

12000 m 特深井自动化钻机研制与应用

王维旭^{1,2}, 曹晓宇², 马继光³, 张洪⁴, 李亚辉^{1,2},
覃建^{1,2}, 王安义^{1,2*}, 朱海峰⁵

(1. 中油国家油气钻井装备工程技术研究中心有限公司, 陕西宝鸡 721002;

2. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西宝鸡 721002; 3. 中国石油集团西部钻探工程有限公司, 新疆克拉玛依 650200;

4. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司, 四川成都 510100; 5. 中国石油集团长城钻探工程有限公司, 北京 100020)

摘要:为助力我国超深地层科学探索和万米以上深层油气发现, 研制了2套12000 m特深井自动化钻机。该钻机配套15 m超高钻台底座、4600 kW高载重比较车、3000 hp五缸钻井泵组、9000 kN交流变频顶部驱动装置等, 满足万米超高压复杂井钻井作业需要; 配套超大容量管柱自动化处理设备及其集成控制系统, 满足万米钻具自动化存储和排放要求, 实现了管柱从堆场到井口的全流程作业自动化; 全面应用电动驱动设备, 控制更精准, 运行更环保, 低温环境适应能力强, 安全性更高; 顶部驱动装置、发电机组、国产变频器全面替代进口, 国产化程度高。钻机现场应用效果表明: 两套12000 m特深井自动化钻机综合钻井速度达到1.6 m/h, 起下钻速度24.8柱/h, 通过远程在线检测及专家诊断系统使钻机的平均故障率较在役石油钻机降低50%, 可减少钻井作业人员3人/班, 人员劳动强度大大降低。为我国万米级地层的油气田开发提供了装备保障。

关键词: 万米钻井; 特深井; 石油钻机; 自动化; 电动化; 深层油气; 深地科探

中图分类号: TE922:P634.3⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)04-0007-07

Development and application of automatic drilling rig for 12000m extra-deep wells

WANG Weixu^{1,2}, CAO Xiaoyu², MA Jiguang³, ZHANG Hong⁴, LI Yahui^{1,2},
QIN Jian^{1,2}, WANG Anyi^{1,2*}, ZHU Haifeng⁵

(1. CNPC National Engineering Research Center for Oil and Gas Drilling Equipment Co., Ltd., Baoji Shanxi 721002, China;

2. CNPC Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd., Baoji Shanxi 721002, China;

3. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Karamay Xinjiang 650200, China;

4. CNPC Chuangqing Drilling Engineering Company Limited, Chengdu Sichuan 510100, China;

5. CNPC Greatwall Drilling Company, Beijing 100020, China)

Abstract: In order to help the scientific exploration of ultra-deep formation and oil and gas discovery over 10000m in China, two sets of automatic drilling rig for 12000m extra-deep wells were developed which is equipped with 15m ultra-high drilling floor base, 4600kW winch with high load ratio, 3000hp five-cylinder drilling pump set, 9000kN AC frequency conversion top drive device, etc., to meet the needs of drilling operations for myriametric wells with ultra-high pressure complex condition. Ultra-large capacity pipe string automatic processing equipment and integrated control system are accompanied to meet the requirements of automatic storage and discharge of myriametric drilling

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-07-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.04.002

基金项目: 中国石油天然气集团公司课题“工程技术与装备迭代升级发展研究”(编号: 2023DQ0715)

第一作者: 王维旭, 男, 汉族, 1978年生, 高级工程师, 机械工程专业, 硕士, 从事石油钻井装备研究开发与管理工作, 陕西省宝鸡市金台区东风路2号, 13152206991@126.com。

通信作者: 王安义, 男, 汉族, 1983年生, 高级工程师, 工程力学专业, 硕士, 从事油气钻井装备研究开发与系统集成设计工作, 陕西省宝鸡市金台区东风路2号, wanganyi03031530@sina.com。

引用格式: 王维旭, 曹晓宇, 马继光, 等. 12000 m特深井自动化钻机研制与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(4): 7-13.

WANG Weixu, CAO Xiaoyu, MA Jiguang, et al. Development and application of automatic drilling rig for 12000m extra-deep wells [J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 7-13.

tool, the full automated process of pipe string from the yard to the wellhead was achieved. Electric drive equipments were comprehensively applied with more accurate control, more environment friendly operation, low temperature environment adaptability and higher safety. Equipments such as top drive device, generator set and domestic inverter are locally made rather than imported. The field application showed that the two sets of automatic drilling rig for 12000m extra-deep wells has an integrated drilling speed of up to 1.6m/h, and the tripping speed is 24.8columns/h. Through the remote online detection and expert diagnosis system, the average failure rate is reduced by 50% compared with the in-service drilling rig, and the drilling operator can be reduced by 3 people/shift, as a result, the labor intensity of drilling personnel can be greatly reduced. It provides equipment support for China's oil and gas field development in myriametric formations.

Key words: myriametric drilling; extra-deep well; petroleum drilling rig; automation; electrification; deep oil and gas; deep scientific geological exploration

0 引言

能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题。油气资源作为国家战略资源,事关国家战略安全。当前,我国正处于向地球深部进军的重要关键时期,油气勘探开发已经突破9000 m、向万米超深层迈进,石油钻机作为油气勘探开发的核心装备,对于加快万米超深层油气资源勘探开发至关重要^[1]。与此同时,超深地层科学探索也是特深井钻机的重要应用领域^[2-3]。

我国2007年研制的第一台12000 m钻机^[4]难以适应当前超深层钻井作业需求,主要表现在:一是自动化、模块化程度较低,钻具的输送、上卸扣、排放等作业功能全部依靠人力完成,工人劳动强度大,钻井现场的本质安全水平难以得到保障^[5-8];二是钻机结构件材料强度低,设备笨重,安装运输难度较大,作业风险较高;三是面对当前超井深、超高温、超高压、超大负荷等钻井领域世界级难题,适应性不足^[9]。

目前,我国39%的剩余石油和59%的剩余天然气分布在深层、超深层区域,该区域是我国油气重大战略接替领域,但万米级地质参数未知,并且深层、超深层地质条件异常复杂,面临井底压力大、钻具载荷重、作业风险高等多重技术难题^[10]。中国石油宝鸡石油机械有限责任公司12000 m特深井自动化钻机的成功研制,为我国深层、超深层地质勘探开发提供了装备利器。目前该型钻机已生产应用2台。

1 总体技术方案及技术参数

1.1 总体技术方案

12000 m特深井自动化钻机采用柴油发电机组

作为主动力,输出的交流电经变频单元(VFD)分别为驱动绞车、顶驱、转盘和钻井泵的交流变频电动机。绞车由4台1150 kW的交流变频电机驱动,经2台两挡齿轮减速箱减速后驱动绞车滚筒。顶驱由2台440 kW交流变频电机驱动。转盘由1台800 kW的交流变频电机经Ⅱ挡二级齿轮减速箱驱动。配3套QDP-3000U型钻井泵组,单台钻井泵组由2台1200 kW交流变频电机经齿轮减速箱驱动泵输入轴。钻机总体方案如图1所示。

井架为前开口K型井架,底座为旋升式结构,井架和底座均低位安装,采用绞车依次整体起升,钻井绞车低位安装。钻机采用三单根立柱模式,配全套推扶式管柱自动化系统,具备超高钻台管柱输送和万米钻具自动化存储和排放能力,实现管柱从堆场到井口的自动化处理。钻机控制采用双司钻操作工位,一体化集成控制系统,实现管柱自动化设备、绞车、转盘、钻井泵、顶驱等关键设备的集成操控。配备区域管理系统,实现不同设备间的防碰互锁功能。配五缸高压钻井泵更加适应特深井作业喷射钻井要求。配远程监测系统,实现关键钻井设备运行监测,具有维保提醒、故障辅助诊断等功能。

1.2 主要技术参数

12000 m特深井自动化钻机主要配套技术参数如表1所示。

2 关键技术与创新点

2.1 关键技术

(1)超高钻台、超大载荷提升系统设计制造技术。全新研发15 m高钻台底座,转盘梁底面高度13 m,旋升式结构;52 m净空高井架,主体分6段,

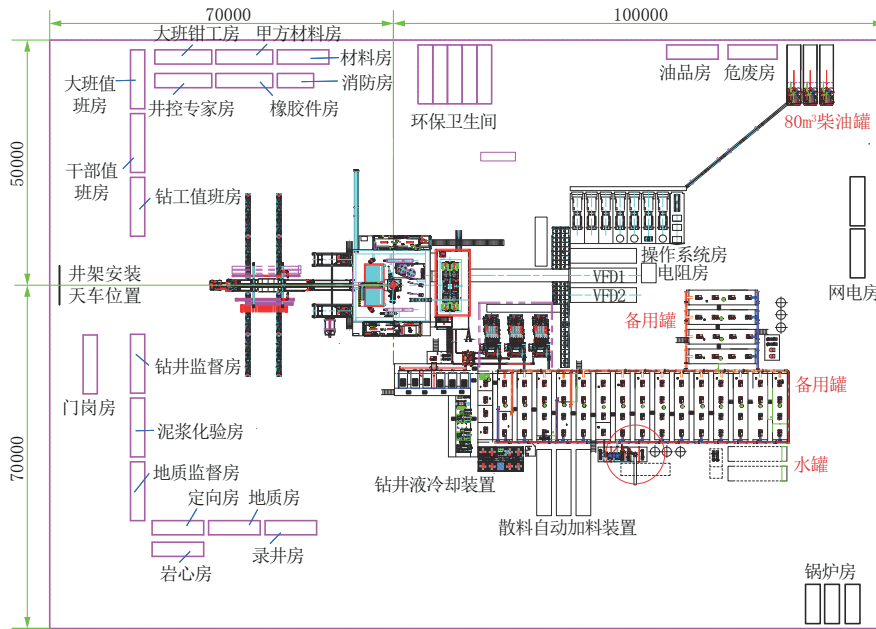


图 1 钻机总体方案

Fig.1 Overall plan of the rig

表 1 12000 m 特深井自动化钻机主要配套技术参数

Table 1 Main technical parameters of automatic rig for 12000m extra-deep well

主要技术参数	数值
名义钻井深度(Ø127 mm 钻杆)	12000 m
最大钩载	9000 kN
绞车额定输入功率	4×1150 kW
绞车挡位	2+2R
提升系统绳系	7×8
钻井钢丝绳直径	Ø48 mm
井架有效高度	52 m
钻台高度	15 m
转盘梁底面高度	13 m
管柱输送系统输送最大管柱长度	14 m
输送最大管柱重力	45 kN
适用最大管柱规格	Ø609.6 mm (24 in)
建立根系统适用最大管柱规格	Ø73 mm (2 7/8 in)~Ø254 mm (10 in)
最大卸扣扭矩	160 kN·m
排管系统适用管柱范围	Ø88.9 mm (3 1/2 in)~ Ø279.4 mm(11 in)
钻井泵组台数及型号	3 台, QDP-3000U 型泵组
钻井液管汇压力	70 MPa
动力传动方式	AC-DC-AC 全数字变频
主柴油发电机组	7 台, 单台功率 1200 kW, 电压 600 V, 频率 50 Hz

最大载荷 9000 kN, 井架支脚连接在底座基座上, 井架靠绞车动力通过钢丝绳系整体起放。开发提升能力为 9000 kN 的顶部驱动装置、天车、游车, 满足万米超深层油气勘探开发需要。超高钻台、超大载荷提升系统见图 2。

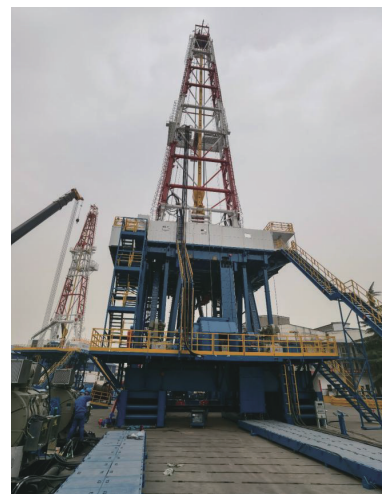


图 2 超高钻台、超大载荷提升系统

Fig.2 Ultra-high drilling floor and super-large load lifting system

(2)高载重比绞车, 模块化设计制造技术。该绞车为交流变频控制的单轴齿轮传动绞车, 额定功率 4600 kW, 提升能力强, 具有理想的输出特性, 四

电机双减速箱对称布置,结构紧凑,载荷与质量比值大。刹车方式有液压盘式刹车与电机能耗制动。滚筒轴及刹车系统^[11]、绞车电机和减速箱等主要部件模块化设计,形成3个运输单元,满足快速拆装与搬安。4600 kW两挡高载重比较车见图3。



图3 4600 kW两挡高载重比较车

Fig.3 4600kW winch with two speed high load ratio

(3)超高钻台、超大容量管柱自动化处理技术。全新开发管柱自动化系统,满足15 m高钻台管柱输送能力和12000 m超大容量钻具的存储和转运,满足11 in钻铤处理需求,实现管柱从堆场到井口的自动化处理。所有设备在司钻控制房集中操控。动力猫道采用钢丝绳拉升式结构,电液复合驱动,可实现多根输送,作业效率高;一体化铁钻工集成上卸扣、对扣、涂油、泥浆防喷等技术,具备一键联动、设备间安全互锁等功能,减少井口人工辅助作业^[12-13];钻台机械手采用L形行走方式,并采用下沉式轨道,实现避让立根台通道;缓冲机械手采用双扶正臂结构;二层台机械手采用推扶式结构^[14]。管柱自动化系统主要设备见图4~7。



图4 一体化铁钻工

Fig.4 Integrated iron roughneck



图5 钻台机械手

Fig.5 manipulator on drill floor



图6 缓冲机械手

Fig.6 Buffer manipulator



图7 二层台机械手

Fig.7 Manipulator on monkey board

(4)双司钻集成控制技术^[15-18]。钻机配套宝鸡石油机械有限责任公司自主知识产权的idriller®双司钻集成控制系统,如图8所示。系统主要控制模块和通讯线路一用一备,提高了稳定性和冗余能

力。控制上采用触摸式一体化座椅,实现主机和管柱设备的集成操控,同时能够兼容工业电视、顶部驱动装置等第三方设备的集成操作和显示。在控制软件方面开发了智能区域防碰管理系统,能根据设备动态轮廓进行坐标分析计算和防碰处理。通过各执行元件位置传感器,由程序实时判断设备是否处于“临碰状态”,对不同工况下关联设备间进行互锁保护和安全提示,进而实现即将碰撞设备的强制停机管理。



图8 双司钻集成控制房

Fig.8 Dual driller integrated control room

2.2 创新点

(1)关键设备参数强化。15 m超高钻台底座设计,满足超高压复杂井井控设备安装要求;4600 kW高载重比较车,最高钩速达2 m/s以上,起下钻速度提高8%,可连续提升最大钩载;3台3000 hp (2238 kW)五缸钻井泵组,适应喷射钻井要求;9000 kN交流变频顶部驱动装置,冲管满足70 MPa压力钻井作业需求,工作压力与高压循环系统匹配,提升了系统的作业能力,连续工作扭矩86 kN·m,最大卸扣扭矩137 kN·m。

(2)超大容量管柱自动化处理。配置高效动力猫道、钻台机械手、一体化铁钻工、二层台机械手等8套管柱自动化设备,具备超高钻台管柱输送和万米钻具自动化存储和排放能力;触摸屏式双司钻集成控制系统,实现管柱设备、绞车、转盘、钻井泵、顶驱等关键设备的集成操控及安全互锁。

(3)电动化驱动设备全面应用。电驱动力猫道、电动钻台机械手及二层台排管装置、电动提升小绞车,控制更精准,运行更环保,低温环境适应能力强。高压钻井液远程控制闸阀组,司钻远程操作,安全性更高。

(4)核心部件全面国产化。顶部驱动装置、发电机组、变频器全面替代进口,国产化程度高,有效

解决核心部件卡脖子问题。

3 试验及现场应用

3.1 厂内组装与试验

为保证设备可靠性,验证设备功能,该型首台12000 m特深井自动化钻机在宝鸡石油机械有限责任公司新厂区井场组装完成后,开展了多项单元设备试验和系统功能试验(图9)。



图9 钻机厂内调试

Fig.9 Drilling rig debugging in the factory

(1)井架和底座起升下放试验:井架和底座起升下放过程平稳、起升载荷、关键部位应力值均满足设计要求。

(2)井架和底座载荷试验:底座在井架最大钩载试验、最大转盘载荷试验时关键部位应力值均满足设计要求。

(3)动力猫道试验:动力猫道空载动作、多根钻杆输送过程、最大载荷输送能力均满足设计要求。

(4)绞车运转、转盘驱动装置运转、钻井泵组运转、动力控制系统、通讯管理机、井场防爆电路系统、气源净化装置等试验:试验结果均满足设计要求。

(5)钻杆/钻铤立根建立、排放、拆解、甩钻模拟试验:系统运行平稳顺畅,动作准确到位,满足设计要求。

(6)钻井泵组、绞车、转盘联合调试:绞车、转盘、钻井泵组运转正常;绞车盘刹操作可靠、动作响应迅速、滚筒缠绳整齐;电控系统运行正常。

3.2 油田现场应用情况

中国石油大力实施“万米深地科探工程”,2022年先后在塔里木盆地和四川盆地部署了2口万米深地科探井——深地塔科1井和深地川科1井。

深地塔科1井配套的12000 m特深井自动化钻机,于2023年5月30日开钻。至本文截稿时,连续安全钻达10000 m深地层。在三开中完下套管中,将直径273.05 mm的707根套管,在空质量达710 t高难度条件下,连续安全下入7856 m深地层,成功创造了我国陆上一次性下入套管最深、同尺寸套管最重纪录。深地塔科1井作业现场如图10所示。



图10 钻机在深地塔科1井作业

Fig.10 Drilling rig is operating in Deep Earth Take 1 well

深地川科1井配套的12000 m特深井自动化钻机,于2023年7月20日开钻。至本文截稿时,连续安全钻达6464 m深地层。在二开 $\varnothing 812.8$ mm钻头钻至500 m中完,下入 $\varnothing 635$ mm套管顺利固井,创全球 $\varnothing 812.8$ mm井眼钻深最深、超大尺寸套管下深最深等多项纪录。深地川科1井作业现场见图11。

该两套12000 m特深井自动化钻机综合钻井速度达到1.6 m/h,起下钻速度24.8柱/h,通过远程在线检测及专家诊断系统使钻机的平均故障率较在役石油钻机降低50%,可减少钻井作业人员3人/班,人员劳动强度大大降低。

在万米深井钻探过程中也不可避免的出现了些技术问题,如钻压施加问题、钻柱疲劳问题、地层高温问题等,有待在今后的研究中加以改进。

4 结论

(1)12000 m特深井自动化钻机,承载能力更强、提升能力更大、作业效率更高,能够有效应对超



图11 钻机在深地川科1井作业

Fig.11 Drilling rig is operating in Deep Earth Chuanke 1 well

深复杂地层勘探开发中的各种挑战。该钻机的成功研制,实现了万米级超深井钻井工程技术突破,补强了特深井开发装备短板,提升了我国万米特深井装备自动化水平,丰富了我国油气钻井装备的规格与系列,为我国更深层油气资源勘探开发提供坚强的装备保障。

(2)12000 m特深井自动化钻机,集成了机械、控制、软件、通信等多个领域的先进技术,推动了钻机提升系统、控制系统和机器人技术不断发展,是对自动化钻机实现万米级跨越的重大技术突破,是对中国技术、中国制造的一次探索与发展。

(3)12000 m超深井自动化钻机是我国目前钻探能力最强、自动化程度最高、技术最先进的钻井装备,该钻机在2口科探井的成功应用,将推动我国超深地层科学探索和万米以上深层油气发现,助力我国更好认识和掌握地下资源储量与分布,进一步提升我国油气资源开发能力和水平。

(4)12000 m特深井自动化钻机的应用推广,进一步提升了我国油气装备产业的自主性与安全性,有效提升我国钻井工程技术的极限作业能力,助力我国加快油气勘探开发技术策源地建设;开辟新的战略油气接替领域,提高我国能源开采能力,提升能源供应的可靠性和持续性,有效降低能源供应风险,确保我国能源供应的安全性。

参考文献(References):

- [1] 王兆明,温志新,贺正军,等.全球近10年油气勘探新进展特点与启示[J].中国石油勘探,2022,27(2):27-37.
WANG Zhaoming, WEN Zhixin, HE Zhengjun, et al. Characteristics and enlightenment of new progress in global oil and gas

- exploration in recent ten years [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(2): 27-37.
- [2] 尹浩, 梁健, 李宽, 等. 万米科学钻探关键机具优化措施研究 [J]. *钻探工程*, 2023, 50(4): 16-24.
YIN Hao, LIANG Jian, LI Kuan, et al. Research on optimization measures of key instrument for myriametric scientific drilling [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(4): 16-24.
- [3] 薛倩冰, 刘凡柏, 张金昌, 等. 特深孔地质岩心钻探技术装备集成及示范 [J]. *钻探工程*, 2023, 50(2): 8-16.
XUE Qianbing, LIU Fanbai, ZHANG Jinchang, et al. Integration and demonstration of geological core drilling technology and equipment for ultra-deep hole [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50(2): 8-16.
- [4] 《新疆石油地质》编辑部. 国产12000 m钻机诞生 [J]. *新疆石油地质*, 2008, 29(1): 40.
《Xinjiang Petroleum Geology》Editorial office. The birth of the domestic 12000m drilling rig [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2008, 29(1): 40.
- [5] 秦永和, 曹晓宇, 张志伟, 等. 油气钻采装备技术发展现状与展望 [J]. *前瞻科技*, 2023, 2(2): 89-104.
QIN Yonghe, CAO Xiaoyu, ZHANG Zhiwei, et al. Development status and prospect of oil and gas drilling and production equipment and technologies [J]. *Science and Technology Foresight*, 2023, 2(2): 89-104.
- [6] 王定亚, 王耀华, 于兴军. 我国管柱自动化钻机技术研究与发展方向 [J]. *石油机械*, 2017, 45(5): 23-27.
WANG Dingya, WANG Yaohua, YU Xingjun. Research and development trend of domestic automated drilling rig [J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(5): 23-27.
- [7] 杨双业, 张鹏飞, 王飞, 等. 新型自动化技术在钻机及钻井中的应用展望 [J]. *石油机械*, 2019, 47(5): 9-16.
YANG Shuangye, ZHANG Pengfei, WANG Fei, et al. Prospect of new control technologies on drilling rigs and drilling operations [J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(5): 9-16.
- [8] 于兴军, 景佐军, 智庆杰, 等. 自动化钻机向智能化发展的关键技术分析 [J]. *石油矿场机械*, 2020, 49(5): 1-7.
YU Xingjun, JING Zuojun, ZHI Qingjie, et al. The key technology analysis of the rig development from the automation to intelligence [J]. *Oil Field Equipment*, 2020, 49(5): 1-7.
- [9] 朱浩铭, 彭俊威, 郗秦阳, 等. 钻井液冷却装置技术发展现状及展望 [J]. *钻探工程*, 2024, 51(2): 8-14.
ZHU Haoming, PENG Junwei, XI Qinyang, et al. Technology development status and prospect of drilling fluid cooling equipment [J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(2): 8-14.
- [10] 苏义脑, 路保平, 刘岩生, 等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议 [J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(5): 527-542.
SU Yi'nao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(5): 527-542.
- [11] 马青芳, 杨晖, 邵强, 等. 12000 m钻机盘式刹车系统的研制与应用 [J]. *石油机械*, 2010, 38(7): 52-55.
MA Qingfang, YANG Hui, SHAO Qiang, et al. Research and application of the disc braking system of the 12,000 m drilling rig [J]. *China Petroleum Machinery*, 2010, 38(7): 52-55.
- [12] 李洪波, 王洪川, 赵磊, 等. 伸缩臂式铁钻工的研制 [J]. *石油机械*, 2014, 42(11): 16-19.
LI Hongbo, WANG Hongchuan, ZHAO Lei, et al. Development of telescopic iron roughman [J]. *China Petroleum Machinery*, 2014, 42(11): 16-19.
- [13] 耿长伟, 王清岩, 孙友宏, 等. “地壳一号”万米钻机铁钻工伸展机构设计及运动学仿真分析 [J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2015, 42(5): 53-56.
GENG Changwei, WANG Qingyan, SUN Youhong, et al. Design of stretching mechanism of iron roughneck for “Crust I” myriameter drilling rig and the dynamics simulation analysis [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(5): 53-56.
- [14] 王定亚, 张增年, 王汝华, 等. 推扶式管柱自动化处理系统研究与发展建议 [J]. *石油机械*, 2018, 46(9): 1-6.
WANG Dingya, ZHANG Zengnian, WANG Ruhua, et al. Research and development suggestion for automatic push-support pipe handling system [J]. *China Petroleum Machinery*, 2018, 46(9): 1-6.
- [15] 夏辉, 李勇, 王议, 等. 自动化钻机管柱输送控制系统的研制 [J]. *石油机械*, 2020, 48(7): 56-60.
XIA Hui, LI Yong, WANG Yi, et al. Development of the pipe conveying control system for automatic drilling rig [J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(7): 56-60.
- [16] 孔永超, 张鹏飞, 于兴军, 等. 一种拉升式动力猫道控制系统的研制 [J]. *石油机械*, 2019, 47(2): 14-18.
KONG Yongchao, ZHANG Pengfei, YU Xingjun, et al. Development of control system for the draw lifting power catwalk [J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(2): 14-18.
- [17] 杨双业, 樊勇利, 贾涛, 等. 二层台机械手伺服驱动和控制系统开发 [J]. *石油机械*, 2020, 48(1): 52-57.
YANG Shuangye, FAN Yongli, JIA Tao, et al. Development of servo drive and control system for monkey board manipulator [J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(1): 52-57.
- [18] 张鹏飞, 魏培静, 田德宝, 等. 石油钻机集成控制虚拟仿真培训系统的研制 [J]. *石油机械*, 2017, 45(1): 1-5.
ZHANG Pengfei, WEI Peijing, TIAN Debao, et al. Development of virtual simulation training system for oil drilling rig integrated control [J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(1): 1-5.

(编辑 王文)