等技术；②孪生数据预处理技术，如数据清洗、数据归一化、数据融合等技术；③孪生数据共享相关技术，如数据协议标准化、跨数据库共享、数据自更新等技术。

（4）信息系统构建与管理技术

信息系统构建与管理技术辅助企业进行信息系统的规划、开发、部署、使用等工作，包括：①信息功能解耦技术，用于梳理、分解各个系统服务，降低各系统间功能的耦合性；②服务治理技术，明确各系统功能类别、数据标准、接口与协议等事项，确保各系统间的兼容性与共享程度；③企业服务总线技术、微服务技术等，将各系统间不同功能的集成与互联互通。

（5）燃气应用与服务技术

燃气系统应用服务是燃气企业日常最重要的活动，相关支撑技术包括：管网规划设计技术用于提升管网规划效果和效率，提升管网全生命周期效益。包括：①管网规划设计相关技术，如用户规模预测、管网可视化设计、管网全生命周期仿真验证等技术；②完整性管理相关技术，如阴极保护、完整性评价、风险评价等技术；③燃气巡检相关技术，如按需定制巡检路线、气体泄漏检测等技术；④应急相关技术，如警情自动上报、警情信息综合、应急方案模拟等技术；⑤输配调度相关技术，如气源协调、状态监控、调度方案仿真等技术；⑥用户服务相关技术，如用户需求预测、用户需求捕捉等技术。

2 数字孪生智慧燃气应用服务

2.1 基于数字孪生的管网设计

基于数字孪生的管网设计主要包括需求分析、设计仿真及施工交互三个步骤，数字孪生技术可实现市场需求分析与预测、设计方案仿真验证、施工辅助等作用，使物理设计与数字孪生设计同步，如图 3 所示。

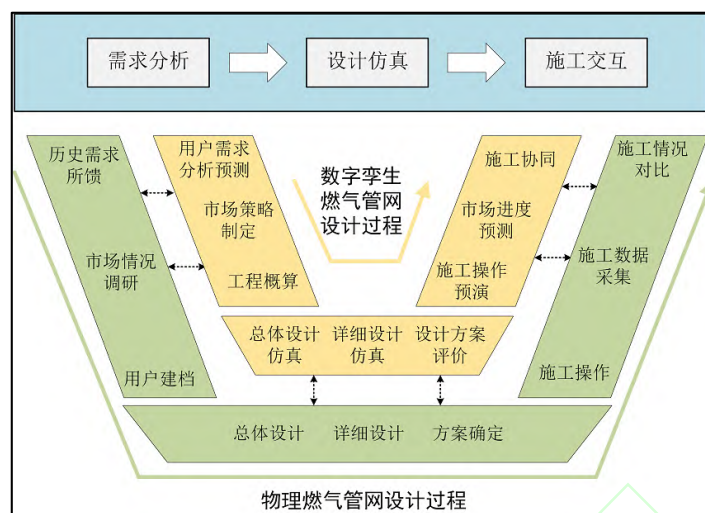


图 3 基于数字孪生的管网规划设计

(1) 需求分析

在物理过程中，对历史需求、市场情况等需求信息进行收集或调研并进行用户建档，如用户数量、类型、地理分布、城市规划建设、其他管网建设等数据。基于得到的数据并参考已有用户需求管理模型，虚拟模型可进行用户需求分析与预测、市场策略制定、工程概算等工作，如计算用户规模、预测用气量分布等。

(2) 设计仿真

设计仿真主要包括总体设计、详细设计及方案评价三项工作。规划设计人员在物理世界进行管网设计的同时，利用虚拟模型进行可视化交互，并对设计方案全寿命周期内的输配调度、完整性管理、应急响应等各项燃气应用进行仿真，验证方案的安全性、可靠性、经济性等指标。经过迭代优化，确定最终方案，即管网设计阶段的数字孪生模型。

(3) 施工交互

施工交互主要包括施工数据采集、施工协同、施工辅助三项工作。在施工过程中，利用传感器、三维扫描仪、人工测量等方式采集管网施工数据。同时，对比实测数据与设计方 案，核验施工过程并及时调整。在施工过程中，利用虚拟模型辅助操作预演、参数确定、进度预测等作业，提高施工效果和效率。

2.2 基于数字孪生的管网完整性管理

数字孪生技术贯穿于燃气完整性管理全过程，与物理实体中完整性管理相互促进，如图 4 所示。

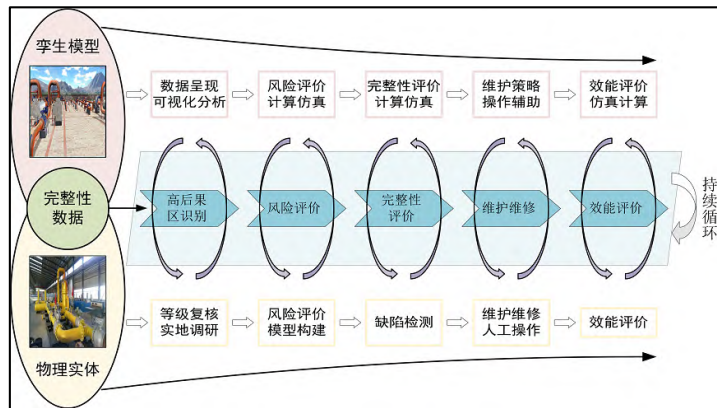


图 4 基于数字孪生的管网完整性管理

（1）完整性数据整合

收集并整理完整性相关数据，包括物理管网完整性数据采集，如管网测量、运行监测、巡检维修数据等；虚拟模型完整性数据，如管网三维模型、运行仿真、评价指标数据等。对数据电子化、标准化，经过集成与融合后，导入管网完整性数据库中。

（2）高后果区识别

对物理实体主要采用等级复核法与实地调研进行高后果区别，同时结合虚拟模型进行可视化分析，全方位呈现管网设备设施及其周围环境情况，精准确定高后果区类别、位置、等级等信息。

（3）风险评价

对风险因素进行识别，并导入虚拟模型进行仿真模拟，确定风险发生的可能性、严重性、可能的损失等结果，判定风险等级。

（4）完整性评价

通过内检测法、压力试验法、直接评价法等技术，对物理管网进行缺陷检测。将检测数据导入虚拟模型，使用人工智能、大数据等技术对管网的剩余寿命、损失速率等状态进行评价分析，并将结果进行可视化呈现。

（5）维护维修

基于完整性评价结果，利用虚拟模型仿真来确定维护策略，结合 VR/AR、北斗定位等技术进行维护维修辅助，实现路线指引、操作预演、信息呈现等功能。

（6）效能评价

维护维修后，将完整性管理全流程数据导入完整性数据库中，对该次完整性完整过程的效能进行评价，确定下一步的完整性管理时间、对象等信息，保证管网始终处于安全、完整、可靠的运行状态之下。

(7) 完整性管理提升燃气输配安全

管网完整性管理是提升燃气输配安全的重要组成部分。对管网基础设施设施的监测、控制、维护维修等是保证燃气运营的重要步骤，完整性管理在数据采集与处理、风险分析等方面成为提升燃气运营安全的重要手段。

2.3 基于数字孪生的燃气巡检

数字孪生技术在巡检方案制定、巡检人员管理、巡检数据记录及气体泄漏分析等方面发挥重要作用。将燃气系统物理实体的数据采集传输至虚拟模型，虚拟模型通过数据分析、仿真验证等方法获得巡检相关结果并反馈至物理实体，最终达到虚实一体的全空间、自适应的智能巡检，如图 5 所示。

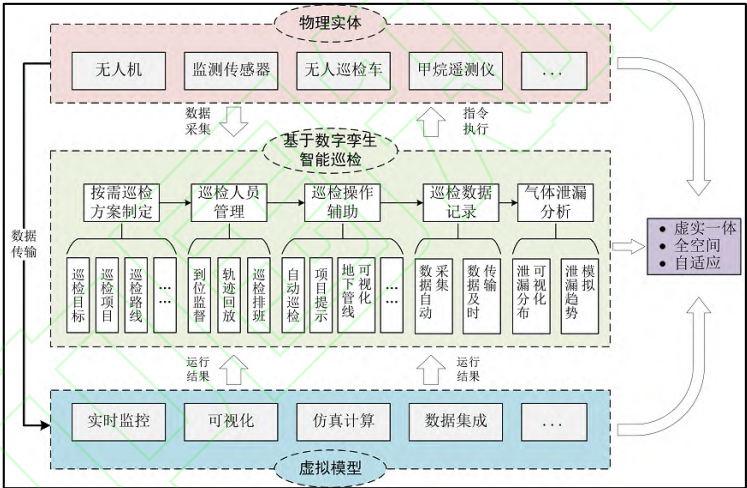


图 5 基于数字孪生的燃气巡检

(1) 巡检方案按需制定

设定巡检目标、巡检项目、巡检路线、巡检时间等参数，将这些参数导入孪生数据与虚拟模型中，分析管网状态、衡量巡检必要性与巡检成本，模拟仿真按需巡检的巡检方案，确定巡检项目、巡检路线、巡检频率等参数。

(2) 巡检人员管理

结合精确定位技术、设备及数字孪生可视化技术，可对巡检人员进行更精确的管理，实现巡检到位监督、巡检轨迹回放、巡检排班等功能，提高巡检人员的巡检效率。

（3）巡检操作辅助

结合数字孪生技术与 AR/VR、北斗定位等技术，辅助巡检操作，如利用无人机、无人巡检车实现自动巡检，对巡检人员进行埋地管网可视化指示、巡检项目提示等。

（4）巡检数据采集与传输

采集并记录巡检数据，如巡检到位情况、巡检目标状态、巡检时刻等数据，将巡检数据进行初步处理后上传到智慧燃气孪生数据中心，可用于新一轮巡检方案的制定。

（5）气体泄漏分析

气体泄漏情况是燃气巡检工作的重点，利用无人巡检车、甲烷遥测仪等设备，可以精确探测燃气泄漏情况。同时，将测得数据与虚拟模型联结，可模拟燃气泄漏趋势，绘制燃气泄漏云图。

2.4 基于数字孪生的燃气应急

基于数字孪生的应急响应主要包括警情上报、紧急处置自动化和应急策略增强三部分，数字孪生技术主要可应用于自动化接警处置及对应急策略进行仿真验证，实现虚实同步的智能应急，如图 6 所示。

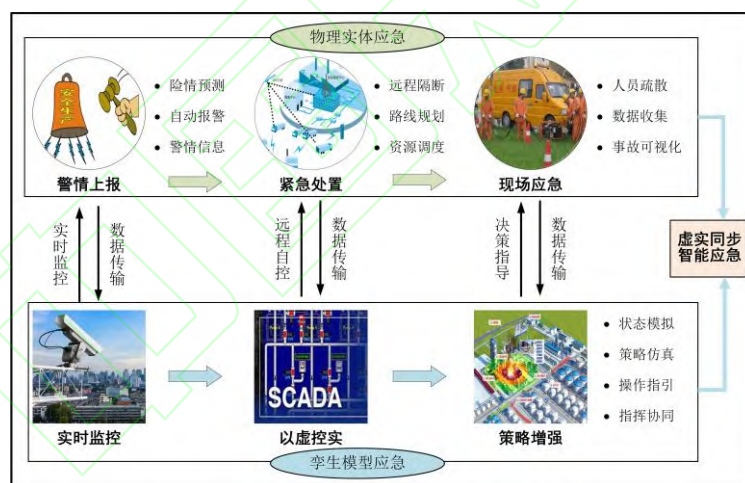


图 6 基于数字孪生的应急响应

（1）主动报警

险情预测。基于实时监控数据，虚拟模型可对燃气系统物理实体进行险情预测，针对高危险级别的故障进行险情提示。

警情自动上报。事故发生时，将包括事故类型、事故地点、管网参数等警情信息自动上报，并远程自动传输到数字孪生数据中心。

（2）接警处置

紧急处理。接警后，通过虚拟模型确定紧急处置方式，并利用数字孪生虚实交互功能，从虚拟模型对物理实体进行远程控制，如向周围民众发出警报、远程隔断、放散等操作。

及时出警。在紧急处置的同时，基于虚拟模型对企业资源的监视、管理调配应急资源；根据应急资源与事故地点间的交通情况，结合 GIS、北斗定位等系统，利用虚拟模型规划最优路径，减少应急反应时间。

(3) 现场应急

数据综合。融合警情上报数据、智能 SCADA 系统实时监测数据、事故现场采集数据及燃气网虚拟模型实时仿真数据，获得应急响应相关的综合数据，并将数据传输到数字孪生数据中心。

应急策略仿真。基于当前及历史应急响应相关数据，对应急策略进行仿真验证，确定最优应急策略；应急操作时，虚拟模型结合 AR/VR 等技术，实现可视化、虚实交互、操作指引等功能，辅助现场人员进行应急操作。

远程指挥。在现场应急时，通过远程数据传输将现场数据、画面、音频等信息传输到指挥中心，便于指挥中心决策，实现应急现场与指挥中心的协同。

2.5 基于数字孪生的输配调度

基于数字孪生的燃气输配调度重点在于对供给侧、需求侧及输配侧进行仿真，并将仿真策略应用到物理实体当中，数字孪生技术可用于需求预测、供给预测，以及调度方案的计算和仿真，如图 7 所示。

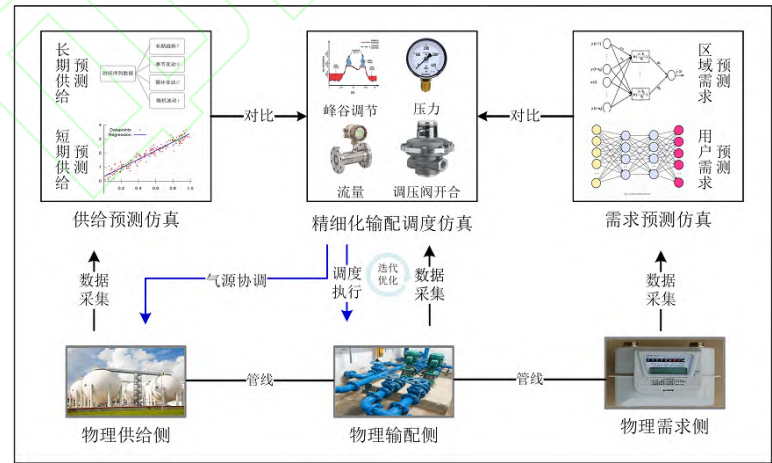


图 7 基于数字孪生的燃气输配调度

(1) 数据采集

综合与输配调度相关的数据，包括燃气系统物理实体在供给侧、输配侧、需求侧的实测数据，如供给侧的气源类型、数量、地理位置等数据，输配侧的管网压力限制、管径、管网拓扑结构等数据，需求侧的用户类型、用户数量、大用户用气申报等数据，并将数据传输到虚拟模型当中。

(2) 调度仿真

供给预测与需求预测。基于供给侧、需求侧相关数据，利用虚拟模型进行多气源/多压力级制/多时段/多地区等不同条件下地供给预测与需求预测。在供给侧预测时，结合燃气气源，如生物质气、煤质气、LNG 等多种气源，保证供气的多样性与安全性。

输配方案仿真。基于燃气系统物理实体输配侧相关数据，结合供给预测与需求预测，对输配方案进行仿真。确定输配调度优化目标，如压力均匀程度、供气稳定程度、设备磨损要求等；确定约束条件，主要包括气源供气压力与管网压力界限；利用虚拟模型仿真不同参数下的输配调度策略，确定最优压力、流量、阀门开合角度等参数。

(3) 方案应用

将调度方案应用到燃气系统物理实体中，实现多气源/多压力级制/多时段/多地区的精细化调度。在供给侧完成气源协调工作；在输配侧将调度方案导入智能 SCADA 系统，对管网设备进行控制，用于指示现场操作人员手动调控设备，向企业调度中心提供决策依据等。对输配调度结果进行实时监测，持续执行以上步骤，迭代优化输配调度过程。

2.6 基于数字孪生的用户服务

基于数字孪生的燃气用户服务主要包括主动捕捉用户需求、增值服务提供及提升用户服务三个步骤，数字孪生技术可用于分析用户需求、预测增值服务效果、提升服务便捷性等方面，如图 8 所示。

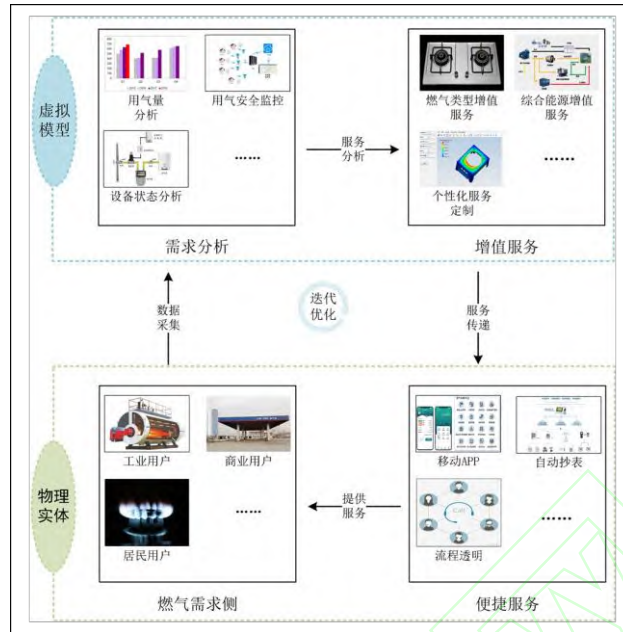


图8 基于数字孪生的用户服务

（1）需求分析

在物理燃气系统的需求侧，对各类型用户用能数据进行采集，并传输到虚拟模型中，对用户需求进行明确、分类、收集与整理，结合大数据分析、数据挖掘等方法，对用户需

（2）增值服务

提供燃气类型增值服务。当前燃气运营商主要业务为单一的接驳、售气服务，可基于燃气拓展增值服务，如发展燃气灶、燃气具、燃气锅炉等燃气直接下游产品，以及如燃气空调、燃气干衣机等新型燃气设备的市场。

提供综合能源增值服务。随着燃气与其他能源的融合以及能源互联网的发展，燃气运营商可以提供综合能源服务，如提供气、电、热、冷等多种能源，并提供如综合用能分析、用能切换、节能减排方案制定等配套服务。

个性化服务。根据用户需求，为用户提升定制化服务，如燃气具定制、设备定时维修、燃气保险等服务。

服务模拟。根据用户需求分析结果以及已有增值服务积累数据，利用虚拟模型对提供增值服务的面向用户人群、定价、推广策略等进行模拟，据此向用户提供相适应的服务。

（3）便捷服务

转变服务方式。升级基础设施、完善信息系统、提升服务流程透明度，结合虚拟模型中用户服务功能与新一代信息技术，借助网页、微信、移动应用等工具，将如抄表、缴费、开户、销户等服务从线下转移至线上，或形成线上为主线下为辅的服务方式，提升服务便捷性。

提升服务质量。基于需求捕捉、增值服务、线上服务等功能，提升对用户需求的响应速度、服务准确度、用户满意度等指标，从而提升服务质量。

(4) 户内安全提升

户内安全监测。基于安全型燃气表、智能燃气泄漏检测装置等设备的更新与使用，可对用户室内燃气用气数据、设备状态等进行实时采集，通过虚拟模型进行数据分析，监测用气安全。

户内安全控制。基于远程控制阀、切断阀等设备，当用户室内发生燃气泄漏等，虚拟模型可紧急采取及时报警、切断阀门、放散燃气等操作，最大限度降低用户损失。

3 相关实践工作

3.1 数字孪生燃气管网综合调度指挥系统研究及实践

为解决现有燃气管网调度指挥系统在运行调度、应急指挥、决策支持等方面信息化、智能化水平不足的问题，本文作者团队结合数字孪生技术，在燃气管道数字化构建、燃气信息系统整合方面进行了相关研究。

在燃气管道数字化构建上，以燃气管网地理信息数据为基础，通过数字孪生技术，集成管网运行监控、调度管理、应急指挥、管道完整性管理、设备管理等业务数据，构建基于数字孪生体的数字化燃气管网，实现集输配调度、应急指挥、抢维修、完整性管理、知识库管理、人员培训等功能于一体的燃气管网综合调度指挥系统。如在多个场站之间应用协同控制策略，实现调压、调流的区域协同；在应急时可视化事故情况并、规划应急路线及资源，并进行三维虚拟方案仿真；通过视频、地图等方式指导抢维修作业；将不同部门、不同系统、不同业务的文档统一管理、共享，完成闭环管理，如图 9 所示。

在燃气信息系统整合上，燃气管网数字孪生体融合了 SCADA、GIS、管道完整性管理等系统，实现系统数据整合、共享与可视化展现，以“一张图”的方式实现集成展示、综合分析，以及统一化移动 APP 等服务，如图 10 所示，通过移动 APP 可实时查看燃气调度信息。

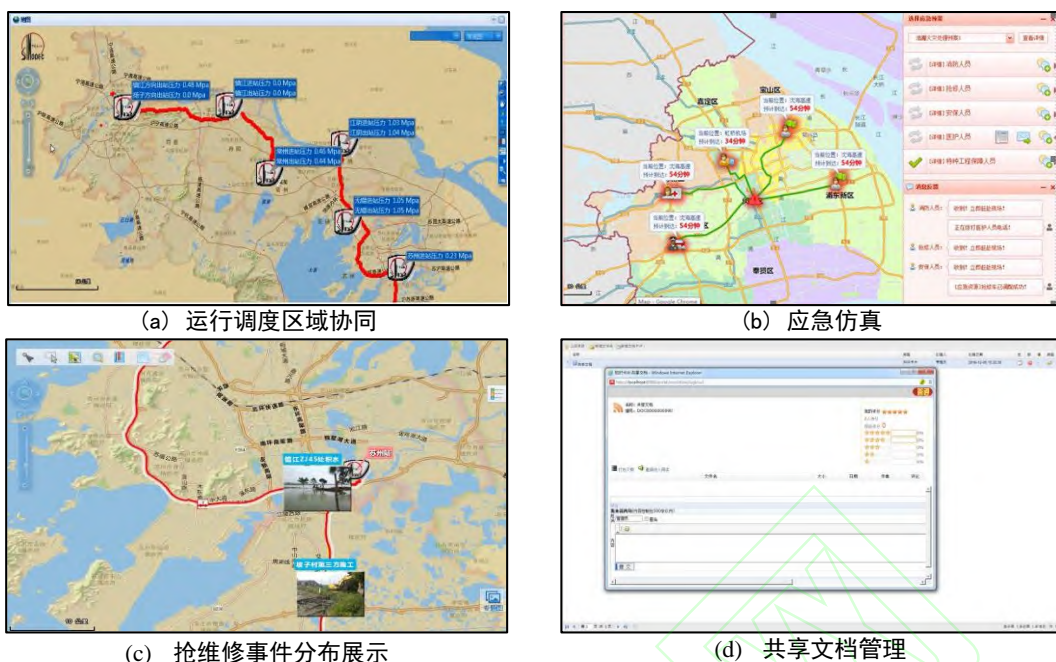


图 9 调度指挥系统功能集成

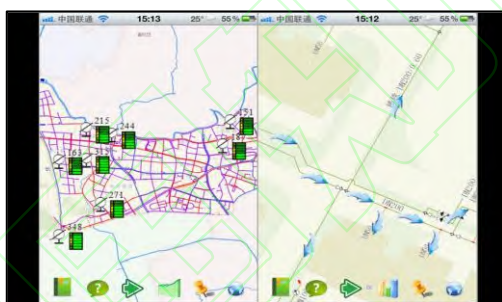


图 10 调度信息在移动 APP 上的实时显示

3.2 数字孪生燃气系统输配调度研究及实践

为解决现有燃气管网调度服务系统在智能调控、应急灾备、智慧服务等方面安全性、便捷性、智能性不足的问题，本文作者团队基于数字孪生智慧燃气关键技术，对燃气输配调度进行了相关研究。

如图 11 所示，基于北斗短报文、4G/5G 等技术实现燃气系统物理实体与调度平台间的数据通信，提高了通信的可靠度；通过分布式控制、协同控制等技术，实现从调度平台到场站的实时控制，最终实现场站与平台间的数据双向传输。。如图 12 所示，本文作者团队已开发数字孪生燃气智能场站系统，可对各个场站压力、流量等状态进行实时监控。如图 13 所示，基于构建的燃气管网数字孪生体，实现输配调度方案生成与迭代优化。首先，通过实时感知、气体泄漏检测、分布式控制等技术感知、构建燃气系统物理实体；从几何、物理、行为、规则四方面分别对供给侧、输配侧及需求侧的燃气系统进行管网、流程、业

务等方面构建虚拟模型，并依次进行单元级、系统级与复杂系统级的模型组装、验证，实现各级虚拟模型的逻辑融洽，构建燃气系统虚拟模型；数据中心通过北斗、4G/5G 等通信方法连接物理实体数据，并接收虚拟模型运行后的结果数据，并通过数据清洗、归一、融合等方法进行数据的整合。然后，调度服务平台基于整合后的数据生成初步调度方案，通过数字孪生体进行仿真验证且通过人工审核后，转化为可执行调度方案并下发至燃气系统物理实体执行，实现多场站之间的协同调度。最后，通过实时监控反馈结果，作为燃气系统数字孪生体新的数据输入，迭代优化调度方案。



图 11 场站与平台实时数据交互示意图



图 12 调度服务平台实时监控数据

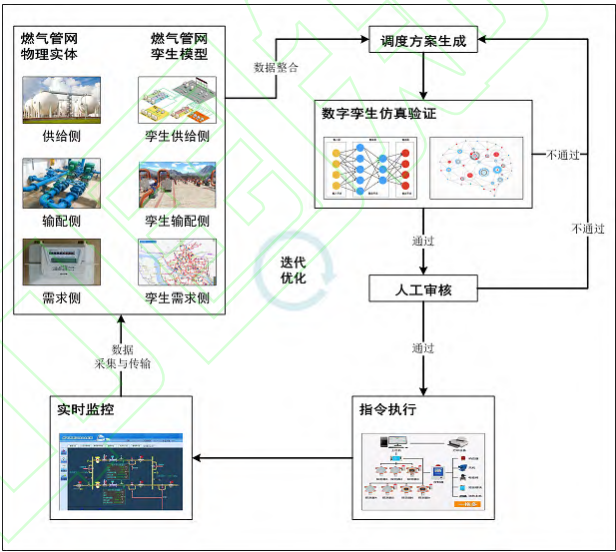


图 13 数字孪生燃气系统输配调度

4 结束语

近年来，燃气行业呈现出市场下沉化、多能综合化、运营一体化、数据采集传输自动化、设计交互化、巡检在线化、应急一体化等趋势，逐步向燃气智慧化方向发展。同时，如物联网、大数据、云计算等多种新技术被探讨、应用到燃气行业中，为智慧燃气的建设提供了新的技术手段与发展机遇。但是，燃气行业仍面临着如数据获取不全面、数据中心

不规范、信息系统不兼容、运维管理不智能等难题和挑战。为顺应发展趋势、把握新技术红利、解决难题、应对挑战，本文分析了燃气行业现状并结合数字孪生技术，探讨提出了数字孪生智慧燃气系统的概念。

数字孪生智慧燃气系统是将数字孪生与燃气运营全周期、全流程、全业务相结合，从虚拟模型、数据中心、信息系统、应用服务等方面发挥数字孪生在燃气运营管理中的重要作用，达到管网设计交互化、应急智能一体化、输配调度精细化等智慧化目标的新一代燃气系统。在分析阐述数字孪生智慧燃气系统体系架构、关键技术及应用服务后，本文还对当前的相关实践工作进行了介绍。

未来将进一步完善数字孪生智慧燃气系统理论基础、研究相关关键技术。同时，对数字孪生智慧燃气系统各项应用服务进行开发、部署方面的落地研究。燃气系统庞大、运营过程复杂，本文的不足及疏漏之处，望专家同行批评指正。

参考文献：

- [1]XU Bo, JIN Hao, XIANG Yue, et al. Analysis of natural gas consumption trend in China during the 14th Five-Year Plan[J]. World Petroleum Industry, 2021, 28(1):10-19(in Chinese). [徐博, 金浩, 向悦, 等. 中国“十四五”天然气消费趋势分析[J]. 世界石油工业, 2021, 28(01):10-19.]
- [2]WANG Qian. Current situation and prospect of China's urban and rural gas market development[C]//Proceedings of the China Gas Operation and Safety Symposium (9th) and the 2018 Annual Academic Conference of the Gas Branch of the Chinese Civil Engineering Society (Volume 1 of 3). Tian Jin, China: Gas&Heat, 2018:31-35(in Chinese). [王倩. 中国城镇与农村燃气市场发展现状及展望[C]//中国燃气运营与安全研讨会（第九届）暨中国土木工程学会燃气分会 2018 年学术年会论文集（上册）. 天津：煤气与热力杂志社，2018:31-35.]
- [3] DONG Kangyin, SUN Renjin, LI Hui. Study on the adjustment and countermeasures of natural gas consumption structure in China[J]. Science and Technology Management Research, 2016,36(9):235-241(in Chinese). DOI:10.3969 /j.issn.1000—7695.2016.09.043. [董康银, 孙仁金, 李慧. 中国天然气消费结构转变及对策[J]. 科技管理研究, 2016, 36(9): 235-241.]

- [4] CAI Jun. The Distributed Energy Market Strategy Research fox Xiamen China Resources Gas Co., Ltd[D]. Xia Men: Huaqiao University, 2019(in Chinese). [蔡俊. 厦门华润燃气有限公司分布式能源市场战略研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2019.]
- [5]MA Gang. Ideas for the development of natural gas distributed energy in the energy internet[J]. China Chemical Trade, 2018, 10(2):2-3(in Chinese). [马刚. 能源互联网中天然气分布式能源的发展思路[J]. 中国化工贸易, 2018, 10(2): 2-3.]
- [6] DOU Jinyue. Business models design and cost-benefit analysis of regional integrated energy services[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019(in Chinese). [窦金月. 区域综合能源服务商业模式设计及成本效益分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.]
- [7] CHEN Rui, SUN Wenyu, WU Minjie. Influence of the establishment of the National Oil & Gas Pipeline Network Corporation on the competition pattern of natural gas market in China[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3):137-145(in Chinese). DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.03.017. [陈蕊, 孙文字, 吴珉颀. 国家管网公司成立对中国天然气市场竞争格局的影响[J]. 天然气工业, 2020, 40(03): 137-145.]
- [8] BAI Jun. Reconstructing China's natural gas price marketization reform based on competition[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(5):117-125(in Chinese). DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.05.015. [白俊. 以竞争为标尺重构中国天然气价格市场化改革[J]. 天然气工业, 2020, 40(5): 117-125.]
- [9] QIU Yanfeng. Analysis on the status quo and development of city gas enterprises in China[J]. International Petroleum Economics, 2020, 28(4):82-89(in Chinese). [邱岩峰. 中国城镇燃气企业发展现状与形势分析[J]. 国际石油经济, 2020, 28(4): 82-89.]
- [10] DENG Jianping. Research on value-added business development of gas companies[J]. Modern Business, 2020(34):136-138(in Chinese). [邓建萍. 燃气企业增值业务发展研究[J]. 现代商业, 2020(34): 136-138.]
- [11] SONG Keyu, LONG Tao, DUAN Hongmei, et al. Research on the development trend of China's gas energy in the future[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2):187-195(in Chinese). [宋科余, 龙涛, 段红梅, 等. 未来我国气体能源发展动向研究[J]. 地球学报, 2021, 42(2):187-195.]

- [12] HUANG Jianjie. Study on safe operation of Shenyang gas pipeline network[D]. Da Lian: Dalian University of Technology, 2018(in Chinese). [黄健杰.沈阳燃气管网安全运行对策研究[D].大连:大连理工大学, 2018]
- [13] ZHUANG Xiaoyu, LI Dan, YU Aisheng, et al. Explosion proof measurements of intrinsically safe gas meter[J]. Electric Explosion Protection, 2014, (2):37-38(in Chinese). [庄小豫, 李丹, 余爱生, 等.本质安全型燃气表的防爆措施[J]. 电气防爆, 2014, (2):37-38]
- [14] LIU Jinlan, KONG Xiangyu. Thoughts and Suggestions on Realizing Indoor Gas Safety[C]//Proceedings of the China Gas Operation and Safety Symposium (2017). Tian Jin, China: Gas&Heat, 2017:741-745(in Chinese). [刘金岚, 孔祥宇.关于实现户内燃气本质安全的思考和建议[C]//中国燃气运营与安全研讨会(2017).天津:煤气与热力杂志社, 2017:741-745]
- [15] YAN Xiyue. Remote data acquisition and management system of gas company[D]. Da Lian: Dalian University of Technology, 2018(in Chinese). [严惜月.燃气公司远程数据采集与管理系统[D].大连:大连理工大学, 2018.]
- [16] ZHU Yanan. Data integration and sharing of underground pipeline in multi source cities and application analysis[D]. Shan Dong: Shan Dong University of Science and Technology, 2018(in Chinese). [朱娅男.多源城市地下管线数据集成共享与应用分析[D].山东科技大学, 2018.]
- [17] JIAO Jianying, JIANG Feng, WANG Songmei, et al. Data Standardization Construction of Gas Pipeline Integrity Management[J]. Gas&Heat, 2019, 39(11):37-38, 46(in Chinese). [焦建瑛, 江枫, 王嵩梅, 等.燃气管道完整性管理的数据标准化建设[J]. 煤气与热力, 2019, 39(11): 37-38, 46.]
- [18] HAN Meng, SUN Jinhong, YI Pengfei, et al. Application of gas production and operation platform based on GIS of pipeline network[C]//Proceedings of the China Gas Operation and Safety Symposium (10th) and the 2019 Annual Academic Conference of the Gas Branch of the Chinese Civil Engineering Society (Volume 2 of 3). Tian Jin, China: Gas&Heat, 2019:385-391(in Chinese). DOI:10.26914/c.cnkihy.2019.022037. [韩猛, 孙进红, 尹鹏飞, 等.基于管网地理信息系统的燃气生产运行平台应用[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集(中册).天津:煤气与热力杂志社, 2019: 385-391.]

- [19] China Gas Association. China urban smart gas development report[R]. Beijing: China Gas Association, 2019. [中国城市燃气协会. 中国城镇智慧燃气发展报告[R]. 中国城市燃气协会, 2019.]
- [20] China Academy of Information and Communication Technology. Digital Twin Cities Research Report[R]. Beijing: China Academy of Information and Communication Technology, 2019. [中国信息通信研究院. 数字孪生城市研究报告 (2019 年) [R]. 中国信息通信研究院, 2019.]
- [21] ZHAO Chunyan. Study on GPS-based portable gas pipe network inspection alarm[D]. Jinan: Shandong Institute of Light Industry, 2012(in Chinese). [赵春艳. 基于 GPS 的便携式燃气管网巡检报警仪的研究[D]. 济南: 山东轻工业学院, 2012.]
- [22] GENG Yan. Gas pipeline network inspection automation research report[C]//Proceedings of the China Gas Operation and Safety Symposium (10th) and the 2019 Annual Academic Conference of the Gas Branch of the Chinese Civil Engineering Society (Volume 3 of 3). Tian Jin, China: Gas&Heat, 2019:494-497(in Chinese). DOI: 10.26914/c.cnkihy.2019.022850. [耿岩. 燃气管网巡检自动化调研报告[C]//中国燃气运营与安全研讨会 (第十届) 暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集 (下册). 天津: 煤气与热力杂志社, 2019: 494-497.]
- [23] VON FISCHER J, COOLEY D, CHAMBERLAIN S, et al. Rapid, vehicle-based identification of location and magnitude of urban natural gas pipeline leaks[J]. Environmental Science & Technology, American Chemical Society, 2017, 51(7): 4091–4099. DOI:10.1021/acs.est.6b06095.
- [24] TAN Yihao. Standardization and simulation exercise for emergency repair of gas pipeline leakage[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018(in Chinese). [谈亦豪. 燃气管网泄漏应急抢修标准化及模拟演练[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018.]
- [25] ZHANG Bo. Path Optimization in Emergency Evacuation after Urban Natural Gas Pipeline Leakage Accident[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016(in Chinese). [张博. 城市燃气管网泄漏事故应急疏散路径优选研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2016.]
- [26] LI Cuimei. The Development of Gas Pipeline Emergency Repair on-site Mobile Monitoring and Decision Support System[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and

Architecture, 2016(in Chinese). [李翠梅. 燃气管网应急抢修现场移动监控及辅助决策系统开发[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.]

[27] LUNDE G, RUDRUM G, ANGELO P, et al. Ormen lange flow assurance system (fas) - online flow assurance monitoring and advice[C]//OTC Brasil. Rio de Janeiro, Brazil: Offshore Technology Conference, 2013. DOI:10.4043/24297-MS.

[28] DAWES B, MEAH N, KUDRYAVTSEV A, et al. Digital geometry to support a gas turbine digital twin[C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019. DOI:10.2514/6.2019-1715.

[29] LIU Jing. Research on intelligent dispatching of gas transmission and distribution pipeline[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013(in Chinese). [刘靖. 燃气输配管网智能调度研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.]

[30] LIU Xuewei. Smart gas dispatch system application solution[C]. Proceedings of the China Gas Operation and Safety Symposium (10th) and the 2019 Annual Academic Conference of the Gas Branch of the Chinese Civil Engineering Society (Volume 2 of 3). Tian Jin, China: Gas&Heat, 2019: 523-528(in Chinese). [刘学伟. 智慧燃气调度系统应用方案[C]//中国燃气运营与安全研讨会(第十届)暨中国土木工程学会燃气分会 2019 年学术年会论文集(中册).天津: 煤气与热力杂志社, 2019: 523-528.]

[31] DENG Tianjiao. The problems and Countermeasures of Beijing gas user service[D], Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017(in Chinese). [邓天骄. 北京燃气用户服务存在问题与对策[D]. 北京: 北京建筑大学 2017.]

[32] 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(in Chinese). DOI:10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2020.01.001. [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.]

[33] JIN Jian, ZHU Xueshan, LIU Yanyang, LI Ning, ZOU Bin. Research on integration technology method of oil and gas long distance pipeline big data[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2020,39(2):77-81(in Chinese). DOI:10.3969/j.issn.1006-6896.2020.02.016. [金剑,

朱学山, 刘艳阳, 等. 油气长输管道大数据整合技术方法研究[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(2): 77-81.]

[34] ZHOU Lijian, JIA Shaohui. Progress and development in the informatization of pipeline integrity management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(6):571-576(in Chinese). DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2014.06.001. [周利剑, 贾韶辉. 管道完整性管理信息化研究进展与发展方向[J]. 油气储运, 2014, 33(6): 571-576.]

[35] ZHAO Qi. Mobile Inspection System for Urban Gas Pipeline Based on ArcGIS for Android[D]. Shan Dong: Shan Dong University of Science and Technology, 2018(in Chinese).[赵琪. 基于 ArcGIS for Android 的城市燃气管线移动巡检系统[D]. 山东: 山东科技大学, 2018.]

[36] HE Jin, ZHONG Yuanchang, Sun Lili, et al.RBF artificial intelligence control strategy for gas pressure regulating application[J]. Computer Science, 2019,46(S1):138-141(in Chinese). [何进, 仲元昌, 孙利利, 等. 面向燃气调压应用的 RBF 人工智能控制策略[J]. 计算机科学, 2019, 46(S1): 138-141.]

[37] Grieves M. Digital Twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL].

https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication, 2015.

[38] 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(in Chinese). DOI:10.13196/j.cims.2017.08.001. [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.]

[39] 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(in Chinese). DOI:10.13196/j.cims.2019.01.001. [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.]

[40] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019,15(4):2405–2415. DOI:10.1109/TII.2018.2873186.

- [41] Tao F, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017,23(01):1-9(in Chinese). DOI:10.13196/j.cims.2017.01.001. [陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(01): 1-9.]
- [42] LI Baisong, WANG Xueli, WANG Juhong. Digital twin and its application feasibility to intelligent pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018,37(10):1081-1087(in Chinese). DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2018.10.001. [李柏松, 王学力, 王巨洪. 数字孪生体及其在智慧管网应用的可行性[J]. 油气储运, 2018, 37(10): 1081-1087.]
- [43] XIONG Ming, GU Li, WU Zhifeng. Construction and application of digital twin in the in-service oil and gas pipeline[J].Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(05):503-509(in Chinese). DOI:10.6047/j.issn.1000-8241.2019.05.003. [熊明, 古丽, 吴志锋, 等. 数字孪生体在国内首条在役油气管道的构建与应用[J]. 油气储运 2019,38(05):503-509.]
- [44] 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(in Chinese). DOI:10.13196/j.cims.2020.01.001. [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.]