

智能管道发展现状及具体领域 智能化的探讨

陈传胜¹ 李 丹² 尹 恒¹ 王盼锋² 全 青² 王寿喜²

1. 中国石化川气东送天然气管道有限公司, 湖北 武汉 430000;

2. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065

摘 要:大数据、人工智能、数字孪生等科技信息技术的高速发展,极大地推动了管道行业智能化转型升级。基于协同建造的数字化管道建设成果向管道生产运行系统的数字化交付,以及基于建设与运行数据向智能应用的数字化交付,构成了满足管道运行实时监测、远程实时控制、自主决策和智能预测预警等管理需求的完整体系,这一智能化体系的可持续发展有利于油气管道的高质量发展。通过总结提出了智能管道概念及其具体指标,并分类介绍了目前国内外在油气管道具体领域的智能算法模型。提出我国油气管道建设正在进入智能化时代,相关领域理论研究深入,但实际应用不够广泛,未来应以全面感知、综合预判、一体管控和自适应优化为目标进行建设,从而实现“智慧管网”。研究对推动管道智能化改革有一定的借鉴意义。

关键词:智能管道;建设指标;预测预警;算法模型

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.05.021

Development Status of Smart Pipeline System and Discussion on Its Intellectualization Application in this Specific Field

Chen Chuansheng¹, Li Dan², Yin Heng¹, Wang Panfeng², Quan Qing², Wang Shouxi²

1. Sinopec Sichuan to Eastern China Transmission Gas Pipeline Co., Ltd, Wuhan, Hubei, 430000, China;

2. School of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, 710065, China

Abstract: The rapid development of scientific and technological information technologies, such as big data, artificial intelligence and digital twins, has greatly promoted the transformation and upgrading of the pipeline industry to intellectualization. The digital delivery of digital pipeline construction results based on collaborative construction to the pipeline production and operation system and the digital delivery based on construction and operation data to intelligent applications constitutes management system that meets real-time monitoring of pipeline operations, remote real-time control, independent decision-making, and intelligent prediction and early warning. The sustainability of this intelligent system is conducive to the high-quality development of oil and gas pipelines. In this paper, the concept of smart pipeline and its specific indicators are put forward, and intelligent algorithm models in specific fields of oil and gas

收稿日期:2020-01-02

基金项目:国家青年自然科学基金项目“基于湍流脉动理论的输油管道减阻效果评价及预测技术研究”(51704236)

作者简介:陈传胜(1985-),男,湖北咸宁人,高级工程师,硕士,主要从事天然气长输管道运营与管理工作。E-mail: chchsh1003@163.com

pipelines at home and abroad are introduced as well. It is pointed out that the construction of oil and gas pipelines in China is entering the era of intelligence. The theoretical research in related fields is intensive, yet without broad application. In the future, the construction should be aimed at all-round perception, comprehensive prediction, integrated management and adaptive optimization, so as to achieve Smart Pipe Network. The study is a good reference for the promotion of intellectualized reform of pipeline.

Keywords: Smart pipeline; Construction index; Prediction and early warning; Algorithm model

0 前言

2017年,我国发布的《中长期油气管网规划》指出:目前中国运营的油气管道里程为 12×10^4 km,到2025年将达到 24×10^4 km,形成主干互联、区域成网的全国网络。针对建设规模日益庞大的油气管网,对管道高效运营和安全管理的要求越来越高,管道发展迎来新机遇。

随着大数据、物联网、移动互联、数字孪生及人工智能(AI)等新一代信息技术的提出与发展,“智慧地球”战

略付诸实施,油气管道行业也积极推进与新兴技术的融合创新,开拓智能管道的发展道路^[1]。

1 智能管道介绍

智能管道集智能感知、智能预判、智能管控和自适应于一体。管道从数字化向智能化的发展,可以理解为从代替人的眼(如无人值守、视频巡检、异常报警)向代替人的手(如远程启停、机器人)和脑(如智能决策、诊断预警)的发展。智能化管道系统的具体建设内容^[2]见表1。

表1 智能化管道系统具体建设内容表

Tab.1 Specific construction content of smart pipeline system

目标	内容	方法
管网运行全面感知	实时传感和采集管道运行期间的各类生产数据	以高速网络通信技术建设信息传输层,充分利用RFID、智能传感、移动智能终端、管道内检测等数据采集技术,并与物联网技术充分结合
数据智能处理	采集的数据来源广、维度多,且存在质量问题,对数据进行预处理并存储,做到数据统一化标准化,利用数据进行初步分析	采取数据清理、数据集成、数据变换等方式进行预处理,应用数据挖掘、关联规则挖掘、大数据分析、报警聚合等手段和方法进行分析
生产监测/趋势预测/辅助决策	输送介质:气体组分跟踪、气源走向跟踪,对介质特性计算分析,如热值计算、组分分析、水合物生成预测等 仪表设备:仪表和通信状态的监测及预防性维修、站场设备运行工况实时监测、设备远程一键启停等 生产运行:管道强度实时分析、管道效率和管存可视化、管道泄漏实时监测、安全监控智能报警、用气负荷预测、智能调度与运行优化	应用数字孪生技术,即利用传感器、物理模型、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多概率的仿真过程,在虚拟信息空间中对管网实际运行进行仿真模型建立,从而高度反映并实时监测管网全生命周期的实体行为和运行状态,融入各类智能算法,针对特定对象建立先进的算法模型,对工况进行智能预测、优化和决策

管道系统的智能化建设过程中,充分利用物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新兴技术,做好数据实时采集及标准化、数据数字化移交、大数据智能分析、管道数字孪生体构建、智能算法模型建立等工作^[3],实现管道系统的全面感知、综合预判、一体管控和自适应优化,并且能在某些关键部位进行自主决策和操作。典型智能管道的整体架构包括感知层、网络层、数据层、算法层和应用层^[4],总体架构见图1。

2 智能管道建设现状

在管道智能化建设方面,国外发达国家起步较早。目前,在管道建设过程中应用物联网数据采集、云计算

和大数据等信息技术较为成熟的国家有美国、加拿大和意大利,不同管道公司在建设智能管道上也各有特色^[5],见表2。

近年来,随着信息技术和管道完整性管理技术的逐步发展,我国智能管道、智慧管网的建设陆续展开,并有了一定的探索成果,油气管道的建设逐步由数字化向智能化发展,见图2。但就目前的建设状况来说,感知技术(包括传感器精度、感知能力以及感知范围)还有待加强,数据标准化统一化程度低、数据规范差异大,大数据、数字孪生等技术应用的广度和深度有待提升,数据挖掘、智能决策等方面仍有待突破。

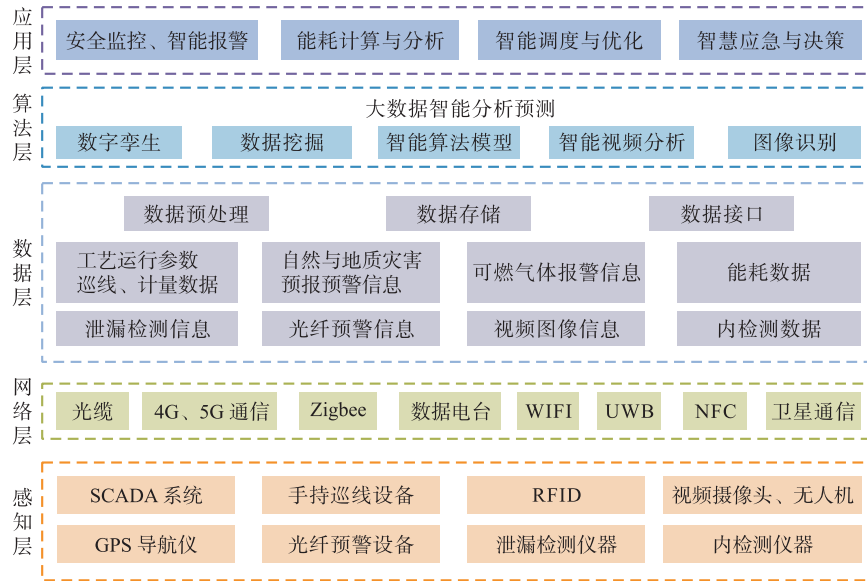


图 1 智能管道总体架构图

Fig. 1 The overall architecture of the smart pipeline

表 2 国外智能管道建设特色做法表

Tab. 2 Specific construction content of smart pipeline system abroad

运营公司 / 服务商	特色做法
美国通用电气和埃森哲公司	物联网、云与大数据; GIS 系统、风险管理系统、设备状态监测系统、生产系统
意大利 SNAM 公司	机器学习、人工智能、物联网; 智能监测系统
美国 CDP 管道公司	物联网; 智能人员生命安全装备系统 ALSS
加拿大 Enbridge 公司	物联网; 无线智能终端应用; 虚拟现实数字孪生体
英国 BP 公司	物联网; 无线智能终端应用; 无人机管道泄漏检测
美国 Rockwell 自动化公司	大数据分析; 基于 IoT 云平台的数据管理
其他公司	SmartPig、SmartBall; 管道内检测; 小泄漏检测

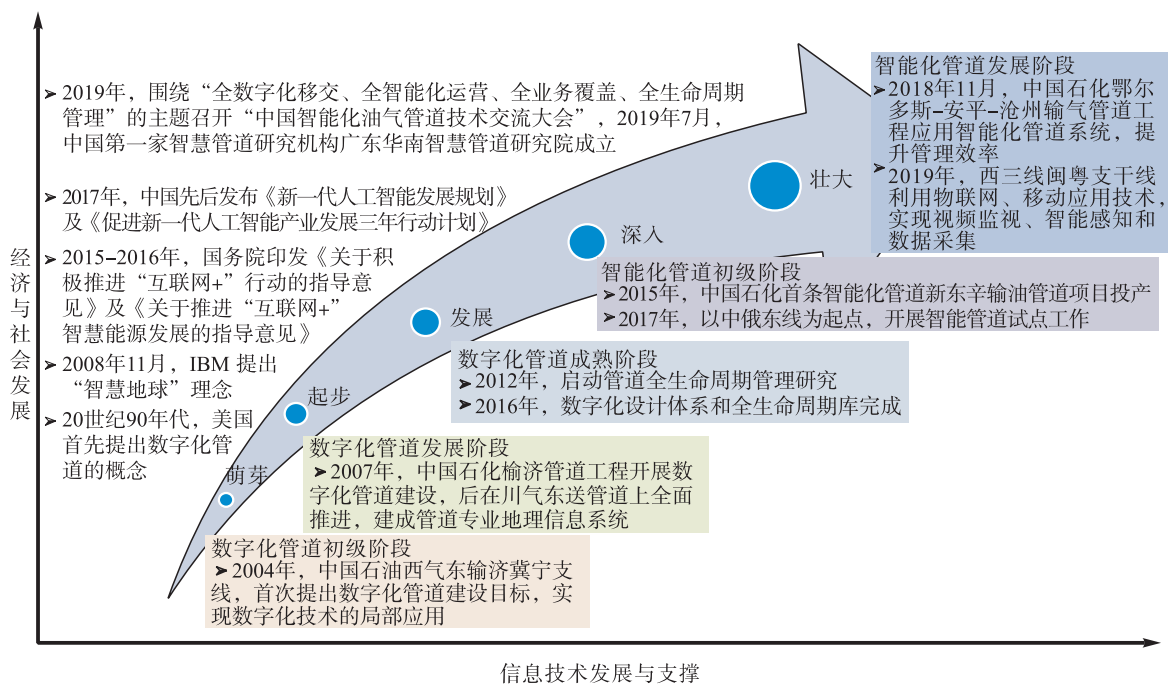


图 2 我国油气管道信息化发展历程图

Fig. 2 Informatization development of oil and gas pipelines in China

中国石油在国内最早提出了“数字化管道”的概念,并于 2004 年首次应用于西气东输冀宁管道联络线。在管道建设期间,应用遥感、数字摄影测量等数字化技术^[6],建立起管道信息管理系统,实现管道工程项目建设和运营管理的信息化,西气东输冀宁管道是我国第一条数字化多功能管道。后经过不断规划和探索,建设管道 ERP 系统、管道工程建设管理系统(PCM)等核心应用系统,构建了包含管道勘察设计系统、管道项目建设管理系统、管道运营管理系统数字化管道体系^[7]。中国石化于 2007—2008 年开展的数字化管道建设,始于榆济管道工程,将二维 GIS 系统作为基础平台,采集了包括管道走向、埋深等多类施工数据,叠加了影像图。后在川气东送管道上全面深入建设数字化管道,建设了 3 D 管道 GIS 系统,完善施工数据,完成 GPS 巡检、GMS、运行仿真等,并建成了管道专业地理信息系统。

随着物联网、大数据等新兴技术的迅速发展,智能化管道的建设逐步提上日程。中国石油将互联网技术与 GIS、SCADA 等自动化管理技术相结合,建设 PIS 管道完整性管理系统,应用于多家单位所辖管线,有效降低了管道事故率。2017 年 6 月,中国石油通过中俄东线智能管道试点全力推进智能管道的建设,应用 PIS 系统,通过管道工程建设管理系统(PCM)获取中俄东线建设期间的钢管、防腐层等多类数据,构建了中俄东线的数字孪生体,并实现建设期间有关钢管、防腐层等的多类数据全数字化移交,成为我国首条第三代管道。2014 年,中国石化正式启动智能管线的建设,建成具有管线数字化管理、管线完整性管

理、管线运行管理、应急响应、防患治理、综合管理 6 大功能的智能化管线管理系统,实现管线管理水平和管线防患预测、风险管控、应急处置等管网安全管控能力的提升^[8]。2018 年中国石化投产的川气东送智能诊断项目,为实现天然气长输管道智能化运行管理与实时诊断,充分应用物联网、数字孪生等技术,以管网运行可视化、可监测和可决策为目标,研究智能诊断技术,为天然气长输管道系统的调度管理和操作控制提供科学手段。

3 油气管道具体领域智能化发展现状

随着油气管网的愈发庞大和复杂,管道经济运行、安全管理的要求也越来越高。对天然气管网进行运行优化,可以提高输送效率,大幅降低运行成本,从而辅助决策集输配气方案^[9]。在生产过程中,油气管线一旦发生泄漏,将会对人民生命、财产以及环境造成巨大伤害^[10]。同时在管网运行期间也会产生各类其他异常,科学、有效地进行油气管道诊断、预警已成为油气管道行业管理中的重大研究课题^[11]。对管网的未来状态进行预测,亦具有重要的指导意义。燃气负荷是城市燃气设计、调度的理论依据,是燃气管网优化的根基。科学、准确地对未来指定时段的用气量进行预测,会给整个天然气长输管线带来良好的投资效益和可靠的决策支持,还关系到城市燃气管网规划能否更好地适应新型能源结构、用户结构和居民生活方式等问题^[12-13],预测结果可指导生产调度、合理规划燃气用量。国内外学者结合智能算法对油气管道的具体领域做了深入研究,见表 3。

表 3 具体领域智能化发展现状表

Tab. 3 Current situation of intellectualization development in specific fields

领域	学者(作者)	方法及理论	优点	缺点
天然气管网运行优化	昂扬	运用动态规划方法,基于自适应算法实现对管网运行状态的自我调节	提高动态规划方法对复杂管网和动态运行优化问题的求解能力和效率	只停留在理论研究阶段,实际应用还需进一步研究
	Martin A	建立混合整数非线性规划模型,采用 SOS 方法对模型进行线性近似,结合模拟退火算法、分支一切割算法对模型求解	针对管道非稳态运行进行建模,更符合实际情况,计算效果理想	运算结果依赖于线性近似精度,若精度低,无法得到最优解,若精度过高,则难以在有限时间求解
	Kelling C	采用序列线性规划算法(SLP),将一个管段视作一个时间步长,从而简化模型,对非线性项进行线性化处理	可以获得非稳态优化方案,且方案可行,计算结果较为准确	决策变量考虑不够全面,且若时步较长,则偏于稳态计算
泄漏分析与诊断	于丹、李阳、李炜	采用改进的 M-SPRT 进行泄漏检测与估计,采用压力梯度法进行泄漏定位	进一步提高泄漏检测的精度	方法不能指导现场长输管道,只停留在实验室阶段
	Jaeho J	模拟管道泄漏检测的智能数据采集与控制系统	有效地采集泄漏数据并进行定位	精度不高,误报、漏报率较高,鲁棒性低
	Kim S H	采用 GA 算法和 HS 算法对管道系统进行瞬态分析和泄漏检测	理论方法较为先进,具有较高的前沿性	算法研究需进一步深入,没有应用于现场
系统诊断预警	纪鹏荣、马坤	采用神经网络算法对管道防腐保温层进行故障诊断方法研究	对诊断方法做了详细的阐述,诊断结果也较为满意	模型较难建立,需考虑的因素较多

续表

领域	学者(作者)	方法及理论	优点	缺点
系统诊断预警	龙学渊、冯健	采用模糊决策理论对泄漏进行诊断与定位	可计算出泄漏位置,具有一定的理论价值	泄漏定位的灵敏度和准确性不够精确,漏报、误报率较高,鲁棒性不强
	李琦	基于故障诊断理论研究成果,动态准确监控管道运行状况、科学预测管道寿命	准确定位管道事故,具有较高的参考价值	影响分子的因素较少,对算法也只是较为浅显地进行了说明
	Sementsov H N 等	提出基于受控参数相图分析的信息检测技术用于增压设备诊断	能够及时检测设备的喘振,可用于启动报警	对设备状态的诊断不够全面,且需要考虑受控参数的实时变化情况
燃气负荷预测	武海琴等	线性和非线性回归预测模型	应用动态线性回归模型预测冬季负荷,动态非线性回归模型预测全年负荷	仅考虑气象因素
	Ahmad A	人工神经网络模型	充分考虑人口密度和温度的影响,准确率高	城市人口密度数据难以获取,限制了模型的发展
	刘金源	PCA-GM-BPNN 组合预测模型	利用主成分分析技术(PCA)和灰色预测理论(GM)对 BP 神经网络(BPNN)模型进行优化,得到的组合预测模型具有更好的预测效果	组合后的模型更为复杂,增加了预测所需的计算时间
	Taspinar S 等	采用时间序列、径向基网络和多层感知器网络进行预测	用于日负荷预测,时间序列的预测精度要更高一些	有一定局限性,对于平滑的序列处理效果较好,但不适用于波动较大的序列
	陈川	BP 神经网络—经验模态分解—长短期记忆神经网络组合模型	避免了单一模型存在的过拟合问题,有效提升了模型预测精度	存在残差序列与其他影响因素间关系不明确的问题

研究发现,大量算法仅停留在理论阶段,还未结合生产实际应用于智慧管网的建设中。管网运行优化大多偏于稳态计算,同时鉴于天然气管道的愈发庞大和复杂,模型的建立亦需从提高运算速度着手加深研究^[14]。泄漏检测理论研究丰富,但检测的精度与准确定位还不能达到理想要求^[15-16],可结合管道的实时瞬态模型,加深相关算法研究,降低误报率,实现准确、快速检测与定位。诊断预警的算法虽多,但存在较大的局限性^[17]。油气管道事故类型复杂多样,包括管线泄漏、仪表阀门故障、场站设备异常等。应深入研究异常类型及信号特征,充分利用现场管道生产运行数据结合大数据、数字孪生等技术进行故障诊断,以管道系统异常诊断和预警为目标,向智能化方向发展。传统负荷预测模型在某方面具有一定的稳定性,不断涌现基于 AI 的高精度预测模型及其优化组合模型是燃气负荷预测模型的发展方向^[18-20]。

4 结论和建议

油气行业处于结构调整和转型升级的关键期,智能化是油气管道行业发展的大趋势。目前我国的管道智能化建设整体还处在初级阶段,对于智能管道未来的建设,提出以下三点建议。

1)数据是基础。基于物联网等技术的数据采集手段已经足够丰富,已能采集到管道运行期间的大量生产数据,但需统一数据标准,同时若能结合人工智能等技

术,做到数据智能前端处理,部分数据就地处理,则会为系统运算节省时间。

2)加强数字孪生技术的应用。构建管网数字孪生体,从而高度反映管网全生命周期的实体行为和运行状态。针对管道建设运营期间产生的大量数据,基于人工智能、机器学习、模式识别等,加强数据挖掘能力,构建未来知识,并充分了解知识网络,建立人机混合智能综合决策模型,形成智慧决策。

3)基于管网数字孪生体,深入研究油气管道各类异常的诊断和预警技术,对管道运行进行实时监测,结合关联规则挖掘、报警聚合等技术,做到事故报警预警,保障管网安全运营。

参考文献:

- [1] 李海润. 智慧管道技术现状及发展趋势[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 129-132.
Li Hairun. The Status Quo & Development Trend of Smart Pipeline Technology [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36(2): 129-132.
- [2] 张海峰, 蔡永军, 李柏松, 等. 智慧管道站场设备状态监测关键技术[J]. 油气储运, 2018, 37(8): 841-849.
Zhang Haifeng, Cai Yongjun, Li Baisong, et al. Key Technologies of Equipment Condition Monitoring at the Station

- of Intelligent Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37 (8): 841-849.
- [3] 吴琚瑛. 大数据在管道运行中的应用探讨[J]. 天然气与石油, 2015, 33(3): 15-17.
- Wu Xiyang. Application of Big Data in Pipeline Operation [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (3): 15-17.
- [4] 蔡永军, 蒋红艳, 王继方, 等. 智慧管道总体架构设计及关键技术[J]. 油气储运, 2019, 38(2): 121-129.
- Cai Yongjun, Jiang Hongyan, Wang Jifang, et al. The Overall Architecture Design and Key Construction Technologies of Intelligent Pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38 (2): 121-129.
- [5] Fandrich D. Intelligent Pipeline Solution: Leveraging Breakthrough Industrial Internet Technologies and Big Data Analytics for Safer, More Efficient Oil and Gas Pipeline Operations [J]. World Journal of Engineering & Technology, 2014, 2 (2): 55-67.
- [6] 喻言家, 雍歧卫. 无人机油气管道巡线系统发展现状及建议[J]. 天然气与石油, 2017, 35(2): 22-24.
- Yu Yanjia, Yong Qiwei. Development Status and Suggestions of the UAV-Based Oil and Gas Pipeline Inspection System [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (2): 22-24.
- [7] 王馨艺. 天然气管道可靠性研究进展[J]. 天然气与石油, 2017, 35(4): 1-5.
- Wang Xinyi. Research Progress of Gas Pipeline Reliability [J]. Natural Gas and Oil, 2017, 35 (4): 1-5.
- [8] 黄维和. 对我国《中长期油气管网规划》的解读和思考[EB/OL]. (2017-07-20)[2019-09-10]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-07/20/content_5212142.html.
- Huang Weihe. Reading and Thinking on Domestic "Mid Long Term Planning of Oil and Gas Pipeline Networks" [EB/OL]. (2017-07-20) [2019-09-10]. http://www.gov.cn/zhengce/2017-07/20/content_5212142.html.
- [9] 昂 扬. 动态规划方法在天然气管网运行优化和控制中的应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2014.
- Ang Yang. The Application Research of Dynamic Programming Method in Natural Gas Transmission Networks Operation Optimization and Control [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [10] 于 丹. 基于 Kalman 滤波器的管道泄漏检测与定位方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- Yu Dan. Research on Pipeline Leak Detection and Location Method Based on Kalman Filter [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010.
- [11] 龙学渊, 李志军, 习尚斌, 等. 基于模糊决策的管道泄漏智能诊断与定位方法[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(7): 17-19.
- Long Xueyuan, Li Zhijun, Xi Shangbin, et al. Intelligent Diagnosis and Location Method for Pipeline Leakage Based on Fuzzy Decision [J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 2010, 29 (7): 17-19.
- [12] Ahmad A, Mojtaba S N, Mahmoud A. Short-term and Medium-term Gas Demand Load Forecasting by Neural Networks [J]. Iranian Journal of Chemistry & Chemical Engineering (International English Edition), 2012, 31 (4): 77-84.
- [13] 刘金源, 王寿喜, 李 婵. 城市燃气日负荷 PCA-GM-BPNN 组合预测模型[J]. 天然气与石油, 2018, 36(5): 19-25.
- Liu Jinyuan, Wang Shouxi, Li Chan. PCA-GM-BPNN Combined Forecasting Model for Daily Load of City Gas [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (5): 19-25.
- [14] Kim S H, Yoo W S, Oh K J, et al. Transient Analysis and Leakage Detection Algorithm Using GA and HS Algorithm for a Pipeline System [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2006, 20 (3): 426-434.
- [15] 李 炜, 李 阳. 优化 M-SPRT 法在管道泄漏检测中的应用[J]. 天然气工业, 2009, 29(4): 93-95.
- Li Wei, Li Yang. Application of the Optimized M-SPRT Method in Pipeline Leakage Detection [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29 (4): 93-95.
- [16] Borraz-Sánchez C, Haugland D. Minimizing Fuel Cost in Gas Transmission Networks by Dynamic Programming and Adaptive Discretization [J]. Computers & Industrial Engineering, 2011, 61 (2): 364-372.
- [17] Sementsov H N, Feshanych L I. Informative Technology of Early Diagnosis of Deviated Gas Compression Process from Normal Gas Process [J]. Scientific Bulletin of National Mining University, 2016 (5): 137-143.
- [18] 韩 玥, 邓卫疆, 高 强, 等. 基于气象因子的西青开发区燃气负荷模型研究[J]. 天津科技, 2018, 45(5): 73-79.
- Han Yue, Deng Weijiang, Gao Qiang, et al. Gas Load Forecasting Model in Xiqing Development Area Based on Meteorological Factors [J]. Tianjin Science and Technology, 2018, 45 (5): 73-79.
- [19] 张少平. 基于经验模式分解和优化神经网络的燃气负荷预测研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2016.
- Zhang Shaoping. The Research on Gas Load Forecasting Based on Empirical Mode Decomposition and Optimal Neural Network [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.
- [20] 陈 川, 陈冬林, 何李凯. 基于 BPNN-EMD-LSTM 组合模型的城市短期燃气负荷预测[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(1): 149-154.
- Chen Chuan, Chen Donglin, He Likai. Short-term Forecast of Urban Natural Gas Load Based on BPNN-EMD-LSTM Combined Model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2019, 26 (1): 149-154.