

高温高压井地面测试计量自动化智能控制技术

张明友, 谢奎, 廖刚

中国石油川庆钻探工程有限公司试修公司 四川成都 610052

通讯作者: Email: xiekui_zyy@cnpc.com.cn

项目支持: 中国石油集团关键核心技术重大科技攻关项目“230 ℃/140 MPa 抗硫试油测试关键装备研制”(2021ZG09)

引用: 张明友, 谢奎, 廖刚. 高温高压井地面测试计量自动化智能控制技术[J]. 油气井测试, 2023, 32(3): 12-16.

Cite: ZHANG Mingyou, XIE Kui, LIAO Gang. Automatic and intelligent control of surface testing and metering for HTHP wells[J]. Well Testing, 2023, 32(3): 12-16.

摘要 高温高压井地面测试计量主要依赖人工在作业区域内操作承压设备, 近距离检查、判断和处置作业异常, 存在一定的安全风险。通过升级电气化控制地面测试设备, 建立和优化算法模型, 搭建测试参数数据库, 实现稳定控压、产量测试、液气分离等作业的智能控制; 利用图像智能识别方法, 构建测试风险识别模型和数据库, 对采集到的图像进行风险智能识别、预警和控制, 建立地面测试流程的自动化集中控制系统。在川渝地区 J1 等井成功应用了 26 井次, 实现全流程多个节点的计算机远程一键自动控制、测试作业区域无人值守、测试风险图像智能识别和主动控制, 显著降低了作业安全风险, 满足高温高压油气井地面测试安全、高效的作业需求, 应用前景广阔。

关键词 高温高压井; 地面测试计量; 电动执行器; 智能化; 自动控制; 计算机; 图像智能识别

中图分类号: TE353 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.03.003

Automatic and intelligent control of surface testing and metering for HTHP wells

ZHANG Mingyou, XIE Kui, LIAO Gang

CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Well Workover Company, Chengdu, Sichuan 610052, China

Abstract: The surface testing and metering for high-temperature high-pressure (HTHP) wells primarily rely on manual operation of pressure equipment in the work area, involving close-range inspection, judgment, and handling of operational anomalies, which poses certain safety risks. By upgrading the electrical control of surface testing equipment, building/optimizing the algorithm model, and establishing the testing parameter database, the intelligent control of stable pressure control, production testing, liquid-gas separation and other operations is realized. By using the image intelligent recognition method, the risk identification models and databases are constructed, allowing for intelligent recognition, early warning, and control of risks based on collected images. Thus, an automated centralized control system for surface testing process is established. This technology has been successfully applied in 26 wells, including J1, in the Sichuan-Chongqing region, enabling a computerized remote one-key automatic control of multiple nodes in the entire process, unmanned operation in the testing work area, intelligent recognition and active control of testing risk images. The technology significantly reduces operational safety risks, meets the requirements for safe and efficient surface testing for HTHP oil and gas wells, showing broad application prospects.

Keywords: HTHP well; surface testing and metering; electric actuator; intelligent; automatic control; computer; image intelligent recognition

川渝、新疆、青海等地区超深高温高压井日益增多, 井下面临高温(225 ℃)、高压(160 MPa)、含 H_2S (675 g/m³)等极端苛刻工况, 地面测试计量作业安全面临更大挑战, 对测试设备远程操控提出了迫切需求, 为此开展了测试设备远程操作和控制的研究与实践, 运用液压控制技术可实现高压区地面紧急关断阀、油嘴管汇的远程操作, 但其成本高、存在液压油泄漏风险; 热交换器、分离器、缓

冲罐等中低压设备全部依赖手工操作, 高压高产井设备操作人员心理压力, 易出现误判、误操作, 作业区域巡检依赖人工近距离检查, 人员安全风险大, 且存在巡检不及时造成异常情况发现滞后带来安全风险。为此通过对地面测试计量设备电气化改造、智能控制系统研究, 率先在行业内应用远程计算机一键操作, 实现全流程多个节点的自动控制、测试作业区域无人值守、测试风险图

像智能识别和自动控制^[1-4]。

1 总体目标和技术思路

总体目标是形成地面测试计量自动化智能控制技术,实现远程计算机自动化智能控制、一键操作、作业区域无人值守,消除作业区域操作人员的安全风险,满足高温高压井试油测试作业需求。其技术思路如下:

(1)构建电气化地面测试计量设备。对紧急关断阀、捕屑器、除砂器、转向管汇、油嘴管汇、热交换器、分离器、缓冲罐和计量罐等测试设备的开关阀和节流阀进行电气化改造,将液动、手动和气动阀门全部升级为电驱动,为自动化智能化创造条件。

(2)建立地面测试流程的自动化集中控制系统。采用实时高效的总线+ModBus 的通讯协议,将紧急关断阀、捕屑器、除砂器、分离器等所有地面测试计量设备形成一个有机整体,一台计算机直接控制每个设备上的 PLC 单元,单台设备上的 PLC 单元也可实施单独控制,构建集中化、自动化、具有一定冗余度的地面测试设备控制系统^[5]。

(3)建立和优化算法模型,搭建测试参数数据库,采集流速、压力、气液产量等参数,实现稳定控压、产量测试、液气分离等作业的智能控制。同时根据作业安全需求,系统设计时考虑人工判断和干预,设备调整的每次开度都反馈到软件界面,需要经过操作人员的允许后才能进行。

(4)利用图像计算机智能识别方法,构建已知测试风险的识别模型和数据库,对采集到的图像进行风险智能识别、预警和控制^[6-8]。

主要技术指标:流程自动化控制覆盖率 $\geq 95\%$,节流油嘴的开度最小间隔 $\leq 1\%$,截止阀开关时间 $\leq 40\text{ s}$,ESD 阀关断时间 $\leq 15\text{ s}$,作业区域无人值守,已知测试风险图像智能识别和预警。

2 地面测试计量自动化智能控制技术

地面测试计量自动化智能控制技术包含了地面测试设备阀门的电控改造、地面测试流程压力和气液分离的自动化控制、测试风险智能主动预警及调控以及集中控制软件,实现了地面测试的主要作业如流程开关控制、分离器压力和液位排液、图像识别与预警等的一键操作,远程控制。

2.1 统一地面测试设备执行方式

自动化是智能化建设的基础。转向管汇、油嘴

管汇、分离器等地面测试设备上的阀门根据功能分为开关型和调节型,根据执行机构工作方式分为手动、电动、液动和气动。要实现自动化控制,首先应统一阀门的执行机构。相较于液动、气动执行方式,电动执行机构响应快、安装方便、驱动力大,可实现数字化开度、扭矩显示,利于自动化集成,因此优选电动执行器作为动力单元^[9]。闸阀应用开关型电动执行器,调节阀应用调节型电动执行器。开关型执行器以直行程的方式实现闸阀的开关,调节型执行器以多回转的方式实现调节阀的调节,均采用驱动电机和减速齿轮箱组合的模式,具有行程限位功能,可设置扭矩限制,防爆等级 EXDIIIC4 T4,防护等级 IP68。

控制系统由设备单体 PLC 控制模块、测试参数传感器及信号线等组成,主要分为实时数据采集模块和自动控制模块。采集模块实时采集阀门开度、扭矩、转速以及压力、温度、流量等参数,计算机完成参数分析、整理和判断,将指令下达给设备单体的 PLC 控制柜(见图 1)。

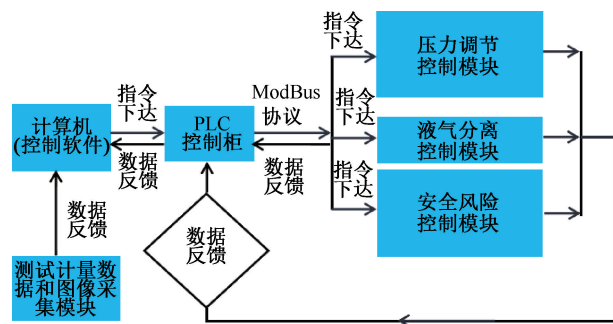


图 1 控制系统运行示意图

Fig. 1 Schematic diagram of control system operation

系统设置了测试计量流程自由操作、批量操作和恒压三种操作模式,分别对单个阀门、流程上批量阀门和调节阀进行自动控制。

2.2 压力调节自动控制

测试流程压力的控制是非常重要的一个过程控制,若节流阀开度过大极有可能导致下游分离器压力过高出现分离器超压情况,所以在压力控制的过程中对节流阀的每一次调整行程都是非常细微的,每次不能过大的进行调整。根据目标区块产量、压力、流体等特性,建立了测试工作制度数据库,并依据现场阀门特性建立开度计算模型^[10-11]。通过在现场和实测数据进行比对验证,确保预测的节流油嘴下游压场的准确。

压力控制是自动调节节流阀开度,将压力控制在目标范围内。在稳压模式控制操作前,需对浮动压力范围进行设定,选择调节系数 $K(0 \leq K \leq 1; K$ 值

越大,开关阀速度越快),使得调节阀在预设压力范围内自动调节。

上游压力恒压模式:

当 $P_1 > P$ 时:

$$Q = Q_1 - [(P_1 - P_{\text{上}}) / (P_1 + P_{\text{上}})] \times (1 - Q_1) \times K$$

当 $P > P_1$ 时:

$$Q = Q_1 + [(P_1 - P_{\text{上}}) / (P_1 + P_{\text{上}})] \times (1 - Q_1) \times K$$

下游压力恒压模式:

当 $P_1 > P$ 时:

$$Q = Q_1 + [(P_1 - P_{\text{下}}) / (P_1 + P_{\text{下}})] \times Q_1 \times K$$

当 $P > P_1$ 时:

$$Q = Q_1 - [(P_1 - P_{\text{下}}) / (P_1 + P_{\text{下}})] \times Q_1 \times K$$

式中: P_1 为目标压力, MPa; $P_{\text{上}}$ 为节流阀上游实时压力, MPa; $P_{\text{下}}$ 为节流阀下游实时压力, MPa; K 为调节系数; Q 为阀门开度, Q_1 为初始开度, 全开时 Q 值为 1, 全关时 Q 值为 0。

考虑到高压差、高含砂复杂井口条件下, 节流油嘴受到冲蚀, 需要进行更换, 采用超声波砂探头实时探测出砂量, 通过建立的出砂量与油嘴冲蚀程度之间的关系模型, 对油嘴冲蚀程度进行智能预判, 及时检查、更换油嘴。

2.3 液气分离自动控制

该模块以电子液位计、防爆接口箱、液位调节阀、阀门定位器、计算机软件为核心。电子液位计是基于时间行程原理的电磁波测距系统, 将液位高度信号反馈到控制软件, 根据反馈与接收的时间差准确计算出分离器液位高度, 对分离器内不同的流体介质, 如返排液、黏度较高的原油和凝析油均有较高的适应性。控制软件对分离器液位高度进行判定(见图 2), 并将控制指令发给阀门定位器, 根据分离器液位实际高度与用户预设的液位高度自动控制调节阀开度, 实现自动排液, 确保将分离器液位控制在预设范围内。

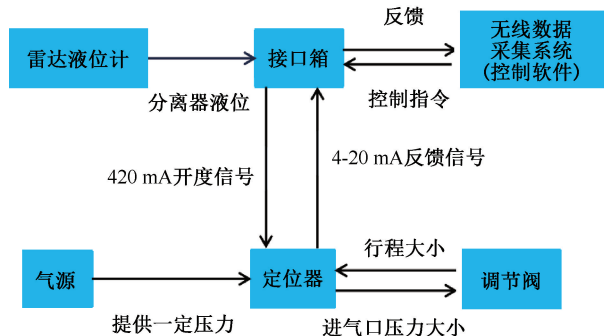


图 2 分离器自动排液原理图

Fig. 2 Schematic diagram of automatic drainage of separator

液位控制阀开度与分离器液位高度呈线性关系为^[12-13]

$$A = \frac{100}{h_2 - h_1} (h - h_1)$$

式中: A 为节流阀开度, %; h 为分离器内实际液位高度, m; h_2 为液位控制上限, m; h_1 为液位控制下限, m。

2.4 测试风险图像智能识别、预警

利用人工智能、计算机深度学习技术, 采用 VGG-16 和 MCCNN 卷积神经网络算法建立已知类型测试风险隐患问题的识别模型^[14-15], 对监测范围内已知风险隐患问题进行预警提示, 具备已知风险隐患问题如分离器超压、流程刺漏、作业区域人员进入等多种工况的识别、预警以及处置功能。在已知风险识别的基础上, 对新增风险具备学习功能, 不断丰富隐患问题的图像识别和控制。

2.5 集成控制软件

运用边缘计算、大数据分析等技术研制了多通道、多界面无线数据采集系统, 可实现全套流程 30 多个数据节点的自动化控制全覆盖, 对压力、温度、压差等关键数据做到秒级的实时采集。将流程开关自动化控制、分离器自动排液、图像识别与预警等 7 大功能进行集成, 对软硬件功能整合, 形成集多功能于一体的地面测试计量自动化智能控制软件。通过计算机人机交互界面, 对阀门开度、扭矩、压力、流量、温度等多节点数据进行实时采集、自动分析、整理、判定, 并下达指令给 PLC 控制柜, 进行阀门开度调节、分离器自动排液、作业过程安全防控等, 实现全套流程的统一控制、安全运行。

3 现场应用

以四川盆地 J1 井为例, 该井完钻井深 7 760 m, 预测地层压力 151 MPa, 地层温度 155 ℃, 采用了 2 套 140 MPa 自动化智能控制地面测试流程进行测试计量作业(见图 3)。

该井作业前设置为批量操作模式, 设定阀门开关状态、开度等参数, 然后计算机一键开井放喷排液。测试计量期间, 计算机自动调节和控制井筒流体, 节流阀调节平稳、灵活, 压力控制差值未超过 0.5 MPa; 分离器液位远程实时监测、报警准确, 液面控制灵敏、波动范围 ± 2 cm; 能够对人员进入作业区域、管线及阀门刺漏等已知测试风险准确图像识别和告警, 并对分离器即将超压等风险自动关井, 图

像识别率大于95%,紧急关井时间小于10 s。该井测试计量作业遭遇了连续2天暴雨、雷电恶劣天气,设备运行正常,未发生漏电、系统失效等复杂情况。整个测试期间,作业区域无人值守、无人操作,仅1人

在机房通过计算机即完成测试计量作业。该井最高关井压力113 MPa,最高井口流动压力94 MPa,地面流动温度93℃,H₂S含量100 ppm,测试获得天然气产量 $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

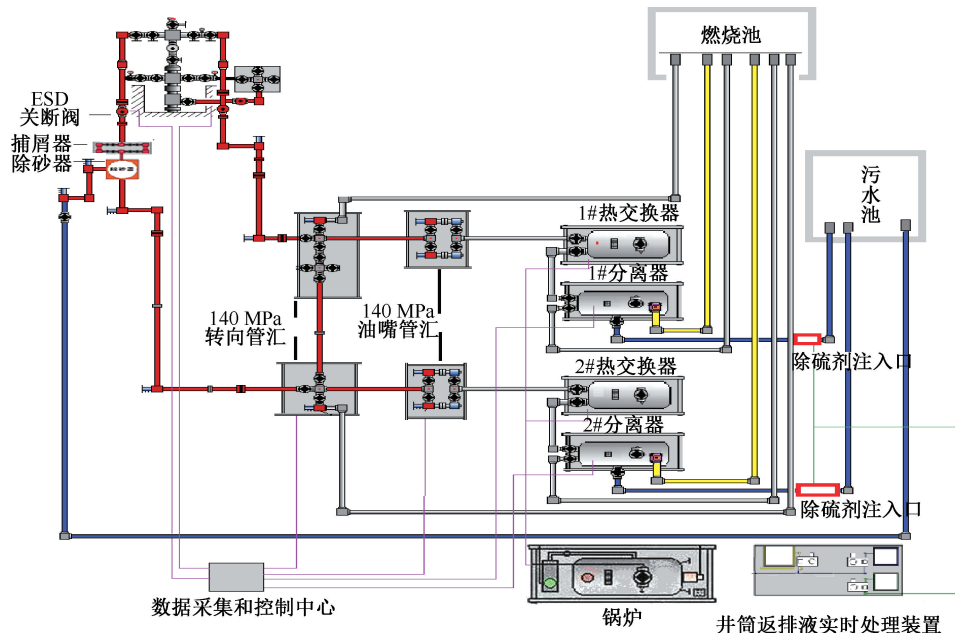


图3 J1井自动化智能控制地面测试计量流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of surface testing and metering flow of automatic intelligent control in well J1

该技术在川渝地区J1等26口高温高压气井进行了现场应用,闸阀开关、节流阀调节、分离器液位自动调节、流程自动切换、自动排液、排砂、图像智能识别和计算机远程一键操作等功能运行正常,作业区域无人值守,取全取准了测试数据,有效满足了高温高压气井地面测试计量安全、高效的作业需求。

4 结论

(1)地面测试计量自动化智能控制系统实现了测试作业智能控制、远程一键式安全操作、作业区域无人值守,消除了人工作业的安全风险,能满足高温高压油气井地面测试安全、高效的作业需求,将我国地面测试技术提升到一个新台阶。

(2)自动化智能控制技术为油气井地面测试作业的数字化转型升级奠定了良好基础,下步还需通过网络信息、大数据等技术构建一体化平台,实现从远程决策中心到现场的数据实时共享、实时评价、专家远程决策和指挥,真正形成智能设计、智能监控、智能响应的智能试油测试技术。

(3)自动化智能控制技术在高温高压油气井地面测试计量作业的成功应用,展示了其在油气勘探

开发领域的巨大潜力和广阔应用前景,值得进一步研究应用。但地面测试自动控制系统不同于石油炼化企业的自动化系统,测试井工况存在较大的不确定性,尤其对于探井测试,流动状态经常出现反复,下步需要针对区块特点完善测试工况数据库,进而优化智能算法模型,提高智能控制系统的工况适应性、控制准确度和测试效果。

致谢:论文撰写过程中,得到了中国石油川庆钻探工程有限公司试修公司的支持,在此感谢!

参考文献

- [1] 赵益秋,王志敏,杨川琴. 地面测试高压远程控制技术及应用实践[J]. 钻采工艺, 2019, 42(1): 61-64.
ZHAO Yiqiu, WANG Zhimin, YANG Chuanqin, Surface well testing high pressure remote control technology and application[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(1): 61-64.
- [2] 匡立春,刘合,任义丽,等. 人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 1-11.
KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1-11.

- [3] 庞东晓,卢齐,王志敏. 智能化技术在试油测试作业应用初探[C]. 第32届全国天然气学术年会(2020)论文集. 2020;1945-1952.
PANG Dongxiao, LU Qi, WANG Zhimin. Preliminary study on intelligent technology in well testing[C]. Proceedings of The 32nd National Natural Gas Academic Annual Meeting (2020). 2020;1945-1952.
- [4] 项培军,张明友,贺秋云,等. 四川高温高压含硫井测试技术[J]. 油气井测试,2007(S1):53-56.
XIANG Peijun, ZHANG Mingyou, HE Qiuyun, et al. Well testing technology of sichuan high temperature high pressure sour wells [J]. Well Testing,2007(S1):53-56.
- [5] 庞东晓,卢齐,张斌,等. 自动化技术在川渝地区试油工程中应用初探[J]. 钻采工艺,2021,44(4):68-72.
PANG Dongxiao, LU Qi, ZHANG Bin, et al. Preliminary study on the application of intelligent well-test technology in sichuan and chongqing areas[J]. Drilling & Production Technology, 2021,44(4):68-72.
- [6] 黄船,曾小军,何锦华. 智能试油技术在川渝气田的探索与实践[J]. 钻采工艺,2020,43(4):57-60.
HUANG Chuan, ZENG Xiaojun, HE Jinhua. Research on intelligent well testing technology and its application in Sichuan and Chongqing areas[J]. Drilling & Production Technology,2020,43(4):57-60.
- [7] 庞东晓,王志敏,黄焰,等. 智能图像识别技术在试油测试安全作业中的应用[C]. 第31届全国天然气学术年会(2019)论文集(05 钻完井工程). 2019;234-238.
PANG Dongxiao, WANG Zhimin, HUANG Yan, et al. The application of intelligent image recognition technology in safety control of well testing[C]. Proceedings of The 31st National Natural Gas Academic Annual Meeting (2019) (05 Drilling and Completion Engineering). 2019;234-238.
- [8] 谢奎,王雷. 川东北罗家寨区块放喷排液地面流程设计及优化[J]. 油气井测试,2016,25(6):31-33.
XIE Kui, WANG Lei. Surface well testing system design and optimization of LuoJiaZhai district in northeast Sichuan [J]. Well Testing, 2016,25(6):31-33.
- [9] 吴举秀,綦星光. 电动执行器的应用现状及发展趋势[J]. 山东轻工业学院学报(自然科学版),2007,21(3):50-52.
WU Juxiu, QI Xingguang. The application actuality and development trend of electric actuators [J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry (Natural Science Edition), 2007,21(3):50-52.
- [10] 吴昌军,杜征鸿,罗朝东,等. 精细控压管汇远程控制系统设计与应用[C]. 第31届全国天然气学术年会(2019)论文集(05 钻完井工程). 2019;117-125.
WU Changjun, DU Zhenghong, LUO Chaodong, et al. The design of the control syse of accurate pressure control manifold and its application[C]. Proceedings of The 31st National Natural Gas Academic Annual Meeting (2019) (05 Drilling and Completion Engineering), 2019;117-125.
- [11] 何恩鹏,潘登,涂敖. 页岩气井地面除砂技术[J]. 油气井测试,2016,25(6):56-58.
HE Enpeng, PAN Deng, TU Ao. Shale gas well surface sand removal technology [J]. Well Testing,2016,25(6):56-58.
- [12] 王雷. 雷达探测技术在分离器实时排液上的应用[J]. 钻采工艺,2021,44(2):107-109.
WANG Lei. Application of radar detecting technology on real-time fluid discharge of test separator[J]. Drilling & Production Technology, 2021,44(2):107-109.
- [13] 何石,向鹏. 元坝气田高压分离器自动排液系统技术改造与效果分析[J]. 西部特种设备,2021,4(3):67-73.
HE Shi, XIANG Peng. The design of high pressure separator auto fluid-discharging system and its application in Yuanba gas field[J]. Western Special Equipment, 2021,4(3):67-73.
- [14] 郝扬,周景润,蔡璇. 卷积神经网络在石油勘探开发领域的应用研究[J]. 信息系统工程,2020(11):138-140.
HAO Yang, ZHOU Jingrun, CAI Xuan. The research on the application of convolutional neural networks in petroleum exploration and development[J]. China CIO News, 2020(11):138-140.
- [15] 熊江宜. 基于深度学习图像识别的石油工人智能安全检查系统[J]. 电脑知识与技术,2020,16(25):171-172.
XIONG Jiangyi. Petroleum worker safety inspection system based on deeping learning image recognition[J]. Computer Knowledge and Technology, 2020,16(25):171-172.

编辑 方志慧

第一作者简介:张明友,男,1969年出生,高级工程师,2003年毕业于西南石油大学石油工程专业,现从事试油测试、带压作业科研工作。电话:13508011970,Email:zhangmyou_sc@cnpc.com.cn。通信地址:四川省成都市成华区龙潭街道华泰路42号试修公司,邮政编码:610052。