

适用于提钻取心工艺的立轴钻机自动化升级 方案研究

薛善忠^{1,2}, 王春蕾^{1,2*}, 郭虎科^{3,4}, 李柏军^{3,4}, 赵春雷^{3,4}, 刘颖毅^{1,2},
臧臣坤^{1,2}, 朱江龙^{1,2}, 王宇哲^{1,2}, 何磊^{1,2}, 宋志亮^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 中国地质装备集团有限公司, 北京 100015; 2. 中地装(北京)科学技术研究院有限公司, 北京 100120; 3. 中核地质勘查集团, 北京 100013; 4. 核工业二〇八大队, 内蒙古 包头 014010)

摘要:针对提钻取心工艺下立轴钻机井场作业劳动强度大、安全风险高、缺乏工序协同的问题, 本文提出了一套自动化升级方案与人机协同作业方法。该方案以电传动立轴钻机替代机械式立轴钻机, 采用“主机升级与增量配套”的技术路线——通过电传动实现无级调速、参数实时监测与远程操控; 在此基础上集成自起升钻塔、远程控制吊卡、二层台机械手、孔口一体化减污装置及拧管机, 形成覆盖塔上与孔口的协同作业系统, 并对钻塔结构进行了有限元仿真, 验证了起升状态下塔体的安全可靠。此外, 还设计了起下钻的协同作业流程, 明确了各步骤的时序衔接与触发条件, 并建立了基于PLC总线的安全联锁逻辑。理论分析表明, 该方案可将班组人员由3~4人减至2人, 实现塔上无人作业; 此外, 在减少孔口污染面积的同时, 将6 m长立根的提钻耗时由100 s缩短至约70 s, 起下钻效率提高约42.9%。本文为适用于提钻取心工艺的立轴钻机自动化升级提供了一条可行的技术路径, 对推动地质勘探行业的减员增效与绿色勘查具有积极意义。

关键词: 提钻取心工艺; 立轴钻机; 自动化升级; 电传动; 塔上无人作业; 人机协同; 孔口减污; 绿色勘查
中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0131-09

Research on automatic upgrade scheme of vertical shaft drill suitable for trip-out coring technology

XUE Shanzhong^{1,2}, WANG Chunlei^{1,2*}, GUO Huke^{3,4}, LI Baijun^{3,4}, ZHAO Chunlei^{3,4}, LIU Yingyi^{1,2},
ZANG Chenkun^{1,2}, ZHU Jianglong^{1,2}, WANG Yuzhe^{1,2}, HE Lei^{1,2}, SONG Zhiliang^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100015, China; 2. China Geological Equipment Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China; 3. CNNC Geological Exploration Group Co., Ltd., Beijing 100013, China; 4. Geological Party No.208, CNNC, Baotou Inner Mongolia 014010, China)

Abstract: Aiming at the problems of high labor intensity, high safety risks and insufficient process coordination in field operations of vertical shaft drills using trip-out coring technology, this paper proposes an automatic upgrade scheme and human-machine collaborative operation method. Adopting the technical route of "main engine upgrading and incremental supporting matching", the scheme replaces mechanical vertical shaft drills with electric-drive vertical shaft drills, realizing stepless speed regulation, real-time parameter monitoring and remote control through electric transmission. On this basis, a collaborative operation system covering derrick and wellhead is formed by integrating

收稿日期: 2026-07-31; 修回日期: 2026-08-20 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.014

基金项目: 深地国家科技重大专项(编号: 2024ZD1003100)课题二(编号: 2024ZD1003102)

第一作者: 薛善忠, 男, 汉族, 1994年生, 工程师, 机械设计制造及其自动化专业, 主要从事地质钻探、工程勘察装备研发工作, 北京市朝阳区酒仙桥东路1号, 805291380@qq.com。

通信作者: 王春蕾, 女, 汉族, 1992年生, 高级工程师, 油气井工程专业, 硕士, 主要从事钻探设备研发、钻探工艺研究工作, 北京市朝阳区酒仙桥东路1号, 1756079775@qq.com。

引用格式: 薛善忠, 王春蕾, 郭虎科, 等. 适用于提钻取心工艺的立轴钻机自动化升级方案研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 131-139.

XUE Shanzhong, WANG Chunlei, GUO Huke, et al. Research on automatic upgrade scheme of vertical shaft drill suitable for trip-out coring technology[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 131-139.

self-elevating drilling derrick, remote-control elevator, platform manipulator, integrated wellhead pollution reduction device and pipe spinner. Finite element simulation is conducted on the derrick structure to verify the structural safety and reliability under the lifting state. In addition, a collaborative tripping operation process is designed with clear time sequence connection and trigger conditions for each procedure, and a PLC bus-based safety interlock logic is established. Theoretical analysis shows that the scheme reduces the team staffing from 3~4 workers to 2 and realizes unmanned derrick operation. Meanwhile, it reduces the wellhead pollution area and shortens the tripping time of 6 m drill stands from 100 s to about 70 s, improving the tripping efficiency by approximately 42.9%. This study provides a feasible technical path for the automatic upgrading of vertical shaft drills adapted to trip-out coring technology, and has positive significance for promoting staff reduction, efficiency improvement and green exploration in the geological drilling industry.

Key words: trip-out coring technology; vertical shaft drill; automatic upgrading; electric transmission; unmanned derrick operation; human-machine collaboration; wellhead pollution reduction; green exploration

0 引言

提钻取心工艺是我国地质钻探领域广泛应用的取心方法,在铀矿勘查、煤田勘探、水文地质调查及固体矿产勘查中均有大量使用。以铀矿钻探为例,其设备的钻进能力大都集中在700~2000 m(N口径)范围内,其中机械式立轴钻机凭借传动效率高、维修简单等优势,成为铀矿钻探最核心的装备,占比高达87%。2025年,我国中央财政铀矿勘查项目共投入166台套钻探装备,其中机械式立轴钻机占比达75.9%。砂岩铀矿钻探施工共开动113台套钻机,112台为拖车式或落地式立轴钻机,仅1台为电动顶驱岩心钻机^[1-2]。

然而,庞大的设备保有量并不等同于良好的作业效果,当前立轴钻机的井场作业方式仍以传统人工模式为主。如图1所示,每个班次需包括司钻、井架工、孔口操作工在内的3~4人分工协作,劳动强度大且安全风险高。此外,在采用提钻取心工艺的钻探施工中,随着孔深的增加,起下钻耗时以及工作人员的劳动强度也会随之持续攀升,严重制约了钻探效率和安全水平。亟需通过对立轴钻机进行自动化升级,从源头上降低安全风险,提升全作业流程的连续性与效率。

近年来,行业内针对立轴钻机的技术升级已进

行了大量探索。在主机层面,臧臣坤等^[3]、高明帅等^[4-5]、周政等^[6-7]研发的XY-8DB、XY-9DB型电传动立轴钻机通过采用交流变频技术,构建了基于PLC的机电液一体化控制平台,实现了钻机的数字化和操控集中化。在孔口拧卸作业层面,利用液压拧管机替代人工拧卸已成为地质行业常用的孔口自动化方案^[8-9]。在管柱接卸自动化层面,石油钻机领域已有较为丰富的研究成果,孙威^[10]设计了一款自动化钻机二层台立根排放系统,杨双业等^[11]开发了一种二层台机械手的伺服驱动和控制系统。但因作业场景、作业装备类型和作业流程的差异性,无法直接移植应用。

以上研究多聚焦于单设备的优化改进,未能形成针对提钻取心工艺的全流程系统化装备方案,与之相对的多设备协同作业方法也尚属空白,自动化流程没有得到贯通。为解决这个问题,本文以实现立轴钻机塔上无人自动化协同作业为目标,通过三个步骤构建了完整的系统方案:第一,选用具备远程控制和无级调速能力的电传动立轴钻机作为主机,在实现钻进参数的精准控制和数据传输的同时,为协同调度提供控制基础;第二,配套升级了自起升钻塔、远程控制吊卡、二层台机械手、拧管机和孔口一体化减污装置等自动化部件,形成完整的硬件系统;第三,设计了一套适用于立轴钻机的全井场协同作业时序方法,将起下钻全流程分解为可执行的步骤序列并定义了安全联锁逻辑。

1 整体方案设计

1.1 研究目标与整体思路

本次自动化升级方案围绕塔上无人、减员增效、安全保障和减污四个目标展开。在塔上无人层



图1 机械式立轴钻机起下钻作业

面,通过二层台机械手与远程控制吊卡的协同配合替代井架工的全部塔上操作,消除高空作业隐患。在减员增效层面,将班组由传统的 3~4 人减少至 2 人,通过自动化设备替代重复性体力劳动,降低起下钻辅助用时在台月时间中的占比,从而提升整体作业效率。在安全保障和减污层面,通过降低孔口钻井液喷溅伤害与机械伤害的发生概率,改善作业人员的劳动环境。

为实现上述目标,本方案使用新型电传动立轴钻机代替机械式立轴钻机作为主机,并配套自起升钻塔及自动化执行机构,形成“主机升级与增量配套”相结合的技术路线,并最终形成人机协同的塔上无人自动化作业模式。其中自动化装置执行重复性、高强度作业,作业人员负责需要判断力与触觉反馈的环节,双方通过安全互锁实现有序协作。

1.2 系统架构与设备组成

为实现人机协同的塔上无人自动化作业模式,本文以新型电传动立轴钻机为主体,配套研发了塔上无人化作业系统、孔口作业系统和自起升钻塔,形成了覆盖起下钻全过程的设备体系,改造后的塔上无人自动化井场如图 2 所示。

塔上无人化作业系统由远程控制吊卡、二层台



图 2 塔上无人自动化井场示意

机械手组成,替代井架工的塔上摘挂钩与立根排放操作;孔口作业系统由拧管机和孔口一体化减污装置组成,前者完成钻杆接头的自动拧卸,后者实现钻杆外壁清洗、卸扣防溅与排液回收;自起升钻塔作为上述设备的承载装置,采用 K 型板片式设计,可在现场低位组装并整体起升。各设备通过 PLC 总线实现互联通信,司钻可在司钻房内通过触摸屏和操控手柄集中操控,按流程步骤手动触发各设备动作,其自动化作业流程如图 3 所示。

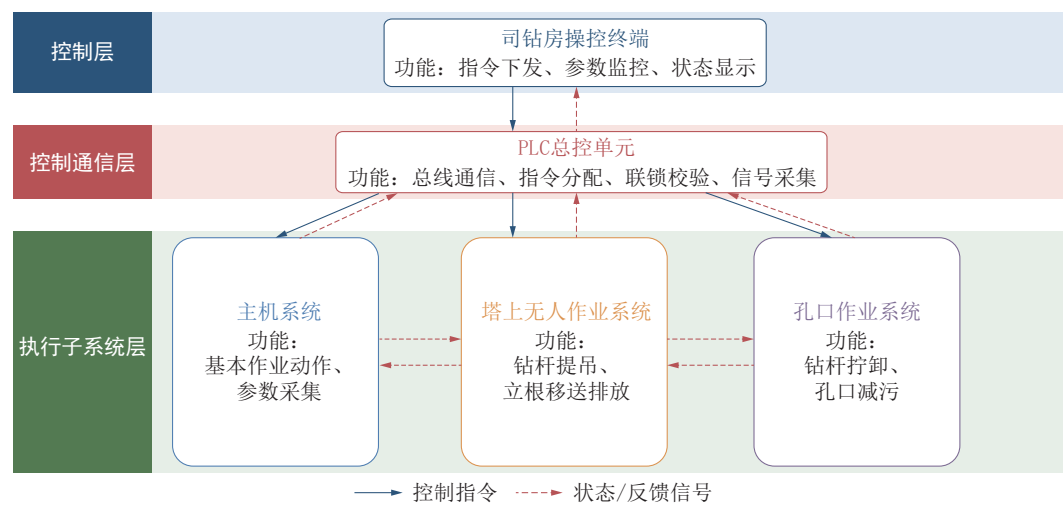


图 3 钻机自动化作业流程

该系统架构按功能划分为控制层、控制通信层与执行子系统层三个层级。控制层以司钻房操控终端为人机交互节点,负责操作指令的输入与设备运行状态的实时监控;控制通信层由 PLC 总控单元承担,通过现场总线与各子系统互联,实现指令分

发、联锁校验与信号采集;执行子系统层则涵盖主机驱动、塔上无人作业与孔口作业等多个子系统,各子系统在执行自身功能动作的同时,通过到位信号与互锁机制实现彼此间的时序协同。各层级间通过指令下发与状态反馈构成闭环控制:司钻按工

序触发操作指令后,PLC先行校验联锁条件,确认满足后将指令下发至对应子系统,子系统在执行动作的同时将运行参数与到位信号回传至PLC,经汇总处理后回显于操控终端,由此完成单次控制闭环。

2 关键子系统设计

2.1 主机系统

传统机械式立轴钻机的回转与提升系统均为机械传动,依赖司钻在钻机旁手动操控离合器、制动带及换挡手柄等部件进行作业,存在回转与提升速度挡内固定、司钻劳动强度大、钻进参数无法实时监测等固有缺陷。因此,本次自动化升级方案选用了XY-6DG型电传动立轴钻机作为主机,其外形如图4所示,具体性能参数如表1所示。

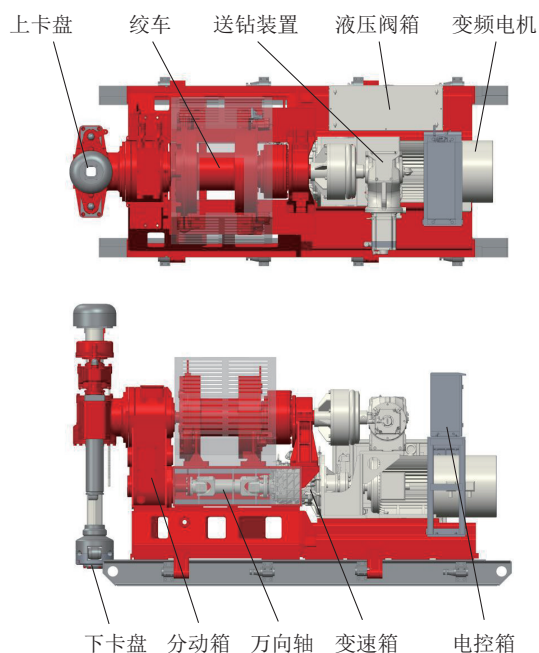


图4 XY-6DG型钻机主机示意

该钻机采用交流变频电机和远程变速箱驱动立轴主轴,通过变频器实现各挡位下的无级调速。提升系统配备了液压盘式制动和送钻装置^[12-14],在提高了制动响应速度的同时能够实现长行程给进。此外,XY-6DG型钻机构建了以PLC为核心的控制单元,通过集成各变频器及传感器信号,实现液压与电气系统的协同工作,形成“传感器采集—PLC决策—执行机构响应”的闭环控制链路^[15-17]。

新型电传动立轴钻机的使用为全井场自动化

表1 XY-6DG型钻机主机性能参数

参 数 项	参 数 值
最大钻深/m	2000
适用钻杆直径/mm	50/60/89
立轴转速/($r \cdot \min^{-1}$)	正转 0~1000(无级变速)
最大扭矩/($kN \cdot m$)	6.5
给进油缸上顶力/kN	200
给进油缸给进力/kN	150
单绳提升力(第三层)/kN	68
绞车提升速度/($m \cdot s^{-1}$)	0~9.28(无级变速)
主电机类型	55 kW 变频电机
外形尺寸/mm	3458×1488×2222
控制方式	电-液/气远程控制

人机协同作业提供了两个基础条件:(1)PLC控制系统具备总线通信和信号采集能力,为多设备互联提供了技术接口;(2)司钻房作为集中操控平台,使司钻由钻机旁现场操作转为房内操控,可同时兼顾钻机基础动作和人机协同作业流程中的其他辅助动作。

2.2 孔口作业系统

孔口作业的目标是实现钻杆接头的自动拧卸与孔口防污。提钻取心工艺下的常用钻杆为锁接手钻杆,拧卸动作可直接选用地质钻探中应用成熟的拧管机完成,但卸开接头螺纹最后几扣时,内部高压泥浆会在压差驱动下从接头间隙向外喷溅,造成台面污染。目前现场主要依靠孔口操作工手持防溅装置进行遮挡,防污效果缺乏稳定性。

针对上述问题,本文设计了适用于提钻取心作业场景的孔口一体化减污装置,该装置分为喷淋装置和孔口机械手两部分,如图5所示。喷淋装置安装于孔口处的作业台面下方,提钻时钻杆会从装置中心通道通过,可启动喷淋清洗钻杆外壁泥皮。孔口机械手为双折臂结构,其回转半径小,不占用孔口位置和钻杆摆放空间。作业时机械手通过电缸驱动执行两个动作:首先罩住两钻杆连接处,阻挡卸扣时的钻井液喷溅,待卸扣完成后将提起的钻杆推靠至孔口后方泥浆池通道上方,使钻杆内部钻井液直接回流至泥浆池。该装置同时覆盖了钻杆外壁泥皮和杆内残余钻井液两类污染源的处理,兼具作业面减污与钻井液回收的双重效果。

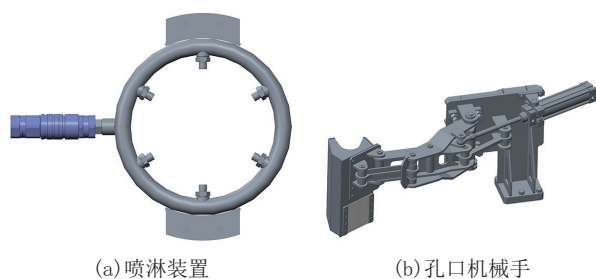


图5 孔口一体化减污装置三维示意

2.3 塔上无人化作业系统

塔上无人化作业系统由远程控制吊卡和二层台机械手两部分组成,在起下钻作业时前者负责钻杆的提吊和下放,后者负责立根的存取,通过流程上的紧密配合,能够代替井架工的塔上作业动作,实现钻杆立根的自动提吊与排放。

2.3.1 远程控制吊卡

提钻取心作业中常用滑环式提引器进行钻杆提吊,需井架工在塔上高处摘挂操作,劳动强度大且存在坠落和机械伤害风险。石油钻井中已有成熟的液压或气动自动吊卡产品,可直接提吊钻杆,但因钻杆规格和拧卸流程的特殊性,不能直接应用于地质钻探场景。为实现塔上无人的自动化作业模式,设计了如图6所示的远程控制吊卡。作业时操作人员可在地面远程发送信号控制吊卡月牙块的打开或闭合,月牙块到位后,由凸轮触发到位报信装置发出到位信号并自动切断电机,完成动作反馈。

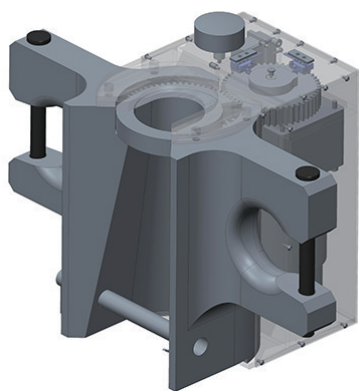


图6 吊卡三维示意

在起下钻流程中,吊卡需与孔口作业系统及二层台机械手协同配合。提钻时,吊卡提升钻杆的同时,喷淋系统启动清洗钻杆外壁;待吊卡停止提升

后,孔口作业系统随即执行防溅、卸扣等动作;待二层台机械手将已落地的钻杆上端移送至指梁内后,吊卡方能解卡。下钻时,吊卡上提使钻杆对准孔口后,二层台机械手才能执行复位动作,为后续钻杆下放创造条件。整套动作通过远程信号依次触发,各子系统按设定逻辑有序响应,从而在实现塔上无人自动化的前提下,保证了起下钻作业的连续性和安全性。

2.3.2 二层台机械手

二层台机械手安装在二层台指梁中央,用于替代井架工完成钻杆立根在吊卡与立根盒之间的往复移送,其与远程控制吊卡协同配合,构成了塔上无人作业的完整执行链。该装置主要由二层台本体、机械手执行机构、传感检测系统及视觉监控单元等部分组成,其结构如图7所示。二层台本体上按设定间距布置指梁锁,每个指梁锁对应一个立根存放位置,通过气缸驱动开合,并配有传感器以实现立根的定位与状态检测^[18]。机械手执行机构负责在指定位置环持立根并将其移送至目标位置,其机构组成包括回转机构、平移机构、环持机构及多级伸缩臂等,各运动部件均由液压驱动。

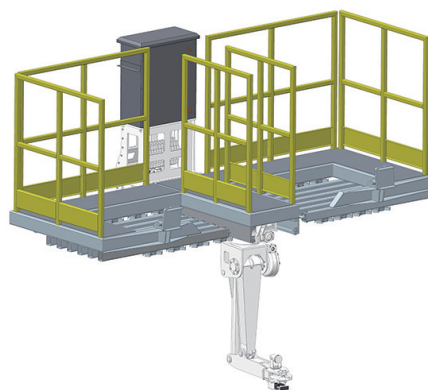


图7 二层台机械手三维示意

2.4 自起升钻塔

自起升钻塔采用K型结构,四角落地支承,作业空间开阔,无需绷绳即可满足作业承载要求。钻塔采用了板片式结构,各构件可在低位完成组装,完成后由液压油缸驱动整体起升,其起升动作如图8所示。该设计结构在保证钻塔作业刚度的同时,解决了常规钻塔安装过程中对大型吊车辅助的依赖,有利于提升钻前安装效率与作业安全性。为验证钻塔结构的可靠性,本文参照API Spec 4F的规范

要求,对钻塔进行了起升状态的有限元仿真分析。

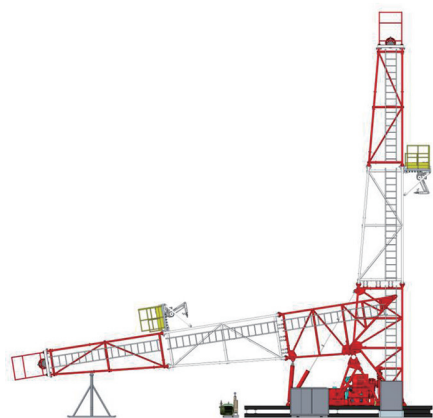


图8 钻塔起升动作示意

2.4.1 有限元模型建立

本文设计的自起升钻塔为空间桁架结构,主要构件均是材料为Q355B的钢梁、柱和杆件。在模拟前需根据钻塔的具体结构特点,对其进行相应的力学简化,因此在ANSYS软件前处理模块中整体建立了以三维梁、柱单元为主,包含井架、底座和天车的钻塔有限元模型,其节点模型和约束模型如图9、图10所示。

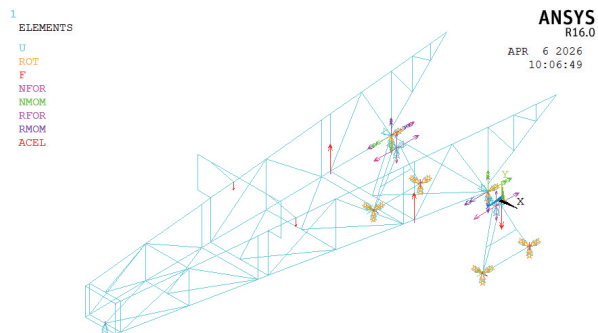


图9 钻塔节点模型

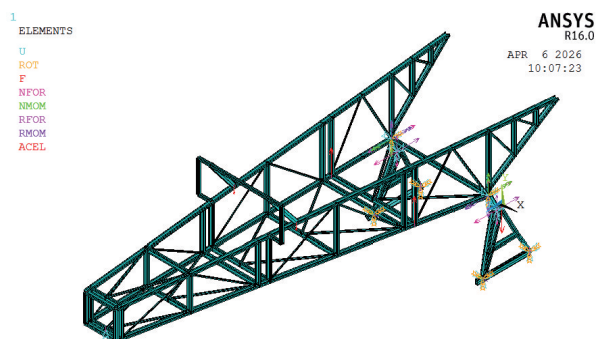


图10 钻塔约束模型

2.4.2 起升工况分析

井架在起升工况下,所受载荷随着起升角度 α 的变化而变化。当 $\alpha=0^\circ$ 时,井架起升力矩和油缸推力最大,各构件上的应力值和井架的整体变形也较大,故选择 $\alpha=0^\circ$ 这一瞬间对井架进行起升计算。根据起升过程中起升力矩与重力力矩的相互平衡关系,计算可得油缸最小推力约85 kN。随后根据理论计算值开展了有限元对照,首先将井架全段重力均分到相应的节点处,然后将油缸推力分解为水平方向和竖直方向,并在井架上段部位限制Y方向上的自由度,根据理论计算值给油缸推力一个预估值进行试算。同时为确保井架起升的准确性,在试算过程中,需不断调整油缸推力并记录高位观测点的支反力^[19-20]。最终试算出观测点的支反力接近0时,油缸推力约83 kN,相对偏差为2.3%。此时最大应力发生在井架油缸推力作用处,其最大应力为117 MPa,钻塔的最大位移为10.2 mm,应力云图及位移云图如图11、图12所示。验证得钻塔安全系数为3.03,满足设计需求。

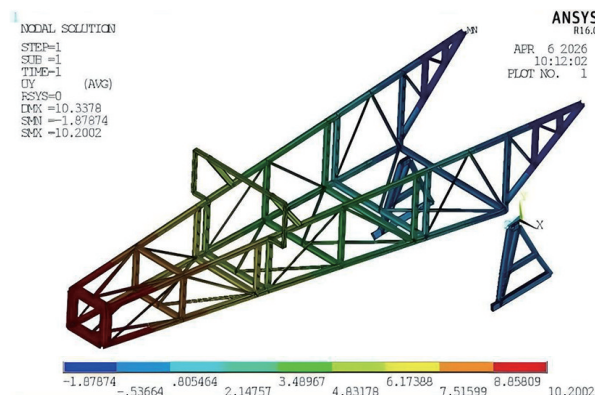


图11 钻塔起升应力云图

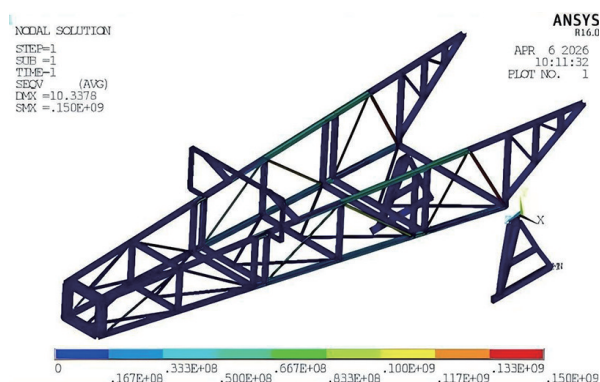


图12 钻塔起升位移云图

3 自动化系统控制方法与作业流程

在完成自动化升级设备配置与适配性分析的基础上,还需对各执行机构的动作序列与衔接关系进行设计。本章在确定了控制界面的功能设置与操作模式的同时,将提钻与下钻全流程分别分解为若干可执行的步骤,通过明确各步骤的动作内容、执行设备与衔接关系,构建了完整的协同作业时序方案。

3.1 控制界面

作业时,司钻可通过集成了控制元件与显示终端的司钻操作台实现远程操控。其中HMI触摸屏作为人机交互的核心载体,可切换显示钻进界面、起下钻界面、钻杆控制界面等。起下钻过程中,司

钻通过监控显示确认现场工况,并结合如图 13、图 14 所示的起下钻界面和钻杆控制界面完成各部件执行动作的触发^[21]。

3.2 提钻协同作业流程

提钻过程中,主机、远程控制吊卡、喷淋装置、孔口机械手、拧管机及二层台机械手依次介入,形成孔口与塔上衔接的作业序列。各设备按固定时序动作,前一动作完成后方可触发下一动作,具体流程如表 2 所示。

3.3 下钻协同作业流程

下钻为提钻的逆过程,由二层台机械手从指梁取杆开始,至钻杆下入孔口结束。由于无需孔口机

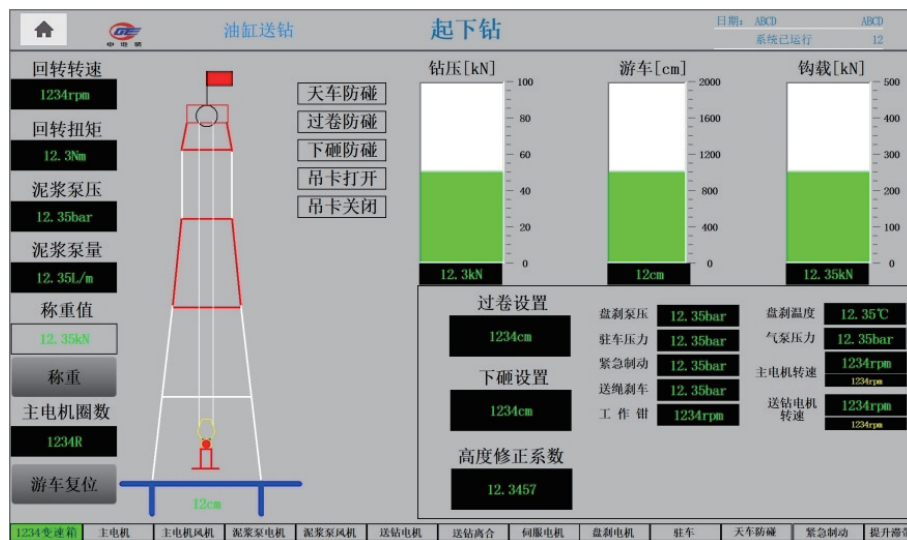


图 13 起下钻控制界面

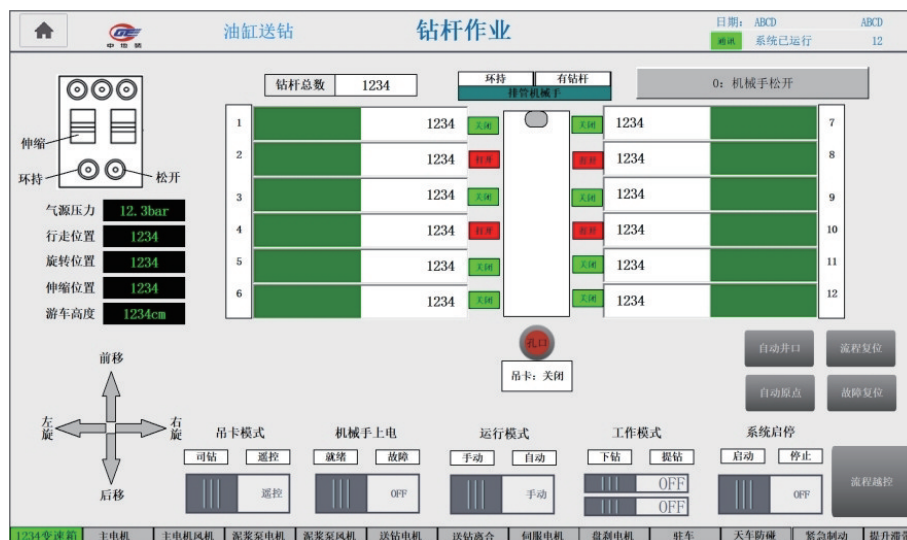


图 14 钻杆作业控制界面

表2 提钻作业流程

步骤	操 作 内 容	主要执行设备
1	吊卡下放提吊钻杆	主机+远程控制吊卡
2	吊卡提升至下一立根接头露出,喷淋同步启动	主机+喷淋装置
3	孔口机械手罩住钻杆接头防溅	孔口机械手
4	拧管机卸扣	拧管机
5	孔口机械手推靠钻杆至排液槽排液	孔口机械手
6	孔口机械手复位至待机位	孔口机械手
7	机械手持立根,同时孔口操作工推扶钻杆底部至钻杆架	二层台机械手+人工
8	吊卡下移至钻杆落地,解卡	主机+远程控制吊卡
9	机械手将钻杆放入指梁内	二层台机械手

械手介入,各操作步骤衔接更加紧密,具体流程如表3所示。

表3 下钻作业流程

步骤	操 作 内 容	主要执行设备
1	二层台机械手移至指梁处环持住立根	二层台机械手
2	二层台机械手将钻杆上端放入吊卡内	二层台机械手
3	吊卡闭合并上提使钻杆离地	远程控制吊卡+主机
4	孔口操作工推扶钻杆对准孔口	人工
5	二层台机械手复位	二层台机械手
6	吊卡下放钻杆至对扣	主机
7	拧管机旋扣	拧管机
8	吊卡继续下放钻杆	主机

4 作业效能分析

为验证本系统在提钻取心作业场景中的综合效能,本文选取钻前安装部署、起下钻作业与孔口污染控制三个具有代表性的环节开展效能分析,从不同层面评估本次自动化升级方案对作业效率与安全水平的提升效果。

4.1 安装部署效能

传统A型钻塔的起塔作业通常需要50 t级大型吊车配合,在山区、林地等大型吊车无法进入的场地施工时尤为困难。自起升K型钻塔通过液压油缸自主完成起落塔动作,仅需20 t级吊车在低位辅助完成板片结构的拆装,安装用时由3 d缩短至1 d,拆卸用

时由1 d缩短至0.5 d,大幅降低了钻塔安装对大型吊车的依赖,提升了井场部署的机动性(表4)。

表4 钻塔安装环节效能对比

钻塔类型	吊车需求	安装用时/d	拆卸用时/d
传统A型钻塔	50 t级吊车	3	1
自起升K型钻塔	20 t级吊车	1	0.5

4.2 起下钻效率分析

在起下钻作业方面,自动化设备操作的动作精度和响应速度均优于人工操作,各执行机构动作通过PLC状态信号传递衔接,减少了口头指令传递和视觉确认的延迟。其中远程控制吊卡和二层台机械手按预设时序协同配合,不仅代替了井架工的塔上操作动作,实现了作业模式上的本质安全,还减少了人工操作中的调整与等待时间,提升了作业效率。理论估算表明,在熟练操作的情况下,本方案可将6 m长立根的提钻耗时由传统人工模式下的约100 s缩短至约70 s。以铀矿钻探中常见的500 m孔深为例,单次全提钻可节约时间约42 min,起下钻效率提高42.9%。

4.3 孔口减污效果

在传统作业模式中,即使卸扣时使用手动防溅罩进行遮挡,喷溅的钻井液仍会在孔口周边形成一定面积的散落区,同时钻杆外壁的泥皮会不断滴落污染机台面。而升级后的孔口作业系统通过喷淋、防溅、定向推靠等一系列动作,在清洗了钻杆外壁的同时将散落面积缩减至回收槽开口范围以内,台面污染面积理论减少约70%~80%。这一改进既消除了台面湿滑导致的人员安全隐患,也使钻井液在孔口即被拦截并导入回收通道,避免泥浆落地,从源头提高了钻井液回收利用率,为绿色勘查钻探提供了装备支撑。

5 结论与展望

本文针对提钻取心工艺下立轴钻机井场作业自动化水平低、劳动强度大、安全风险高、孔口钻杆喷溅污染的问题,提出了基于新型电传动立轴钻机的“主机升级与增量配套”的自动化升级方案,得到以下结论:

(1)使用具备远程控制与参数实时监测能力的新型电传动立轴钻机作为主机,配套了远程控制吊

卡、二层台机械手、孔口一体化减污装置、拧管机及自起升钻塔,形成了完整的井场自动化设备体系。同时通过钻塔结构有限元仿真,验证了起升工况下塔体强度与刚度的可靠性。

(2)设计了塔上无人自动化作业的起下钻协同作业流程,明确了各步骤的时序衔接与触发条件,建立了基于PLC总线的安全联锁逻辑,并通过人机协同的分工模式,实现了塔上无人自动化作业。

(3)理论分析表明,该方案可将班组人员由3~4人减至2人,单立根提钻耗时由100 s缩短至70 s的同时,孔口台面污染面积理论减少70%~80%,为提钻取心工艺下立轴钻机通过自动化升级实现减员增效与绿色勘查提供了理论依据和技术基础。

上述工作为基于提钻取心工艺的立轴钻机的自动化升级提供了基础方案,后续研究可在以下方面作进一步探索:

(1)基于现有的钻参采集与实时监测能力,后续可依据钻进参数与设备状态数据开展钻进过程智能化控制研究,通过钻压、转速、泵量等参数的协同优化与自适应调节,建立地层特征与钻进规程的动态匹配关系,从而在复杂地层条件下实现钻进效率和钻孔质量的双重提升^[22-23]。

(2)在人机协同的作业模式的基础上,开发上位调度系统,将当前“人工触发-PLC执行”的操作模式升级为“系统调度-自动执行-人工监控”的全自动模式,实现起下钻作业的全流程自动化。

(3)引入数字孪生技术构建井场作业虚拟仿真平台,在施工前进行协同流程的预演与参数优化,缩短现场调试周期。同时施工过程中对作业状态进行实时映射与异常预警,提升系统的自适应调整能力与故障响应速度^[24-25]。

参考文献:

- [1] 李柏军,曾令,侯江楠,等.我国铀矿钻探装备主要进展和发展建议[J].钻探工程,2026,53(1):4-12.
- [2] 李柏军,童俊涛,王琳,等.铀矿地质钻探月效率影响因素分析及提升建议[J].钻探工程,2023,50(3):44-53.
- [3] 臧臣坤,何磊,孙军盈,等.XY-9DB电传动立轴钻机的研制及

- 应用[C]//第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流会论文集.北京:地质出版社,2019:378-384.
- [4] 高明帅,孙军盈,臧臣坤,等.基于XY-6型立轴钻机的数字化升级改造[J].钻探工程,2023,50(S1):471-475.
- [5] 高明帅,王春蕾,薛善忠,等.XY-5DB型电传动立轴钻机的研制与应用[J].地质装备,2020,21(5):11-14.
- [6] 周政,臧臣坤,秦爱国,等.XY系列电传动立轴式岩心钻机的研制[J].地质装备,2019,20(5):11-14.
- [7] 周政,臧臣坤,朱江龙,等.一种深孔用电传动立轴钻机:CN109973007B[P].2020-07-03.
- [8] 黄洪波,张文举,臧臣坤,等.深部取心钻探拧卸工具机械化的思考与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):1-4.
- [9] 贾玉龙,王程皓.一种防脱大通径液压拧管机:202521925187[P].2026-06-30.
- [10] 孙威.自动化钻机二层台立根排放系统设计[D].青岛:中国石油大学(华东),2019.
- [11] 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.
- [12] 孙军盈,沈怀浦,宋志亮,等.一种深孔电传动岩心钻机刹车控制系统[J].地质装备,2017,18(2):13-16.
- [13] 高明帅,孙卫娜,宋志亮,等.一种用于机械立轴钻机主绞车的液压制动装置:CN213011735U[P].2021-04-20.
- [14] 王龙,白祖卫.岩心钻机液压钳盘式刹车卷扬机的研发与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):63-67.
- [15] 臧臣坤,高明帅,王宇哲,等.XY-8型立轴钻机电传动数字化升级改造研究[J].钻探工程,2026,53(4):154-162.
- [16] 马芳进,李宁,李昂.基于PLC的煤层气车载钻机控制系统设计与实现[J].矿业装备,2024(4):149-151.
- [17] 徐世国,杨茂林,杜平,等.基于PLC技术的履带式钻机自动化控制系统研发[J].煤矿机械,2025,46(9):203-206.
- [18] 臧臣坤,孙军盈,高明帅,等.XD50DB地质岩心钻机管柱处理系统的研制[J].地质装备,2022,23(1):3-8.
- [19] 杨晓刚,陈思祥,张小龙,等.JC30DB-II型海洋修井绞车设计与分析[J].石油矿场机械,2021,50(5):44-48.
- [20] 赵磊,江苗苗,王柳.双升式钻机井架起升过程受力研究[J].河北农机,2021(7):122-123.
- [21] 孙军盈,宋志亮,臧臣坤,等.5000 m智能地质岩心钻机集成控制系统设计[J].地质装备,2021,22(6):3-8,18.
- [22] 王悦,王金平,王春蕾,等.数字化立轴钻机在科钻深孔中的应用[J].地质装备,2025,26(2):40-44.
- [23] 杨卫明.我国地质勘探钻机发展方向及应用的思考[J].设备管理与维修,2018(14):34-36.
- [24] 柴喜元,谭颖,欧阳志强,等.机械传动立轴式岩心钻机自动化升级的研究及应用[J].地质装备,2021,22(3):7-11.
- [25] 周亲宗,谭颖,卢春阳,等.传统立轴岩心钻机的智能升级[J].地质装备,2019,20(5):15-16.

(编辑 王文)