

引文: 黄维和, 宫敬. 天然气管道与管网多能融合技术展望[J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1321-1328.

HUANG Weihe, GONG Jing. Prospect for the development of natural gas network and the multi-energy integration technology in pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1321-1328.

天然气管道与管网多能融合技术展望

黄维和¹ 宫敬²

1. 中国石油天然气股份有限公司; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院·油气管道输送安全国家工程研究中心·石油工程教育部重点实验室·城市油气输配技术北京市重点实验室

摘要: 天然气管网作为天然气产业链中的重要一环,亦是能源互联网的重要参与者,在国家能源体系和国民经济建设中占有极其重要的地位。通过回顾中国天然气管道从建国初期蹒跚起步到当前位于世界高钢级、大口径、高压力管道建设运营技术第一方阵的发展历程,系统梳理了中国天然气管道在材料与装备、设计与施工、管理与运行方面的技术发展成就。立足天然气管网“全国一张网”发展趋势及未来能源互联网发展模式,明确了在“双碳”愿景和能源转型背景下,天然气管网可在能源互联网中发挥将多种能源融合在时空供需平衡的作用,成为调峰、掺氢输送、能量转换与储存等的重要载体,进而对能源互联网中天然气管网的天然气能量计量技术、储能及能量转换设施建设技术、天然气管网-电网综合仿真技术、智能调度与控制技术进行系统分析,为确定能源互联网情境下天然气管网技术研究方向和思路提供了参考。(图 2, 参 25)

关键词: 天然气管道; 天然气管网; 发展成果; 能源互联网; 多能融合; 技术展望

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)12-1321-08

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.12.001

Prospect for the development of natural gas network and the multi-energy integration technology in pipeline networks

HUANG Weihe¹, GONG Jing²

1. China National Petroleum Corporation; 2. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing)// Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology//National Engineering Research Center of Oil and Gas Pipeline Transportation Safety

Abstract: The natural gas pipeline network, as an important part of the natural gas industry and an indispensable participant in the energy Internet, plays a crucial role in the construction of China's energy industry and in the development of national economy. In this paper, the history of China's natural gas pipeline industry was reviewed from going through extreme hardships in the formative years of the new China after 1949 to leading the world in the construction and operation technologies of high-grade steel, large diameter, high pressure pipelines. And China's technological achievements in natural gas pipeline materials and equipment, design and construction, operation and maintenance were further systematically examined. Based on the current development trend of "One Pipeline Network" for natural gas pipelines and the future development mode of energy Internet, the importance of natural gas pipeline network in achieving the spatial and temporal balance between energy demand and supply by assisting the integrated development of multiple energies was identified under the background of achieving carbon peaking and carbon neutrality and energy transition goals; the role of the natural gas pipeline network was established in energy peak shaving, hydrogen blending transportation, energy conversion and storage. Moreover, the technologies of natural gas energy metering, energy storage and conversion facility construction, simulation of integrated natural gas pipeline network and power grid, and intelligent control of the natural gas pipeline network in energy Internet were systematically analyzed. As a result, this research serves as a valuable reference for determining the direction and ideas of natural gas pipeline network technology research in the context of energy Internet. (2 Figures, 25 References)

Key words: natural gas pipeline, natural gas pipeline network, development achievements, energy Internet, multi-energy integration, technology prospect

中国的天然气利用最早可以追溯到公元前 200 多年的秦汉时期^[1],据《华阳国志》记载,蜀郡采气煮盐,将打通的竹节连接起来输送天然气,称之为“火筩”,用于输送卤水则称之为“水筩”。近代中国天然气管道工业显著落后于工业发达国家,新中国成立前仅在四川地区修建了少量钢质输气管道,全长约 27.7 km。新中国成立 70 多年来,中国逐渐发展成为世界管道大国^[2]。

20 世纪 50 年代至 80 年代初期,中国经济水平落后于欧美发达国家,西方对中国实施经济和技术封锁,“自力更生、艰苦创业”成为唯一选择,自此,中国开始了天然气管道的规模化建设:1963 年,巴渝输气管道的修建拉开了新中国天然气管道建设的序幕;到 1979 年,在四川省境内形成了从川东、川南到川西的南半环天然气管网^[3]。

20 世纪 80 年代,改革开放推动了油气管道行业的发展与国际合作,通过引进、吸收国外先进科学技术和理念,中国油气管道建设和管理水平迅速提升。1987 年,四川建成北半环天然气管网,与之前的南半环天然气管网共同形成中国第一个区域性天然气管网;1997 年,陕京输气管道投产,成为中国天然气管道追赶世界先进水平的起点。

进入 21 世纪,以西气东输为代表的管道建设,推动了中国油气管道行业的“自主创新、跨越发展”。2004 年,西气东输管道建成投产,干线里程 3 843 km (全长 5 700 km),管径 1 016 mm,设计压力 10 MPa,采用 X70 钢,年输量 $170 \times 10^8 \text{ m}^3$,是当时世界最大管道工程。随后陆续建成西气东输二、三线及陕京二、三、四线等管道,形成连接海外、覆盖全国的天然气管网。2019 年 12 月,中俄东线天然气管道黑河—长岭段正式投产^[4],标志着中国高压力、高钢级、大口径输气管道建设与运营技术进入世界第一方阵。

2004 年,西气东输管道实现商业运营,推动了天然气管道向管网发展,网络化趋势愈加明显,逐步形成“主干互联、区域成网”的全国天然气管道基础网络。2019 年 12 月 9 日,国家石油天然气管网集团有限公司成立,此后中国天然气管网互联互通水平大幅提升,形成了管网统一高效集输新局面。

1 中国天然气管道技术发展成果

1.1 天然气管道材料与装备

断裂控制是高钢级、高压力、大口径管道安全输送

的核心技术。中国自主研发了一系列高强韧性管线钢生产工艺,包括 X80 大口径厚壁螺旋埋弧焊管低残余应力成型工艺和直缝管 JCOE 成型工艺, X80 弯管、管件化学组成及制造工艺,实现了 X80 钢管与管件制造全部国产化。为预防高压输气管道断裂事故,研究了高设计系数和富气条件下 X80 钢管断裂止裂行为,探明了断口分离与钢管止裂能力的相关规律^[5];建成亚洲最大的全尺寸钢管爆破试验场,开展了模拟实际输送介质与设计参数的 X80 螺旋管全尺寸气体爆破试验,确定了止裂预测模型的修正方法和修正系数,系统提出兼顾安全性与经济性的 X80 高钢级、大口径、高压力管道止裂韧性关键技术指标。针对管道断裂过程减压波传播特性,探明了天然气气质、温度、压力等因素对 X80 高钢级、高压力、大口径输气管道气体减压波特性的影响规律,建立了减压波计算模型。

通过引进、消化、吸收、积累,中国油气管道装备制造技术水平大幅提高,设备和材料国产化成效显著。30 MW 级燃驱机组、20 MW 级高速直连电驱机组、Class 900 56 in (1 in=25.4 mm) 以下口径全焊接球阀、各种规格的组合式过滤分离器、绝缘接头、快开盲板等系列化配套产品全部实现国产化,形成行业设计制造规范,并在国内外得到推广应用^[6]。油气管道装备国产化不仅保障了国家能源安全需求,也为实施“走出去”战略创造了条件。

通过开展天然气站场控制技术研发,实现了压气站自动控制和远程控制。攻克了压缩机组远程控制、压气站启机顺序控制、多机组负荷性能动态分配、中控/站控无扰切换等多项技术,开发了可编程逻辑控制器 (Programmable Logic Controller, PLC)、安全仪表系统 (Safety Instrumented System, SIS)、协调控制系统 (Coordination Control System, CCS) 等国产化硬件系统,实现了压气站核心装置压缩机的一键启停自动化运行与机组保护以及压气站站控安全保护^[7]。

1.2 天然气管道建设

创建了“标准化、模块化、信息化”管道综合设计平台,建立了集管道应变设计、可靠性分析方法等相关技术为一体的设计标准体系,并将其融入综合地理信息系统数字化线路设计平台及计算机辅助设计多专业站场协同设计平台。数字化设计卓有成效,实现了组织方式、设计方法与手段的变革,具备大型管道规模化协同设计能力。采用多时相与高分辨率卫星遥感及地

理信息系统(Geographic Information System, GIS)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等技术,形成三维地景仿真辅助选线和站场工程选址、勘察数据采集、数据资源管理及综合制图等一系列新技术。建立了强震区和活动断裂带、滑坡、矿山沉陷、冻土等不良地质条件地区管道应变计算模型,形成了基于应变的设计准则。

为满足高钢级、大口径、厚壁钢管道的焊接要求,研发了管道全位置自动焊技术及外焊机、内焊机、坡口机、对口机等大型施工机具,管道现场环焊缝焊接实现从半自动焊到全位置自动焊技术的跨越式发展,焊接质量和效率大大提高。中国有着世界上最复杂的地质地貌,以顶管法、盾构法、定向钻法为代表的管道非开挖穿越技术,成为复杂地形地质条件下管道穿越工程施工的主要技术手段。针对山区、湿陷性黄土、沼泽、滩涂、水网等复杂地段管道施工的特点,建立了完整的系列施工法,并研制出配套的施工机具。

数字化管道由西气东输冀宁联络线开始,向中俄东线天然气管道工程规模化应用发展。中俄东线天然气管道在统一的数据标准下开展可研、设计、采办、施工,形成的数字化成果通过数字化设计云平台、管道建设脉冲编码调制(Pulse Code Modulation, PCM)系统等完成数字化管道的构建,实现了数字化技术与管道建设的充分融合^[8]。同时,中俄东线天然气管道基于互联网技术及光纤振动和温度传感器、视频监控等智能技术应用,实现了对管道及周边环境、压缩机组、PLC、电气、计量设备等的远程监测^[9],提升了实时泛在感知能力。

1.3 天然气管网管理

中国于2001年引进管道完整性管理方法,目前已基本完成管道完整性管理体系建设,建立了配套国家技术标准,完成了完整性管理信息系统开发^[10-11],自主开发了多种漏磁、电磁等组合式管道内检测器和评价方法,奠定了完整性管理方法全面推广应用的基础。目前,油气管道完整性管理数字化已成为当前工作的重点,基础数据库、GIS、高精度检测及多目标决策技术等融合应用取得进展。

当前天然气管网完整性管理存在以下难点:大型管网系统规模庞大,包含海量设备和管道,状态组合数量巨大,完整性管理面临组合爆炸问题;大型管网系统结构复杂,存在多输入多输出结构,传统完整性管理技

术难以描述系统的复杂拓扑结构;大型管网系统设备老化程度不同,状态变化复杂,完整性管理过于依赖历史数据,难以适应;大型管网系统运行过程中人为操作频繁,传统完整性管理技术难以考虑人为误操作引起的系统故障;大型管网系统中存在大量不确定因素,完整性管理需要考虑各种随机影响,而传统方法不能很好解决系统的随机性问题;大型管网系统运行状态动态变化复杂,而传统完整性管理更侧重于管网系统的静态分析;大型管网系统中的子系统相互依赖和互联,传统方法过于依赖子系统分割分析,难以描述子系统间的依赖关系。自2013年天然气管网系统可靠性概念^[12]提出以来,经10余年发展,已初步形成适用于大型、复杂天然气管网的系统可靠性计算方法,天然气管网管理也正在从完整性管理向可靠性管理提升。在天然气管网系统可靠性技术研究领域,主要通过建立管网系统及设备单元可靠性计算模型,形成天然气管网系统可靠性评价方法,识别系统可靠性薄弱环节,给出可靠性增强判定,从而为保障管网系统的安全运行提供技术支撑与决策支持^[13-14]。

天然气站场是天然气管网的重要组成部分,中国建立了符合国情的“无人操作、有人值守”管理模式,提升了劳动用工效率。利用站控系统实现天然气压力、流量、温度等参数的实时监控,并根据预设的逻辑和算法实现一键分输和启停站场操作。以压气站、枢纽站等为中心,对相邻站场的生产运行、管道保护按作业区进行业务整合,按照“运检维”一体化的作业方式,对生产运行、设备维护、管道保护实行作业区集中管理。

1.4 天然气管网运行

中国已基本形成连通海外、覆盖全国的天然气骨干管网布局,天然气管网系统运行呈现出许多新特点,对大型天然气管网的安全运行与集中调控能力、系统可靠运行能力、油气管道维抢修能力、精确计量能力等提出了新要求。

在管网调控技术方面,研发了中国首套具有自主知识产权的油气管道SCADA系统软件PCS V1.0,目前已进入推广应用阶段。构建了由光传输网、卫星通信网及公网电路组成的空天地一体化管道通信系统。开发了基于OPC协议的异构SCADA数据交互技术,建立了适用于长输管道集中控制的标准逻辑。形成了基于天然气指定用户用气特性的分输控制算法及PLC

的调节阀压力流量优选/保护自适应控制方法、信息网向 SCADA 系统的数据安全传输策略。

在管网仿真技术方面,形成了基于自主开发和商业软件且比较完整的在线、离线兼备的仿真体系。面向大规模复杂天然气管网的仿真应用需求及管道行业智能化转型现实需要,提出了一种全新的仿真引擎核心算法——分区增量迭代法,其具备健壮性、开放性的工业级天然气管网仿真引擎开发条件,可以实现仿真核心技术自主可控^[15]。

在管网运行优化技术方面,基于管道生产实践,通过积累和总结不同管道的运行特点,细化优化了管网运行的管理方法和技术要点,形成了优化方案库识别与检索、多目标稳态优化、指定时段优化等系列运行优化技术。建立了行之有效的天然气管网运行优化管理技术体系,形成“月方案优化、周预测控制、日平衡调整”三级优化管理模式,有力提高了调控运行的优化管理水平^[16-19]。

在信息化管理技术方面,建立了管道生产管理系统(Pipeline Production Management System, PPS),实现了管网生产运行信息发布、运行计划发布、调度令发布等多重功能。

2 能源互联网中的天然气管网

能源互联网(图 1)立足于未来能源发展模式,具有支持多种能源融合发展、大规模分布式能源接入、多种储能设备接入、大规模可再生能源利用新型电力系统建设等特征,可充分利用信息化、数字化、智能化等技术,实现能量流、信息流、价值流的融合。能源互联网将深刻改变原有能源生产、运输、利用方式,使之更加安全、清洁、高效、经济、可持续。随着中国天然气能源地位的提高,天然气管网的建设和运营规模不断扩大,将成为能源互联网中消纳可再生能源的重要参与者^[20-21]。

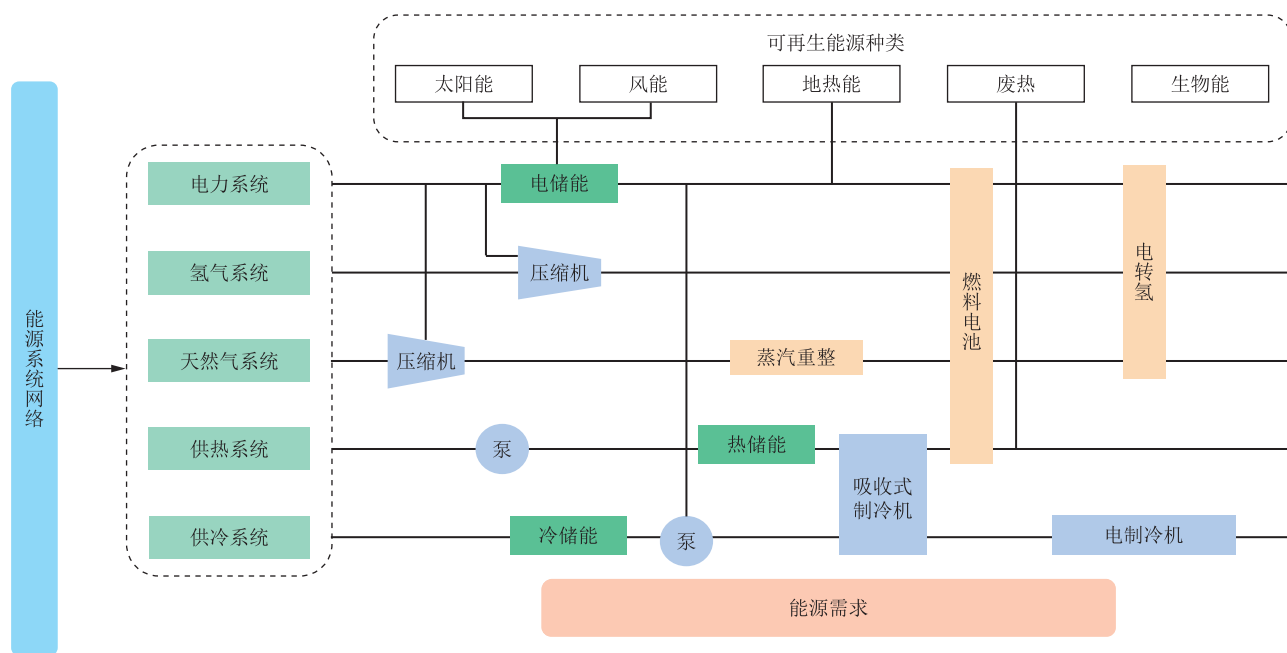


图 1 能源互联网示意图
Fig. 1 Energy Internet diagram

2.1 能源互联网中天然气管网的作用

中国天然气管道网络已成为从气源到终端用户的完整输送系统。截至 2023 年 4 月,中国天然气管网总里程已达 12.1×10^4 km,城镇燃气管道已超过 105×10^4 km。天然气管网因其网络化运行的特点,在能源互联网中可以发挥将多种能源融合在时空供需平衡的作用,包括气电调峰、掺氢输送、能量转换与储存等。

2.1.1 储能与调峰

天然气作为低碳化石能源,是可再生能源的长期伙伴。在“双碳”目标下,天然气消费将逐步向有利于二氧化碳捕集和支持可再生能源利用的电气化方向转变。当前技术和商业条件下,不论是季节调峰还是日内调峰,采用储气设施和利用天然气管网管容灵活输运都是现实的手段。如将风能、光能等间歇发电电源纳入能源互联网,通过合理规划协调天然气和电力系

统的运行,天然气发电可以起到“削峰填谷”的作用,提高电网运行的安全性和可靠性;在用电高峰期,通过燃气轮机发电,可以承担腰荷、峰荷的调峰发电任务;在用电低谷期,通过 P2G (Power to Gas) 技术将电能转化为氢气或甲烷等,注入天然气管网或储能设施中存储。未来研究方向包括天然气电传输系统建模、系统可靠性分析、系统经济成本分析等^[22]。

2.1.2 掺氢输送

氢能作为清洁、零碳的二次能源,是未来新能源的重点发展方向,储运安全、效率、成本是制约其规模化发展的主要瓶颈问题,也是国内外研究热点。其中,在天然气输送管道中以适合比例掺入氢气,是目前可发展的氢气大规模输送的实现方式之一。

掺氢输送是将氢气与天然气在流量随动式混气装置中混合后通入天然气管输系统^[23],以掺氢天然气的形式输送至城市燃气管网用作终端客户的燃气,也可在终端将氢气与天然气分离后使用。天然气管道掺氢输送在解决用户适用性的基础上,需要研究掺氢比例对管内流体流动状态的影响及其工艺配套技术,探究管道材料和设施性能对掺氢输送的适应性,提高天然气管道掺氢输送的安全性和经济效益。

2.2 能源互联网中天然气管网关键技术

能源互联网中天然气管网的主要作用、运行状态、用户特性、数字化与智能化基础及其与多能系统的交互都会对天然气管网相关技术产生影响,对其发展水平提出了更高要求^[24]。在此,分别对天然气能量计量技术、天然气管网储能及能量转换设施建设、天然气管网-电网综合仿真技术、天然气管网智能调度与控制技术进行分析。

2.2.1 天然气能量计量

随着包括 LNG、生物质气体、氢气等在内的多种形式气质进入天然气管网,中国所采用的计量方式将由体积计量向国际通行的能量计量转变,体现更为公平的贸易计量的热值赋值方法成为关键技术。在天然气管网合理布局高成本天然气热值测量仪表的同时,基于天然气管网的拓扑结构和运行状态实现各计量的热值赋值,通过研究计算随管流变化的物性参数,获得各关键节点的天然气热值可以成为一种手段,天然气管网在线仿真技术与组分跟踪技术也是实现热值计算的关键^[25]。

2.2.2 天然气管网储能及能量转换

天然气地下储气库(包括废弃油气藏、盐穴、含水

层等)以及天然气液化储存仍是当前高安全性和高能量密度大规模储能最有效的设施与方式。大型地下储气库适用于战略储备或季节调峰,地下储气资源勘探和工程利用导致建设成本与操作成本高是其发展所面临的主要矛盾。加强地下储气库(特别是地下含水层、废弃矿山岩穴等)技术研究,突破中国天然气管网储气短板,对于实现未来能源互联网灵活高效运行具有重要意义。天然气液化储存在海上进口天然气方面发挥着不可替代的作用,未来也可作为分布式能源体系中天然气储存的重要基础之一,研究提高天然气液化制冷效率、LNG 液态低温输送、冷能综合利用等,应成为相关技术发展的方向。

P2G 技术将在天然气管网与电网之间构建一座双向桥梁:天然气可通过气电厂用于发电, P2G 技术设施则可将富裕的电力转换成氢、天然气等,现有天然气基础设施则可作为储能设施,但当前需解决能效转换效率与规模化商业运行的成本问题。

2.2.3 天然气管网-电网综合仿真

在实现大规模复杂天然气管网的仿真应用后,开展综合仿真(特别是天然气管网-电网)研究,是未来智慧能源体系的核心要件之一,也是能源互联网优化调度、供应保障的基础。

通过研究建立不同能流的建模机理、流体管道瞬态模型、供能机械模型、电力系统稳态模型及电网与外网耦合模型(燃气轮机模型、P2G 模型、压缩机模型等),将管网系统与电网系统中的参数相融合,实现管网-电网系统的稳态及瞬态仿真计算。考虑到大型输气管网的惯性、天然气的可压缩性、管网能量传输特性与电网能量传输特性的差异,需将混合建模、通用建模仿真及数字建模方法有机结合,形成系统综合仿真技术。

2.2.4 天然气管网智能调度与控制

基于泛在智能感知系统与全生命周期数字化,建立管网介质流动和设备设施资产数字化仿真模型,通过多源异构数据融合与机器学习,构建介质流、信息流、价值流为一体的安全高效智能管网。

为实现天然气管网的智能调度与控制,需研究在能源与能量转化过程中天然气管网系统的能量流动、潮流收敛及能量守恒。天然气管网系统特性体现在天然气从各气源点经高、中、低压网络传输到储气点、负荷侧或通过耦合组件与电力系统交互,而天然气管网

系统可大规模储气特性为多能互补联合优化运行提供了技术支撑。未来,需要从技术上探索建立油气管网与电网、热能网络、新能源网络的源-网-荷-储一体化响应协同机制,开发面向综合能源网络的数字化、智能化体系,实现综合能源网络系统一体化调度优化与高效协同机制(图2)。

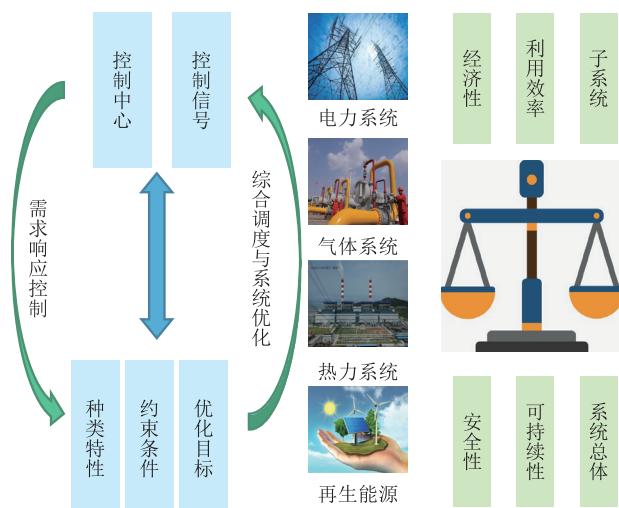


图2 多能源综合调度优化示意图

Fig. 2 Diagram of the comprehensive scheduling optimization of multiple energies

2.2.5 天然气管网管理可靠性

近年来,管道完整性管理为中国管道安全管理及管网系统静态分析发挥了重要作用。面对未来天然气管网全生命周期系统安全和高效运行的要求,特别是受系统复杂拓扑结构、管网系统设备老化程度及服役状态、外部环境及人为操作频繁随机变化、大型管网多能融合与能源互联网系统的不确定性及随机性等影响,仅依赖历史数据的完整性管理已经难以满足需要。需要研究建立大型管网系统管段/设备单元、各管道子系统间相互依赖和互联的系统数学描述,管网可靠性技术将是未来的发展趋势。

目前,中国已探索形成了一些适用于大型复杂天然气管网的单元、系统可靠性计算方法,但天然气管网管理从完整性向可靠性发展尚处于起步阶段。

3 结束语

进入21世纪,伴随西气东输天然气管道的投产,中国天然气管道进入“自主创新、跨越发展”新阶段,天然气输送从管道到管网的发展进程中形成了一系列核心技术。回顾了中国天然气管道由线到网的发展历

程,总结了天然气管道材料与装备、建设技术以及国际上最大规模天然气管网集中调控技术成就,同时提出了未来天然气管网从独立运行发展到能源互联网需要解决的关键问题。目前,中国正着力开展智能技术在天然气管网运行管理中的应用研究。同时,随着能源需求的日益增长及天然气在能源供给体系中地位的日益提升,天然气管网在能源互联网中的作用愈发凸显,对天然气管网互联互通、灵活调度及对可再生能源的接纳、储存、转化能力提出了更高要求。“双碳”目标和能源互联网概念的提出,对天然气管网的发展既是机遇也是挑战,需充分利用其储能量大、传输损耗低、新能源接纳能力强等优势,克服能量转换设施少、运行调度灵活性不足等劣势,促进天然气管网进入发展新阶段。

参考文献:

- [1] 黄维和,郑洪龙,王婷.我国油气管道建设运行管理技术及发展展望[J]. 油气储运,2014,33(12): 1259-1262. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.12.001.
HUANG W H, ZHENG H L, WANG T. Construction and operation management technology and prospect of oil and gas pipelines in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1259-1262.
- [2] 黄维和,郑洪龙,李明菲.中国油气储运行业发展历程及展望[J]. 油气储运,2019,38(1): 1-11. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.01.001.
HUANG W H, ZHENG H L, LI M F. Development history and prospect of oil & gas storage and transportation industry in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(1): 1-11.
- [3] 黄维和.我国油气储运技术的发展[J]. 油气储运,2012,31(6): 411-415. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2012.06.003.
HUANG W H. The development of oil & gas storage and transportation technology in China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(6): 411-415.
- [4] 王振声,陈朋超,王巨洪.中俄东线天然气管道智能化关键技术创新与思考[J]. 油气储运,2020,39(7): 730-739. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.07.002.
WANG Z S, CHEN P C, WANG J H. Key technological innovations and thinking of pipeline intelligence in China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 730-739.

- [5] 李鹤林, 吉玲康, 田伟. 西气东输一、二线管道工程的几项重大技术进步[J]. 天然气工业, 2010, 30(4): 1-9. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.04.001.
- LI H L, JI L K, TIAN W. Significant technical progress in the Wes-East Gas Pipeline projects-Line One and Line Two[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(4): 1-9.
- [6] 黄泽俊, 高顺华, 王世君. 我国天然气管道核心装备国产化进程及应用展望[J]. 天然气工业, 2014, 34(7): 1-6. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.07.001.
- HUANG Z J, GAO S H, WANG S J. The core pipeline equipment localization process and application prospects in China[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(7): 1-6.
- [7] 王振声, 董红军, 张世斌, 赵国辉, 张舒, 余冬, 等. 天然气管道压气站一键启停站控制技术[J]. 油气储运, 2019, 38(9): 1029-1034. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.09.010.
- WANG Z S, DONG H J, ZHANG S B, ZHAO G H, ZHANG S, YU D, et al. Control technologies for the one-key start and stop of compressor stations of gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(9): 1029-1034.
- [8] 姜昌亮. 中俄东线天然气管道工程管理与技术创新[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 121-129. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.001.
- JIANG C L. Management and technological innovation in China-Russia Eastern Gas Pipeline Project[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 121-129.
- [9] 宫敬, 徐波, 张微波. 中俄东线智能化工艺运行基础与实现的思考[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 130-139. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.02.002.
- GONG J, XU B, ZHANG W B. Thinking on the basis and realization of intelligent process operation of China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 130-139.
- [10] 董绍华, 袁士义, 张来斌, 胡瑾秋, 陈怡玥. 长输油气管道安全与完整性管理技术发展战略研究[J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 435-446. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.038.
- DONG S H, YUAN S Y, ZHANG L B, HU J Q, CHEN Y Y. Research on integrity development strategy for long-distance oil and gas pipeline[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 435-446.
- [11] 董绍华. 中国油气管道完整性管理 20 年回顾与发展建议[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 241-261. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.03.001.
- DONG S H. Review of China's oil and gas pipeline integrity management in the past 20 years and development suggestions[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(3): 241-261.
- [12] 黄维和. 大型天然气管网系统可靠性[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 401-404. DOI: 10.7623/syxb201302026.
- HUANG W H. Reliability of large-scale natural gas pipeline network[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 401-404.
- [13] YU W C, HUANG W H, WEN Y H, LI Y C, LIU H F, WEN K, et al. An integrated gas supply reliability evaluation method of the large-scale and complex natural gas pipeline network based on demand-side analysis[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 212(8): 107651.
- [14] 虞维超. 基于需求侧分析的天然气管网供气可靠性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- YU W C. Research on gas supply reliability of natural gas pipeline network based on demand side analysis[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.
- [15] 张对红, 杨毅. 大型复杂天然气管网离线仿真软件国产化研发及应用[J]. 油气储运, 2023, 42(9): 1064-1072, 1080. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.010.
- ZHANG D H, YANG Y. Development and application of localized offline simulation software for large complex natural gas pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 1064-1072, 1080.
- [16] 中国石油北京油气调控中心. 天然气管网集中调控运行优化管理创新体系[J]. 中国石油企业, 2017(10): 83-88.
- China Petroleum Beijing Oil and Gas Control Center. Innovation system of centralized regulation, operation, optimization and management of natural gas pipeline network[J]. China Petroleum Enterprise, 2017(10): 83-88.
- [17] 王寿喜, 邓传忠, 陈传胜, 李伟, 李俊, 高翔. 天然气管网在线仿真理论与实践[J]. 油气储运, 2022, 41(3): 241-255. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.03.001.
- WANG S X, DENG C Z, CHEN C S, LI W, LI J, GAO X. Online simulation of natural gas pipeline networks: theories and practices[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(3): 241-255.
- [18] 李长俊, 张员瑞, 贾文龙, 仇柏林, 何杰, 王硕. 大型天然气管网系统在线仿真方法及软件开发[J]. 油气储运, 2022, 41(6): 723-731. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.014.

- LI C J, ZHANG Y R, JIA W L, QIU B L, HE J, WANG S. Online simulation method and software development of large-scale natural gas pipeline network system[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 723-731.
- [19] 宫敬, 史博会, 李晓平, 虞维超, 吴海浩. 油气管网仿真技术在智能管网建设中的应用及展望[J]. *油气储运*, 2023, 42(9): 988-997. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.09.004.
- GONG J, SHI B H, LI X P, YU W C, WU H H. Application of oil and gas pipeline network simulation technologies in construction of intelligent pipeline network and its prospect[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(9): 988-997.
- [20] 黄维和, 沈鑫, 郝迎鹏. 中国油气管网与能源互联网发展前景[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2019, 21(1): 1-6. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2019.3518.
- HUANG W H, SHEN X, HAO Y P. Prospects of China's oil and gas pipeline network and energy Internet development[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2019, 21(1): 1-6.
- [21] 黄维和, 宫敬, 王军. 碳中和愿景下油气储运学科的任务[J]. *油气储运*, 2022, 41(6): 607-613. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.002.
- HUANG W H, GONG J, WANG J. Tasks of oil & gas storage and transportation discipline under the vision of carbon neutrality[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 607-613.
- [22] 窦迅, 赵文浩, 郎伊紫禾, 李扬, 高赐威. 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 165-173. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2964.
- DOU X, ZHAO W H, LANG Y Z H, LI Y, GAO C W. A review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas technology[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 165-173.
- [23] 李敬法, 苏越, 张衡, 宇波. 掺氢天然气管道输送研究进展[J]. *天然气工业*, 2021, 41(4): 137-152. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.04.015.
- LI J F, SU Y, ZHANG H, YU B. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 137-152.
- [24] 宫敬, 殷雄, 李维嘉, 廖清云. 能源互联网中的天然气管网作用及其运行模式探讨[J]. *油气储运*, 2022, 41(6): 702-711. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.06.012.
- GONG J, YIN X, LI W J, LIAO Q Y. Exploration on the function and operation mode of natural gas pipeline networks in energy Internet[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(6): 702-711.
- [25] FAN D, GONG J, ZHANG S N, SHI G Y, KANG Q, XIAO Y Q, et al. A transient composition tracking method for natural gas pipe networks[J]. *Energy*, 2021, 215(Part A): 119131. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119131.
- (收稿日期: 2023-09-22; 修回日期: 2023-11-10; 编辑: 刘朝阳)
-
- 作者简介:** 黄维和, 男, 1957年生, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 2005年博士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事能源安全、能源战略等研究工作。地址: 北京市海淀区志新西路3号, 100083。电话: 010-82383106。Email: huangweihe@petrochina.com.cn

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

