

国外智慧管网的研究进展

杨 旻¹, 侯宜辰², 蒋丽琼¹, 郭德华³, 杨 锋³

(1. 国家管网集团西南管道有限责任公司, 成都 610041;

2. 攀枝花华润燃气有限公司, 四川攀枝花 617000;

3. 中国标准化研究院, 北京 100191)

摘 要: 中国正在开展智慧管网技术和标准化研究, 了解国外在智慧管网方面的研究进展对中国的智慧管网技术和标准化研究具有非常重要的借鉴意义。基于对国外智慧管网相关期刊论文的检索和分析, 从国外智慧管网的研究进程、载文期刊分布和研究机构分布等角度对国外智慧管网的总体研究进展进行探讨; 从智能化设计、智能化建设、自动化控制、运行优化、风险监测、数字仿真、泄漏计算、应急处置和安全环保等多个角度对国外智慧管网的研究领域与成果进行了详细分析。结论表明, 国外智慧管网研究在 2016 年之后发展迅速, 研究热点包括腐蚀、设计、能源和模拟等, 以智慧管网作为研究对象来进行整体性与系统性研究较少, 也未使用智慧管网的概念并对其进行研究探讨, 主要聚焦关键技术研究, 在某些特定技术领域达到较高水平, 应用了传感器、算法建模、互联网、物联网、大数据分析、移动通信、人工智能、无人机、机器人、计算机、神经网络、数字化、仿真、模拟、数字孪生等技术。

关键词: 智慧管网; 智慧管道; 油气管道

中图分类号: G323; TE832 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3772/j.issn.1009-8623.2024.05.007

国家发展改革委、国家能源局分别于 2016 年和 2017 年印发了《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》和《中长期油气管网规划》, 提出将全面建设“互联网+”智慧能源, 构建布局合理、覆盖广泛、外通内畅和安全高效的现代油气管网。国家石油天然气管网集团有限公司认真贯彻落实习近平总书记提出的“四个革命、一个合作”能源安全新战略, 在 2019 年 12 月创立之初即提出“打造智慧互联大管网, 构建公平开放大平台, 培育创新成长新生态”的“两大一新”战略目标^[1]。2019 年在中国智能管道大会上, 中国石油管道局工程有限公司提出, “智慧管网”是在数字化管道与标准统一的基础上, 采用“端+云+大数据”体系架构

保存管道全生命周期数据, 用信息分析处理以及人工智能等技术手段实现管道的智能化、网络化和可视化管理, 提供智能分析与决策支持, 具有一体化管控、全方位感知、自适应优化和综合性预判的能力。智慧管网具有感知交互可视、数据全面统一、预测预警可控、运行智能高效、供应精准匹配和系统融合互联等特征。

国外目前并未直接给出智慧管网的定义, 但在某些关键技术方面开展了研究和实践应用, 税碧垣^[2]、董绍华等^[3]对国外智慧管网技术的典型案例进行了分析, 例如, 安桥管道公司(Enbridge)联合微软、Fingers Food 开发管道数字孪生技术并应用于其管辖的 6 条管道上; 通用电气公司(GE)与艾森哲公司

第一作者简介: 杨旻(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为智慧管网标准、油气管道工程数字化移交等。

通信作者简介: 郭德华(1965—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为标准情报分析、公共安全标准化等。电子邮箱: guodh@cnis.ac.cn

项目来源: 国家石油天然气管网集团有限公司科技项目“智慧管网建设运行标准研究”(JCGL202108)。

收稿日期: 2024-03-07

联合发布的首个智能管道解决方案在美国哥伦比亚管道公司已得到应用；意大利 SNAM 公司与挪威船级社、欧洲能源研究院等合作开展站场泄漏检测技术、无人机巡检系统等研究。总体而言，国外智慧管网某些技术已经达到了较高水平，因此需要对国外智慧管网的研究进展进行更加系统化的分析研究，为中国智慧管网的技术与标准化研究提供借鉴参考。

本文基于对中国石油管道公司提出的智慧管网这一概念的认识，确定相关的关键词（pipeline, natural gas, intelligence, intelligent, smart, artificial, neural network, machine learning, network, mathematical model, prediction model, deep learning, algorithm, robot, digital twin, digital twins, information mirroring, SCDA, big data, internet of things, IOT），对国外论文进行检索。检索数据库选择“ProQuest 综合学术期刊数据库（Research Library）”，该库收录了大量综合学科的核心学术期刊内容，包括油气管道行业的核心期刊《管道和天然气》（*Pipeline & Gas Journal*）在内的近 6 000 种期刊，覆盖了多元化的刊物类型，期刊的收录时间范围自 1946 年开始，至 2023 年动态更新。

经过对检索数据的筛选整理，与智慧管网技术相关的论文有 1 428 篇，本文从技术进展进程、期刊分布和作者分布等角度对论文进行了总体分析，并从智能化设计、智能化建设、自动化控制、运行优化、风险监测、数字仿真、泄漏计算、应急处置和安全环保等多个角度对国外智慧管网研究进展进行了详细分析。

1 国外智慧管网研究的总体情况

1.1 国外智慧管网的研究进程

对国外智慧管网期刊论文发布年代的统计分析，学术界对智慧管网相关研究大致可分为 3 个阶段。首先是初始萌芽期（1978—2000 年），学术界最早开始研究智慧管网是 1978 年，此后 20 余年研究热度一般，每年发文量在 6 篇及以下，这一时期每年平均发文数量占智慧管网论文总数量的 0.30% 以下，发文总数占智慧管网论文总数量的 3.36%。其次是缓慢发展期（2001—2015 年），2001 年以后 10 余年间研究热度有所增加，历年发文呈波动上涨趋势，每年发文在 10 ~ 30 篇左右，这一时期每年平均发文数量占智慧管网论文总数量的 0.70% ~ 2.50% 之间，

发文总数占智慧管网论文总数量的 22.06%。最后是快速发展期（2016 年至今），2016 年之后发文量呈逐年上升趋势，尤其是 2019 年，相较上一年发文量增加 100 余篇。2021 年发文量最多，达到 261 篇。这一时期每年平均发文数量占智慧管网论文总数量的比率大致在 4.00% ~ 20.00% 之间，发文总数占智慧管网论文总数量的比率为 74.58%。

本文对 1 428 篇论文中的主题词进行拆解，去除通用词，统计词频分布情况，词频在 100 以上的主题词见表 1。

将 pipeline（管道）、pipe（管）这 2 个专用词去除，取前 20 个词分析各年度的词频。研究发现，natural gas（天然气）作为词频最高的词，在 2018 年之后关注度越来越高，相应的 gas pipeline（气体管

表 1 智慧管网技术相关论文中英文主题词总词频表

主题词	词频
pipeline	1 777
natural gas	1 113
gas pipeline	721
corrosion	716
pipe	640
oil	587
mathematical model	536
petroleum pipeline	462
energy	455
soil	408
simulation	315
risk	311
fluid	307
design	269
algorithm	261
leak	236
network	221
optimization	220
data	190
carbon dioxide	187
heat	181

续表

主题词	词频
inspection	167
failure	158
finite element method	146
safety	143
mathematical analysis	142
deformation	139
earthquake	132
construction	130
damage	120
flow velocity	119
sensor	118
hydrogen	106
buried pipe	102
steel	102
vibration	101
friction	100

道)的词频相较 petroleum pipeline (石油管道) 在 2019 年之后呈现持续增长的趋势, 这表明在气体管道方面的智慧管网研究更多。corrosion (腐蚀) 的词频其次, 最早出现于 1994 年, 从 2017 年之后持续增长, 是智慧管网研究的热点。mathematical model (数学模型) 在油气管道行业的论文最早出现于 1979 年, 从 2017 年之后持续增长。自 2017 年, 智慧管网的研究呈现快速发展的态势, 腐蚀、设计、能源、模拟等都是智慧管网的研究热点, 其中气体管道的腐蚀研究是研究的重点。

1.2 载文期刊分布

基于检索数据, 智慧管网技术 1 428 篇论文分布于 513 种期刊上, 其中该领域载文量 10 篇以上的期刊共 22 种, 具体如表 2 所示。

从表 2 中可以看到, 载文量最多的期刊为 *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 刊载智慧管网技术相关论文 79 篇, 其次为 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *Pipeline & Gas Journal* 等。载文量 > 10 篇的期刊中有 20 种属于 SCI, 根据科睿唯安每年定期发布的期刊引用报告 (Journal Citation Reports, JCR), 位于 Q1 区的有 5 种

表 2 智慧管网技术载文期刊分布 (发文量 > 10 篇)

期刊名称	载文量 / 篇	期刊类别	2020 影响因子	5 年影响因子	JCR 分区
<i>IOP Conference Series: Earth and Environmental Science</i>	79	SCI	—	—	—
<i>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering</i>	65	SCI	—	—	—
<i>Pipeline & Gas Journal</i>	63	SCI	—	—	—
<i>Energies</i>	59	SCI	3.004	3.085	Q3
<i>Corrosion</i>	43	SCI	1.77	2.056	Q2
<i>Journal of Physics: Conference Series</i>	43	SCI	—	—	—
<i>Applied Sciences</i>	36	SCI	—	—	—
<i>Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice</i>	32	SCI	1.952	1.838	Q3
<i>Sensors</i>	25	SCI	3.576	3.735	Q1
<i>Process Safety and Environmental Protection</i>	20	SCI	6.158	6.046	Q1
<i>Journal of Marine Science and Engineering</i>	19	SCI	2.458	2.455	Q2
<i>Sustainability</i>	15	SCI	3.251	3.473	Q2
<i>Measurement</i>	14	SCI	3.927	3.778	Q1
<i>IEEE Access</i>	13	SCI	3.367	3.671	Q2

续表

期刊名称	载文量 / 篇	期刊类别	2020 影响因子	5 年影响因子	JCR 分区
Mathematical Problems in Engineering	13	SCI	1.305	1.27	Q4
Soil Dynamics and Earthquake Engineering	13	SCI	3.718	3.888	Q2
Water	12	SCI	3.103	3.229	Q2
Energy	11	SCI	7.147	6.845	Q1
Energy Law Journal	11	—	—	—	—
Journal of Petroleum Exploration and Production Technology	11	SCI	2.077	2.116	Q2
Reliability Engineering & System Safety	11	SCI	6.188	6.336	Q1
The Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference	11	—	—	—	—

期刊, 位于 Q2 区的有 7 种期刊, 5 年影响因子 (期刊近 5 年刊载论文的总被引数 / 总论文数) 最高的是 *Energy*。

1.3 研究机构分布

以 748 篇有“作者”字段的论文数据作为分析对象。对第一作者单位数据进行提取、合并和名称规范等一系列清洗工作, 得到 748 篇论文的第一作

者主要分布于 368 所国外机构。其中主要的国外机构有俄罗斯乌法国立石油技术大学、俄罗斯圣彼得堡矿业大学、俄罗斯秋明工业大学和波兰华沙理工大学等。发文数量在 3 篇及以上的国外研究机构分布如表 3 所示。

通过上述分析可以发现, 国外开展智慧管网研究的机构大多数为高校。

表 3 国外研究机构分布

序号	机构名称	发文数量 / 篇
1	俄罗斯乌法国立石油技术大学 (Ufa State Petroleum Technological University)	11
2	俄罗斯圣彼得堡矿业大学 (Saint Petersburg Mining University)	8
3	俄罗斯秋明工业大学 (Industrial University of Tyumen)	7
4	波兰华沙理工大学 (Warsaw University of Technology)	6
5	伊朗阿米尔卡比尔技术大学 (Amirkabir University of Technology)	5
6	马来西亚国油科技大学 (Universiti Teknologi Petronas)	5
7	俄罗斯托木斯克理工大学 (National Research Tomsk Polytechnic University)	4
8	乌兹别克斯坦塔什干灌溉与农业机械学院 (Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers)	3
9	马来西亚彭亨大学 (Universiti Malaysia Pahang)	3
10	尼日利亚哈科特港大学 (University of Port Harcourt)	3
11	澳大利亚皇家墨尔本理工大学 (RMIT University)	3
12	德国亚琛工业大学 (RWTH Aachen University)	3
13	印度尼西亚大学 (Universitas Iodnesia)	3

2 国外智慧管网的研究领域与成果

由上述分析可知, 国外智慧管网在 2016 年以后进入快速发展期, 论文数量逐年增多, 涉及腐蚀、设计、能源、模拟和泄漏等内容都是研究的重点, 对论文进行深入分析后发现, 国外关于智慧管网的研究领域主要集中在智能化设计、智能化建设、自动化控制、运行优化、风险监测、数字仿真、泄漏计算、应急处置和安全环保等具体技术领域, 还没有开展智慧管网概念的讨论和系统性研究。为深入解析国外智慧管网关键技术的研究进展, 本文选取 2016 年之后具有代表性的论文进行研究进展的详细分析, 同时选取数字仿真、泄漏计算等较早开展研究的早期代表性论文进行研究进展的详细分析。

2.1 智能化设计

国外油气管道设计将智能化技术体现在设计方案中, 在这一方面, 学术界或介绍或提出智慧管网相关的智能化模型、设备和技术等。

2.1.1 智能化技术应用

《管道和天然气》在其“新产品和服务”栏目中介绍了管道建设或设计中的几种智能化设备、方法, 包括可避免管道安装过程中涂层受到损害的方法、带有蓝牙的智能温度变送器等^[4]; Newman^[5]介绍了可用于实时监控管道状况的机器人、无人机、人工智能和云计算等现代管道技术; Chavala 等^[6]通过罗拉低功耗局域网无线标准技术、安装感知节点和沿线网关体系等研究了油气管道长距离维护管理的方法, 并进行了性能评估; Murray 等^[7]研究了分布式光纤传感在管道完整性、安全性中的应用, 包括泄漏检测、第三方入侵、刮板跟踪等管道监控功能和泄漏检测等定量系统等; Clayton^[8]分析了几种智能化管道清管检测技术及相关方案; Leipzig 等^[9]分析了元数据在可重复计算研究中的作用; Myrvang^[10]分析了数字化技术在油气管道网络安全运营中的应用与作用; Sharma 等^[11]介绍了管道行业各类型监测技术, 包括用于腐蚀监测的光纤传感器、用于物理化学传感的分布式光纤传感器 (OFS)、基于声学/无人驾驶等新技术等; Abate 等^[12]研究了以燃气管道为通道的智能通信可行性。从上述研究可以看出, 机器人、无人机、人工智能、云计算、光纤传感和数字化等智能化

新技术在油气管道设计中均有所涉及, 促进了油气管道智能化水平的提升, 将智能化新技术与油气管网的具体实践需求相结合将成为智慧管网建设中的发展方向和研究重点。

2.1.2 智能化模型建设

《管道和天然气》在其“产品开发技术”栏目中讨论了一种数字孪生模型鉴定方法, 用于促进数字孪生技术在管道智能化中的应用^[13]; Lu 等^[14]提出了一个有效数据驱动的长距离输油管道能耗预测模型, 该模型首先通过相关性分析提取特征, 然后利用混合支持向量机进行预测, 结果表明其具有较高的预测精度。Thomas^[15]研究了用于管道修复的机器人技术开发相关问题; Kershenbaum 等^[16]研究了海底管道跨度、应力、挠度测定的分析方法与数学模型, 协助选择海底管道路线。Stoddard^[17]研究了一个管道运输公司管理运营智能化系统, 该系统包括网络分析、区域隔离、自动化设计和客户需求管理等模块。数字孪生技术的应用可以使用户通过 3D 视图实时监测管道的运行, 应用数字孪生技术以及构建能耗、管道修复和管道应力等各种应用的智能化模型将对智慧管网的设计与运行管理至关重要。

2.2 智能化建设

在智能化建设方面, 学术界针对智慧管网建设过程中涉及的系统架构、基础设施和线路建设等方面进行了研究。

博莱克威奇公司探讨了数据采集与监视控制系统 (SCADA) 用于管道控制室管理的优势^[18]; Russel^[19]研究了 SCADA 和遥感技术在管道传输系统中的应用; Wibawa 等^[20]研究了印尼东部天然气基础设施建设方面内容, 包括设备设施选择、天然气技术应用、消费者需求和人力资源素质等; Harderode^[21]介绍了利用无代码数字孪生技术的数据基础架构进行减阻剂 (Drag Reducing Agent, DRA) 处理的管道监控; Priyanka 等^[22]提出了一种新的集成智能物联网模块, 其操作依赖于免费软件, 可实现高效的数据通信, 用于在线数据分析、实时监控, 支持石油管道智能运输, 具有智能化、低成本和便携性等优点。智能化数据管理系统、遥感技术和物联网等在系统、线路和基础设施等重点研究和应用的技术, 已在智慧管网的建设中得到广泛应用。

2.3 自动化控制

在自动化控制方面,学术界对相关理论、观点、技术应用等方面做了研究。

Nemec^[23]研究了行业内知名人士在管道建设中自动化控制的相关论述,如自动化工具与技术的协调使用、自动化控制中人工干预的必要性、相关制度法规等;Maheswari等^[24]对从物联网视角出发的工业自动化在线监测与控制相关研究进行了梳理论述,包括各种自动化工具、技术、方法,以及不同的通信协议等内容。Newman^[25]讨论了自动化技术在管道建设中的优势,包括声学传感器、无人机监视和分布式控制系统等。

自动化和传感器是实现全天候监控管道的关键技术,传感器可获得如管道结构、裂缝等异常损害信息,特别是物联网传感器不仅可以识别潜在损害的第一阶段,还可以识别其位置和性质的严重性,为控制室提供实时数据,提高管网运行安全性和效率,是智慧管网技术中需要深入研究与应用的关键技术。

2.4 运行优化

在运行优化方面,学术界对管道网络设计、管理、运营、经济和工具等方面的优化方法进行了研究,数据分析、优化算法等技术是智慧管网运行优化方面的发展方向与关键技术。

Allemand^[26]研究了边缘计算在管道管理优化中的作用与意义,其指出边缘计算能够支持数据管理辅助分析功能,从而改善企业和工业资产管理,尤其对于中游运营公司而言,其组织结构适合应用边缘计算设计解决方案,在决策和资产管理中有效实现实时数据的处理。

Arya^[27]构建了可降低天然气管道运营成本的多目标建模框架,能够帮助管道管理人员从中选出最佳解决方案;Medvedeva等^[28]通过确定主管道位置实现天然气管道路线选择,从而降低管道建设和运营成本;Acquatella等^[29]研究了石油天然气公司通过智能化连接解决节省资金、保持盈利、保障生存能力等问题。

2.5 风险监测

在风险监测方面,学术界对管道风险监测的具体方法技术、系统构建等方面进行了研究。

2.5.1 风险监测方法技术

管道风险监测包括:地质灾害、性能故障、管

道检查等。

Elshaboury^[30]开发了一种用于预测管道故障的智能化模型,该模型主要基于管道事件的历史数据,采用多层感知器(MLP)神经网络、径向基函数(RBF)神经网络和多项式逻辑回归(MNL)等技术;Basha等^[31]提出了一种基于人工神经网络的预测管道寿命的智能方法,并进行灵敏度分析、剩余使用寿命预估,可以避免不必要的检查成本并规划维护计划。风险监测最重要的作用是能提前预防地质灾害、提前发现性能故障和管道泄漏,其中,神经网络算法、数据分析与处理等技术将有效提高风险监测效率,随着人工智能技术的发展,这些技术将进一步在智慧管网中得到开发和应用。

2.5.2 风险监测系统构建

Singh等^[32]提出了一种基于Zigbee和LoRa架构的输油管道物联网监控系统,用于管道实时监测,并进行了实验与评估工作;Tejedor等^[33]提出了一种新型管道完整性风险监测系统,系统结合上下文信息源特征,基于混合高斯模型-隐马尔科夫模型,采用“机器+活动识别”、威胁检测两种运行模式;Chavala等^[34]公开了一项石油管道智能腐蚀监测系统,该系统由具有发射器和接收器模块的机器人组成。风险监测系统集成物联网、大数据、机器人、信息化和数据通信等多种技术以实现管道风险的实时监测和预警。

2.6 数字仿真

在数字仿真方面,国外开展研究较早,早期研究包括利用有限元等方法建模仿真,研究管道应力分析、动力响应和极限荷载等方面的问题。例如,Ansari^[35]通过非线性大挠度分析,基于建模、提出方程公式等研究起重作业期间海底管道的非线性应力分析方法;O'Leary等^[36]使用管道壳体模型分析了嵌入弹性介质中的长连续管道在长波长、低频下的动力响应;Takada等^[37]介绍了连续管道或接合管道地震反应的三维静态模拟分析;France^[38]研究了管道系统分析中摩擦系数关系计算;Mashaly等^[39]研究了基于集中质量模型的埋地管道地震应力分析;Roun^[40]通过有限元方法进行管道应力建模分析;Nixon^[41]利用有限元和热应变类比方法对永久冻土区融化而产生的差异融沉降进行建模,研究解冻沉降对海上管道的影响;Chiou等^[42]通过有限元方法模拟研究非弹性土壤介质中浅埋管道的极限荷

载问题; Verley 等^[43]研究了沙土与管道的管土作用模型, 通过与实验数据拟合, 预测管道穿透和位移发展过程; Sumer 等^[44]研究了跨肩管道自埋的过程模拟实验, 利用土壤承载力公式研究跨肩管道沉没情况; Choi^[45]利用迭代方法模拟海上管道扩张与管道末端约束力间的相互作用, 以得出管道尺寸设计标准; Chung 等^[46]研究了管道冲击荷载的三维非线性响应, 通过非线性有限元法对冲击荷载的静态、动态三维耦合建立响应模型; Klomp^[47]通过物理模型测试、建立实验关系等研究管道-海床相互作用, 管道自由跨度发展。

在近期的研究方面, 对相关模型建设有所研究。Li 等^[48]提出了一种基于混合技术的数据驱动腐蚀预测模型, 可以实现对海底原油管道腐蚀速率的有效模拟与预测, 该模型主要集成了主成分分析 (PCA)、人工蜂群算法 (ABC) 和支持向量回归 (SVR) 3 种数据驱动方法; Mohamed 等^[49]开发了一种应用多种人工智能方法的油气管道最大点蚀深度预测模型框架, 利用了人工神经网络、模型树 (MSTree)、多元自适应回归样条 (MARS) 等人工智能技术; Thiberville 等^[50]研究了用于管道泄漏检测的智能清管建模, 主要包括数值模型和网络模型两个部分的内容。

数字仿真技术已经发展到运用数据驱动、人工智能、神经网络等方法和技术进行模拟、建模与预测的阶段, 并应用于油气管道的腐蚀、泄漏等隐患的预防与治理。

2.7 泄漏计算

在泄漏计算方面, 国外研究了管道泄漏监测、计算、风险评估与防控、预测等方面内容。

在早期阶段, Baghdadi 等^[51]研究了一种基于单维流量分析的管道泄漏检测方法管道泄漏定。Yun 等^[52]对埋地管道梁式屈曲进行建模, 并计算分析管道的极限载荷; Spiekhout 等^[53]研究了管道抗机械损伤能力评估的计算模型, 从而获得对管道抵抗机械损伤有用的相关参数。

近年来, Palmer 等^[54]研究了将磁通泄漏数据转换为 3D 金属损耗曲线, 从而提高管道行业检测质量; Yang 等^[55]研究了一种基于人工智能和振动分析的管道泄漏监测系统, 包括泄漏检测算法、泄漏定位、泄漏力估计等内容, 能够同时对安装在地上的液体管道进行全面的泄漏检测、定位和体积率估算, 并进行了性能验证; Cruz 等^[56]研究了机器

学习与声学方法在燃气管道泄漏检测与定位中的应用, 该方法能够及时检测到在低压下运行的管道上的小泄漏, 并且能在存在外部干扰的情况下减少虚假警报。

油气管道泄漏是影响管道安全运行的重要因素, 人工智能、机器学习以及声学等智能化方法和技术的应用, 使管道的泄漏计算智慧化, 实现对泄漏的及时、准确的监测、发现、定位和防护。

2.8 应急处置

在应急处置方面, Paramkusem 等^[57]利用大数据分析研究方法研究了 SCADA 攻击类型及其对应的解决方案, 主要利用 K 均值 (k-means) 聚类方法分析报文的属性差异和历史记录, 对 SCADA 网络中的恶意命令和响应报文进行检测和分类, 并提出攻击分类解决方案, 利用 Apache Mahout 随机森林分类算法对 SCADA 管道数据集进行攻击分类, 实验证明该方法对响应攻击的分类准确率提高了 5~17 个百分点, 对恶意命令的分类准确率提高了 2~8 个百分点。数据与网络安全是智慧管网运行的保障, 应用大数据、聚类等方法研究应急处置技术以解决智慧管网中的数据和网络安全问题是非常重要的发展方向。

2.9 安全环保

在安全环保方面, 国外在管道风险评估、风险防控、安全标准、相关方法举措等方面进行了研究。

2.9.1 管道风险评估与防控

Nasser 等^[58]分析对比了传统方法与人工智能方法在油气管道腐蚀速率预测中的应用, 主要包括确定性和概率模型、人工智能方法等, 为运营商在进行管道风险评估相关工作时提供参考; Martin^[59]讨论了持续监控、控制细节、了解标准和关注边界安全等降低管道基础设施中网络安全风险的方法。将人工智能方法运用于管道风险评估与防控是未来的发展方向。

2.9.2 管道安全标准制定

Lemieux^[60]详细介绍了美国石油学会 (API) 发布的标准 API STD1164《管道控制系统网络安全》, 指出该标准能够帮助行业有效保护基础设施免受网络威胁; 美国联邦能源管理委员会对其州际天然气管道商业实践标准的法规进行了修订, 引用适用于天然气管道的最新商业实践标准, 旨在加强天然气行业的系统和软件安全措施^[61]; DiChristopher^[62]介

绍了穆迪对于美国天然气管道网络安全标准的相关观点,例如,推动对美国天然气管道运营商实施强制性联邦网络安全标准将增强中游公司及其供应的电力公用事业的信誉,2018年美国国务院问责办公室将网络安全标记为运输安全管理局实施的天然气管道安全计划的主要弱点。基于智慧管网建设中的标准化需求,及时制定标准并在法律法规中引用,是智慧管网标准化的发展方向。

2.9.3 管道安全方法与举措

Everage^[63]讨论了政府在管道安全与维护中的角色;Arceneaux等^[64]研究了管道承包商的安全管理,包括建立安全文化、注重安全理念与现场安全实践的融合性、确定与管道承包商的发展规划和整合先进信息技术等;Crynes^[65]讨论了政府及相关企业在保护管道运营地区人类健康等方面制定的空气质量标准及相关举措;Pasquali^[66]研究了油气管道中网络安全的重要性问题,提出智能管道和智能员工是要解决的基本问题。信息化、智能化技术和方法不仅提高管道安全性,而且也通过更加智能的员工保障管道的安全。

3 结语

通过对国外智慧管网研究进展的分析,可以得到以下研究结论。

从研究进程来看,数学模型(mathematical model)在管道行业的论文最早出现于1979年,曾使用了电子管道(electronic pipeline)的概念,相关智能化技术的研究持续开展,特别是自2016年之后,智慧管网的研究呈现快速发展的态势,腐蚀、设计、能源和模拟等都是智慧管网的研究热点,其中气体管道的腐蚀研究是研究的重点。

从智慧管网的研究对象上看,国外以保证管道安全运行为目标,采用大数据、信息化、人工智能和神经网络等技术开展腐蚀、泄漏和网络安全等特定研究对象的研究,促进管网安全运行,未以智慧管网作为研究对象进行整体性与系统性研究,也未使用智能管道或智慧管网的概念并对其进行研究探讨,主要聚焦关键技术。

在智慧管网的研究领域方面,国外研究涵盖了智能化设计、智能化建设、自动化控制、运行优化、风险监测、数字仿真、泄漏计算、应急处置和安全环保等方面,特别在安全环保方面的研究较多,涉

及油气管道网络安全、风险评估、空气质量、安全运行和安全文化等多个方面,也包括了管道控制系统网络安全标准的研究与应用。

在技术先进性方面,虽然国外没有开展系统性的智慧管网研究,但在某些特定技术领域也达到较高水平,例如,在SCADA及其配套系统应用等方面。SCADA是油气管道或管网运行监控的中枢神经系统,也是智慧管道的核心组成部分。SCADA的数据采集、状态监测、故障报警及各种控制功能自身都具有不同程度的智能性,此外,其还可以与运行仿真、运行优化、状态预测、泄漏监测、故障监测与诊断等支持管道运行的专用系统配套使用,从而提高管道运行的智能化程度和水平。

在技术发展趋势方面,智慧管网应用传感器、算法建模、互联网、物联网、大数据分析、移动通信、人工智能、无人机、机器人、计算机、神经网络、数字化、仿真、模拟和数字孪生等技术,具备可观测、可控制和智能化的特征。其中,可观测是指能够对所有主要设备的状态进行监管,并能感知交互可视;可控制是指能够对所有主要设备的状态进行控制,并能控制泄漏、腐蚀等预测预警;智能化是指智慧管网可自适应,可进行智能分析,实现运行智能高效。例如,基于传感器技术收集数据,可以预测未来的任何运行故障,从而使用算法建模技术加以预防;利用基于管网模拟模型的模拟技术预测各种操作场景对管网不同部分的影响,可以发现管网内每个点的实际情况,确定可能出现的问题及其原因;无人机技术可以从空中检查管道网络,使用光学、红外和热像仪收集大量数据,自动使用人工智能和云计算创建显示泄漏的植物死亡区等信息,供决策者采取行动。■

参考文献:

- [1] 国家石油天然气管网集团有限公司. 国家管网集团: 打造智慧互联大管网 畅通国家能源大动脉 [EB/OL]. [2024-01-30]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n13461446/n15390485/n15769618/c27880633/content.html>.
- [2] 税碧垣. 智慧管网总体架构与发展策略思考 [J]. 油气储运, 2020, 39(11): 1201-1218.
- [3] 董绍华, 张轶男, 左丽丽. 中外智慧管网发展现状与对策方案 [J]. 油气储运, 2021, 40(3): 249-255.

- [4] EBSCO. What's new in products & services[J]. Pipeline & gas journal, 2021, 248(5): 58.
- [5] NEWMAN N. A guide to new robotics, drone technologies for pipe[J]. Pipeline & gas journal, 2021, 248(11): 44, 46.
- [6] CHAVALA L N, SINGH R, GEHLOT A. Performance evaluation of LoRa based sensor node and gateway architecture for oil pipeline management[J]. International journal of electrical and computer engineering, 2022, 12(1): 974-982.
- [7] MURRAY A, GRAHAM D, MINTO C. Application of distributed fiber-optic sensing for pipeline integrity and security [J]. Pipeline & gas journal, 2021, 248(3): 50, 52-54.
- [8] CLAYTON P. Making simple smart and smart simple: cost-effective, low-risk pipeline inspection[J]. Pipeline & Gas Journal, 2018, 245(8): 44-47.
- [9] LEIPZIG J, NÜST D, CHARLES T H, et al. The role of metadata in reproducible computational research[J]. Patterns, 2021, 2(9): 1-28.
- [10] MYRVANG P. Guideline shows how to make oil and gas industry cyber-secure[J]. Pipeline & gas journal, 2018, 245(2): 46-48.
- [11] SHARMA V B, SINGH K, GUPTA R, et al. Review of structural health monitoring techniques in pipeline and wind turbine industries[J]. Applied system innovation, 2021, 4(3) :1-31.
- [12] ABATE F, CARO D D, LEO G D, et al. Smart meters communication using gas pipelines as channel: feasibility study[C]. New Zealand: IEEE, 2019.
- [13] Tech Notes. Global pilot launched to secure greater trust in digital twins[J]. Pipeline & gas journal, 2020, 247(6): 55.
- [14] LU H F, XU Z D, AZIMI M, et al. An effective data-driven model for predicting energy consumption of long-distance oil pipelines[J]. Journal of pipeline systems engineering and practice, 2022, 13(2): 1949-1204.
- [15] THOMAS A. Robots and pipe rehabilitation[J]. Trenchless technology, 1994, 3(1): 24-26.
- [16] KERSHENBAUM N Y, HARRISON G E. Seabed irregularity in subsea pipeline spanning[J]. Isope golden colorado, 1995(2): 8-14.
- [17] STODDARD B. Integrated modeling[J]. American gas, 1994, 76(10): 28.
- [18] Black & Veatch Insights Group. Many benefits occur within integration of the control room with SCADA[J]. Pipeline & gas Journal, 2021, 248(3): 42-43.
- [19] RUSSEL W. TREAT. SCADA and telemetry in gas transmission systems[J]. Pipeline & gas journal, 2015, 242(2): 61-63.
- [20] WIBAWA B, IBNU F, NOVIANTI D A, et al. Development of sustainable infrastructure in eastern indonesia[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 832(1): 012045.
- [21] HARDERODE C, NATHAN A. Support for DRA-Treated liquid pipelines using no-node digital twins[J]. Pipeline & gas journal, 2020, 247(10): 61-65.
- [22] PRIYANKA E B, MAHESWARI C, THANGAVEL S. A smart - integrated IoT module for intelligent transportation in oil industry[J]. International journal of numerical modelling, 2021, 34(3): 1-20.
- [23] NEMEC R. Control centers at the heart of innovation, advancement[J]. Pipeline & gas journal, 2020, 247(4): 16-19.
- [24] MAHESWARI C, PERINCHERY A A B, PRIYANKA E B, et al. Review on online monitoring and control in industrial automation—an IoT perspective[J]. IOP conference series. materials science and engineering, 2021, 1055(1): 1-8.
- [25] NEWMAN N. Smart pipeline technologies boost safety, regulatory compliance[J]. Pipeline & gas journal, 2020, 247(2): 37-38.
- [26] ALLEMAND C. Edge optimizes pipeline management [J]. Pipeline & gas journal, 2021, 248(4): 32-34.
- [27] ARYA A K. Optimal operation of a multi-distribution natural gas pipeline grid: an ant colony approach[J]. Journal of petroleum exploration and production technology, 2021, 11(10): 3859-3878.
- [28] MEDVEDEVA O N, YU CHILIKIN A. The route selection method for natural gas pipelines[J]. IOP conference series. materials science and engineering, 2021, 1079(4): 1-6.
- [29] ACQUATELLA A. Smart-connected pipeline serves as critical step in journey to success[J]. Pipeline & gas journal, 2016, 243(10): 59.
- [30] ELSHABOURY N, AL-SAKKAF A, ALFALAH G, et al. Data-driven models for forecasting failure modes in oil and gas pipes[J]. Processes, 2022, 10(2): 400.
- [31] BASHA S N, RAO P S, OTHMAN A R, et al. An intelligent model to predict the life condition of crude oil pipelines

- using artificial neural networks[J]. Neural computing & applications, 2021, 33(21): 14771-14792.
- [32] SINGH R, BAZ M, CN L N, et al. Zigbee and long-range architecture based monitoring system for oil pipeline monitoring with the Internet of things[J]. Sustainability, 2021, 13(18): 10226.
- [33] TEJEDOR J, JAVIER M G, MARTINS H F, et al. A contextual GMM-HMM smart fiber optic surveillance system for pipeline integrity threat detection[J]. Journal of lightwave technology, 2019, 37(18): 4514-4522.
- [34] CHAVALA L N, RAJESH S, ANITA G, et al. A smart corrosion monitoring system for oil pipeline: IN202011032880A[P]. 2020-10-09.
- [35] ANSARI K A. Nonlinear stress analysis of offshore pipelines during pickup operations[J]. Computer & Structures, 1984(2): 357-363.
- [36] O'LEARY P M, DATTA S K. Dynamic response of a buried pipeline at low frequencies[J]. Journal of pressure vessel technology, 1985, 107(1): 44-50.
- [37] TAKADA S, TANABE K. Three-dimensional seismic response analysis of buried continuous or jointed pipelines[J]. Journal of pressure vessel technology, 1987, 109(1): 80-87.
- [38] FRANCE P W. Some recent explicit friction factor relationships for the analysis of multiple reservoir pipeline systems[C]. Boston: Computational Mechanics Publications, 1988.
- [39] MASHALY E A, DATTAK T K. Seismic stresses at the intersections of buried pipelines[J]. Journal of pipelines, 1989, 7(3): 281-299.
- [40] ROUN P. Static analysis of the behaviour of pipelines under service conditions[J]. ACTA tech csav, 1991, 36(6): 750-757.
- [41] NIXON J F. Thaw-subsidence effects on offshore pipelines[J]. Journal of cold regions engineering, 1991, 5(1): 28-41.
- [42] CHIOU Y J, CHI S Y. Limit loads of buried pipelines in inelastic soil medium[J]. Journal of engineering mechanics, 1993, 119(5): 939-954.
- [43] VERLEY RLP, SOTBERG T. A soil resistance model for pipelines placed on sandy soils[J]. Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 1994, 116(3): 145-153.
- [44] SUMER B M, FREDSOEE J. Self-burial of pipelines at span shoulders[J]. International journal of offshore and polar engineering, 1994, 4(1): 30-35.
- [45] CHOI H S. Expansion analysis of offshore pipelines close to restraints[C]//The Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. Hague: ISOPE, 1995: 81-88.
- [46] CHUNG J S, CHENG B R, HUTTELMAIER H-P. Three-dimensional nonlinear responses to impact loads on free-span pipeline: Torsional coupling and load steps[C]//The Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. Hague: ISOPE, 1995: 109-116.
- [47] KLOMP WHG, HANSEN E A, CHEN Z, et al. Pipeline seabed interaction, free span development[C]//The Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference. Hague: ISOPE, 1995: 117-122.
- [48] LI X H, ZHANG L Y, KHAN F, et al. A data-driven corrosion prediction model to support digitization of subsea operations[J]. Process safety and environmental protection, 2021(153): 413-421.
- [49] MOHAMED E A B, BEHROOZE K, MOHAMMED T B, et al. Advanced intelligence frameworks for predicting maximum pitting corrosion depth in oil and gas pipelines[J]. Process safety and environmental protection, 2021(147): 818-833.
- [50] THIBERVILLE C, WANG Y F, WALTRICH P, et al. Modeling of smart pigging for pipeline leak detection[J]. SPE production & operations, 2020, 35(3): 610-627.
- [51] BAGHDADI AHA, MANSY HA. Mathematical model for leak location in pipelines[J]. Applied mathematical modeling, 1988, 12(1): 25-30.
- [52] YUN H, KYRIAKIDES S D. Model for beam-mode buckling of buried pipelines [J]. Journal of engineering mechanics, 1985, 111(2): 235-253.
- [53] SPIEKHOUT J, GRESNIGT A M, KONING C, et al. Calculation models for the evaluation of the resistance against mechanical damage of pipelines[J]. 3R international, 1986, 25(4): 198-203.
- [54] PALMER J, DANILOV A. 3-D metal loss profiles from MFL data [J]. Pipeline & gas journal, 2021, 248(10): 46-49.
- [55] YANG J, MOSTAGHIMI H, HUGO R, et al. Pipeline leak and volume rate detections through Artificial intelligence

- and vibration analysis[J]. *Measurement*, 2022(187): 110368.
- [56] CRUZ R P D, SILVA F, FILETI A M F. Machine learning and acoustic method applied to leak detection and location in low-pressure gas pipelines[J]. *Clean technologies and environmental policy*, 2020,22(3): 627-638.
- [57] PARAMKUSEM K M, AYGUN R S. Classifying categories of SCADA attacks in a big data framework[J]. *Annals of data science*, 2018,5(3): 359-386.
- [58] NASSER A M M, MONTASIR O A, N A WAN ABDULLAH ZAWAWI, et al. A review on oil and gas pipelines corrosion growth rate modelling incorporating artificial intelligence approach[J]. *IOP conference series. earth and environmental science*, 2020, 476(1): 012024.
- [59] MARTIN D. Pipeline infrastructure: how to reduce cyber-risk[J]. *Pipeline & gas journal*, 2021, 248(10): 35-36.
- [60] LEMIEUX S. API's cybersecurity standard provides approach to protection[J]. *Pipeline & gas journal*, 2021, 248(10): 38-39.
- [61] Federal Energy Regulatory Commission. Standards for business practices of interstate natural gas pipelines[EB/OL]. [2024-02-04]. <https://ferc.gov/media/g-3-rm96-1-042>.
- [62] DICHRISTOPHER T. Gas pipeline operators would benefit from cybersecurity regulation, Moody's says[EB/OL]. [2024-02-20]. https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/ee7nw84uuk4d_ezi7wgcf2.
- [63] EVERAGE B. A Look at government's role in pipeline safety, maintenance[J]. *Pipeline & gas journal*, 2018, 245(10): 38, 40.
- [64] ARCENEUX J, SPEER J. How to regulation-proof pipeline contractor safety programs[J]. *Pipeline & gas journal*, 2017, 244(1): 28-30.
- [65] CRYNES L. Custom adapters, tubing eliminate leaks, allow retrofitting[J]. *Pipeline & gas journal*, 2020, 247(7): 28, 30.
- [66] PASQUALI D. Smart pipelines and smarter people[J]. *Pipeline & gas journal*, 2018, 245(2): 44-45.

Development of Smart Pipeline Networks on Abroad

YANG Yang¹, HOU Yichen², JIANG Liqiong¹, GUO Dehua³, YANG Feng³

(1. National Pipe Network Group Southwest Pipeline Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041;

2. Panzhihua China Resources Gas Co., Ltd., Panzhihua, Sichuan 617000;

3. China National Institute of Standardization, Beijing 100191)

Abstract: China is currently conducting study on technology and standardization for smart pipeline network. Understanding the development of smart pipe networks on abroad is of great reference significance for China. Based on the retrieval and summary of papers published in foreign journal related to smart pipeline networks, this paper analyzes the overall study development of smart pipeline networks on abroad from the perspectives of research progress, distribution of journals, and research institutions. A detailed analysis is completed on the research fields and achievements of smart pipeline networks on abroad from multiple perspectives, including intelligent design, intelligent construction, automation control, operation optimization, risk monitoring, digital simulation, leakage calculation, emergency response, safety and environmental protection. This paper puts forward the conclusions based on analysis: the study on smart pipeline network on abroad has developed rapidly since 2016 with research focuses including corrosion, design, energy, simulation, etc., and does not take smart pipeline network as the research object to conduct integrated and systematic research, nor does it discuss the concept and definition of smart pipeline network, focusing mainly on key technology research and reaching a high level in some specific technical fields, using sensors, algorithm modeling, the Internet, the Internet of Things, big data analysis, mobile communications, artificial intelligence, UAVs, robots, computers, neural networks, digitization, simulation, simulation, digital twins and other technologies.

Keywords: smart pipeline network; smart pipeline; oil and gas pipeline