◀钻井技术与装备▶

万米钻机连续旋转智能铁钻工适应性技术研究

石宪峰[1] 张增年[1] 朱再思[2] 廖文玲[3] 陈明凯[4]
（1. 中国石油川庆钻探工程有限公司 2. 中石油江汉机械研究所有限公司
3. 成都工业学院智能制造学院 4. 三一能源装备有限公司）

石宪峰，张增年，朱再思，等. 万米钻机连续旋转智能铁钻工适应性技术研究［J］. 石油机械，2026，54（10）：38-46.

Shi Xianfeng，Zhang Zengnian，Zhu Zaisi，et al. Adaptability technology of continuously-rotating intelligent iron roughneck for 10，000-meter drilling rig［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：38-46.

摘要：随着钻井深度向万米级进军，井下高温高压间接导致钻柱载荷和作业需求增加，传统铁钻工在超深井工况下暴露出作业效率低、自动化程度差、适应性不足等问题。为此，以川科1井为研究对象，针对四川盆地复杂地质条件及超深井连续高效作业需求，设计并研制了一种连续旋转智能铁钻工系统。该系统集成360°连续旋转钳头、多连杆柔性悬挂装置、接箍智能识别系统及一键式智能控制系统，实现了钻具快速精确夹持与全流程自动上卸扣作业。通过构建夹紧扭矩计算模型并引入动态工况修正系数，确保作业安全可靠。现场测试结果表明，该系统在钻井液、夜间及雨天等复杂环境下，接箍智能识别系统累计运行30 h，完成304次识别（上扣151次、卸扣153次），综合准确率达98%，高度定位平均偏差仅4.1 mm；铁钻工依据识别结果自动调节臂架高度，响应时间短于0.9 s，单次上卸扣作业时间为35~39 s，相较传统分体式铁钻工（平均每次50~60 s）效率提升30%~35%；自适应夹紧系统将牙板寿命提升至1 000次以上，咬痕深度严格控制在0.5 mm内；“一键式”控制降低人工操作强度90%，并通过多级互锁机制实现零安全事故。相较传统设备，本系统提升了一次性上扣成功率、钻具适应性与作业效率，可为万米钻机智能化升级提供重要工程支撑。

关键词：铁钻工；连续旋转；智能控制；超深井钻井；多连杆悬挂系统；扭矩计算模型
中图分类号：TE921 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202506066

Adaptability Technology of Continuously-Rotating Intelligent Iron Roughneck for 10，000-meter Drilling Rig

Shi Xianfeng[1] Zhang Zengnian[1] Zhu Zaisi[2] Liao Wenling[3] Chen Mingkai[4]
（1. *CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited*；2. *Jianghan Machinery Research Institute Limited Company of CNPC*；3. *School of Intelligent Manufacturing*，*Chengdu Technological University*；4. *Sany Energy Equipment Co.*，*Ltd.*）

Abstract：As drilling depths advance toward the 10，000-meter level，the downhole high-temperature and high-pressure conditions indirectly increase drill-string loads and operational demands，exposing the deficiencies of traditional iron roughnecks in ultra-deep wells，such as low efficiency，poor automation，and insufficient adaptability. Taking Well Chuanke-1 as the research object，and considering the complex geological conditions in the Sichuan Basin and the demand for continuous and efficient ultra-deep well operations，a continuously-rotating intelligent iron roughneck system was designed and developed. This system integrates a 360° continuously-rotating clamp head，a multi-link flexible suspender，a intelligent coupling recognition system，and a one-button intelligent control system，enabling rapid and precise clamping of drill pipes and fully automatic make-up and break-out

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

operations throughout the entire process. A clamping torque calculation model was established and a dynamic operating-condition correction coefficient was introduced to ensure safe and reliable operations. Field test results show that in complex environments such as drilling fluid, nighttime, and rain, the intelligent coupling recognition system operates for a total of 30 hours, completing 304 recognitions (151 make-ups and 153 break-outs), with an overall accuracy of 98% and an average height-positioning deviation of only 4.1 mm. Based on the recognition results, the iron roughneck automatically adjusts the arm height with a response time of less than 0.9 s. The single make-up/break-out operation time is reduced to 35-39 s, representing an efficiency improvement of 30%-35% compared with 50-60 s for traditional split-type iron roughnecks. The adaptive clamping system extends the service life of the dies to over 1,000 times, with the bite depth strictly controlled within 0.5 mm. The one-button control reduces manual operation intensity by 90%, and the multi-level interlock mechanism achieves zero safety incidents. Compared with traditional equipment, this system significantly improves the one-time make-up success rate, drill-pipe adaptability, and operational efficiency, providing important engineering support for the intelligent upgrading of 10,000-meter drilling rigs.

Keywords: iron roughneck; continuously-rotating; intelligent control; ultra-deep well drilling; multi-link suspension system; torque calculation model

0　引　言

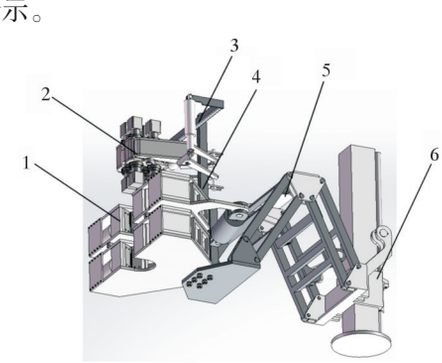
随着钻井深度向万米级进军，对钻井自动化与智能化设备提出更高要求[1]。铁钻工作为实现管具自动上卸扣的关键装备，广泛应用于国内外深井、超深井钻井工程中[2-3]。国外早期开发的模块化、遥控化铁钻工系统存在适应性差、上扣效率低、结构刚性不足等问题[4-6]。国内起步虽晚，但近年来在夹紧机构优化、扭矩控制精度、智能识别与互锁系统等方面取得长足进展[7-10]。研究表明，传统分体式旋扣钳和扭矩钳结构在超深井复杂工况下，作业效率、安全性和智能化程度难以满足万米钻机作业需求[11-13]。川科1井作为四川盆地万米级科学探索井，面临高温高压等苛刻工况，钻柱质量大、起下钻频次高，对铁钻工的自动化、效率、定位精度和安全性提出了更高要求。该井原配套的铁钻工无独立旋扣钳，仅能夹持钻具接箍位置，主钳旋转部件与本体之间无有线连接，虽可避免作业后反转等待，但需人工识别接箍位置，作业效率较低；随着钻井深度增加，钻杆悬重大幅提升，需采用双机械吊卡方式进行钻具悬挂，而此方式下钻杆相对于井口位置具有随机性，易与铁钻工初始标定位置产生偏差，影响定位准确性。此外，超深井连续作业要求高、节奏快，也对铁钻工的作业效率、自动定位能力及安全防碰功能提出更高要求。

为解决上述问题，笔者研发了一种适用于川科1井的连续旋转智能铁钻工系统。该系统具备360°连续旋转钳头、多连杆柔性悬挂系统、接箍智能识别系统及一键式智能控制系统等关键创新功能。该系统突破了传统“间断旋转+人工辅助”作业模式，实现钻具快速精确夹持、无需二次定位的连续上卸扣作业，有效提升了井口操作效率和作业安全性。笔者系统评估了该装置在万米钻机作业条件下的适应性与优势，以期支撑深层钻井装备的智能化发展。

1　结构原理

1.1　铁钻工结构

图1为ø73.0 mm（$2^{7}/_{8}$ in）~ø254.0 mm（10 in）管柱作业的连续旋转铁钻工结构示意图。该铁钻工主要由旋扣钳、冲扣钳、悬吊总成、门架总成、伸缩臂总成和液压系统等组成，主要技术参数如表1所示。



1—旋扣钳；2—冲扣钳；3—悬吊总成；4—门架总成；5—伸缩臂总成；6—液压系统。

图1　铁钻工结构示意图

Fig. 1　Schematic structure of the iron roughneck

表 1　铁钻工技术参数

Table 1　Technical parameters of the iron roughneck

参数名称	数值	备注
适用管具直径/mm	73~254	
旋扣速度/(r·min^{-1})	≥40	
旋扣扭矩/(N·m)	≥7 500	
最大上扣扭矩/(N·m)	≥160 000	
最大卸扣扭矩/(N·m)	≥160 000	
冲扣角度/(°)	360	连续旋转
水平伸缩范围/mm	1 200~2 750	
垂直升降范围/mm	630~1 680	

1.2　铁钻工工作原理

铁钻工作业时，电控系统接收控制命令，由伸缩臂与对正装置协同完成钳头对准钻具接箍的定位，随后液压系统驱动钳头夹紧钻具[14-16]。旋扣钳与冲扣钳协同工作，在保证夹紧稳定的前提下进行360°连续旋转，完成上扣或卸扣作业。旋扣扭矩可根据作业需求自动调节，并通过传感系统实时反馈当前扭矩值，确保上扣过程稳定、卸扣过程彻底。为满足连续高效作业需求，铁钻工配备喷油装置和钻井液盒等辅助系统，可对钻具接箍部位进行润滑与防护，有效减轻牙板对钻具的磨损。门架与悬吊系统保证钳头在立根与鼠洞等位置工况下自由移动与自动调姿，而多连杆柔性结构提升了其对偏心钻具的适应能力。通过一键式控制，实现从定位、识别、夹紧、旋转、解锁到回位的全流程闭环控制，提高了井口作业的效率与安全性。

2　关键技术

2.1　连续旋转功能

为满足ø73.0~ø254.0 mm管柱作业需求，研制了一种具备360°连续旋转的铁钻工。其钳头总成包含可360°连续旋转、大角度冲/紧扣的主钳，可通过高低挡自动切换实现旋扣与冲/紧扣功能切换。主钳360°旋转部件与铁钻工本体间无有线连接避免作业后反转等待，可实现一次夹紧连续上扣/卸扣作业，极大提高作业效率。一体化连续旋转结构在川科1井现场应用中表现出远高于传统旋扣钳与扭矩钳分体式结构的一次性成功率。

2.2　智能悬挂系统

为提升钳头在复杂工况下的自适应能力，川科1井配套的连续旋转铁钻工钳头研制了多连杆悬挂方案，主要包括2个可主动控制伸缩油缸、1个随动油缸、1个固定长度连杆及阻尼油缸。并联四连杆上下连接均采用球形连接，在阻尼系统解锁时，具备自动引导钳头与钻具同心能力[17]。在双吊卡起下作业时无需进行钳头位置调整。同时1、2号主动控制伸缩油缸可单独控制长度，并配置位移传感器记录油缸长度，可用于调节钳头空间倾斜角度，从而适应鼠洞工况时的钻具倾斜，具备自动记忆和自动调整功能，如图2所示。



1—右主动控制伸缩油缸；2—左主动控制伸缩油缸；3—阻尼油缸。

图2　铁钻工悬挂系统

Fig. 2　Suspension system of the iron roughneck

2.3　大扭矩钳头

铁钻工采用连续旋转技术钳头，如图3所示。上扣和卸扣扭矩均能达到最大160 kN·m。可以满足川科1井大扭矩钻具的上卸扣需求。钳头采用三夹紧油缸均匀布置，上卸扣作业时，钻具受力均匀，夹紧油缸采用同步伸缩控制，油缸夹紧力可根据钻具规格和上扣扭矩自动调整，减小牙板对钻具的咬痕深度。管具适应范围大，适应ø73.0~ø254.0 mm管柱。

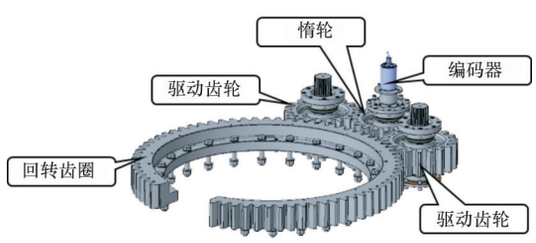


图3　钳头

Fig. 3　Clamp head

2.3.1　钳头扭矩计算

夹紧扭矩计算公式如下[18]：

$$T = Fr\mu \tag{1}$$

式中：T为钳头提供的扭矩，N·m；F为钳头施加的夹紧力，N；r为钻杆/套管半径，m；μ为钳牙与管材间的摩擦因数，通常取0.1~0.3，需根据材质和润滑条件调整。

2.3.2　夹紧力计算

夹紧力F可根据液压系统参数按下式计算[19]：

$$F = \frac{pA}{\eta} \tag{2}$$

式中：p为液压系统工作压力，Pa；A为液压缸有效作用面积，m^2；η为机械效率，一般取0.8~0.9。

2.3.3　动态工况修正

综合考虑动态扭矩需求，设计扭矩T_{si}需包括以下修正项[17]。

惯性扭矩T_{gx}[20]：

$$T_{gx} = I\alpha \tag{3}$$

式中：I为转动惯量，$kg·m^2$；α为角加速度，rad/s^2。

螺纹摩擦扭矩T_{lw}用于卸扣时，需叠加该项。

安全系数修正：

$$T_{si} = TS_f \tag{4}$$

式中：S_f为安全系数，通常取1.5~2.0。

钳头无独立旋扣钳、不伤钻具本体，主钳满足一次夹紧连续旋转不停顿作业直至管具达到上紧要求或完成卸扣要求，无需主钳打开复位二次紧扣/冲扣。连续旋转铁钻工钳头夹紧力可根据钻具上卸扣扭矩自动调整夹紧力，在满足上卸扣需求的同时，尽可能减小钳头对钻具的咬痕，咬痕深度小于0.5 mm。主钳360°连续旋转通过2个驱动齿轮、中间惰轮与齿圈形成的闭合齿圈传动系统驱动。驱动齿轮分别由减速机和液压马达驱动，且随时保证至少有1个驱动齿轮与回转齿圈正常啮合。主钳360°旋转可实现高速与低速挡位的切换，通过马达串联与并联驱动控制的切换，实现高低挡控制。同时传感器可根据工况检测确定扭矩，判断高低挡切换时机，实现自动切换。

2.4　自动识别装置

连续旋转铁钻工配套有自动找接箍系统，可识别井口或鼠洞位不同尺寸的钻具接箍高度和钻具规格，臂架控制系统根据此信息，在铁钻工伸缩过程中调节高度和速度，使得钳头能平稳准确地到达钻具中心位置。在铁钻工作业过程中，钳头无撞击钻具的现象，同时降低了操作人员工作强度，提高效率。为量化视觉定位系统的综合误差，由下式定义总定位误差Δx模型：

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta x_{camera})^2 + (\Delta x_{motion})^2} \tag{5}$$

式中：Δx_{camera}为图像识别误差（受光照不均、粉尘干扰影响），通过高动态范围（HDR）相机与卷积神经网络（CNN）降噪算法，将其控制在±0.5 mm以内；Δx_{motion}为机械臂运动误差，结合高精度伺服电机与闭环反馈机制进一步优化。

接箍自动识别设备由防爆相机、驱动部件、算力服务器、机械定位及支撑结构、有线通信模块、算法软件等构成。相机采用高清可见光成像与红外补光形式，实现全天候高可靠性、精准的在线智能视觉检测。钻具接箍识别系统利用智能神经网络模板匹配与特征提取技术方案[21]，如图4所示。变焦相机根据控制系统发出的工况信息（井口或鼠洞）获取相应的扫描区域完成扫描，扫描数据发送到算力服务器后，通过图像特征提取找到接箍中心位置，解算出接箍高度位置。

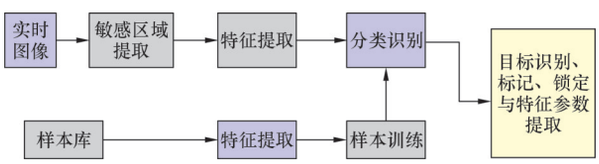


图4　接箍智能识别逻辑

Fig. 4　Logic diagram of intelligent coupling recognition

2.5　智能控制系统

连续旋转铁钻工设计“一键式”操作和手动操作模式。“一键式”操作模式下可实现铁钻工完成移动、识别接箍、上卸扣、回位等全流程作业，提高整体作业效率[22]。通过引入阿姆达尔定律（Amdahl’s Law）来量化系统并行优化后的性能提升：

$$S = \frac{1}{(1-P) + \frac{P}{N}} \tag{6}$$

式中：S为串行比例，P为可并行化任务的比例（例如动力猫道、顶驱、铁钻工等9种设备的指令分发与状态监控），N为处理器核心数。

司钻操作包括一个触控显示屏和一个多功能按键手柄。多功能按键手柄上集成了设备的常用控制命令，如臂架伸出、收回，臂架旋转、升降，上卸扣旋转、对缺等。触控显示屏上集成了工况设置，部分动作命令信号，以及状态和设备信号显示等功能；操作便捷，动作准确，上卸扣时间40 s以内，效率提升30%。铁钻工钳头总成配置传感器可实时检测主钳的上卸扣扭矩，可在司钻、控制台进行扭矩显示和记录。连续旋转铁钻工钳头还具备管具反扭矩检测功能，防止臂架总成承受扭矩造成损坏。

2.6　安全互锁装置

配套的连续旋转铁钻工的互锁系统控制逻辑如图5所示，包括2部分：一是铁钻工自身互锁，包含缺口互锁、井口互锁、鼠洞互锁、回转互锁；二是设备间的联动互锁，包含大钩低位禁止铁钻工往井口移动，钻台面在井口禁止铁钻工往井口

移动，扶杆臂在井口禁止铁钻工往井口移动，卡瓦未关闭禁止铁钻工上卸扣等互锁。这些互锁将保证设备在使用过程中的安全性，避免误操作。

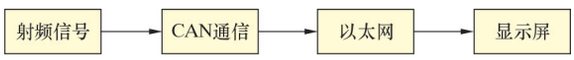


图 5　系统控制逻辑框图

Fig. 5　Logic diagram of system control

采用有限状态机模型，下式为动态管理设备状态转换。

$$S_{\text{next}} = f\left(S_{\text{current}}, \text{输入信号}, \text{互锁条件}\right) \tag{7}$$

式中：S_{next}为下一时刻系统状态，S_{current}为当前系统状态，输入信号包括钳头闭合传感器、管柱位置编码器等实时数据，互锁条件由预设安全规则构成。

例如，在提管手摆臂动作中，若检测到铁钻工处于上扣状态，系统将强制冻结提管手动作，直至铁钻工完成作业并反馈安全信号。

防碰互锁功能通过安全距离动态阈值模型与状态机逻辑实现安全管控。动态阈值模型定义为：

$$d_{\text{safe}} = v_{\max} \cdot t_{\text{reaction}} + \delta \tag{8}$$

式中：d_{safe}为设备间理论安全间距，m；$v_{\max}$为设备最大运动速度，m/s；t_{reaction}为制动响应时间，s，取值不大于50 ms；δ为冗余安全距离，m。

通过实时计算设备间距并与d_{safe}对比，系统在潜在碰撞前触发紧急制动。

为加强铁钻工使用安全，控制系统设定互锁保护（见图6），通过管理员身份可解除互锁。



图 6　互锁设置界面

Fig. 6　Interlock setting interface

（1）回转互锁。回转互锁用于限制铁钻工臂架旋转范围，以井口位置为0°，铁钻工臂架旋转范围为−110°~90°，该范围为程序写定，用户无法修改。其中顺时针旋转角度减小，逆时针旋转角度变大。若用户设置的“顺时针回转限位”参数小于−110°，则臂架顺时针旋转最大至用户设置值，若用户设置的“顺时针回转限位”和“逆时针回转限位”范围在−110°~90°，则以用户设置为准。

（2）井口互锁。井口互锁表示当臂架对准井口且臂架伸出距离大于500 mm时，将禁止铁钻工臂架进行旋转，臂架可以进行伸缩；同时，当臂架伸出至提前标定的井口位置后将无法继续伸出，但可以收回臂架，需要提前正确标定好井口位置，否则将无法正常使用。

（3）鼠洞互锁。鼠洞互锁表示当臂架对准鼠洞且臂架伸出距离大于500 mm时，将禁止铁钻工臂架旋转，臂架可以进行伸缩；同时，当臂架伸出至提前标定的鼠洞位置后将无法继续伸出，但可以收回臂架，需要提前正确标定好鼠洞位置，否则将无法正常使用。

（4）缺口互锁。缺口互锁表示当钳体缺口未对正时，禁止铁钻工臂架伸出和收回动作，防止撞击管具。缺口对正包含如下内容：①背钳（下钳）松开，压力传感器检测到背钳松开压力达到阈值，则视为背钳已松开；②主钳（上钳）松开，压力传感器检测到主钳松开压力达到阈值，则视为主钳已松开；③钳体对正，钳体接近开关检测到对缺感应板，则视为钳体已对正；④齿圈对正，齿圈接近开关检测到对缺感应板，则视为齿圈已对正；⑤安全门打开，安全门打开接近开关检测到对缺感应板，则视为安全门已打开。

以上5项全部满足时，臂架才可进行伸出或收回，否则将触发互锁保护。

（5）司钻联动互锁。司钻联动互锁为响应集成控制系统的互锁信号，主要由集成厂家控制。此外，该功能还与钻台面其他配套设备的配置密切相关。常见的联动对象包括大钩、吊卡、扶正装置、猫道输送系统及井口装置等。例如：在大钩处于低位时，铁钻工禁止靠近井口；吊卡未闭合时，禁止执行上卸扣；猫道输送装置运行时，限制铁钻工伸缩。由于不同钻机的配套设备存在差异，互锁逻辑需根据具体钻机的配置进行调整与标定，以确保作业全过程的安全性与兼容性。

3　试验与应用

为验证连续旋转铁钻工在复杂深井环境下的适应性与作业性能，2025年1—6月在川科1井开展了现场应用试验，在晴天、雨天和夜晚3种环境工况下进行。川科1井为万米钻井工程，井深超过8 500 m，井段复杂，作业周期长，钻柱结构涉及多规格钻杆与钻铤，对铁钻工具体功能、可靠性和适应性提出了严苛要求。井口作业空间受限，作业过程中要求高频起下钻和大扭矩上扣作业。

特别是在高温高压、作业节奏紧凑的实际工况下，对设备的稳定性、持续作业能力和与现场其他系统的协同能力构成考验。连续旋转铁钻工正是在这种高难度、高强度的作业场景下进行了全面验证，为后续推广提供了坚实基础。

3.1　试验流程

自动找接箍系统主要分为接箍是否识别成功，识别成功后接箍高度是否识别准确。当满足2个条件后可以直接进行自动上卸扣，否则需要人工确认接箍位置来调整臂架高度。具体流程如图7所示。

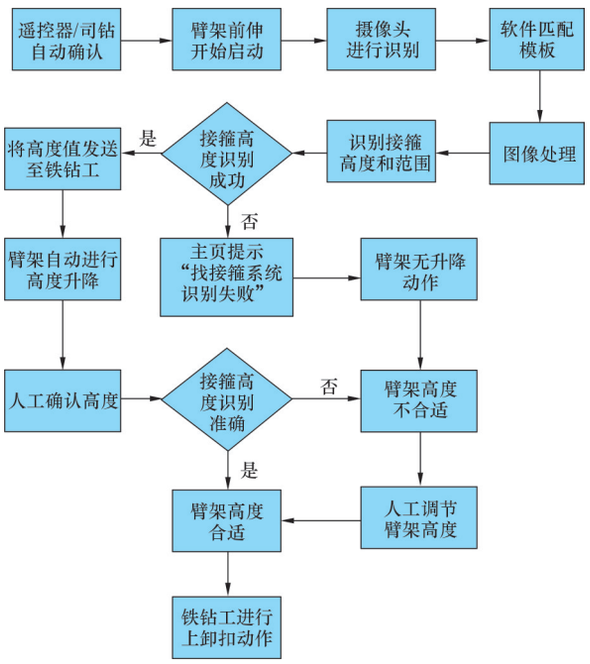


图7　试验流程图

Fig. 7　Test workflow

3.2　软硬件测试

试验围绕嵌入式系统在长时间运行下的稳定性表现展开，主要包括嵌入式主机稳定性测试与软件稳定性测试2个方面。首先，在嵌入式主机稳定性测试中，选用富士康嵌入式主机作为测试平台，运行目标软件持续超过24 h，期间观察系统运行状态，重点监控是否存在卡顿、延时等异常现象。测试过程中主机性能表现稳定，未出现明显异常，系统响应正常，满足测试要求，判定为通过。其次，在软件稳定性测试中，首先确认并记录了自动连接所识别的软件版本号为V2.1.17。随后对该版本的软件进行了不短于24 h的连续运行测试，重点检测运行过程中的稳定性表现，是否存在程序崩溃、异常中止或功能故障等现象。经测试，软件运行状态良好，功能响应正常，无崩溃和错误提示，测试同样判定为通过。本次测试结果表明，所选嵌入式主机与软件在长时间运行条件下均表现出良好的稳定性，满足系统运行的基本要求，如表2所示。

表2　软硬件试验测试

Table 2　Software and hardware test results

测试项目	测试内容	测试要求	测试结果
嵌入式主机稳定性	富士康嵌入式主机连续运行软件24 h以上	无明显卡顿,延时	通过
软件稳定性	软件版本号	记录自动找接箍的软件版本号	V2.1.17
	软件连续运行24 h以上	识别软件无崩溃现象	通过

3.3　现场功能试验

3.3.1　上扣工况

在钻杆从立根盒取出并与井口钻杆进行上扣连接的工况下，针对识别上接箍高度、下接箍高度及井口处接箍高度的需求，在摄像头距离井口约7 m、存在钻井液且主要为夜晚和雨天等复杂环境条件下进行了测试。经过2个软件版本累计约15 h的运行，系统共进行了151次接箍高度识别，其中准确识别148次，识别准确率达到98%。测试结果如表3所示。测试结果表明，在此工况和环境条件下，系统识别性能稳定可靠。同时，铁钻工在接收自动找接箍指令后，高度调节准确恰当，能够顺利完成正常的上扣操作。

3.3.2　卸扣工况

在钻杆于井口处卸扣并放回立根盒的工况下，针对上接箍高度、下接箍高度和井口处接箍高度的识别需求，于存在钻井液、摄像头距井口约7 m且以夜间晴天为主的作业环境中开展测试。经2个软件版本累计约15 h运行，系统共完成153次接箍识别，其中150次准确，识别准确率达98%。测试结果如表4所示。测试表明，在此复杂工况下系统识别稳定可靠，且铁钻工依据自动找接箍指令可实现精准高度调节，保障了卸扣操作的正常执行。

3.4　应用效果与对比分析

连续旋转智能铁钻工系统在川科1井累计完成上千次钻具上卸扣作业，实测数据验证了其显著优势。在复杂环境（钻井液、夜间、雨天/晴天）下，接箍智能识别系统累计运行30 h，共识别接箍304次（上扣151次、卸扣153次），综合识别准确率达98%，高度定位平均偏差仅4.1 mm（最大

表 3　上扣工况试验测试结果

Table 3　Make-up operation test results

测试内容	测试要求	测试结果	备注
摄像头安装距离井口 7 m 左右的位置；雨天（小雨）；钻杆直径 160.3 mm；测试 151 次；软件测试版本 V2.1.16 和 V2.1.17	上位机能显示识别接箍框架，接箍识别准确率≥90%	98%，通过	测试 151 次，准确 148 次
	上位机能显示识别接箍高度，识别高度与实际高度偏差≤1 cm	10 mm，通过	平均 4.1 mm，最大 10.0 mm
	铁钻工开始动作到上位机显示高度时间≤1 s	1 s，通过	平均 0.8 s，最长 0.9 s
铁钻工自动上扣模式	铁钻工臂架伸展至井口过程中自动调节高度	通过	
	铁钻工臂架高度与识别的高度偏差≤1 cm，可以进行上扣	10 mm，通过	平均 4.1 mm，最长 10.0 mm
V2.1.16 版本软件连续识别 8 h 和 V2.1.17 版本软件连续识别 7 h	查看软件的崩溃情况	V2.1.16 版本崩溃 2 次 V2.1.17 版本未出现崩溃	持续优化

表 4　卸扣工况试验测试结果

Table 4　Break-out operation test results

测试内容	测试要求	测试结果	备注
摄像头安装距离井口 7 m 左右的位置；晴天/夜晚；钻杆直径 160 3 mm；测试 153 次；软件测试版本 V2.1.17	上位机能显示识别接箍框架，接箍识别准确率≥90%	98%，通过	测试 153 次，准确 150 次
	上位机能显示识别接箍高度，识别高度与实际高度偏差≤1 cm	10 mm，通过	平均 4.1 mm，最大 10.0 mm
	铁钻工开始动作到上位机显示高度时间≤1 s	1 s，通过	平均 0.8 s，最长 0.9 s
铁钻工自动卸扣模式	铁钻工臂架伸展至井口过程中自动调节高度	通过	
	铁钻工臂架高度与识别的高度偏差≤1 cm，可以进行卸扣	10 mm，通过	平均 4.1 mm，最大 10.0 mm
V2.1.16 版本软件连续识别 8 h 和 V2.1.17 版本软件连续识别 7 h	查看软件的崩溃情况	V2.1.16 版本崩溃 1 次 V2.1.17 版本未出现崩溃	持续优化

10. 0 mm）。铁钻工依据识别结果自动调节臂架高度，动作响应时间≤0. 9 s，成功保障了 35~39 s/次的高效上卸扣作业流程。

与传统分体式铁钻工（每次上卸扣平均用时 50~60 s）相比，本系统用时 35~39 s，效率提升 30%~35%，接近先进自动化钻机铁钻工水平。

多连杆悬挂系统配合智能识别技术，彻底解决钻具重载位移不确定导致的定位偏差问题；自适应夹紧系统使牙板寿命延长至 1 000 次作业以上，咬痕深度严格控制在 0. 5 mm 内；“一键式”控制降低人工操作强度 90%，并通过多级互锁与防碰撞机制实现零安全事故。这些成果充分验证了该系统在超深井复杂工况下的适应性、可靠性和智能化水平。

4　结　论

围绕连续旋转铁钻工在万米钻井作业中的适应性，结合川科 1 井实际施工环境，系统分析了设备在高温高压、井口定位不确定、钻具大扭矩等复杂工况下的运行表现。通过引入连续旋转、多连杆柔性悬挂、接箍智能识别、一键式控制与安全互锁等关键技术，研制的连续旋转铁钻工在川科 1 井完成了上千次钻具上卸扣作业，表现出优异的作业效率、定位精度、安全保障和智能化水平。现场应用结果充分验证了该装备在超深井高频作业条件下的可靠性、稳定性与推广价值。具体结论如下：

（1）设备可实现 360°连续旋转作业模式，突破传统分体式铁钻工的结构限制，完成 1 次上卸扣用时仅 35~39 s，一次性成功率超过 98%。

（2）多连杆钳头悬挂系统具备自适应引导功能，配合智能识别系统实现了井口与鼠洞不同工况下的自动定位和接箍识别，单次标定后无需重复调整。

（3）夹紧系统具备扭矩自适应调整功能，牙板寿命延长至 1 000 次作业以上，咬痕深度严格控制在 0. 5 mm 内。

（4）“一键式”全流程控制降低人工劳动强度 90%，并通过多级互锁与防碰撞机制实现零安全事故。

（5）系统与 EISC 平台实时数据对接，实现全面状态监控与远程维护。

（6）接箍智能识别技术在钻井液、夜间及雨

天环境中实现98%的识别准确率与4.1 mm的平均高度定位偏差，彻底克服传统人工定位缺陷。

（7）全流程自动化设计保障上千次操作中设备零故障，验证了超深井高频作业的工程适用性。

参 考 文 献

[1] 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 its dynamics simulation analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)，2015，42(5)：53-56.

[2] 刘志强，宋朝阳，程守业，等．我国反井钻机钻井技术与装备发展历程及现状［J］．煤炭科学技术，2021，49（1）：32-65.
Liu Zhiqiang，Song Zhaoyang，Cheng Shouye，et al. Development history and status quo of raise boring technologies and equipment in China［J］. Coal Science and Technology，2021，49（1）：32-65.

[3] 何平，米永强，李永国，等．紧凑型伸缩臂式铁钻工的控制[J]．钻采工艺，2025，48(2)：136-141
He Ping，Mi Yongqiang，Li Yongguo，et al. Control of Compact Telescopic-arm Iron Roughneck［J］. Drilling and Production Technology，2025，48(2)：136-141.

[4] Wu Chuanyun，Wang Jianhe，Yao Yang，et al. Analysis of the development status and mechanization trends of economic crop industry in China［J］. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2024，45（1）：1-13.

[5] Molaie A M，Kaneko N，Tateshima S，et al. Robotics in neurointervention［M］. Switzerland：Springer，2025：343-360.

[6] Eremin A N，Eremin A N，Eremin N A. Smart fields and wells［EB/OL］. PC of Kazakh-British Technical University（KBTU） JSC Almaty，2013［2025-03-05］. https：//www. researchgate. net/publication/297391864_Smart_Fields_and_wells_A_textbook_in_English_Alexander_N_Eremin_Anton_N_Eremin_Nikolai_A_Eremin.

[7] 张洪生，于昊，赵金峰．铁钻工的现状与展望［J］．石油矿场机械，2008，37（1）：12-16.
Zhang Hongsheng，Yu Hao，Zhao Jinfeng. The situation and forecast of iron roughneck［J］. Oil Field Equipment，2008，37（1）：12-16.

[8] 易先中，张仕帆，万继方，等．轨道式铁钻工旋扣钳动态特性分析［J］．机床与液压，2023，51（10）：137-142.
Yi Xianzhong，Zhang Shifan，Wan Jifang，et al. Analysis of the dynamic characteristics of the rail type iron roughneck snap clamp［J］. Machine Tool & Hydraulics，2023，51（10）：137-142.

[9] 李根生，宋先知，祝兆鹏，等．智能钻完井技术研究进展与前景展望［J］．石油钻探技术，2023，51（4）：35-47.
Li Gensheng，Song Xianzhi，Zhu Zhaopeng，et al. Research progress and the prospect of intelligent drilling and completion technologies［J］. Petroleum Drilling Techniques，2023，51（4）：35-47.

[10] 杨双业，于兴军，张鹏飞，等．钻机司钻集成控制系统技术现状及发展建议［J］．石油机械，2017，45（9）：1-7.
Yang Shuangye，Yu Xingjun，Zhang Pengfei，et al. Technology status of drilling rig driller integrated control system and its development advices［J］. China Petroleum Machinery，2017，45（9）：1-7.

[11] 吕庆田，张晓培，汤井田，等．金属矿地球物理勘探技术与设备：回顾与进展［J］．地球物理学报，2019，62（10）：3629-3664.
Lü Qingtian，Zhang Xiaopei，Tang Jingtian，et al. Review on advancement in technology and equipment of geophysical exploration for metallic deposits in China［J］. Chinese Journal of Geophysics，2019，62（10）：3629-3664.

[12] 杜可普．轻便型智能化铁钻工研制［J］．智能城市应用，2019，2（3）：1-5.
Du Kepu. Development of portable intelligent iron roughneck［J］. Smart city applications，2019，2（3）：1-5.

[13] 沈怀浦，何磊，黄洪波，等．适用于大深度地质钻探和油气地热钻井的双动力电顶驱系统设计［J］．探矿工程-岩土钻掘工程，2020，47（4）：31-39.
Shen Huaipu，He Lei，Huang Hongbo，et al. Dual-power electric top drive drilling system design for large-depth geological drilling and hydrocarbon & geothermal drilling［J］. Exploration Engineering（Rock & Soil Drilling and Tunneling），2020，47（4）：31-39.

[14] 杜明甫．基于PLVC的铁钻工控制系统设计［J］．石油矿场机械，2016，45（10）：27-30.
Du Mingfu. Design of iron roughneck control system based on PLVC［J］. Oil Field Equipment，2016，45（10）：27-30.

[15] 王定亚，王耀华，于兴军．我国管柱自动化钻机技术研究及发展方向［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.

[16] 张宝泉，向勇，辛祖强，等. 智能液压抽装管机的电控系统设计与研究［J］. 机床与液压，2023，51（18）：78-83.
Zhang Baoquan，Xiang Yong，Xin Zuqiang，et al. Design and research of electronic control system of intelligent hydraulic pipe extraction and loading machine［J］. Machine Tool & Hydraulics，2023，51（18）：78-83.

[17] 秦赛博，易先中，张徐文，等. 海底钻井用铁钻工机械臂的工作安全性分析[J]. 石油机械，2024，52(10)：74-82.
Qin Saibo，Yi Xianzhong，Zhang Xuwen，et al. Working safety analysis of iron roughneck arm used in seabed drilling［J］. China Petroleum Machinery，2024，52(10)：74-82.

[18] 陆文红，赵广慧，李涛，等. 铁钻工上卸扣的最大主动扭矩分析［J］. 西南石油大学学报（自然科学版），2024，46（2）：176-186.
Lu Wenhong，Zhao Guanghui，Li Tao，et al. An analysis of the maximum torque provided by iron roughnecks［J］. Journal of Southwest Petroleum University （Science & Technology Edition），2024，46（2）：176-186.

[19] 孟宪国，冯长儒. 锻造操作机钳口夹紧力和夹紧缸能力的计算［J］. 一重技术，2006（2）：1-3.
Meng Xianguo，Feng Changru. Calculation of jaw clamping force and clamping cylinder capacity of forging manipulator［J］. CFHI Technology，2006（2）：1-3.

[20] 邵博. 钻井工程参数监测系统体系结构与数据采集传输模块的研究［J］. 中国科技纵横，2016（10）：42.
Shao Bo. Research on the architecture of drilling engineering parameter monitoring system and data acquisition and transmission module［J］. China Science & Technology Panorama Magazine，2016（10）：42.

[21] 张洪生，谷敏永，李向荣. 基于视觉的铁钻工控制系统的设计[J]. 新技术新工艺，2010(1)：23-25.
Zhang Hongsheng，Gu Minyong，Li Xiangrong. Design of control system for iron roughneck based on vision[J]. New Technology & New Process，2010(1)：23-25.

[22] 刘晓林，王林清，许本冲，等. 基于 Profinet 与 S7-1200 PLC 的 RN254 型铁钻工电控系统的研发与应用［J］. 钻探工程，2024，51(增刊1)：231-237.
Liu Xiaolin，Wang Linqing，Xu Benchong，et al. Research and application of RN254 roughneck electrical control system based on Profinet and S7-1200 PLC[J]. Drilling Engineering，2024，51(S1)：231-237.

第一作者简介：石宪峰，高级工程师，生于1968年，1992年毕业于江汉石油学院矿山机械专业，现从事石油钻井装备智能化研究工作。地址：（710061）陕西省西安市。email：shiqf@cnpc.com.cn。

修改回稿日期：2026-06-28
（本文编辑　刘　锋）