

中国油气管网运行关键技术及展望

梁永图^{1*}, 邱睿¹, 涂仁福¹, 杜渐¹, 廖绮¹, 邵奇^{1,2}

1 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院/城市油气输配技术北京市重点实验室/油气管道输送安全国家工程研究中心, 北京 102249

2 国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司, 广州 510890

* 通信作者, liangyt21st@163.com

收稿日期: 2024-03-07

国家自然科学基金项目“融合LNG管输的多网系统协同优化与冷能梯级利用研究”(5234100047)和新疆天山创新团队“油气高效管输技术研究与应用创新团队”(2022TSYCTD0002)联合资助

摘要 管道是连接油气产业链上下游的关键纽带,是现代能源体系和现代综合交通体系的重要组成部分。在油气体制改革深化和“碳达峰、碳中和”战略目标下,油气管道正朝着大型化、网络化、多元化的方向发展,为大规模复杂管网的运行管理带来了新的机遇和挑战。基于我国油气管网发展现状,聚焦系统分析、仿真优化、运行监测和新型管道输送4个关键领域,剖析了油气管网运行相关研究的发展动态以及面临的难点,包括管网系统可靠性和韧性评估技术、管网运行仿真和调运优化技术、管道本体监测与修复技术以及氢气、甲醇、液氨、LNG管道输送技术等。针对“全国一张网”新阶段和“多能源互补”新动向,总结了数字孪生、智能调控、智能预警、多网融合等前瞻性技术攻关方向,旨在推动我国油气管网安全、高效、绿色转型。最后,提出展望:现阶段,需要立足我国能源资源禀赋,加快适应新形势下的管网运营模式,发挥油气管网在“全国一张网”发展新阶段下的能源大动脉作用;未来,需要稳步推进多元介质的管网灵活输送,挖掘油气管网在综合立体交通和综合能源系统中的发展潜力。

关键词 油气管网; 体制改革; 低碳转型; 运行管理; 关键技术

中图分类号: TE83; TP183

Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China

LIANG Yongtu¹, QIU Rui¹, TU Renfu¹, DU Jian¹, LIAO Qi¹, SHAO Qi^{1,2}

1 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 for Pipeline Safety, Beijing 102249, China

2 PipeChina South China Company, Guangzhou 510890, China

Abstract The pipeline serves as a vital link connecting the upstream and downstream segments of the oil and gas industry chain, playing a crucial role in modern energy systems and comprehensive transportation systems. Amidst the deepening institutional reforms within the oil and gas sector and the strategic goal of "carbon peak and carbon neutrality", oil and gas pipelines are evolving towards large scales, networking and diversification, which brings both new opportunities and challenges to the operation management of extensive and intricate pipeline networks. Leveraging insights from the current development status

引用格式: 梁永图, 邱睿, 涂仁福, 杜渐, 廖绮, 邵奇. 中国油气管网运行关键技术及展望. 石油科学通报, 2024, 02: 213-223

LIANG Yongtu, QIU Rui, TU Renfu, DU Jian, LIAO Qi, SHAO Qi. Key technologies and prospects for the operation of oil and gas pipeline networks in China. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 213-223. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016

of China's oil and gas pipeline networks, this paper analyzed the trends and difficulties in the research of oil and gas pipeline network operation across four pivotal domains: system analysis, simulation and optimization, operation monitoring, and new pipeline transportation. Relevant research included reliability and resilience evaluation technology for pipeline network system, operation simulation and transportation optimization technology for pipeline networks, pipeline body monitoring and repair technology, as well as pipeline transportation technology for hydrogen, methanol, liquid ammonia, and LNG. In light of the new era of "one network nationwide" and the emerging trend of "multi-energy complementarity", forward-looking technological research directions have been proposed, such as digital twin, intelligent scheduling and control, intelligent early warning, and multi-network integration, aiming to drive the safe, efficient, and green development transformation of China's oil and gas pipeline networks. Finally, this paper put forward the prospect: at this stage, it is necessary to capitalize on China's energy and resource endowments, accelerate the adaptation to the operation mode of pipeline networks amidst the new landscape, and play the role of oil and gas pipeline networks as an energy artery in the new stage of "one network nationwide". In the future, it is necessary to progressively advance the flexible transportation capabilities of pipeline networks across multiple media, and tap the development potential of oil and gas pipeline networks within comprehensive transportation systems and integrated energy systems.

Keywords oil and gas pipeline networks; institutional reform; low-carbon transition; operation management; key technology

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.016

中国是全球第二大石油消费国和第三大天然气消费国。国家自然资源部发布的《中国矿产资源报告2023》显示,2022年我国能源消费总量达54.1亿t标准煤,其中原油和天然气的消费占比分别为17.9%和8.4%。中国石油经济技术研究院发布的《2060年世界和中国能源展望》表明,2040年前油气资源仍将占据能源需求主导地位^[1]。管道是连接油气产业链上下游的关键纽带,是现代能源体系和现代综合交通体系的重要组成部分。目前,管道承担了我国陆上约85%原油、30%成品油以及95%天然气的输送任务,在保障国家能源安全方面发挥着不可替代的作用^[2]。

油气管网运行管理涵盖多方面内容,包括安全运行监测、输送工艺分析、运行工况调节以及调运方案

制定等。这是一项系统性工程,涉及流体力学、热力学、机械工程、管理工程等多个学科,需要充分考虑安全、效率、经济和环保等多维目标。在油气体制深化改革和“碳达峰、碳中和”战略目标下,能源结构正在面临深刻变革,油气管道行业也迎来了发展的关键期、黄金期和攻坚期。油气管道正朝着大型化、网络化、多元化的方向发展,为大规模复杂管网的安全高效运行带来了新的难题和挑战。

1 中国油气管网建设现状与前景

国家统计局数据显示,2012年至2022年我国油气管道总里程从 9.16×10^4 km增长至 13.64×10^4 km(图1)。

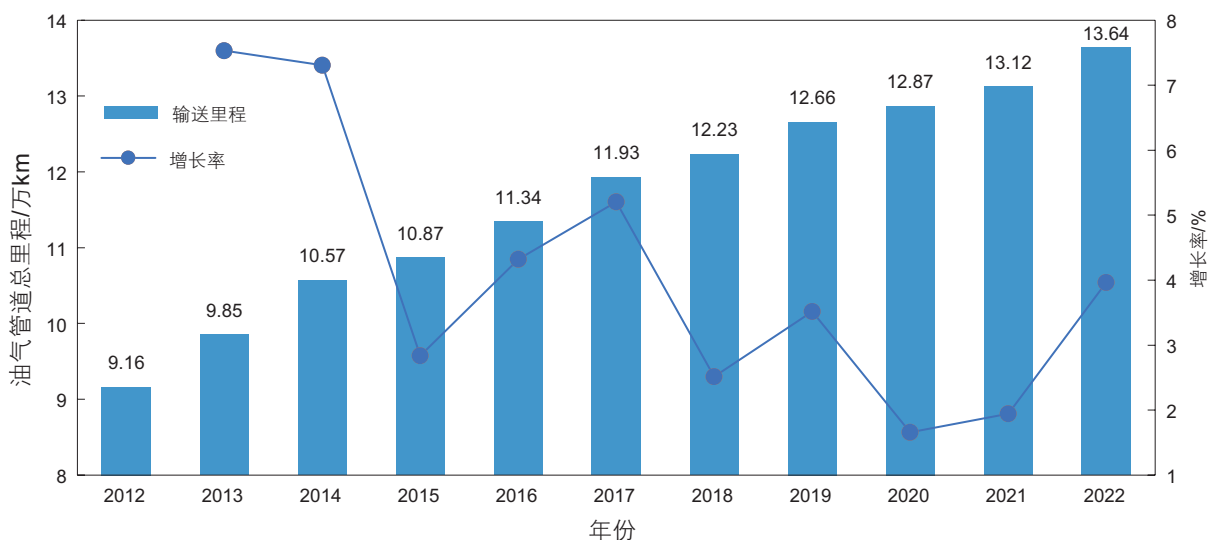


图1 2012年—2022年我国油气管道总里程

Fig. 1 Mileage of oil and gas pipeline in China from 2012 to 2022

在“十三五”时期，我国原油管道的代表性工程包括中俄原油管道二线、中缅原油管道、仪征—长岭原油管道复线、铁岭—大连原油管道复线等项目；成品油管道的代表性工程包括抚顺—锦州—郑州成品油管道、云南成品油管网、钦州—南宁—柳州成品油管道等项目；天然气管道的代表性工程包括西气东输天然气管道三线工程霍尔果斯—中卫段和吉安—福州段、中卫—靖边联络线、中俄东线天然气管道黑河—长岭段和长岭—永清段等项目^[3]。中国油气管道行业的市场规模不断扩大，投资规模和管道网络覆盖率也在持续提升。截至2023年底，我国长输油气管道中，原油管道占比约17%，成品油管道占比约17%，天然气管道占比约64%，总里程位居世界第三。

2019年12月，国家石油天然气管网集团有限公司(简称国家管网集团)挂牌成立，致力于推动形成“X+1+X”油气市场新体系：上游油气资源多主体多渠道供应，中游管网高效集输，下游销售市场充分竞争^[4]。国家管网集团负责全国油气干线管道的投资建设，承担原油、成品油和天然气的管道输送工作，主导干线管道的互联互通和社会管道的并入联通，同时统一负责全国主要油气干线管网的运行调度。在“十四五”时期，油气管网将形成“四大战略通道+五纵五横”的天然气管网架构和“四大进口通道+三大区域”的原油管网架构，以及“三纵三横”的成品油管网架构，实现“全国一张网”的总体布局。预计到2035年我国还将新增天然气管道约 6.5×10^4 km，原油管道约2000 km，成品油管道约4000 km。未来，我国油气管道建设里程将保持稳定增长，其中天然气管道及相关

配套设施的建设将成为重点发展领域。有序推动油气管网建设将有助于实现区域能源均衡配置，降低能源运输成本，进一步提高我国能源供应保障能力。

2 中国油气管网运行关键技术研究进展

下文将重点从系统分析、仿真优化、运行监测和新型管道输送4个领域，对我国油气管网运行关键技术展开讨论，归纳研究现状，总结研究难点，并对该领域的后续发展提出前瞻性建议(图2)。

2.1 管网系统分析技术

2.1.1 油气需求分析与预测技术

油气需求分析与预测在管网规划和运营中扮演重要角色，为管网输送计划制定、资源配置优化以及供应链效率提升提供支撑。在“X+1+X”油气市场新体系下，随着管输资源的开放程度提高，管道运营商对管输资源统筹规划的精细度也相应提高。因此，更准确地把控油气资源需求变化，提高整体利用效率变得尤为关键。油气需求受到季节、节假日、产品种类、产品价格等多因素的影响；同时，在能源低碳化转型过程中，清洁能源需求占比不断增加，多项政策的出台对油气供需水平产生冲击，增大了油气需求不确定性，使得预测难度不断加大^[5]。近年来，油气需求分析与预测已经从传统的统计方法发展到单一机器学习方法，再到混合机器学习方法，预测的准确性和实用性不断提高^[6]。针对油气需求具有明显周期性和波动性特征，可以通过对时间序列数据进行分解、平滑和

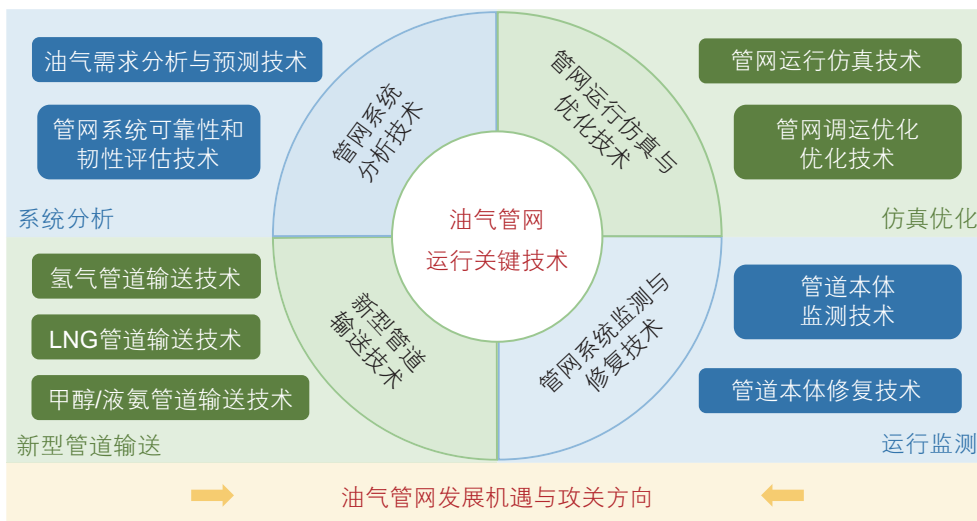


图2 中国油气管网运行关键技术

Fig. 2 Key technologies for the operation of oil and gas pipeline networks in China

建模,并提取需求特征中的局部关联、长期依赖关系及多维特征关联模式,以此来捕捉油气需求的周期性和波动性趋势。近年来,混合机器学习方法在油气需求预测领域取得了较大进展。利用神经网络模型,如循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)和长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM),可以更好地处理序列数据和非线性关系,实现更为精确的时序预测。例如,中国石油大学(北京)研发了油库出库量预测模块,实现了月度成品油需求的合理预测,为油品运输优化提供了指导^[7]。西安建筑科技大学开发了天然气用气负荷预测系统,依托区域省市内天然气站场历史数据,实现了当地小时及日天然气负荷的合理预测^[8]。虽然油气需求预测技术已广泛应用,但仍面临一些困难。例如,在区域分布差异增大、外部环境不确定性增强的情况下,需求预测变得更加复杂。同时,短期预测受到各种环境因素影响,呈现出明显的波动和随机性,导致需求时序数据存在非平稳性。在“全国一张网”背景下,用户行为差异的增加增加了短期预测的困难,对管网的运行稳定性造成了影响。中长期预测面临数据量有限的挑战,限制了预测算法的性能。此外,新市场机制、新政策等因素,如在“X+1+X”油气市场新体系下,油气市场参与主体增多,不同主体之间的博弈关系日益复杂,可能对油气需求的准确预测产生较大影响。如何应对这些影响或成为未来需要攻克的难题^[9]。

2.1.2 管网系统可靠性和韧性评估技术

管网系统在运行过程中融合了多层面复杂性,包括供需关系的波动性和不确定性、拓扑结构的复杂性、系统组件的水热力耦合性以及系统的慢瞬变和时滞性。当管网系统受到扰动时,如何保障油气供应稳定性稳定性是一项艰巨的任务,研究复杂管网系统对扰动的响应和恢复能力具有重要的工程意义^[10]。系统韧性的概念自1973年首次引入生物系统以来,逐渐成为系统工程领域的热点问题。作为一种高度复杂的系统,管网系统同样可以运用韧性思想和理论进行分析。管网系统的韧性主要研究管网系统对外界扰动的响应过程,以评估在受到扰动后管网系统的性能损失、剩余能力和恢复程度。此类研究有效地弥补了管网可靠性和完整性在系统受扰动后响应行为方面的研究不足^[11]。管网系统的韧性评估主要通过指标构建、模型建立和模型求解来实现。在指标构建方面,主要根据系统的输油、输气功能,以鲁棒性、恢复力和脆弱性为依据构建评价体系。建立的韧性度量模型主要用于评估系统面对确定性扰动(如气候变化、节假日等)和不确定性

扰动(如突发灾害、价格波动、管道本体缺陷等)的情况。在模型建立后,通过水力仿真、概率抽样、系统动力学等方法,可以对韧性度量模型进行求解,从而得到相应的评估结果^[12]。尽管油气管道系统韧性研究仍处于初期阶段,中国石油天然气集团有限公司(简称中国石油)、中国石油化工股份有限公司(简称中国石化)等相关油气公司已根据韧性思想制定了系统管理措施,旨在提高系统运行的鲁棒性和恢复能力。然而,随着管网拓扑结构日益复杂,系统涉及大量泵、压缩机、阀门、管件等工艺设备,并受到季节、温度等因素变化的影响,供需关系表现出持续波动性和时域差异性,进一步增加了系统的复杂性,对管道韧性度量模型的建立和求解提出了更高要求。未来,需要在不同技术层面展开对管网系统韧性的研究。例如,发展更为准确、快速的仿真技术,以实现复杂管网系统水力时滞特性的分析;构建包含管道结构、设备类型、运营监测数据等信息的管道韧性数据库,并利用复杂网络理论和数据科学技术,克服管道韧性系统建模复杂度高和求解效率低等问题。

2.2 管网运行仿真与优化技术

2.2.1 管网运行仿真技术

随着SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)系统功能的不断完善,油气管网在数据采集、实时监控和远程操作等方面的能力得以提升,推动了油气管网运行仿真软件的快速发展。现有的油气管网仿真软件已基本涵盖了泄漏检测、水击保护、泵/压缩机组运行优化、批次输送计划编制、界面运移跟踪、清管器跟踪等多个功能模块。目前, PipelineStudio(英国ESI公司)、SPS(德国GL公司)、GREEG(美国GREEG公司)、ATMOS SIM(英国ATMOS公司)等商业软件占据了大部分的市场份额^[13]。国内科研机构也陆续自主研发了仿真软件,如PNS(西安石油大学)、PES(西南石油大学)等,但市场普及率仍然相对有限。随着管网拓扑结构变得愈发复杂,且系统运行参数难以直接获取,不论是国外引进的软件还是自主研发的软件,在处理复杂工况时的求解精度和效率仍然较低^[14]。流体力学三大方程(连续性方程、能量方程、动量方程)是油气管网运行仿真模型构建的核心,一般采用变分法和有限差分法进行方程组求解。然而,油气管网系统涉及大量的节点和元件,造成仿真模型规模庞大,模型求解时需要进行大规模的矩阵运算和迭代计算,计算复杂度较高^[15-16]。近年来,一些适用于油气管网系统的快速仿

真方法被提出,包括分而治之仿真算法、自适应仿真算法和并行计算仿真算法。GPU(Graphics Processing Unit)并行计算和异构并行计算的发展为油气管网系统的快速仿真提供了更多可能性。随着人工智能算法的不断发展,基于数据驱动模型实现管网仿真逐渐受到关注^[17-18]。目前,主要有2种思路:①采用数据驱动方式,避免直接求解三大方程,通过学习管网运行数据,建立输入和输出之间的映射关系;②以三大方程为基础,构建耦合领域知识的数据驱动模型,即知识和数据双驱动方式。油气管网智能化建设是油气储运行业在新时代、新阶段贯彻新发展理念,实现高质量发展的必由之路。在复杂的国际形势背景下,摆脱对国外商业软件的依赖,搭建更高层次具有自主知识产权的油气管网智能决策系统,是我国油气管网行业的重要建设目标。物联网、大数据、云计算、人工智能等新兴技术的快速发展,为油气管网智能决策系统的建设提供了良好契机。

2.2.2 管网调运优化技术

管网调运优化是在特定时间周期内,为满足下游油气需求,对资源(如管输能力、库存能力)进行合理分配的过程,旨在达到特定目标,如最小化耗能、成本或碳排放等。长期以来,采用顺序输送工艺的输油管网调运优化一直是研究的难点^[19]。国外在该领域的研究起步较早。例如,美国Colonial管道输送的油品种类达上百种,采用全/部分流量注入和分输工艺,已实现全自动化计划编制,能够准确计算油头位置、批次剩余体积、混油量以及预计到达时间等关键运行参数^[20]。油气管网调运优化最有效的技术手段是基于物理场景构建数学模型并采用高效算法求解。近十年来,为适应国内管道的特有运行模式,国内高校提出了相对成熟的成品油管网调运优化模型,并开发了相应的调运计划优化软件,以辅助计划编制人员高效地进行调运计划的编制与调整^[21]。与输油管网相比,输气管网结构更加复杂,通常包含数百甚至上千个节点。同时,下游市场的用气需求不确定性较高,给输气管网调运优化带来了更大的挑战^[22]。目前,输气管网调运优化主要关注于解决供需不平衡状态。研究者们致力于开发跨区域调运技术、储气调峰技术、能量计量技术、组分跟踪技术等,旨在确保输气管网系统能够高效稳定地运行,并满足不同地区的用气需求。由于管道的设计、建设和运营单位各不相同,导致管道运行工艺存在明显差异。此外,管网的拓扑结构也存在较大差异,如枝状、网状、环状等,进一步限制了调运优化技术的推广。2022年,国家管网集团启动了“揭

榜挂帅”项目,旨在开发一套通用性强的组态式输油管网调运优化软件。该软件的推出有望打破各管网输送技术的孤立状态,实现输油管网输送优化技术的统一化、专业化和高效化。随着油气管网拓扑结构趋于复杂,介质流向呈现多变,对调运优化模型的适用性和求解效率提出了更高的要求。一方面,需要在模型建立阶段不断完善松弛方法和分解技术;另一方面,还需要探索数据挖掘和机器学习等方法在模型求解阶段的潜力,以最终实现输气管网的主动调度和实时调度目标^[23]。

2.3 管网系统监测与修复技术

2.3.1 管道本体监测技术

随着油气管网规模逐渐增大、运行环境日益复杂,管网失效事件时有发生,其时空分布广泛、发生过程隐蔽,且可能造成灾难性后果。因此,监测管道本体状态、感知管道缺陷,并实现异常事件的预警,对保障管网安全运行具有重要意义^[24]。管道本体监测主要利用安装在管道上或搭载在内检测载体上的各种传感器,通过远程数据传输和处理来监测管道本体的状态参数。本体监测技术主要包括管道内检测技术、应力应变监测技术和腐蚀监测技术。内检测技术依靠内检测载体搭载不同类型的传感器,用于检测和记录管道凹坑、变形、金属缺失等缺陷,常用的方法包括漏磁检测、超声检测和电磁涡流检测等^[25]。在管道内检测方面,我国已成功开发出高精度惯性导航的管道弯曲应变内检测装备,并在中俄东线天然气管道、中俄原油管道等多条管道上得到应用^[26]。应力应变监测技术依靠安装在管道本体的应力应变传感器、数据采集器和数据分析平台实现管道本体状态实时监测和预警。该技术已经得到充分发展,形成了如振弦式应变计、光纤光栅式应变计等监测设备,并在超过1000处的输气管网中广泛应用^[27]。腐蚀监测依靠腐蚀传感器,用于监测阴极保护电位、管道壁厚等参数,主要分为内、外腐蚀监测。内腐蚀监测方面,我国在设备的研发和应用方面已经取得了一定程度进展,并且有许多商业产品可供选择,例如漏磁法智能清管器、电阻探针腐蚀监测仪等。而外腐蚀监测主要监测阴极保护情况,外腐蚀速率监测相关设备的研发仍处于起步阶段。目前,国家管网集团华南分公司所开发的阴极保护智能监控系统通过实时采集和分析数据,能够及时发现阴极保护设备的异常情况和潜在风险。随着管网规模不断扩大和外部环境的复杂化,管道威胁事件特征信号受到多种干扰因素影响,会逐渐衰减或发生变化。此

外,特征信号中还蕴含着管道缺陷的复杂时空演化机制等难以准确解析的信息。同时,微小缺陷如裂纹、针孔的检测率仍有待提高,以及应力集中的检测亦需改善。未来的研究需要着重于对裂纹、针孔等微小缺陷的准确检测,提高应力集中的检测率,并开发基于管道本体缺陷特征数据的多源数据特征提取算法。通过深入研究管道缺陷的时空演化机制,剖析管道缺陷产生的复杂作用机理,建立相关评估模型,实现管道微小缺陷的精准检测与感知,防止进一步造成管道开裂、燃爆等安全事故。

2.3.2 管道本体修复技术

随着在役管道运行时间的增长,受介质腐蚀和环境损坏等因素的影响,管道本体容易发生腐蚀泄漏、爆管等安全事故,对缺陷管道及时进行修复至关重要^[28]。根据施工工艺和输送介质类型,油气管道本体修复技术主要包括焊接套筒和复合材料修复技术、环氧套筒或复合材料修复技术以及局部更换管段技术。此外,还有一些其他修复技术,例如快速堵漏和裂纹型缺陷修复等^[29]。国外管道修复技术研发起步较早。代表性的管道公司,如美国Clock Spring和法国天然气公司,为保障管道的安全性和稳定性,开发了多种修复技术。Clock Spring公司开发的电化级单向纤维强化塑性复合材料已在60多个国家地区安装了超过10万套,其用户包括壳牌、英国天然气公司、埃克森等多家大型油气公司^[30]。国内管道修复技术研发始于上世纪末,最初旨在克服管道腐蚀问题。目前,这些技术已扩展至防止管道老化、失效等风险造成的安全事故。相关技术已成功应用于西气东输管线、陕京管线等十余条管道,在管道抢修和防止事故进一步扩大方面发挥了重要作用。海底管道受到高压作业、海底陡坡和海水冲蚀等因素的影响,因此修复作业的复杂度和实施难度较高。为了实现海底管道的本体修复,已经研发出复合材料修复技术。该技术能够在管道外壁形成补强层,分担载荷并具有防腐效果,是目前最具应用前景的外防腐修复技术之一。该技术于2015年首次应用于我国海底油气管道的缺陷修复^[30],并已在多条海底油气管道上得到应用。作业人员通过评估海底管道的腐蚀状况,确定需要立即修复的高风险评级腐蚀区域,然后利用复合材料修复技术对腐蚀缺陷部位进行补强,使修复部位的承载能力远超海底管道的设计压力,从而有效保障管道的安全运行。然而,由于管道输送介质的多样性、铺设环境的差异以及管道设备元器件密度不断增加,现有技术在规模化应用时仍面临一些限制。例如,在高寒冻土区进行管道修复施

工时,可能会遇到冻土退化、低温和脆弱生态等挑战,这些因素对修复技术提出了新的要求。

2.4 新型管道输送技术

2.4.1 氢气管道输送技术

管道输氢主要分为纯氢管道和天然气管道掺氢2种方式。目前,美国、德国、英国、加拿大、意大利等国家正在积极推进氢气输送管道建设,已建成总里程约6000 km,其中美国的管道长度约占比43%。而我国的氢气管道建设仍处于起步阶段,已建成的纯氢管道长度约为115 km,主要用于化工氢原料的输送。其中,巴陵—长岭的输氢管道距离最长,总里程约为42 km^[31-32]。在氢能需求的推动下,一些代表性的长距离“西氢东送”管道项目,如中国石化主持的“乌兰察布—北京管道”,正在逐步展开建设。该工程已被纳入国家能源局于2023年3月印发的《石油天然气“全国一张网”建设实施方案》,标志着我国长距离输氢管道正进入新的发展阶段。预计到2030年,我国纯氢管道的总里程将超过3000 km,这对于解决氢气运输难题、形成区域氢气骨干管网具有重要意义。鉴于新建氢气管道的资金和时间成本投入较高,国内外正在积极研究天然气管道掺氢输送技术。其中,确定掺氢比是一项综合性难题^[33]。这一挑战主要在于掺氢比受管道输送系统和终端用户制约,包括管道材质、压缩机运行工况、氢气分离技术、燃气互换性以及燃爆安全性等因素^[34]。目前,英国Hy Deploy示范项目已成功向在役天然气管网中掺入20%的氢气;我国“朝阳可再生能源掺氢示范项目第一阶段工程”和“陕西一线掺氢示范项目”的掺氢比约为5%,宁夏银川宁东天然气掺氢管道的掺氢比已逐步达到24%^[35]。氢气掺混均匀度是另一个关键问题,对系统的稳定性和安全性至关重要。掺氢天然气管道输送系统通常会设置掺氢混气站,在静态混合器中采用随动流量掺氢工艺进行氢气的掺混^[36]。2023年,国家管网集团成功实施了9.45 MPa全尺寸非金属管道纯氢爆破试验和全尺寸掺氢天然气管道封闭空间泄漏燃爆试验,为实现大规模、低成本的远距离氢气运输提供了必要的技术支撑。

2.4.2 甲醇/液氢管道输送技术

虽然氢气管道输送技术已初步发展,但氢脆等输送安全问题仍未得到妥善解决^[33]。随着“氨—氢”和“液态阳光”等绿色能源技术的深入发展,甲醇和液氨等氢能载体的产量有望在未来显著增长。过去,这些物质主要用于化工行业,市场需求较为有限,长距

离运输需求并不强烈,导致国内外长距离输送管道的建设相对较少。据公开资料显示,加拿大目前运营着两条长距离甲醇输送管道,其中一条由原油管道改造而来,全长达 1146 km;另一条则由液化石油气管道改造而来,全长达 3000 km^[37]。国内先前建设的甲醇管道通常不超过 10 km。直到 2021 年,中煤鄂尔多斯能源化工有限公司百万吨甲醇技改项目的配套管道成功投产,里程达 52 km,设计压力为 2.5 MPa。与甲醇管道相比,已建成液氨管道数量更多、里程更长。目前,长距离液氨输送管道主要分布在美国和俄罗斯,总里程分别达到了 4800 km 和 2400 km^[38]。国内液氨管道累计里程不足 200 km,以 10 km 左右短距离管道为主,主要服务于化工厂,将氨输送至化肥厂生产农用化肥。由于缺乏相应的设计和运行规范,国内液氨管道的设计相对保守,在借鉴输油管道相关设计规范的基础上,采取调高设计压力、降低运行流速等措施确保管道的运行安全。在经过管道及其配套设备材料适应性实验论证的基础上,将输油管道增/改输甲醇和液氨是实现这两种物质大规模输送的有效方式,同时还能提高管道整体利用率^[39]。若采取顺序输送工艺,需要进一步探究甲醇、液氨与既有油品之间的批次界面混油发展规律以及运行边界的适应程度等。另外,液氨具有强温度敏感性、毒性和腐蚀性等特点,在管输过程中,物性参数的变化将对液氨的水力和热力特性产生显著影响,因此应制定温度监测方案和压力控制策略,以防止发生相变引起气阻、气蚀等不利现象^[40]。未来,甲醇和液氨管道停输再启动的安全性以及泄漏扩散规律等问题也需要得到更多关注。

2.4.3 LNG 管道输送技术

在“碳达峰、碳中和”战略目标的推动下,天然气逐步成为现代清洁能源体系的主要组成部分。随着中国天然气的供需缺口不断扩大,海运液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)已成为保障国家能源安全的重要手段,被视为实现能源转型的“第五大能源战略通道”,其进口量也呈现逐年增长的趋势。目前,我国的 LNG 通常在沿海接收站内与海水换热气化,然后通过长距离天然气管道运输至内陆需求城市。然而,这种方式既对海洋生态环境造成不良影响,也未充分利用 LNG 所蕴含的高品位冷能^[41]。近年来,中国海洋石油集团有限公司(简称中国海油)、中国石油和中国石化等企业主导推广冷能利用技术和商业应用,主要应用于空气分离、冷能发电、低温胶粉等领域,但对 LNG 冷能的利用仍然相对不足^[42]。相比其他方式, LNG 管道运输具有能量密度高、输送容量大等

优势,在一定范围内不仅可以实现大规模的天然气运输,还能将携带的高品位冷能分配至沿途的冷能需求点。因此,发展以 LNG 管道运输为主体的综合输送网络对于实现大规模天然气输运及冷能的高效利用具有重要意义。未来还需扎实开展 LNG 管道运输的技术经济分析工作,包括计算 LNG 管道项目的投资回报率,确定 LNG 管道运输的经济输送距离、经济输送量,评估 LNG 管道建设可能对环境造成的影响等。在调运方面,冷能与天然气供需时空错配下的管网调运是未来需要攻克的难点。城市用冷和用气需求均呈现出明显的季节性变化以及日内波动特征,且时空差异显著。因此,急需解决的关键问题是通过协同优化 LNG 管道与冷能网络、天然气网络,在不同时间和空间尺度上实现冷能和天然气的供需动态平衡,并提高 LNG 冷能利用效率。LNG 管道与冷能网络、天然气网络之间存在着复杂的耦合关系,涉及到不同能流的转化、储存和分配,对多能流耦合系统的精确模拟和多维度调控提出了技术难题。要突破这一难题,关键在于揭示这些复杂系统间相互作用的深层规律,以推动多网系统能流匹配和高效协同。

3 中国油气管网发展机遇与攻关方向

3.1 发展机遇

(1) “全国一张网”发展新阶段

《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》明确指出,需要推进能源革命,完善能源产供储销体系,加强国内油气勘探开发,加快油气储备设施建设,加快全国干线油气管道建设。在“十四五”时期,我国油气管网将全面进入物理互联互通、服务公平开放的“全国一张网”发展新阶段。油气管道的物理互联互通推动了油气运输的灵活性运输,同时也使得油气管网结构不断复杂化。随着管网设施逐步开放,油气管网运营模式也逐渐向面向市场需求转变,有利于进一步激活现有输送能力,为更多市场主体提供储运服务,推动油气行业实现多层次、多元化发展。然而,油气托运方数量众多、分布广泛、消费波动巨大,油气资源供需关系变得复杂多变。针对这种大规模复杂系统,整体把控管网动态输送能力变得更加困难,难以实现统筹兼顾的资源优化配置。

(2) “多能源互补”发展新动向

《中长期油气管网规划》(下称《规划》)指出,油气管网应融入能源互联网发展。未来较长一段时期,

化石能源仍是我国能源利用的主体,油气是能源互联网中可再生能源消纳、智慧能源建设的重要参与者。因此,我国能源互联网建设应促进化石能源与可再生能源的融合,构建横向多能互补、纵向优化配置的能源产业发展新模式^[43]。《规划》为我国油气管网技术发展指明了方向,加速油气管网与电网以及其他清洁能源输送网络的互联建设是石油石化行业转型升级的重要途径,也是推动能源革命的重要手段。然而,油气管网系统与其他能源网络存在差异,各个能源系统规划和运营仍相对独立,导致能源利用率低、供能系统安全性和自愈能力低等问题。此外,油气管网与其他能源系统之间的能源生产、消费信息透明度较低。如何打破各能源系统之间的壁垒,协同优化多种能源输出,增强供能灵活性和柔韧性,实现能源高效梯级利用,是需求导向下的必然要求。

3.2 攻关方向

(1) 油气管网数字孪生技术

数字孪生技术是油气管网全智能化运营的关键,通过构建高保真的管道数字孪生体,对管道全生命周期数据进行感知、传输、处理,并进行智能化决策,实现对油气管网系统的闭环控制。其中,多源异构融合和实时动态更新的数据是驱动数字孪生技术的核心要素。国家管网集团成立后,统一调配全国油气管网资源,并建立了统一的数据接口和信息共享平台,为数字孪生技术提供了更完整和全面的数据源。然而,在面对海量且种类繁杂的管道数据时,高效的数据清理、压缩和分析方法成为提取有效数据的核心所在。数字孪生技术对于光纤、5G等传输技术提出了高宽带和低时延的需求,需要借助高效的传输技术实现物理对象与数字模型之间的实时连接和动态交互。此外,在油气管道多维多时空尺度的管道数字孪生体模型构建过程中,除了考虑保真性、可靠性和可扩展性等问题,还需要充分重视多尺度模型融合所占置信度的重要性,以提高模型的抗干扰能力^[44]。

(2) 油气管网智能调控技术

智能调控技术是油气管网全智能化运营的核心,涵盖需求准确预测、管网精确水热力仿真、管网运行优化等多个模块。面对新网络、新市场机制以及新政策等要素生成的新场景,可用于预测模型训练的数据规模将极大降低,导致模型的有效性、可信度以及可迁移性更加难以把握。为解决上述瓶颈,需要进一步引入理论认知、实际经验等先验知识,以监督模型的执行过程。管道介质、管道设备以及周围环境的状态

变化过程呈现耦合效应,给管网水热力精确仿真建模带来了困难。随着管网结构的复杂化、介质的多元化和流向的多变化,管网仿真计算量急剧增加,传统的求解方法无法满足工程上对计算及时性的要求。未来,研究分而治之的仿真算法、自适应仿真算法以及并行计算仿真算法将成为解决大规模油气管网仿真计算瓶颈的关键^[17]。对于管网运行优化而言,提升优化方案与工程实际的贴合度是研究的重点,需要通过引入多目标优化方法、不确定性优化方法等来提高优化建模的精度。同时,管网运行优化也面临着大规模模型求解的难题,需要开发滚动优化方法、数据驱动算法等,降低求解复杂度,以在模型求解时间与最优性之间寻求平衡。

(3) 油气管网智能预警技术

管网智能预警技术是油气管网全智能化运营的保障,其核心在于挖掘管网实时运行数据的规律,以准确感知管道本体安全状态以及识别管道运行工况。在数据挖掘过程中,数据质量的优劣直接影响到预警和故障诊断的准确性。因此,如何有效处理数据中的噪声、缺失值、异常值等问题成为数据挖掘中的一大挑战。未来,需要进一步研究高效的数据清洗和预处理技术。面对水力复杂、高度非线性的管网系统,需要充分发挥机理模型和数据模型各自的优势,开发机理与数据融合模型。通过耦合管网本体机理和现场实际数据,能够有效提高模型的可解释性,同时在一定程度上解决数据质量问题。数据模型的发展需要更加注重复杂非线性拟合能力的提升,例如探索深度学习技术与管道运行场景的结合,以提高模型在复杂问题上的处理能力。

(4) 油气管网与其他运输网络融合技术

《“十四五”现代能源体系规划》要求在重点行业领域实施节能降碳行动,构建绿色低碳交通运输体系,优化调整运输结构,大力发展多式联运。为实现油气物流领域的节能减碳目标,开展油气管网与其他运输网络融合技术研究迫在眉睫。为了实现油气运输网络优化,传统做法多采用运筹学方法,基于唯一调运中心、信息对称的假设,建立集中式数学规划模型,以实现油气供需平衡和调运方案优化。然而,面对运营主体交互、多层网络耦合的多式联运网络系统,传统优化方法已经失效:一是信息对称假设过于严苛,无法准确表征多主体间的交互规律;二是过度依赖调运中心,网络复杂度提升将限制系统的扩展性能。因此,未来需要重点关注以下两方面:首先,如何准确描述信息非对称下的多主体竞合关系,实现多方博弈的均

衡；其次，需要有效识别不同网络之间的关键联系特征，开发可实现复杂系统解构的分布式优化算法，以提高多式联运优化效率。

(5) 油气管网与其他能源网络融合技术

“油—气—电—热”多网络协同优化对于油气管网融入综合能源系统至关重要，要求油气管网与电力、热力等其他能源网络互补与融合，协调优化多种能源输出，增强供能的灵活性。与其他能源网络类似，油气管网也具备灵活可靠的网络化结构和实时互动的技术特征，其运行方式表现出与其他能源网络相似的组织模式和市场特点。然而，油气管网的传输与消费环节具有较大的时滞性，难以与其他能源网络在同一时间尺度进行能量平衡与优化。因此，需要综合考虑油气管网与其他能源网络不同的传输特性与需求特性，实现不同时间空间尺度的协同优化^[45]。同时，在综合能源系统复杂场景下，如热电联产、电转气、气转电等，多能源形态发生转变，不仅影响油气系统的供应量，还将影响管网压力以及油气质量。因此，需要进一步开展“数量—压力—质量”耦合模拟相关研究，深入探索复杂油气管网运行状态的演化规律。

4 结束语

油气管网是国家能源大动脉，承担着油气资源灵活调配和安全稳定供应的重要任务。在新一轮油气体制改革和全面推进“碳达峰、碳中和”目标的背景下，我国能源结构正面临深刻变革，要求油气管网运行朝着安全化、高效化与绿色化趋势发展。实现油气管网转型的关键在于平稳有序推动管网运行技术变革。现阶段，需要立足我国能源资源禀赋，加快适应新形势下的管网运营模式，发挥油气管网在“全国一张网”发展新阶段下的能源大动脉作用；未来，需要稳步推进多元介质的管网灵活输送，挖掘油气管网在综合立体交通和综合能源系统中的发展潜力。为实现上述目标，需要融合油气储运、数据科学和人工智能等多学科领域的思想、理论及方法，探索油气管网数字孪生、智能调控、智能预警技术以及油气管网与其他运输网络、能源网络融合技术。上述关键技术的实现需要依靠科技创新和学科交叉研究，同时依靠学术界和工业界的深度合作，以创新思维促进能源行业的高质量发展。

参考文献

- [1] 中国石油经济技术研究院. 2060年世界和中国能源展望[R]. 2021. [Economics & Technology Research Institute, CNPC. World and China energy outlook 2060 [R]. 2021.]
- [2] 陈朋超. “双碳”愿景下管网多介质灵活输送与智能化高效利用发展战略思考[J]. 油气储运, 2023, 42(7): 721–730. [CHEN P C. Strategic thinking on pipeline network development for flexible multi-media transport and intelligent efficient utilization under dual carbon vision [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(07): 721–730.]
- [3] 韩景宽, 李育天. 我国油气管网建设“十三五”回顾及“十四五”展望[J]. 石油规划设计, 2021, 32(1): 1–4+66. [HAN J K, LI Y T. Review of oil and gas pipeline network in the 13th five-year plan and prospect in the 14th five-year plan in China [J]. Petroleum Planning & Engineering, 2021, 32(1): 1–4+66.]
- [4] 宫敬, 殷雄, 李维嘉, 等. 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. [GONG J, YIN X, LI W J, et al. 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.]
- [5] 赵振学, 石永杰, 张立峰, 等. 基于时间序列与模糊推理的成品油库出库预测算法[J]. 油气储运, 2022, 41(9): 1095–1102. [ZHAO Z X, SHI Y X, ZHANG L F, et al. Exploration on the function and operation mode of natural gas pipeline networks in energy internet [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(9): 1095–1102.]
- [6] DU J, ZHENG J Q, LIANG Y T, et al. A knowledge-enhanced graph-based temporal-spatial network for natural gas consumption prediction [J]. Energy, 2023, 263: 125976.
- [7] 杜渐, 郑坚钦, 梁永图, 等. 基于数据分析的油库出库量预测研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(15): 94–101. [DU J, ZHENG J Q, LIANG Y T, et al. Research on prediction of oil depot output based on data analysis [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2021, 51(15): 94–101.]
- [8] 杨阳. 基于深度学习的天然气用气负荷预测方法研究与应用[D]. 2023. [YANG Y. Research and application of natural gas load forecasting method based on deep learning[D]. 2023.]
- [9] 张晶, 李熠辰, 张曦, 等. 不同时间尺度下的天然气需求预测模型研究进展[J]. 油气与新能源, 2023, 35(2): 95–111. [ZHANG J, LI Y C, ZHANG X, et al. Progress of the research on natural gas demand prediction model under varied time scales [J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(2): 95–111.]

- [10] 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. [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.]
- [11] 张劲军, 苏怀, 高鹏. 天然气管网韧性保供问题及其研究展望 [J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1665–1678. [ZHANG J J, SU H, GAO P. Resilience-based supply assurance of natural gas pipeline networks and its research prospects [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1665–1678.]
- [12] 杨兆铭, 向旗, 苏怀, 等. 天然气管网系统韧性研究现状与应用展望 [J]. 油气储运, 2023, 42(9): 1024–1041. [YANG Z M, XIANG Q, SU H, et al. Review and application prospect of natural gas pipeline network system resilience research [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 1024–1041.]
- [13] 王军防, 宇波, 李亚平, 等. 国产化液体管道云仿真软件CloudLPS的应用 [J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1419–1434. [WANG J F, YU B, LI Y P, et al. Application of domestic cloud simulation software CloudLPS for liquid pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1419–1434.]
- [14] 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. [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.]
- [15] GUO Q, XIE W H, NIE Z H, et al. New method for the transient simulation of natural gas pipeline networks based on the fracture-dimension-reduction algorithm [J]. Natural Gas Industry B, 2023, 10(5): 490–501.
- [16] 殷雄, 温凯, 谢萍, 等. 大口径天然气长输管道状态空间模型的适用性分析 [J]. 石油科学通报, 2020, 5(1): 101–113. [YIN X, WEN K, XIE P, et al. Applicability analysis of the state space model for large diameter long distance natural gas pipelines [J]. Petroleum Science Bulletin, 2020, 5(1): 101–113.]
- [17] HE L, WEN K, WU C C, et al. Hybrid method based on particle filter and NARX for real-time flow rate estimation in multi-product pipelines [J]. Journal of Process Control, 2020, 88: 19–31.
- [18] 于树博, 刘占生, 赵辰. 动力学仿真数据驱动的域自适应智能诊断方法 [J]. 中国机械工程, 2023, 34(23): 2832–2841. [YU X, LIU Z S, ZHAO C. Dynamics simulation data driven domain adaptive intelligent fault diagnosis [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(23): 2832–2841.]
- [19] 涂仁福, 徐宁, 刘静, 等. 考虑运行平稳性的成品油管道调度方法 [J]. 石油科学通报, 2022, 7(3): 447–456. [TU R F, XU N, LIU J, et al. A scheduling method for products pipeline considering operation stability [J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 447–456.]
- [20] 廖绮, 涂仁福, 徐宁, 等. 成品油管道智能化批次调度研究现状及思考 [J]. 油气田地面工程, 2023, 42(5): 90–97. [LIAO Q, TU R F, XU N, et al. Research status and discussion on intelligent batch scheduling of product oil pipelines [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2023, 42(5): 90–97.]
- [21] 闫亚敏, 董烈武, 任泽, 等. 通用成品油管道调度模型建立及求解 [J]. 油气储运, 2020, 39(5): 549–557. [YAN Y M, DONG L W, REN Z, et al. Model establishment and solution of general product pipeline scheduling [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(5): 549–557.]
- [22] 罗志伟, 左刚, 李博. 输销分离下的天然气托运商调度运行模式 [J]. 天然气工业, 2022, 42(3): 120–128. [LUO Z W, ZUO G, LI B. Dispatching operation mode of natural gas shippers under the system of transportation and marketing separation [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(3): 120–128.]
- [23] LI Z B, LIANG Y T, LIAO Q, et al. A review of multiproduct pipeline scheduling: From bibliometric analysis to research framework and future research directions [J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2021, 1(4): 395–406.
- [24] 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. [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.]
- [25] 耿丽媛, 董绍华, 钱伟超, 等. 基于DCNN的管道漏磁内检测环焊缝缺陷智能分类法 [J]. 油气储运, 2023, 42(5): 532–541. [GENG L Y, DONG S H, QIAN W C, et al. DCNN-based intelligent classification method of girth weld defects in MFL inline inspection [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(5): 532–541.]
- [26] 陈朋超. 油气管网安全状态监测传感系统构建与创新 [J]. 油气储运, 2023, 42(9): 998–1008. [CHENG P C. Construction and innovative development of oil and gas pipeline network safety monitoring sensor system [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 998–1008.]
- [27] 沙胜义, 冯文兴, 詹一为, 等. 管道振弦式应变传感器的使用性能对比 [J]. 油气储运, 2022, 41(4): 397–403. [SHA S W, FENG W X, ZHAN Y W, et al. Service performance comparison of vibrating wire strain sensors for pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 397–403.]
- [28] 李秀锋, 张英, 冯彪. 浅层气区域海底管道的损坏及修复 [J]. 油气储运, 2020, 39(11): 1310–1315. [LI X F, ZHANG Y, FEN B. Damage and repair of subsea pipeline in shallow gas area [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(11): 1310–1315.]

- [29] 杨农, 康云. 成品油长输管道的腐蚀分析及缺陷修复 [J]. 管道技术与设备, 2017, (6): 41-43. [YANG N, KANG Y. Corrosion analysis and defect repair of long distance oil pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment. 2017, (6): 41-43.]
- [30] 姜蕊, 邢金铭, 刘洋, 等. 海底管道复合材料防腐修复技术应用进展 [J]. 涂层与防护, 2023, 44(11): 1-5+10. [JIANG R, XING J M, LIU Y, et al. Progress in application of anticorrosive repair technology of submarine pipeline composite materials [J]. Coating and Protection, 2023, 44(11): 1-5+10.]
- [31] 杨静, 王晓霖, 李遵照, 等. 氢气长距离管输技术现状与探讨 [J]. 压力容器, 2021, 38(2): 80-86. [YANG J, WANG X L, LI Z Z, et al. Present status and discussion of long-distance pipeline hydrogen transportation technology [J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(2): 80-86.]
- [32] 朱珠, 廖绮, 邱睿, 等. 长距离氢气管道运输的技术经济分析 [J]. 石油科学通报, 2023, 8(1): 112-124. [ZHU Z, LIAO Q, QIU R, et al. Technical and economic analysis on long-distance hydrogen pipeline transportation [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(1): 112-124.]
- [33] 高岳, 朱红钧, 唐堂, 等. 天然气管道掺氢输送研究现状与分析 [J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(03): 118-128. [GAO Y, ZHU H J, TANG T, et al. Research status and analysis of hydrogen-blended natural gas transportation in natural gas pipelines [J]. LOW-CARBON CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING, 2024, 49(03): 118-128.]
- [34] 刘超广, 马贵阳, 孙东旭. 氢气管输技术研究进展 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 451-458. [LIU C G, MA G Y, SUN D X. Research progress for technology of hydrogen transportation by pipeline [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(1): 451-458.]
- [35] 李敬法, 李建立, 王玉生, 等. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨 [J]. 油气储运, 2023, 42(8): 856-871. [LI J F, LI J L, WANG Y S, et al. Research progress and development trends of key technologies for hydrogen energy storage and transportation [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 856-871.]
- [36] 苏越, 李敬法, 宇波, 等. 氢气和天然气在静态混合器中的掺混模拟 [J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 113-122. [SU Y, LI J F, YU B, et al. Simulation study on the mixing of hydrogen and natural gas in static mixers [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 113-122.]
- [37] 黄鑫, 滕霖, 聂超飞, 等. 液氨/甲醇/成品油顺序输送技术研究进展 [J]. 油气储运, 2023, 42(12): 1337-1351. [HUANG X, TENG L, NIE C F, et al. Research progress on batch transportation technology of liquid ammonia/methanol/product oil [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(12): 1337-1351.]
- [38] 滕霖, 尹鹏博, 聂超飞, 等. “氨—氢”绿色能源路线及液氨储运技术研究进展 [J]. 油气储运, 2022, 41(10): 1115-1129. [TENG L, YIN P B, NIE C F, et al. Research progress on “ammonia-hydrogen” green energy roadmap and storage & transportation technology of liquid ammonia [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(10): 1115-1129.]
- [39] 梁永图, 廖绮, 邱睿, 等. 市场化改革背景下成品油管网运营关键技术及展望 [J]. 油气储运, 2023, 42(9): 978-987+1008. [LIANG Y T, LIAO Q, QIU R, et al. Key operation technologies and prospects to product oil pipeline network under market-oriented reform [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(9): 978-987+1008.]
- [40] 吴全, 沈珏新, 余磊, 等. “双碳”背景下氨—氢储运技术与经济性浅析 [J]. 油气与新能源, 2022, 34(5): 27-33. [WU Q, SHEN J X, YU L, et al. Analysis on the hydrogen-ammonia storage and transportation technology and economical efficiency against the “Dual-Carbon” background [J]. Petroleum and New Energy, 2022, 34(5): 27-33.]
- [41] 姜英宇, 张奕, 刘中河, 等. 天津南港 LNG 接收站冷能利用可行性分析研究 [J]. 山东化工, 2022, 51(17): 160-162+165. [JIANG Y Y, ZHANG Y, LIU Z H, et al. Feasibility analysis and research on cold energy utilization at Tianjin Nangang LNG receiving station [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(17): 160-162+165.]
- [42] HE T B, CHONG Z R, ZHENG J J, et al. LNG cold energy utilization: Prospects and challenges [J]. Energy, 2019, 170: 557-568.
- [43] 国家发展改革委, 国家能源局. 中长期油气管网规划 [R], 2017. [National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium-and long-term oil and gas pipeline network planning [R]. 2017.]
- [44] 陈钢. 数字孪生技术在石化行业的应用 [J]. 炼油技术与工程, 2022, 52(5): 44-49. [CHEN G. Application of digital twin technology in petrochemical industry [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2022, 52(5): 44-49.]
- [45] BADA KHSHAN S, HAJIBANDEH N, SHAFIE-KHAH M, et al. Impact of solar energy on the integrated operation of electricity-gas grids [J]. Energy, 2019, 183: 844-853.