

文章编号: 1000-8241(2021)03-0287-06

天然气计量检定智能化技术探索与展望

郑宏伟 刘喆 吴岩

国家管网集团西气东输公司南京计量研究中心

摘要: 针对天然气检定过程流量精确调节及质量精密管控的实际问题,研发了一套适用于多气源工况条件的中高压天然气计量智能检定系统,打破了原检定过程工控与数据处理系统之间的通信障碍,将多系统数据与指令融合互联、实时交互,实现了检定设备的全智能控制。该系统建立了标准装置质量控制平台,通过风险预测实时评估标准装置偏差变化趋势及影响;拓展了流量仪表性能评价业务,通过建立多维度数学分析模型,对流量计进行全生命周期运行状况分析、评价;通过重构检定作业模式,实现数据中心操作站控系统远程全流程操作;探索采用防爆 AGV 运输车、防爆机械臂、定制视觉测量系统实现仪表的智能拆装。此外,从在线检定校准技术、计量技术智能化升级、计量科技产业化平台 3 方面对天然气计量检定智能化技术进行了展望。(图 5,参 19)

关键词: 天然气;智能检定;智能控制器;数字孪生体;计量标准质量控制;流量仪表性能评价

中图分类号: TE89

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Exploration and prospect of the intelligent metrological verification technology of natural gas

ZHENG Hongwei, LIU Zhe, WU Yan

Nanjing Metrology Research Center of PipeChina West East Gas Pipeline Company

Abstract: To solve the actual problems of accurate control of flow and quality during the verification of natural gas, an intelligent metrological verification system applicable to the medium-high pressure gas under the condition of multiple sources was researched and developed, so that the communication barriers between industrial control and data processing system during the original verification process were broken, with the data of multiple systems fused and interconnected with the instructions and interacted in real time, realizing the full intelligent control of verification equipment. With the system, a quality control system platform for standard equipment was established, the variation trend and impact of the deviation of standard equipment were assessed in real time through risk prediction, the performance evaluation business of flow meters was expanded, the operation status of flow meters in the full life cycle was analyzed and evaluated by establishing a multi-dimensional mathematical analysis model, the whole-process remote operation of the operation station control system of the data center was realized by reconstructing the operation mode of verification, and the intelligent assembling and disassembling of instruments with explosion-proof AGV vehicles, explosion-proof mechanical arms, and a customized vision measurement system was explored. Moreover, the prospect was made to the intelligent metrological verification technology of natural gas in the 3 aspects of the online verification and calibration technology, the intelligent upgrading of metering technology, and the industrialized metrological platform. (5 Figures, 19 References)

Key words: natural gas, intelligent verification, intelligent controller, digital twins, quality control of metrological standards, performance evaluation of flow meter

随着天然气占中国能源消耗份额的逐年增加,流量计作为天然气计量贸易交接仪表的重要性日益凸

显,流量计检定需求也逐年增多。国家石油天然气管网集团有限公司西气东输分公司南京计量研究中心管

理着国家石油天然气大流量计量站南京分站、广州分站及武汉计量检定点,南京分站以 mt 法高压天然气流量原级标准装置为量值溯源源头,对广州、乌鲁木齐、北京、塔里木等多家检定机构开展量值传递,其量值传递溯源体系科学完善,测量数据及结果准确可靠。截至目前,已为中俄、中亚、中缅、香港支线等跨国跨境管道与中国众多管道、燃气企业及流量计生产厂家检定校准流量计累计 12 000 台次。

国家石油天然气大流量计量站南京分站、广州分站及武汉检定点,工艺装置分处南京、广州、武汉三地,各自具有独立的站控系统与检定系统。在十余年的运行过程中,各套计量标准装置积累了大量日常设备运行数据、流量计检定数据及计量标准管理数据,但前期未能实现统一归集分析,没有深入挖掘数据价值。在日常计量实流检定过程中,工艺流程切换、流量调节、检定操作等主要由检定员手动完成,检定结果也由检定员主观判断。中高压天然气计量检定工艺系统工况复杂度高、流量调节精度要求高、精准控制难度大,且调节过程存在时滞,无法快速达到预期流量,检定过程需要在稳定、准确的流量下进行,传统的手动调节需要在多个工艺系统和阀门间不断调节,对操作人员的经验要求较高,用时较长,且在操作过程中存在误操作、流量超限、流速超限等风险隐患。

基于此,聚焦制约天然气计量检定过程中流量精确调节及质量精密管控的实际问题,借鉴智慧管道建设经验^[1-16],探索将物联网、人工智能、大数据分析、完整性理念与技术^[17-19]引入天然气计量检定领域,结合自身技术特点,开展物联网及智能算法技术、计量标准完整性技术、计量大数据技术、智能仓储与智能拆装技术的研发应用,以期在“智慧互联大管网”的构建中实现天然气计量检定的智能化。

1 天然气计量检定智能化探索

1.1 物联网及智能算法技术

基于物联网及智能算法技术,研发了一套适用于多气源工况条件的中高压天然气智能检定系统,打破了原有通信壁垒,使数据自下而上传输,指令自上而下下达,实现了多系统间数据采集、存储、计算、分析、控制等的互联共享。检定任务通过智能检定系统下达并触发各系统协同工作,现场设备采集检定所需数据并

汇入数据库,智能控制器与实体工艺系统的数字孪生体主动在数据库中搜寻所需数据,计算分析所接受的指令以形成最佳控制策略提交智能检定系统,使系统自主控制现场工艺调整及检定作业全过程(图 1)。

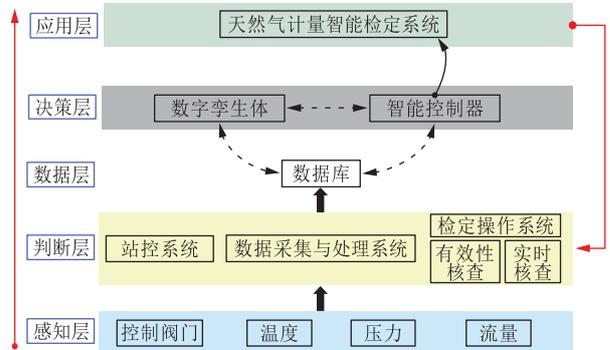


图 1 天然气计量智能检定系统融合互联多系统数据与指令示意图

作为智能检定系统的核心,智能控制器以 10 000×454 余组历史数据为基础进行模型训练,以 5 000×454 余组数据开展模型验证,通过自主学习改变 BP 神经网络参数,不断修正以适应新的控制要求。目前,智能控制器模型已覆盖现场多种工况条件,能够根据需要开展检定的流量计口径、最大流量点要求、精确度等级及当前的工况条件进行自动适应、自主调整,推理选择工艺流程及调节阀组合,自主决策多路流量调节阀开度,根据调节结果反馈不断自主学习优化。控制器借鉴“巡航导弹”控制思想,采用 3 层控制:①流程导通,主要完成当前流量点所需站场工艺的自动导通;②快速调节,从起始状态将系统流量快速调整至被检流量点附近;③精确调整,根据流量偏差,通过组合调整 4 路调节阀的最优动作,将实际流量精确调节至目标流量点允许范围内。

智能检定系统依据工艺管路布局、设备技术参数及运行工况数据,同步开发了相对应的数字孪生体,将工艺系统的流动形态与控制状态同步映射到该模型中,以实现对现场工艺、设备及运行机理的真实描述,直观形象地对检定过程进行数字化模拟,可在智能控制器执行控制策略前作为模拟验证工具使用(图 2)。智能控制器通过计算分析得出的控制策略,需经过数字孪生体进行仿真与迭代运算加以验证,在确保输出结果符合检定所需后,方可下达并执行。

同时,通过在站控系统中设置超限保护、超速保护、超压保护、流量调节保护、阀门互锁、阀门控制、压差及防流程中断等 DCS 安全连锁逻辑,保障了智能检定过程工艺系统的安全平稳运行。



图2 天然气计量智能检定数字孪生体平台辅助模拟验证实况图

1.2 计量标准完整性技术

为了确保计量标准量值传递准确,检定机构通常采用定期开展计量标准装置重复性与稳定性测试、期间核查等传统的质量管控措施,通过测试结果评估计量标准装置量值产生的偏差,并进一步分析评估量值传递影响量,必要时进行质量追溯。但该方法无法第一时间掌握计量标准性能的变化,为此,基于智能化技术研究,逐步形成了3项技术措施。

(1) 计量器具定期比对。针对标准装置配套计量器具,形成如下管控措施:每周抽取温度变送器送实验室进行比对,每周将压力变送器通过台位平压进行在线比对,每日对站内两台色谱仪分析结果进行比对,结合设备不确定度水平制定合理的比对限值核查等,以确保计量器具关键影响因素得到有效监控。

(2) 计量标准在线核查。作为数据分析技术在计量标准核查方面的有益尝试,广州分站在工作级标准智能检定系统控制图法中采用了在线核查技术。通过分析核查流量计历史数据,运用控制图法建立预警限动态模型,基于计量标准不确定度设置控制限,实时核查标准流量计在测量过程中的变化。若超出动态预警限则提示加强质量监控,确保检定或校准状态的可信度;若超出控制限则报警提示停用异常管路。由此可以及时发现标准装置的偏差及趋势,提高其量值监控水平,确保计量标准实时准确可靠。

(3) 计量标准质量控制系统建立与完善。南京分站通过全面梳理计量标准量值传递影响因素,建立了标准装置质量控制系统平台(图3),引入完整性管理理



图3 天然气计量标准装置完整性质量控制系统平台架构图

念,实施标准装置维护维修计划制定与执行、运行参数监控与在线核查、基于风险预测的偏差变化趋势与影响实时评估、异常值问题排查库建立、问题跟踪整改的全过程管理优化。同时,开展标准装置全生命周期数字化恢复工作,建立标准装置的数字档案,包括设备选型、采购技术参数、使用期间历次校准原始数据、调整量及维护维修记录、备品备件更换情况等数据。针对量值传递过程,通过数字化建模,进行全周期质量管控。

1.3 计量大数据技术

1.3.1 流量仪表性能评价

通过积极探索运用大数据分析等技术,开展远程检定及计量仪表测试评价数据中心建设,利用高性能

服务器、存储器、网络设备搭建虚拟化系统平台,配备瘦客户终端用于远程访问,有针对性地编译了结构型数据库软件、可视化系统及网络安全系统,并将其组成整体架构。通过架设 OPC 客户端、组态系统等,实现了南京、武汉、广州三地站控系统 with 检定系统的数据对接,使用统一的数据访问接口服务与不同类型的数据源、数据库进行交互,完成原始数据的积累。利用大数

据技术开展数据分析,使用可视化系统提供丰富的图形化展示,针对不同的分析需求在数据库中搭建数据分析模型,并通过历年数据的导入完善数据模型。计量仪表测试评价数据中心能够通过设置不同的维度来调整数据的展示结果(图4),使分析结果具有指导价值,并通过部署安全策略、使用堡垒机进行登录管理等手段保证整体网络安全。



图4 天然气计量流量仪表性能评价测试中心展示图

计量仪表测试评价数据中心可以从计量检定的角度对流量计性能、计量标准完整性、检定人员评价、检定业务管理评价等方面进行分析。

(1) 流量计性能评价模型:从示值误差、调整量、稳定性、合格率、重复性、线性度、使用年限等维度建立数学分析模型,利用数据中心集聚数据,对不同品牌、型号的流量计,甚至某一台流量计,进行全生命周期运行状况分析与评价。由当前已有数据分析可知,不同品牌、型号流量计的性能确实存在较大差异,尤其是流量计稳定性、调整量相对较差的流量计,其计量输差变化时间、变化量大小均存在不确定性,会对现场计量输差管控产生较大影响;对于单台流量计,经过多个检定周期,可以对其性能作出评价。综上,利用流量计性能评价模型充分挖掘大数据内在价值,能够为客户提供流量计选型、使用、维护保养、送检等方面的建议措施。

(2) 计量标准完整性评价模型:计量标准是将复现的单位量值逐级传递至工作计量器具,其性能情况直接影响到现场工作计量器具的计量结果,对计量器具、输差管控意义重大,因此,保障计量标准的完整性至关重要。标准装置由主要标准器与配套仪表组成,且有一条完整量值溯源链条,每个校准周期均会产生修正因子,影响下一级量值传递。与此同时,装置仪器仪表维护维修同样对计量准确性存在一定影响。基于上述情况,以修正因子、稳定性、维护维修等维度建立数学分析模型,利用历年装置集聚相关数据,对不同流量、

压力工况下的数据进行分析,并以控制图形式进行展示,由此可清晰地展示出标准准性能的变化趋势,进而根据预测结果为分站标准装置完整性管理提供数据支持,为视情维护提供科学的决策依据。

(3) 检定人员评价:当前流量计检定主要由检定人员操作,检定人员对检定过程参数稳定性、数据结果判断程度把握不尽一致,其是量值准确可靠的重要影响因素之一。为了有效监督人员操作是否有效、是否符合规程规范要求,基于人员操作熟练程度、温度、压力、流量稳定度等维度建立数学分析模型,实现对单台流量计检定操作的核查、对多台流量计的统计分析,评价单台流量计操作是否有效与检定人员检定操作能力,以减小人为操作影响因素,提升流量计检定可靠性,提高用户可信度。

(4) 检定业务管理评价:为更好地服务行业发展,提出“733”管理目标,即7天完成合同签订、3天完成检定、3天发送证书,利用智能检定管理系统实现检定申请、合同签订、样品送检、智能排程、样品检定、证书流转、电子证书发放等全业务流程的网上操作,尤其是智能排程和电子证书发放,解决了客户极为关心的待检排队时间长、证书邮寄不及时等问题。基于检定业务管理系统,以各个环节用时、人员提醒等维度建立数学分析模型,评价各业务环节是否及时有效执行,并以此作为管理提升决策依据,可有效解决流量计检定客户痛点问题,提升服务质量和效率。

1.3.2 远程检定

借助计量仪表测试评价数据中心的数据归集功能,重构检定作业模式,利用虚拟化平台,构建了一套导轨式企业级数据中心型服务器整体解决方案系统,将检定操作集中于数据中心,实现平台化操作,并系统建立工艺操作安全逻辑。操作员在现场完成检定准备工作后,检定工程师在数据中心操作站控系统操作员站完成流量调节等工作,随后操作检定系统开展远程检定,若现场突发紧急情况,则退出远程检定模式,由现场站控系统工程师站接管工艺流程操作。

1.4 智能仓储与智能拆装技术

在流量计收发环节,采用无人驾驶 AGV 叉车及仓储系统的堆栈系统。流量计输送至入库缓存区,人工完成组盘后,绑定物料码,系统分配库位,通过货型检测的流量计由堆垛机搬运至指定货位。在平面仓库系统中采用负载均衡、先进先出的策略优化仓储管理,使整个流量计仓储的运作流程、信息处理等达到迅速、准确、及时的效果,进而使出入库管理、盘库、报表等工作变得简单快捷,减少人工误操作,实现检定收发环节的双向追溯与跟踪。

在流量计拆装环节,采用防爆 AGV 运输车、智能 AGV 复合机器人、定制视觉测量系统实现智能拆装(图 5)。智能 AGV 复合机器人前端配置视觉定位辅助系统,结合送检流量计的类型、质量、尺寸,根据操作空间自行制定臂展幅度及扭矩,操作完成后,能够一键返回。防爆 AGV 运输车采用高精度视觉定位工艺,可以实现无人化自动配送,能够运输送检流量计及前后直管段。防爆 AGV 运输车、智能 AGV 复合机器人均配置安全锁定功能,基本实现了“机器为主、人员为辅”的操作模式,人员仅需辅助放置垫片和螺栓,其余工作均由机器人、运输车完成,有效提升了流量计的拆装效率,且安全风险可控。

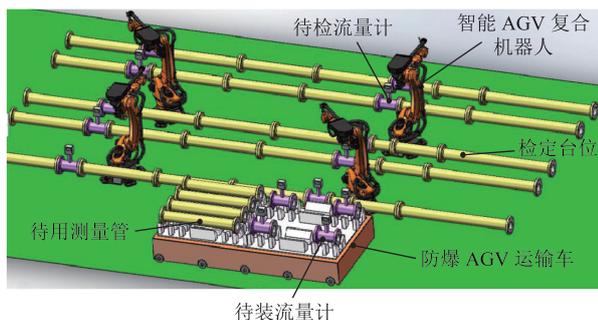


图 5 智能 AGV 复合机器人与定制视觉测量系统实现智能拆装动画展示图

2 天然气计量检定智能化展望

(1) 在线检定校准技术。未来将进一步建立融合边缘计算与云端计算的一体化平台,采用大平台、虚拟化应用模式提高大数据处理能力。通过整合仪表生产商的计量仪表设备数字模型、设计单位设计的工艺及计量仪表参数、工程施工方给出的装置信息、计量检定机构的检定及校准数据、生产现场产生的实时工况数据,实现在线核查仪表运行状态,横向类比同型号计量仪表状态,纵向比较仪表输出结果变化趋势,进而给出在线检定、校准结果。

(2) 计量技术智能化升级。随着物联网、5G 及数字化仪表等技术的发展,使得现场在用仪表可实时回传数据及报警信息,数据中心可应用人工智能、专家经验及大数据分析手段开展针对多维度、多类型、多周期海量数据的应用分析,指导国家计量技术的规划、规范制定及工作部署等,使之更为精准高效。大数据与人工智能的应用将为计量管理提供可靠依据,为决策制定提供有效支持。

(3) 计量科技产业化平台。建立以计量标准建设为主体,以量传溯源体系为基本架构的国家天然气计量智能化服务平台。借助科研院所、高等院校、企(事)业单位等资源,营造开放、共享的计量研究实验环境,研究具有天然气特点的量值传递技术及产业关键领域关键参数的智能化、数字化技术,开发智能化计量标准、测试仪表,研究基于服务产品全生命周期的大数据计量技术,进一步提升数据交互速度,强化测试仪表的自诊断能力。

3 结束语

国家石油天然气管网集团有限公司西气东输分公司南京计量研究中心基于计量检定业务的智能化建设取得一系列成果,通过智能检定系统自主识别检定任务,完成智能化决策、精准化执行、数字化感知等动态过程,实现了从任务下达到证书出具的全流程的“一键式”操作,改变了传统检定过程人工切换流程、手动操作系统的模式,实现了天然气实流智能检定的工业化应用,是智能管道建设的重要组成部分与成功实践。通过对日常流量计检定数据开展归集、整理、分析,为计量标准管理提供了数据支撑,针对不同的

分析需求在数据库中搭建数据分析模型,从不同维度调整数据的展示结果,进而实现天然气流量计量器具的全生命周期管理,可为客户制定计量器具维护保养方案提供参考,为智慧管网计量系统的精准可靠运行提供保障。

参考文献:

- [1] 蔡永军,蒋红艳,王继方,王潇潇,李莉,陈国群,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 Y J, JIANG H Y, WANG J F, WANG X X, LI L, CHEN G Q, et al. Overall architecture design and key technologies of intelligent pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(2): 121-129.
- [2] 董红军,马云宾.输油气站场智能巡检系统设计与实现[J].油气储运,2020,39(5):570-575.
DONG H J, MA Y B. Design and implementation of intelligent inspection system for oil and gas stations[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(5): 570-575.
- [3] 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.
LI B S, WANG X L, WANG J H. Digital twins and its application feasibility to intelligent pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(10): 1081-1087.
- [4] 苏怀,张劲军.天然气管网大数据分析方法及发展建议[J].油气储运,2020,39(10):1081-1095.
SU H, ZHANG J J. Big data analysis method and development suggestions for natural gas pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10): 1081-1095.
- [5] SU H, ZIO E, ZHANG J J, CHI L X, LI X Y, ZHANG Z J. A systematic data-driven demand side management method for smart natural gas supply systems[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 185: 368-383.
- [6] 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.
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.
- [7] 税碧垣.智慧管网的基本概念与总体建设思路[J].油气储运,2020,39(12):1321-1330.
SHUI B Y. Basic concepts and general ideas of intelligent pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(12): 1321-1330.
- [8] 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.
SHUI B Y. Thinking on overall structure and development strategy of intelligent pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(11): 1201-1218.
- [9] 宫敬.从旁接油罐到管网联运再到智能调控——中国输油管道工艺技术50年发展回顾与展望[J].油气储运,2020,39(8):841-850.
GONG J. Review and outlook for development of oil pipeline technology in the past 50 years in China, from floating tank process to joint operation of pipeline network and further to intelligent control[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(8): 841-850.
- [10] 吴长春,左丽丽.关于中国智慧管道发展的认识与思考[J].油气储运,2020,39(4):361-370.
WU C C, ZUO L L. Understanding and thinking on the development of China's intelligent pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(4): 361-370.
- [11] 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.
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.
- [12] 董红军.长输管道网格化管理实现基础与实施设想[J].油气储运,2020,39(6):601-611.
DONG H J. Realization foundation and implementation assumption of grid management for long-distance pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(6): 601-611.
- [13] 张海峰,蔡永军,李柏松,孙巍,王海明,杨喜良.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 H F, CAI Y J, LI B S, SUN W, WANG H M, YANG X L. Key technologies of equipment condition monitoring at the station of intelligent pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(8): 841-849.
- [14] 曹闯明,黄亦星,刘荣,董绍华.中国海油一体化企业智慧管理平台建设[J].油气储运,2018,37(7):741-750.

(下转第318页)

- of natural gas venting[J]. IOP Conference Series. Earth and Environmental Science, 2019, 267(2): 1-5.
- [15] 梁俊奕. 天然气长输管道放空系统设计方法研究[J]. 当代化工, 2014(9): 1833-1835.
- LIANG J Y. Study on design method of venting system for long-distance natural gas pipeline[J]. Contemporary Chemical Industry, 2014(9): 1833-1835.
- [16] 陈利琼, 李攀, 刘博, 李南. 西气东输泗阳站阀室放空安全分析[J]. 天然气与石油, 2015, 33(2): 9-12.
- CHEN L Q, LI P, LIU B, LI N. Safety analysis of venting in Siyang block valve station of West-to-East Gas Pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(2): 9-12.
- [17] 谢跃辉, 吴东容. 长距离输气管道放空时间计算方法研究[J]. 化学工程与装备, 2015(2): 128-130.
- XIE Y H, WU D R. Study on the calculation method of long distance gas pipeline emptying time[J]. Engineering & Equipment, 2015(2): 128-130.
- [18] 刘英男, 张鑫, 单鲁维. 基于特征线法的天然气管道放空时间的计算[J]. 油气储运, 2014, 33(12): 1338-1342.
- LIU Y N, ZHANG X, SHAN L W. Characteristic method based calculation of venting time for natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(12): 1338-1342.
- [19] 赵晋云, 周兴涛, 刘冰, 郑娟, 马伟平. 国内外输气管道放空系统设计标准分析[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 274-278.
- ZHAO J Y, ZHOU X T, LIU B, ZHENG J, MA W P. Analysis on the design standards of venting system for gas pipeline worldwide[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(3): 274-278.
- [20] American Petroleum Institute. Pressure-relieving and depressuring systems, fifth edition: ANSI/API STANDARD 521-2007[S]. Littleton: API, 2007: 1-7.
- (收稿日期: 2019-09-18; 修回日期: 2021-01-28; 编辑: 刘朝阳)

作者简介: 张勇, 男, 1983年生, 工程师, 2006年毕业于解放军后勤工程学院油气储运工程专业, 现主要长输管道油气储运专业方向的研究工作。地址: 四川省成都市锦江区汇源东路88号, 610012。电话: 17761241605。Email: zhangyong009@cnpc.com.cn

(上接第292页)

- CAO C M, HUANG Y X, LIU R, DONG S H. Construction of integrated smart enterprise management platform in CNOOC[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(7): 741-750.
- [15] 熊明, 古丽, 吴志锋, 邓勇, 李双琴, 邹妍, 等. 在役油气管道数字孪生体的构建及应用[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 503-509.
- XIONG M, GU L, WU Z F, DENG Y, LI S Q, ZOU Y, et al. Construction and application of digital twin in the in-service oil and gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(5): 503-509.
- [16] 颜庆龙, 叶国清, 华晶, 纪海涛. 智能工地在中俄东线天然气管道工程的实践[J]. 智能建筑, 2018, 21(9): 65-68.
- YAN Q L, YE G Q, HUA J, JI H T. Practice of intelligent construction site in China-Russia Eastern Route Natural gas Pipeline Project[J]. Intelligent Buildings, 2018, 21(9): 65-68.
- [17] 欧新伟, 陈朋超, 任恺, 李一博, 陈洋西. 中俄东线数字化移交及与完整性管理系统的对接[J]. 油气储运, 2020, 39(7): 777-782.
- OU X W, CHEN P C, REN K, LI Y B, CHEN P X. Digital handover of China-Russia Eastern Gas Pipeline and docking with integrity management system[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(7): 777-782.
- [18] 帅义, 帅健, 冯灿. 基于B/S架构的管道完整性管理系统[J]. 油气储运, 2017, 36(4): 387-392.
- SHUAI Y, SHUAI J, FENG C. Pipeline integrity management system based on B/S architecture[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(4): 387-392.
- [19] 韩小明, 苗绘, 王哲. 基于大数据和神经网络的管道完整性预测方法[J]. 油气储运, 2015, 34(10): 1042-1046.
- HAN X M, MIAO H, WANG Z. Pipeline integrity prediction method based on big data and neural network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(10): 1042-1046.
- (收稿日期: 2021-01-11; 修回日期: 2021-01-18; 编辑: 刘朝阳)
- 基金项目:** 国家管网集团西气东输科技项目“南京分站原级标准智能校准技术研究”, KJ202018.
- 作者简介:** 郑宏伟, 女, 1972年生, 高级工程师, 2009年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事天然气计量、能源计量相关技术研究与管理工作。地址: 江苏省南京市栖霞区学津路8号高创中心B座西气东输南京计量研究中心, 210046。电话: 15821665569。Email: zhenghw@pipechina.com.cn