

文章编号: 1000-8241(2021)10-1194-06

阿独乌鄯系统密闭输送运行风险分析及 PID 参数整定

林永刚 邓忠华 薛延军 王迪

国家管网集团生产经营本部(油气调控中心)

摘要: 针对阿独乌鄯系统异常工况下手动流程切换不及时、调节阀 PID 控制压力调节时间长等问题,对改造后的两种运行方式进行风险分析并制定风险防范措施,明确了调节阀 PID 控制的优越性。利用工程整定法重新整定了乌鲁木齐进站调节阀 PID 参数,通过调节阀压差测试与应急工况模拟,验证了调节阀 PID 控制的可靠性能与快速处置能力,并对 PID 控制效果的影响因素进行了分析。结果表明:乌鲁木齐站整定后的 PID 参数能够实现流程切换和应急工况下进站调节阀快速精准的自动控制,压力调节时间由 780 s 降至约 75 s,且震荡较小。研究成果可为调节阀精准控制及异常工况处理提供指导,并为实现管道智能调控奠定理论基础。(图 7,参 22)

关键词: 原油管道; PID 控制; 密闭输送; 运行风险分析; 参数整定

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.10.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Operation risk analysis for custody transfer of A-Du-Wu-Shan system and the PID parameter setting

LIN Yonggang, DENG Zhonghua, XUE Yanjun, WANG Di

Production and Operation Department of China Oil & Gas Pipeline Network Corporation (Oil & Gas Control Center)

Abstract: Aiming at the problems of untimely manual flow path switching under abnormal working conditions and long time required for pressure regulation through the PID control of the regulating valves of A-Du-Wu-Shan system, risk analysis was carried out for the two operation modes after transformation, appropriate risk prevention measures were developed, and the superiority of PID control of the regulating valves was clarified. Thereby, the PID parameters of the regulating valves in Urumqi Station were reset with the engineering tuning method, the reliability and the rapid disposal ability of the PID control of the regulating valves were verified by differential pressure test and emergency condition simulation, and the influencing factors of the PID control effect were analyzed. The results show that, the reset PID parameters of Urumqi Station can achieve the fast and accurate automatic control of the inlet regulating valves under flow path switching and emergency conditions, and the pressure regulation time decreases from 780 seconds to about 75 seconds with small oscillation. Generally, the research results could provide guidance for the accurate control and abnormal condition treatment regulating valves, and lay a theoretical foundation for the realization of intelligent control of pipelines. (7 Figures, 22 References)

Key words: crude oil pipelines, PID control, custody transfer, operation risk analysis, parameter setting

随着数字化浪潮的到来,传统油气管网开始与人工智能、大数据、云计算等创新融合,国内外学者在此方面开展了大量研究与规划工作^[1-5]。油气管网智慧化的建设处于探索阶段,“全数字化移交、全智能化运营、全生命周期管理”的智慧管网远景逐渐清晰,其中对于“全智能化运营”而言,管道智能调控运行是智慧

管网的基础^[6-8]。目前,管道的水击保护程序、站场高低压保护程序等可以实现异常工况的自动紧急停输与停泵保护^[9-10],但如何实现压力、流量的自动调节对于管道智能调控运行至关重要。中国管道调节阀大多采用 PID 手动控制,调度人员通过手动设置调节阀阀位调节运行压力与流量,现有控制方式已不符合智慧

管网发展趋势,因此亟需开展调节阀PID参数整定等方面的研究,以实现压力、流量的自动调节与异常工况的自动应急处理,保障管道安全。

阿独乌鄯系统包括阿独乌原油管道与乌鄯原油管道,改造后乌鲁木齐站需要进行密闭输送与开式输送两种操作流程的切换,采用手动切换时,可能出现异常工况下人工处理不及时导致进站压力超高的运行风险。而若采用自动流程切换,目前乌鲁木齐进站调节阀PID控制压力调节时间较长,可能导致输油泵抽空甩泵。为实现两种操作流程的自动切换,对阿独乌与乌鄯原油管道改造后的输送方式进行风险分析并制定相应风险防范措施,重新整定调节阀PID参数以提升调节阀PID控制的可靠性与快速处置能力。

1 运行风险分析

1.1 管道概况

阿独乌原油管道与乌鄯原油管道原为顺序独立运行,在乌鲁木齐站以旁接罐流程连接,即阿独乌管道来油进入罐区后,从罐区进入乌鄯管道给油泵,经输油泵后外输。为有效利用上游管道来油余压,对乌鲁木齐首站进行改造(图1, PV为调节阀, V为电动球阀),通过新建站内管道将乌鲁木齐进站与输油泵入口换热器区相连,阿独乌管道来油可直接进入乌鲁木齐站输油泵入口换热器,阿拉山口、独山子、乌鲁木齐及鄯善4个泵站整合为一套统一的水力系统,即阿独乌鄯水力系统(简称阿独乌鄯系统)。改造后,乌鄯管道外输可停用给油泵,输油泵利用阿独乌管道来油压力保持运行,有效利用乌鲁木齐进站余压,实现密闭输送,减少管输能耗^[11]。

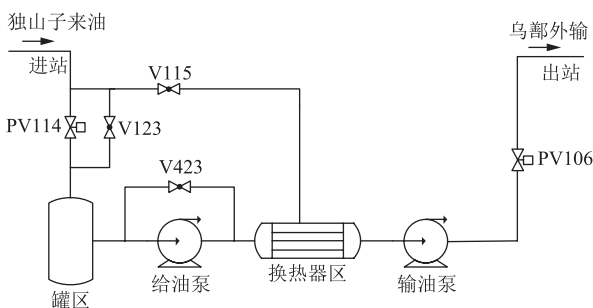


图1 改造后阿独乌鄯系统乌鲁木齐站工艺流程示意图

改造后阿独乌鄯系统可实现开式输送与密闭输送两种运行方式:开式输送为阿独乌管道与乌鄯管道独立运行,密闭输送为阿独乌鄯整合为一个水力系统运

行。当阿独乌与乌鄯管道同时输送哈国原油时,采用密闭输送,可有效利用上游余压;当乌鄯管道输送北疆原油时,采用开式输送。

根据不同运行工况,有时需要进行两种输送方式的切换。由开式输送切换至密闭输送的操作流程为:①设置调节阀PV114手自动状态为手动;②设置PV114前压力与输油泵前压力基本一致;③打开V115;④手动缓慢减小PV114开度,同时缓慢关闭1台给油泵出口闸阀,尽量保持外输流量稳定;⑤当给油泵出口闸阀全关闭时,停运给油泵;⑥依次停运其它给油泵,同时继续缓慢减小PV114开度至5%~10%;⑦调节PV114稳定后切换至自动状态。由密闭输送切换至开式输送的操作流程为:①将给油泵前流程导通,启动1台给油泵;②设置调节阀PV114手自动状态为手动;③手动缓慢打开给油泵出口闸阀,同时缓慢增大PV114开度,尽量保持外输流量稳定;④根据工况要求确定是否启动其他给油泵,同时继续缓慢增大PV114开度至20%~40%;⑤关闭V115;⑥调节PV114稳定后切换至自动状态。

1.2 运行风险及防范对策

流程切换过程中,给油泵启停产生的瞬时压力可能造成输油泵抽空甩泵。由开式输送切换至密闭输送流程时,当乌鲁木齐进站流程与输油泵入口流程导通后,需停运乌鲁木齐站给油泵,此时,乌鲁木齐进站压力与输油泵入口压力会迅速下降,若进站调节阀控制不当,可能造成乌鲁木齐站输油泵抽空甩泵。此外,阿独乌鄯系统密闭输送时,若乌鲁木齐运行两台输油泵,一旦发生站场失电等异常事件造成两台泵同时甩泵,泵入口汇管处的压力会迅速升高,而乌鲁木齐进站泄压值较低,极易造成进站压力超高而泄压^[12-13]。为此,各站设置有站内回流保护、进站泄压保护及调节阀保护。

(1)站内回流保护:当乌鲁木齐站出现输油泵甩泵等情况造成站内压力升高时,可通过给油泵处回流程,将压力泄放至罐区。回流管道阀门V423设置连锁保护,V423处于自动状态时,若运行的输油泵全部甩泵,阀门自动全开,管内原油受输油泵入口处高压影响,经过换热器后,经由V423进入罐区,达到泄放压力的目的。但换热器区设置有计量流量计,回流泄压会造成流量计反转,因此,回流保护应慎重使用。

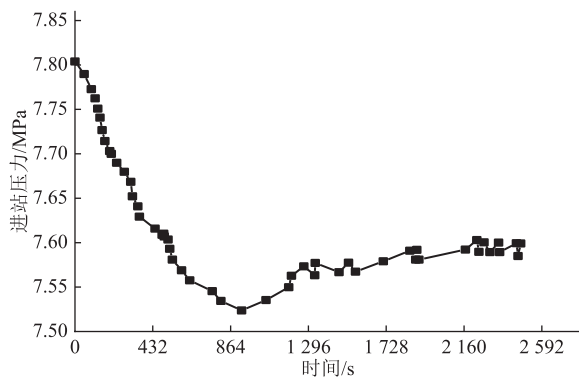
(2)进站泄压保护:出现异常工况时,若乌鲁木齐进站压力大于设定的泄压值,泄压阀V123开启,原

油通过进站泄压管道被泄放至罐区,达到保护输油主干管道的目的^[14-15]。

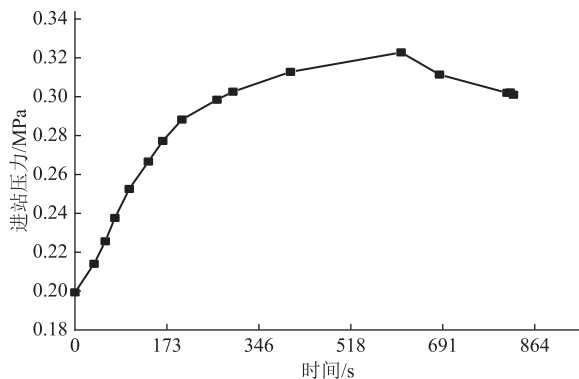
(3) 调节阀保护:改造前,为保证阿独乌管道无节流运行,乌鲁木齐进站调节阀以手动控制为主,运行中处于100%全开状态。改造后,密闭输送时,若调节阀继续采用手动控制,当发生异常事件或进行运行方式切换时,管道内会产生瞬变压力波,一旦处理不及时即可能错过最佳处置时间甚至引发事故。因此,为防止乌鲁木齐站内压力超高等异常情况发生,乌鲁木齐进站调节阀需改为自动控制,实现PID自动调节,从而能够快速处理异常事故,避免调度人员对特殊情况反应不及时而导致超压事故,保障管道安全平稳运行。

2 PID参数整定及影响因素

实际管道运行过程中,PID控制器由接收到输入调节差值开始运行至阀位输出需经过多次迭代计算,由于调节阀PID参数设置不合理,时常发生压力到达设定值的调节时间过长甚至超调的情况(图2),此时若管道出现异常情况,产生瞬时压力波,调节阀将无法及时反应,仍需手动干预,存在引发安全事故的风险。



(a) 西部某管道兰州末站



(b) 改造投产前乌鄯管道乌鲁木齐站

图2 实际管道SCADA数据压力调节反馈示例图

以西部某管道兰州末站为例,SCADA数据显示,进站压力由7.8 MPa设定为7.6 MPa时,约30 min压力调整到位,且超调较大,超调压力约0.1 MPa,在回调过程中震荡较大(图2a)。以改造投产前乌鄯管道乌鲁木齐站为例,SCADA数据显示,进站压力由0.2 MPa设定为0.3 MPa时,在267 s时进站压力达到设定压力,之后开始震荡超调,802 s后才趋于稳定(图2b)。依据投产时调节阀测试,乌鲁木齐进站调节阀PID参数均为程序初始经验值,无法满足运行要求。因此,需根据管道实际工况对调节阀PID参数进行整定,实现管道压力与流量的自动、稳定调节。

2.1 PID控制原理

典型的PID控制器包含比例、积分、微分3部分,PID控制器以模块化形式存储于站场PLC存储器中^[16]。以乌鲁木齐进站调节阀为例,PID控制器以压力设定值与实际压力值的差值作为输入(图3),经过运算后,输出调节阀阀位,通过电液执行机构控制阀门动作产生新的压力值,若其与压力设定值仍存在差值,则进行下一个计算周期,直至实际压力值与压力设定值相等。

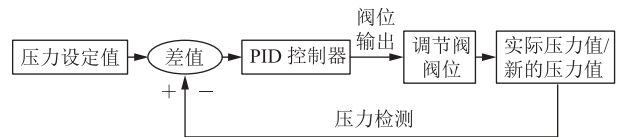


图3 乌鲁木齐进站调节阀PID控制示意图

PID控制以调节阀阀位为输出的表达式为:

$$C_v = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中: C_v 为调节阀开度输出值; K_P 为控制器比例系数; $e(t)$ 为压力设定差值,MPa; t 为时间步长,s; T_I 为控制器的积分时间常数; T_D 为控制器的微分时间常数。

在计算机系统中,PID算法需要通过编程实现,但微积分运算编程不易实现,一般以求和代替积分运算、前后差值代替微分运算的方式进行简化,将数学表达式离散化,则控制阀位输出表达式简化为:

$$C_v = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \sum_{t=0}^k T e(t) + T_D \frac{e(t) - e(t-1)}{T} \right] \quad (2)$$

式中: k 为迭代计算次数; T 为系统单位采样时间,s。

PID的输出 C_v 直接控制阀门执行机构, C_v 的值与执行机构的位置(即阀门开度)一一对应,因此通常称式(2)为位置式PID控制算法。可以看出,位置式

PID 控制算法要用到每个采样周期误差的累计值,可能产生较大的累计值偏差从而导致输出值偏差较大,

$$\Delta C_v(t) = K_p \left[e(t) - e(t-1) + \frac{T_e(t)}{T_I} + T_D \frac{e(t) - 2e(t-1) + e(t+2)}{T} \right] \quad (3)$$

增量式算法不需要计算累计偏差,输出值为当前值的增量,效率更高,速度更快。以调节阀为例,管道中调节阀 PID 控制器仅输出阀位变化的部分,阀位输出变化量小,有利于管道压力稳定,且调节阀出现误动作的概率小。此外,输油管道以压力控制为主,微分控制系数会加剧其压力波动,因此实际输油管道 PID 控制器主要以比例、积分控制阀位输出。

2.2 乌鲁木齐进站调节阀 PID 参数整定及效果

目前 PID 参数整定有多种方法^[17-19],常用方法为工程整定法。工程整定法不需要对象的动态特性曲线,直接在调节系统中整定,简便快捷。对于管道 PID 控制而言,工程整定法只需观察压力随时间的变化曲线,当得到满足运行要求的稳定曲线时,整定的 PID 参数即为最佳参数。

为防止调节过程中压力震荡,乌鲁木齐进站调节阀同样不加入微分控制,即微分时间常数 T_D 设为 0,因此只需确定比例系数 K_p 与积分时间常数 T_I 。比例系数是控制执行器响应速度的主要因素,增大比例系数,执行机构反应灵敏、速度快,但比例系数过大易引起超调,造成震荡,系统将处于不稳定状态。积分时间常数可以消除系统稳态误差,使系统趋于稳定,其值越小,积分效果越明显,有利于消除系统稳态误差,提高控制精度,但其值过小也会引起超调,导致系统震荡。因此在实际参数整定中应优先确定比例系数,先提高执行机构反应速度,再确定积分时间常数,减少系统震荡。

利用上述方法对乌鲁木齐进站调节阀 PID 参数重新整定。乌鲁木齐站 PLC 为罗克韦尔 Allen-Bradley (AB) PLC, PID 控制模块置于 PLC 中,通过下位机修改 PID 控制参数,调整比例系数与积分时间常数。重新整定后,比例系数为 40,积分时间常数为 786,微分时间常数为 0。参数重新整定后通过 SCADA 系统下位机设定进站压力,由重新整定后乌鲁木齐进站压力随时间变化曲线(图 4)可知,进站压力由 0.1 MPa 设定为 0.2 MPa,约 75 s 压力调节到位,震荡较小。上述趋势下,若设定压力与实际压力差值变大,根据式(2)可知,调节阀反应速度会成倍增加,能够满足正常运行下的压力调节要求。

不利于输出控制且计算量大,因此需要采用增量式 PID 控制算法:

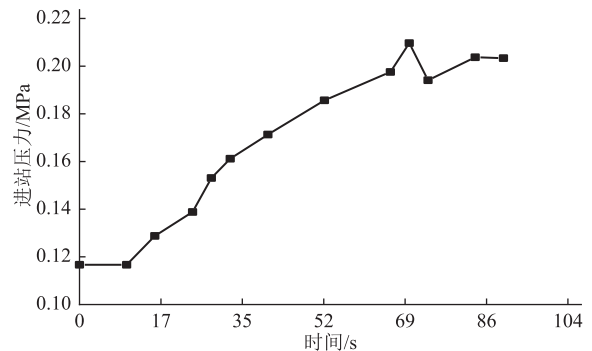


图 4 PID 参数重新整定后乌鲁木齐进站压力反馈曲线

由开式输送切换至密闭输送流程时,乌鄯管道正常停输过程中乌鲁木齐站输油泵入口汇管压力曲线(图 5)可知,218 s 乌鲁木齐站给油泵停运后,输油泵入口汇管压力在 3 s 内由 1.2 MPa 迅速降至 0.1 MPa 左右。因此,可通过停运乌鲁木齐站给油泵模拟大幅度压力波动的异常工况,测试重新整定后进站调节阀对较大压力波动的调节能力与反应速度。

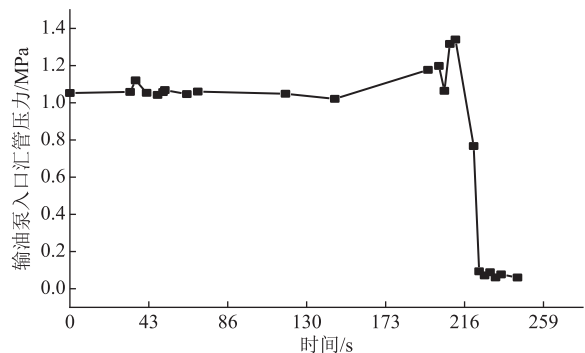


图 5 切换为密闭输送时正常停输过程中乌鲁木齐站压力曲线

在开式输送切换至密闭输送的流程中,进站调节阀设定为自动状态,停运乌鲁木齐站给油泵,由乌鲁木齐站输油泵入口汇管压力曲线(图 6)可知,在大

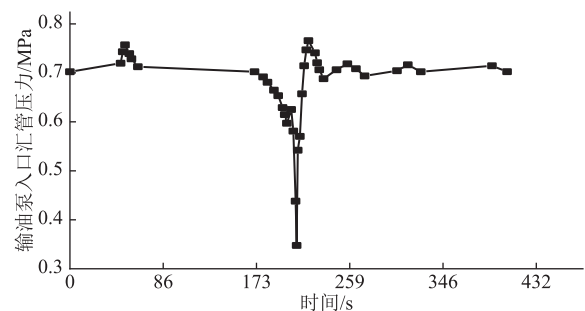


图 6 PID 参数重新整定后切换为密闭输送时异常工况下乌鲁木齐站压力反馈曲线

压力波动的异常工况下,输油泵汇管区压力瞬间达到 0.34 MPa,通过重新整定后的乌鲁木齐进站调节阀 PID 自动控制,1 s 后压力升至 0.54 MPa,2 s 后压力升至 0.65 MPa,4 s 后压力升至 0.71 MPa。在出现压力大幅度波动情况下,PID 参数重新整定后,乌鲁木齐进站调节阀可以快速反馈,有效防止输油泵入口低压导致的甩泵情况发生,满足异常情况处理要求。

2.3 PID 控制的影响因素

(1) 压力仪表的可靠性与灵敏度。PID 控制器通过检测实时压力与设定值,对两者进行比较后输出阀位,若检测的压力仪表出现问题,PID 控制器可能输出错误阀位,导致调节控制出现偏差。同时,采用 PID 控制的调节阀对执行机构要求高,若执行机构灵敏度不够,不仅无法保证压力调节到位,还会引起频繁的压力波动,造成执行机构反复动作。因此,必须定期检修压力仪表,以保证其可靠性与灵敏度。此外,现场进行压力仪表检定或其他影响压力仪表的作业时,应将调节阀切换为手动状态,防止调节阀误动作。

(2) 调节阀阀门特性。每个调节阀特性曲线可能不同^[20-22],在实际运行与数调整过程中应注意调节阀开度与压力曲线的关系。以西部某管道兰州末站为例,设置两路进站调节阀,使用 1[#] 调节阀时,进站压力为 7.8 MPa,流量为 1 700 m³/h,开度为 40%;当切换为 2[#] 调节阀时,进站压力为 8.4 MPa,流量为 1 600 m³/h,调节阀开度仅为 6.5%。两个调节阀阀门特性差别较大,当两路调节阀调节压力幅度均为 0.1 MPa 时,2[#] 调节阀近似快开特性(图 7)。因此,在 2[#] 调节阀 PID 参数整定过程中应注意调节幅度,若参数调节幅度过大,PID 控制器输出偏大,压力变化较大,将造成系统不稳定。

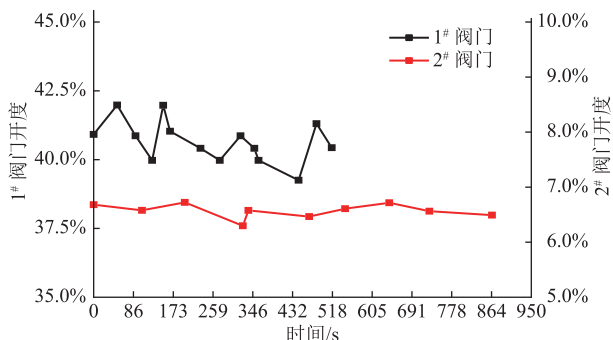


图 7 西部某管道兰州末站压力调节幅度为 0.1 MPa 时两路调节阀开度变化曲线

(3) PID 参数整定过程。在 PID 参数整定时,管道应处于稳定运行状态,如果上下游有较大压力波动,将影响 PID 参数整定。此外,整定参数时应先将积分

时间常数设为最大值,优先调整比例系数,当时间压力曲线满足生产要求后,再调整积分时间常数,通过 SCADA 系统的压力反馈曲线判断参数是否合适。

3 结论

利用工程整定法对改造后阿独乌鄯系统的乌鲁木齐进站调节阀 PID 参数进行重新整定,改善了调节阀调节时长与稳定性,并在正常工况与异常工况下进行了验证。重新整定后的 PID 参数可以提高调节阀在异常工况下的应急处理速度,减少压力瞬间波动与手动调节不及时对管道的风险,可为其他液体管道调节阀参数整定提供参考。合适的 PID 参数可以保证调节阀对异常压力波动的快速调节,保障管道安全。调节阀特性等影响因素对 PID 参数整定影响较大,不同厂家、不同管道甚至不同站场的调节阀 PID 参数均可能不同,管道投产前应根据调节阀特性、水力系统及运行要求开展现场测试,通过压力反馈曲线确定其是否符合生产要求。今后可对不同厂商 PLC 的 PID 控制模块进行分析,总结参数整定规律,提升工程整定法进行 PID 参数整定的效率与准确性。

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. The overall architecture design and key construction technologies of intelligent pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(2): 121-129.
- [2] 聂中文,黄晶,于永志,王永吉,单超,冯骋,等.智慧管网建设进展及存在问题[J].油气储运,2020,39(1):16-24.
NIE Z W, HUANG J, YU Y Z, WANG Y J, SHAN C, FENG C, et al. Construction progress and existing problems of intelligent pipeline network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(1): 16-24.
- [3] 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.

- [4] 李柏松,王学力,徐波,孙巍,王新,赵云峰. 国内外油气管道运行管理现状与智能化趋势[J]. 油气储运, 2019, 38(3): 241-250.
LI B S, WANG X L, XU B, SUN W, WANG X, ZHAO Y F. Operation and management status and intelligentization trend of global oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(3): 241-250.
- [5] 董绍华,张河苇. 基于大数据的全生命周期智能管网解决方案[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 28-36.
DONG S H, ZHANG H W. Full life cycle intelligent pipe network solution based on big data[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 28-36.
- [6] 李锴,李江,顾清林,王多才. 西气东输智慧管网建设实践[J]. 油气储运, 2021, 40(3): 241-248.
LI K, LI J, GU Q L, WANG D C. Practice of intelligent pipeline network development in West-East Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 241-248.
- [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] 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.
- [9] 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.
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.
- [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] 蒋杨贵,屈建宏,臧国君,常江,杨伟. 靖咸输油管道密闭流程改造[J]. 油气储运, 2006, 25(12): 56-58.
JIANG Y G, QU J H, ZANG G J, CHANG J, YANG W. Technology improvement in JingXian Oil Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25(12): 56-58.
- [12] 曾多礼. 格一拉管道密闭输送航煤的实践[J]. 油气储运, 1995, 14(3): 16-21.
ZENG D L. Jet fuel tight line transportation practiced in Golmud-Lhasa Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1995, 14(3): 16-21.
- [13] 付铁成,张海涛,王占宇. 输油管道密闭输送典型事故分析[J]. 油气储运, 2001, 20(12): 42-44.
FU T C, ZHANG H T, WANG Z Y. Typical accident analysis on the oil pipeline with tight line transportation process[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(12): 42-44.
- [14] 房旭鹏,熊伟,魏晓宁. 长输管道瞬变流控制研究[J]. 油气储运, 2009, 28(2): 26-30.
FANG X P, XIONG W, WEI X N. Study on transient flow control of long-distance oil pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(2): 26-30.
- [15] 汪冈伟,田毅. 秦京输油管道密闭运行的安全保护[J]. 油气储运, 2003, 22(3): 41-44.
WANG G W, TIAN Y. Safety and protection for tight line transportation of Qinhuangdao-Beijing Oil Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22(3): 41-44.
- [16] 魏亮. PID 控制对输油管道运行的影响及防控措施[J]. 油气储运, 2015, 34(11): 1214-1218.
WEI L. Effect and preventive measures of PID control technology on oil pipeline operation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(11): 1214-1218.
- [17] 王伟,张晶涛,柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 347-355.
WANG W, ZHANG J T, CHAI T Y. A survey of advanced PID parameter tuning methods[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(3): 347-355.
- [18] 温凯,夏子杰,刘静,黄晓茵,王晗,宫敬. 基于 K-Spice 与 SPS 的单管泵阀模型 PID 控制[J]. 油气储运, 2019, 38(8): 904-910.
WEN K, XIA Z J, LIU J, HUANG X Y, WANG H, GONG J. PID control of single-tube pump valve model based on K-Spice

- and SPS[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(8): 904-910.
- [19] 姜洪亮. 基于 PLC 的 PID 控制器在注入站系统中的应用[J]. 石油规划设计, 2020, 31(4): 43-46.
LOU H L. PID controller based on PLC application in injection station system[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2020, 31(4): 43-46.
- [20] 张柏松. 调节球阀流量特性及口径计算[J]. 油气储运, 1997, 16(11): 18-20.
ZHANG B S. The flow rate properties of ball valve and its bore calculation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1997, 16(11): 18-20.
- [21] 李景翠, 明祥贵, 李亮亮, 易先中, 贺育贤, 宋顺平, 等. CD70 型高压旋塞阀结构强度及启闭特性分析[J]. 石油机械, 2021, 49(9): 33-39, 84.
LI J C, MING X G, LI L L, YI X Z, HE Y X, SONG S P, et al. Analysis on structural strength and open/close characteristic of CD70 high-pressure cock valve[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(9): 33-39, 84.
- [22] 杜杨, 王莹莹, 朱春丽, 刘国恒, 段梦兰, 郑伟. 基于 VOF 法的水下管阀结构水力系数特性研究[J]. 石油机械, 2020, 48(2): 48-56.
DU Y, WANG Y Y, ZHU C L, LIU G H, DUAN M L, ZHENG W. VOF-based Study on characteristics of hydrodynamic coefficients of subsea pipe-valve structures[J]. China Petroleum Machinery 2020, 48(2): 48-56.
(收稿日期: 2019-03-12; 修回日期: 2021-08-24; 编辑: 张静楠)

作者简介: 林永刚, 男, 1987 年生, 工程师, 2010 年毕业于东北石油大学油气储运工程专业, 现主要从事长输管道调度运行及管理工
作。地址: 北京市朝阳区东土城路 5 号院 C 座 801, 100013。电话:
18610054210。Email: linyg@pipechina.com.cn

(上接第 1186 页)

- [15] 张宇清. Nb 及析出相对 LNG 储罐用 9Ni 钢焊材强韧化的影响研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.
ZHANG Y Q. Study on effect of Nb and precipitation on strengthening and toughening of 9Ni steel welding material for LNG storage tank[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [16] 郑义, 李欣雨, 李宁, 蒋勇, 颜家振, 杨飞, 等. LNG 储罐用 9Ni 钢焊条电弧焊接头的组织与性能[J]. 电焊机, 2017, 47(4): 56-59.
ZHENG Y, LI X Y, LI N, JIANG Y, YAN J Z, YANG F, et al. Microstructure and performance of welded joint in shielded metal arc welding of 9Ni steel for LNG storage tank[J]. Electric Welding Machine, 2017, 47(4): 56-59.
- [17] 严春妍, 李午申, 白世武, 薛振奎. 9Ni 钢焊接热影响区组织转变规律的研究[J]. 材料工程, 2010(2): 6-9.
YAN C Y, LI W S, BAI S W, XUE Z K. Study on phase transformation in welding heat affected zone of 9Ni steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(2): 6-9.
- [18] 胡湘红. 9Ni 钢固态相变规律探讨[J]. 宽厚板, 2007, 13(6): 33-39.
HU X H. Discussion of solid-state phase transition rule of 9Ni steel[J]. Wide and Heavy Plate, 2007, 13(6): 33-39.
- [19] 孟传峰, 崔天燮, 刘东风, 王采焕. LNG 用 9Ni 钢控轧控冷工艺的热模拟研究[J]. 压力容器, 2010, 27(9): 7-10, 15.
MENG C F, CUI T X, LIU D F, WANG C H. Study on thermal simulation of controlled rolling and cooling of 9Ni steel used in LNG[J]. Pressure Vessel Technology, 2010, 27(9): 7-10, 15.
- [20] 谢章龙, 刘振宇. 9Ni 钢组织演变、合金元素配分及增韧机理的研究[J]. 材料科学与工艺, 2013, 21(2): 6-13.
XIE Z L, LIU Z Y. Research on microstructure evolution, alloy elements partitioning and toughening mechanism of 9Ni steel[J]. Materials Science and Technology, 2013, 21(2): 6-13.
(收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-09-06; 编辑: 刘朝阳)

作者简介: 陈凯力, 男, 1972 年生, 高级工程师, 1996 年毕业于南京化工大学化工机械与设备专业, 现主要从事储罐、球罐和低温罐的设计研究工作。地址: 北京朝阳区安慧北里安园 20 号中国石化工程建设有限公司, 100101。电话: 010-84877573。Email: chenkailli@sei.com.cn