

XY-8型立轴钻机电传动数字化升级改造研究

臧臣坤^{1,2}, 高明帅^{1*}, 王宇哲¹, 李宽³, 何磊¹, 宋志亮¹, 孙卫娜¹, 孙军盈^{1,2}

(1. 中地装(北京)科学技术研究院有限公司, 北京 100120; 2. 中国地质装备集团有限公司, 北京 100015; 3. 山东省地质矿产勘查开发局第六地质大队, 山东威海 264209)

摘要:针对传统立轴式岩心钻机存在的劳动强度大、安全风险高、频繁倒杆易致孔壁失稳及钻进参数无法实时获取等问题,本文以XY-8型钻机为对象,提出了一种低成本、高性能的数字化升级改造方案。该方案遵循“主体保留、功能增强、数字改造”原则,采用交流变频电机实现回转与提升系统的无级调速,重构了液压盘式制动系统;构建了包含小电机自动送钻、伺服泵控送钻及无动力盘刹送钻的多模式协同送钻体系,有效解决了传统油缸给进行程受限的问题;开发了基于PLC的机电液一体化控制平台,实现了各执行机构的逻辑互锁与参数闭环控制。样机测试表明:改造后钻机速度控制误差不超过 $\pm 1.5\%$,钻压控制误差不超过 $\pm 5\%$,制动响应时间缩短至0.3 s,单位进尺与待机能耗分别降低约29%和75%,改造成本较新购同性能设备降低约25%。本研究为海量存量立轴钻机的数字化转型提供了可复制的工程路径,为深部找矿与地质装备数字化提供技术支撑。

关键词:立轴钻机;数字化改造;电传动;自动送钻;变频驱动;机电液一体化;闭环控制;地质勘探

中图分类号:P634.3⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)04-0154-09

Research on digital electric drive upgrading of XY-8 spindle drill rig

ZANG Chenkun^{1,2}, GAO Mingshuai^{1*}, WANG Yuzhe¹, LI Kuan³,
HE Lei¹, SONG Zhiliang¹, SUN Weina¹, SUN Junying^{1,2}

(1. China Geological Equipment Research Institute Co., Ltd., Beijing 100120, China; 2. China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing 100015, China; 3. No.6 Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Weihai Shandong 264209, China)

Abstract: To address the problems of traditional spindle core drilling rigs, such as high labor intensity, high safety risks, borehole instability caused by frequent rod pulling, and the inability to acquire drilling parameters in real time, this paper proposes a low-cost, high-performance digital upgrading and retrofitting scheme taking the XY-8 drilling rig as the research object. Following the principle of "main structure retention, function enhancement, and digital transformation", the scheme adopts AC variable frequency motors to achieve stepless speed regulation for the rotary and hoisting systems, and reconstructs the braking system to a hydraulic disc brake system. A multi-mode cooperative feeding system is constructed, comprising small-motor automatic feeding, servo pump-controlled feeding, and non-powered disc brake feeding, which effectively solves the problem of limited stroke in conventional hydraulic cylinder feeding. Furthermore, a PLC-based electromechanical-hydraulic integrated control platform is developed to realize logical interlocking and closed-loop parameter control for all actuators. Prototype tests indicate that the speed control error of the retrofitted rig does not exceed $\pm 1.5\%$, the weight on bit (WOB) control error is within $\pm 5\%$, and the braking response time is shortened to 0.3 s. The energy consumption per unit footage and standby energy

收稿日期:2026-02-28; 修回日期:2026-04-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.04.016

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号:2024ZD1003102);山东省重点研发计划项目(重大科技创新工程)(编号:2023CXGC011001)

第一作者:臧臣坤,男,汉族,1984年生,正高级工程师,地质工程专业,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,zangchenkun@cgeg.com.cn。

通信作者:高明帅,男,汉族,1991年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事地质、油气勘探装备研发工作,北京市朝阳区酒仙桥东路1号,gmsstudy@163.com。

引用格式: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.

ZANG Chenkun, GAO Mingshuai, WANG Yuzhe, et al. Research on digital electric drive upgrading of XY-8 spindle drill rig[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 154-162.

consumption are reduced by approximately 29% and 75%, respectively, while the retrofitting cost is about 25% lower than that of purchasing new equipment with equivalent performance. This study provides a replicable engineering path for the digital transformation of the massive stock of existing spindle drilling rigs, offering solid technical support for deep mineral exploration and the digitalization of geological equipment.

Key words: spindle drilling rig; digital retrofitting; electric drive; automatic drilling; variable frequency drive; electro-hydraulic integration; closed-loop control; geological exploration

0 引言

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础,其勘查开发事关国计民生和国家安全。近年来,国家持续强化能源资源安全保障,明确提出要加强战略性矿产资源规划布局,加快推进找矿突破战略行动。钻探作为获取地下实物资料的关键技术手段,其技术水平直接关系到找矿突破的效率和深度,必须持续加大研发投入和技术创新力度,以提升我国矿产资源保障能力^[1]。

立轴式岩心钻机作为我国地质勘探领域的功勋设备,近70年来累计完成了亿万米的机械岩心钻探工作量,以其性能稳定、能耗较低、性价比高、产品系列成熟等优势,至今仍在国内外勘查市场中占有重要地位。《中国矿产资源报告(2024)》的数据显示,在全国各地勘单位在役的岩心钻探装备中,立轴式岩心钻机占比仍达70%以上。这一数据充分表明,在可预见的未来,传统立轴钻机仍将是我国实施深部找矿战略、获取地下岩心实物资料的核心设备之一。因此,立轴钻机的性能优劣,对国家资源勘探的效率提升和成本控制具有重大影响。

然而,传统的机械式立轴钻机也存在诸多弊端:提升与制动完全依赖司钻手动操作,劳动强度大且安全性差;反复倒杆易造成孔壁失稳;处理孔内事故时,回转、提升、给进等动作协调性差且功率分配不可控;工艺参数适配性差,易出现高档憋死、低挡拧断钻杆等现象;最关键的是,转速、扭矩、钻压、钩载等关键钻进参数无法实时获取与记录,严重制约了钻进过程优化与科学决策。

基于传统立轴钻机的升级优化,行业内已进行了大量探索。高明帅等^[2]、周政等^[3-4]、臧臣坤等^[5]研究设计了XY-8DB/9DB系列数字电传动钻机,采用全新主机与数字化司钻房,实现了操控的远程化与部分参数的数字化,但其本质是新装备的替换,成本高、周期长,无法解决海量存量设备的潜能挖掘问题;黄俊才^[6]针对TK-3型钻机的液压回转器

进行了技术改造,解决了钻探过程中易出现的卡盘故障问题,但这只是单一部件的局部优化,缺乏系统性、集成化的解决方案。现有研究大都集中于新装备的研发或单一部件的改良,而在不改变传统立轴钻机主体结构的前提下,对其进行全面数字化改造的研究尚属空白。因此,开发一种成本可控、改动较少、性能提升显著、易于推广的存量立轴钻机系统性改造方案,是衔接传统装备现状与数字化勘探需求的重要桥梁^[7-8]。

针对上述问题,本研究以广泛应用的XY-8型立轴式岩心钻机为对象,开展了电传动数字化升级改造研究,其创新点主要体现在以下3个方面:(1)在保留钻机主体结构的同时,实现了动力系统与传动系统的数字化升级,为海量的存量设备提供了低成本、高性能改造的技术路径;(2)构建了多种送钻模式的协同控制体系,实现了减压钻进工况下的长行程连续送钻,并可根据不同工艺需求灵活选择送钻模式;(3)开发了机电液一体化控制平台,实现了钻机各执行动作的精准比例控制与关键钻进参数的实时采集记录。

1 总体方案设计

本文旨在探索一种面向传统立轴钻机的低成本、高性能数字化改造方法。研究的总体目标是以较小的结构性改动和较高的性价比,将传统XY-8型钻机改造为具备电传动数字化、自动送钻、远程监控能力的XY-8DG型钻机,使其主要性能指标接近或达到新型电传动钻机水平。因此,在改造时应遵循以下原则:(1)主机主体结构不变。保留钻机底座、立轴箱体、绞车卷筒等大型结构件,以确保改造的可行性和成本可控性。(2)确保设备兼容性。改造后钻机应能适配原有的钻塔、泥浆泵、钻杆钻具等配套设备,确保用户现有资产的延续使用。(3)保留原有操作习惯。在实现数字化操控的同时,要在人机交互逻辑上兼顾传统司钻的操作习惯,降低司钻人员的学习成本。

改造内容主要涵盖执行系统和控制系统2个部

分。在执行层面,采用交流变频电传动替代传统的机械传动链,并新增了自动送钻、远程换挡等功能;在控制层面,对液压系统进行了模块化整合,实现了全部液压动作的电液比例控制,同时构建了以PLC为核心的数字化控制系统,能够实现对钻机所有执行机构的集中监控与逻辑互锁,并通过实时数据采集与闭环算法提升关键工艺参数的控制精度。改造后的XY-8DG型钻机如图1所示。

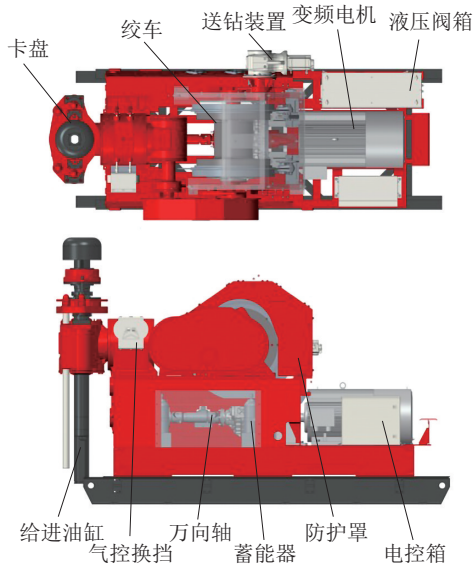


图1 XY-8DG型钻机主机示意
Fig.1 Schematic diagram of the XY-8DG drilling rig main unit

2 关键参数优化

对XY-8型钻机的改造遵循“主体保留、功能增强、数字改造”的基本思路,通过模块化设计,对钻机的回转、升降与控制三大核心系统进行了升级重构。改造前后钻机的主要性能参数发生了显著变化,如表1所示。XY-8DG型钻机在保持与原机型相同钻深能力和外形尺寸的前提下,实现了立轴回转与绞车提升的挡内无级调速,扩展了多种给进模式,控制方式由手动升级为电-液/气远程控制,还具备了运行参数的数字化设定、实时显示与闭环调节能力,为优化钻进工艺、提升复杂地层适应性提供了硬件基础。

3 传动系统改造

3.1 回转驱动系统改造

为了在保留钻机原有机械结构的同时实现回转参数的连续可调与精确控制,在改造过程中沿用

表1 XY-8型钻机与XY-8DG型钻机性能参数对比
Table 1 Performance parameter comparison between XY-8 drilling rig and XY-8DG drilling rig

参 数	XY-8型	XY-8DG型
最大钻深/m		3000
适用口径		N、H、P
立轴转速/(r·min ⁻¹)	正转 79/137/213/223/366/384/604/1024, 反转 51/144	正转 0~1100, 反转 0~1100
最大扭矩/(kN·m)	9.1	10.8
油缸上顶力/kN		300
油缸给进力/kN		142
油缸行程/mm		1000
单绳提升力/kN	120	128
提升速度/(m·s ⁻¹)	7.4	0~8.1
容绳量/m		160
主电机类型	90 kW 定频电机	90 kW 变频电机
给进模式	定量泵控液压给进	伺服泵控液压给进/送钻电机送钻/无动力液压盘刹送钻
外形尺寸/mm	4395×1754×2713	
主机质量/t	9	8
控制方式	手动控制	电-液/气远程控制
钻参数据	给进油缸压力、泥浆泵压力	立轴转速、扭矩、钻压、钻速、泥浆泵压力、泵量

了钻机原有机座及换挡机构安装位置,将原异步电机替换为1台90 kW交流变频电机,构建了“变频电机—变速箱—分动箱”的电传动路径。图2为XY-8DG型钻机回转驱动系统的三维示意图。该方案使钻机在保留原有8个机械挡位的同时,实现了各挡位内的无级调速功能,立轴转速可在0~1100 r/min范围内连续调节,并具备不低于1.5倍的瞬时过载扭矩储备能力。图3对比了改造前后XY-8型钻机与XY-8DG型钻机的立轴转速-扭矩输出特性。改造前钻机的动力输出为8个离散的固定点,其转速与扭矩值在挡位切换时呈阶跃变化,这种特性限制了钻机在不同地层作业时的调整能力。改造后的XY-8DG型钻机,在增大了立轴额定扭矩的基础上,通过变频调速实现了各机械挡位内的无级调速,使立轴输出特性由离散点扩展为8条连续的调速曲线。这

一改进使钻机能够根据地层岩性的实时变化,在更大范围内连续、精确地匹配最优转速与扭矩组合。

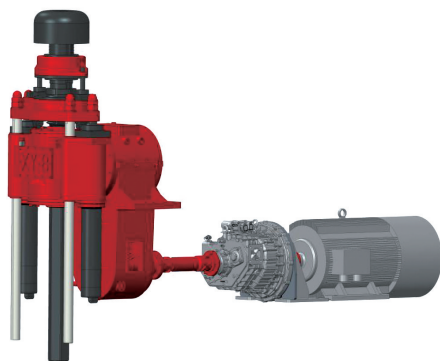


图2 回转驱动系统三维示意

Fig.2 3D schematic diagram of the rotary drive system

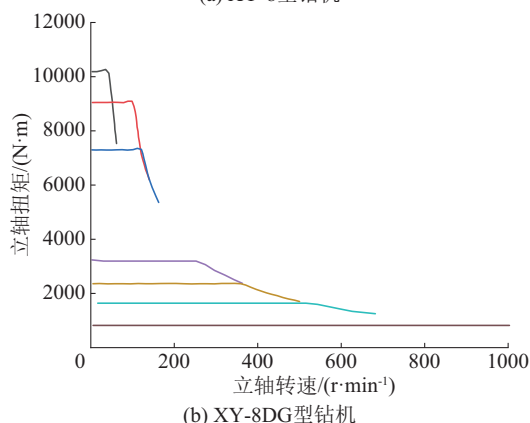
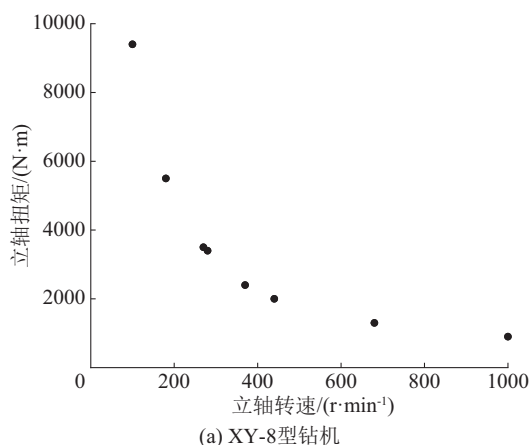


图3 立轴转速-扭矩曲线对比

Fig.3 Comparison curve of spindle speed versus torque

3.2 升降驱动系统改造

3.2.1 传动结构改造

升降驱动系统是立轴钻机实现起下钻与给进

控制的核心执行单元。针对XY-8型钻机升降系统存在的制动性能不足、给进模式单一等问题,对其升降系统进行了重构:取消了原有的提升制动带、水刹车等部件,改用变频电机驱动与液压盘式制动技术,并新增了独立的送钻装置。改造后的升降驱动系统如图4所示。动力单元的升级同样也提高了绞车的提升性能,图5对比了改造前后的绞车绳速-拉力特性,提升速度由单一速度升级为0~8.1 m/s连续可调,单绳提升力由120 kN提升至128 kN。改造后的升降系统同时具备快速起下钻、自动送钻及多种辅助给进模式,全面提升了系统的控制精度、作业效率与运行安全。

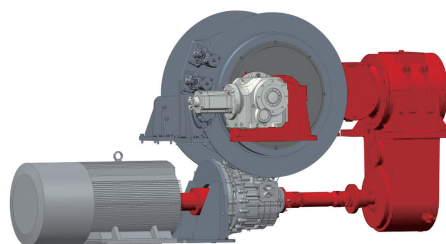


图4 升降驱动系统三维示意

Fig.4 3D schematic diagram of the lifting drive system

3.2.2 制动系统改造

制动系统是保障升降作业安全的关键。改造后的制动系统集成于卷筒两侧,由提升钳、工作钳、驻车钳和刹车盘共同构成,如图6所示。提升钳的作用是当滚筒由主电机驱动时,固定住滚筒行星轮侧的行星架,使滚筒按照驱动方向转动;工作钳为液压夹紧、弹簧复位的常开式制动钳,用于自动送钻模式下的速度调节与制动控制;驻车钳为弹簧夹紧、液压打开的常闭式制动钳,兼具停机驻车与紧急制动双重功能,可实现设备停机状态下的可靠制动,以及遇突发情况时自动安全干预。3种制动钳与变频电机的能耗制动功能协同工作,使绞车在提升、下放及悬停等各工况下均能获得平稳、可控的制动响应^[9-11]。

4 核心控制系统开发

XY-8DG型钻机的控制系统由液压子系统与电气子系统共同构成,采用分布式控制架构,能够实现对钻机各执行机构的动力分配、动作控制与状态监

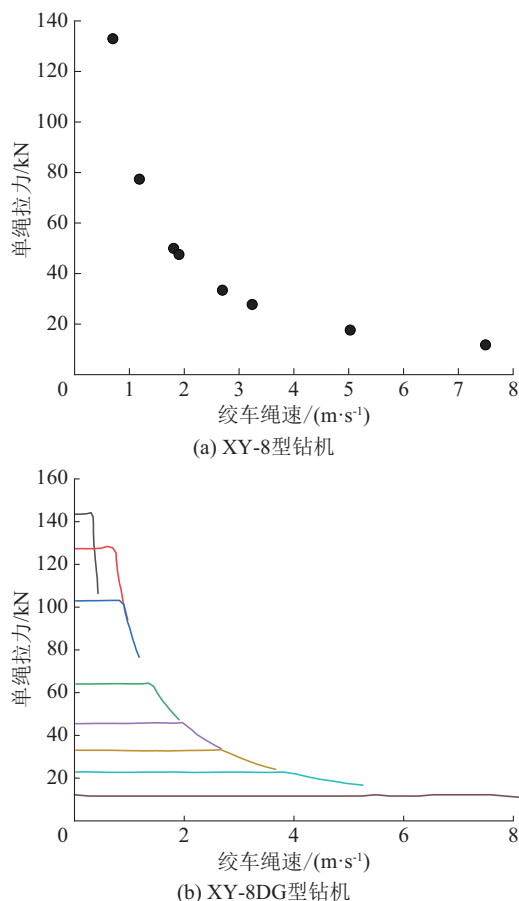


图5 绞车绳速-拉力曲线对比

Fig.5 Comparison curve of winch rope speed vs. tension

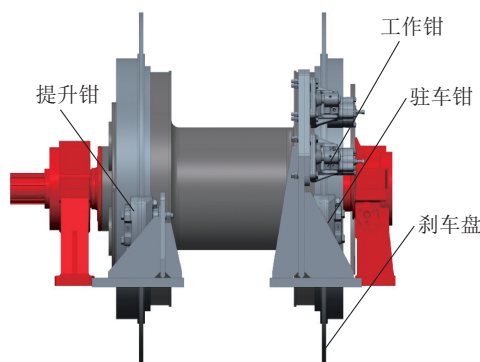


图6 制动系统三维示意

Fig.6 3D schematic diagram of the braking system

测。控制系统以PLC为核心控制单元,通过总线通信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。

4.1 液压系统

改造后的液压系统主要由液压站和液压阀箱

组成,如图7、图8所示。液压站为钻机的卡盘、给进油缸、移车油缸等执行机构提供动力,包括箱体单元、定量泵供油单元、伺服泵供油单元及旁路冷却单元4个部分。液压阀箱是钻机的集成控制核心,将液压站提供的通用液压能,按需分配给钻机的各执行机构,从而确保卡盘夹紧、油缸给进、盘刹制动等动作可靠执行^[12-15]。液压系统的工作原理如图9所示。

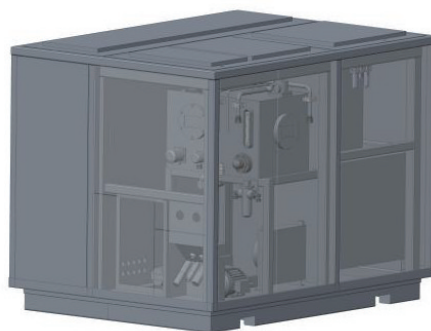


图7 动力站三维示意

Fig.7 3D schematic diagram of the power station

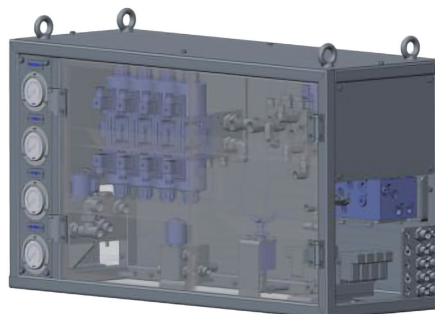


图8 液压阀箱三维示意

Fig.8 3D schematic diagram of the hydraulic valve box

4.2 电气控制系统

电气控制系统由操作台、电控柜和VFD房3个部分组成。司钻操作台集成了控制元件与显示终端,作业时HMI触摸屏能够实时显示钻压、转速、扭矩、钻速等关键钻进参数,如图10所示。司钻可通过操作台面板上的卷扬离合、立轴离合、多功能手柄等控制元件,实现对各执行机构的远程操作。电控柜内置西门子S7-1200系列的主控PLC,承担指令解析、逻辑运算与控制指令下发功能,其控制系统硬件结构如图11所示。VFD房中按功能分区布置了电源柜与变频器,其中的变频器可通过Profibus-DP总

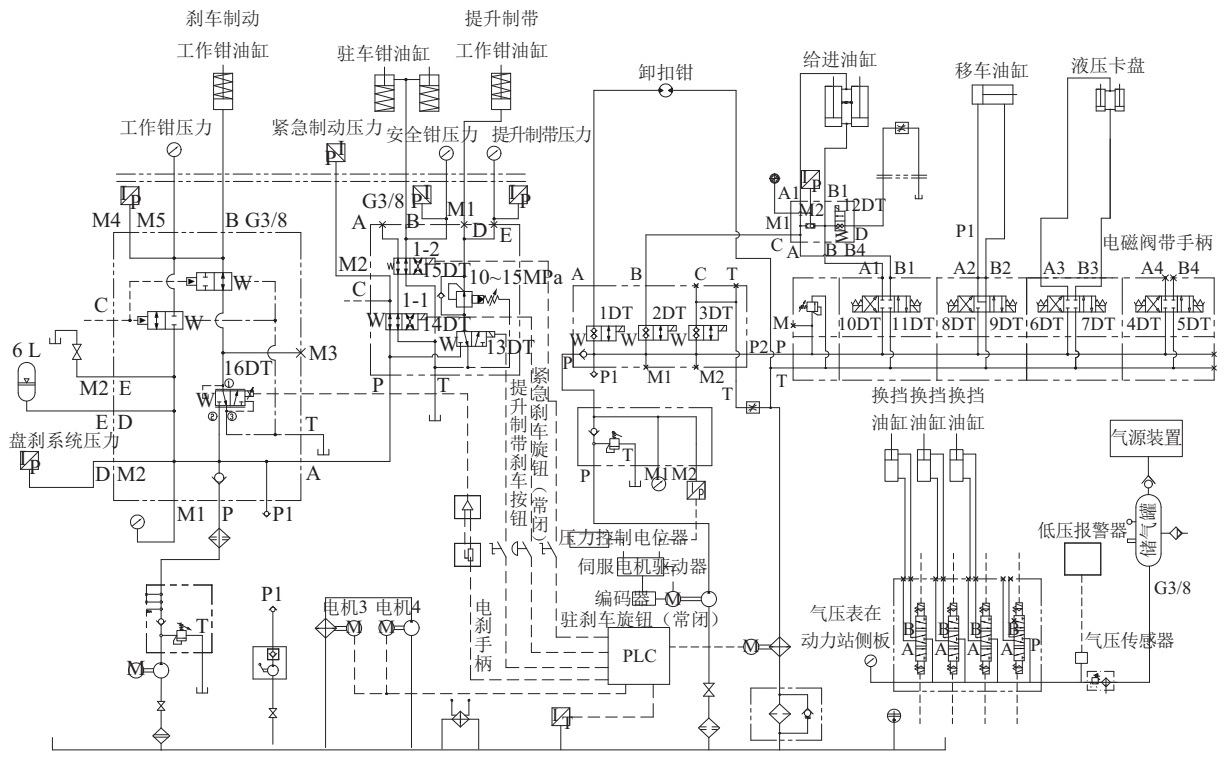


图 9 液压系统原理

Fig.9 Hydraulic system schematic diagram

线接收 PLC 指令,调节变频电机转速,伺服驱动器可通过控制液压系统伺服泵,实现对回转、给进、提升等执行机构的驱动^[16-17]。此外控制系统还可通过拉力传感器、压力变送器、扭矩传感器、位移传感器等多个布置于钻机各关键部位的传感器实时采集钻进参数,为后续闭环控制提供数据支撑。

4.3 液压系统与电气系统的协同控制机制

改造后的液压系统与电气控制系统通过总线通信实现协同控制,形成了“指令输入-逻辑处理-

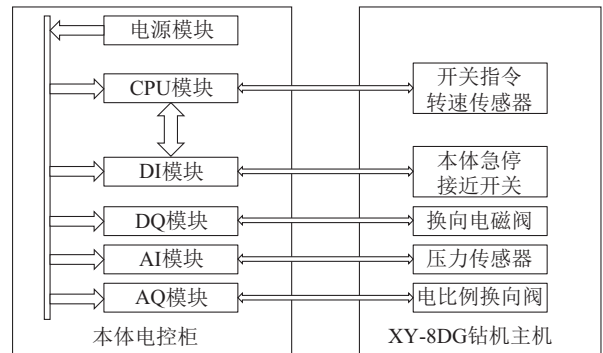


图 11 控制系统硬件结构示意图

Fig.11 Hardware architecture diagram of the control system

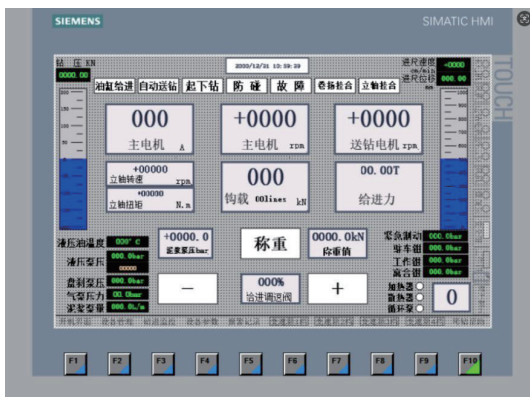


图 10 钻进数据界面

Fig.10 Drilling data interface

执行驱动-闭环调节”的一体化控制架构。协同控制机制主要体现在 3 个方面。

(1)数据交互。PLC 通过 Profibus-DP 总线与变频器、伺服驱动器进行周期性数据交换,实时读取电流、频率、温度、故障代码等设备运行状态参数,同时通过模拟量模块采集液压系统的压力、流量信号。所有状态信息汇聚于 PLC,经处理后统一显示于 HMI 界面,实现液压与电气状态的集中监控。

(2)逻辑互锁。PLC 根据钻进工艺流程与安全

要求,对液压执行机构与电气执行机构进行逻辑互锁控制。例如,在绞车提升过程中,PLC自动锁闭给进油缸的动作,同时监测盘刹制动压力是否低于设定阈值,低于时PLC禁止主电机启动,这样既能防止提升与给进同时动作造成安全事故,也确保了制动安全。

(3)闭环调节。以减压钻进为例,死绳端拉力传感器采集大钩载荷信号,经信号调理后输入PLC。PLC将采样值与钻压设定值进行比较运算,根据偏差大小与方向选择控制策略:若偏差较大,优先通过伺服驱动器调节液压泵流量;若偏差较小且需高精度控制,则切换至送钻变频器调节送钻电机扭矩。这种“液压粗调+电气精调”的协同控制策略,使钻机能够在确保快速响应的同时兼顾控制精度。

4.4 送钻系统设计

为解决传统立轴钻机作业时液压油缸给进行程有限、需频繁倒杆的问题,本次改造在绞车卷筒端部集成了由小功率送钻电机驱动的自动送钻系统。该系统与主绞车驱动系统互为补充,使钻机具备3种可选的送钻模式,以适应不同地层条件与钻进工艺的需求。

4.4.1 小电机自动送钻模式

小电机自动送钻模式是改造方案中实现长行程连续给进的核心模式。该模式下绞车由1台5.5 kW变频送钻电机独立驱动,经送钻减速箱将扭矩传递至卷筒,通过卷筒反拖产生的提吊力实现给定钻压下的连续给进。与传统的油缸给进方式不同,该模式无需依赖卡盘夹持与油缸顶推,可在主动钻杆的自然行程内实现不间断钻进,避免了因油缸行程受限导致的倒杆作业。这一送钻模式不仅提升了作业效率,还减少了在反复倒杆过程中对孔壁产生的扰动,提高了孔壁稳定性。

小电机自动送钻原理如图12所示。该模式采用钻压闭环PID控制算法,通过安装在死绳端的拉力传感器实时采集大钩载荷信号,PLC将采样值与钻压设定值比较后,通过PID控制器计算输出频率给定值至送钻变频器,调节送钻电机转速与输出扭矩,使实际钻压维持在设定值附近。

4.4.2 伺服泵控送钻模式

伺服泵控送钻是一种适用于软岩快速钻进及复杂地层扫孔、扩孔作业工况的动力送钻模式。该模式下,液压站的伺服电机驱动变量泵作为动力源,通过电液比例阀组精确控制给进油缸的动作。

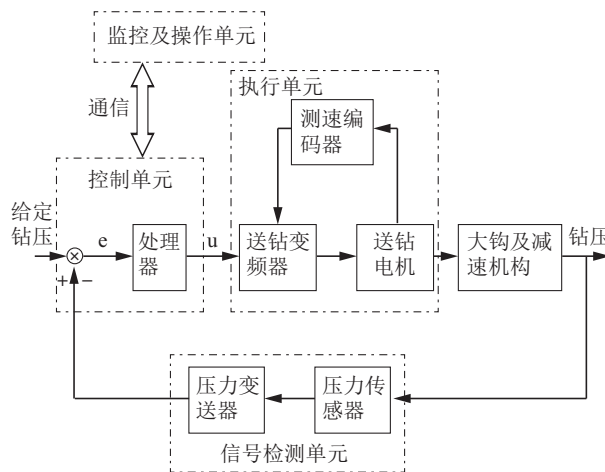


图12 小电机自动送钻原理

Fig.12 Automatic drilling principle using the feed motor

伺服电机根据实时工况动态调节转速,实现按需供油,既保证了输出油量的稳定,又显著降低了能耗。

在控制策略上,该模式采用钻压闭环控制与位置闭环控制相结合的方法:正常钻进工况下,以钻压为反馈量,通过伺服驱动器调节伺服电机转速,控制变量泵输出流量,进而调节给进油缸推进速度;在接近孔底或需要精确定位时,切换至位置闭环控制,以位移传感器反馈的油缸行程为控制量,实现精准位置控制。

4.4.3 无动力盘刹送钻模式

无动力盘刹送钻模式是一种利用液压盘式刹车装置控制卷筒转速、依靠钻具自重下放的辅助钻进模式。此模式下,送钻电机与主电机均不参与驱动,钻压完全依靠盘刹摩擦力控制。

该模式采用开环比例控制,司钻通过操作台手柄发出模拟量信号,经比例减压阀,比例减压阀输出与输入信号成比例的液压压力,控制盘刹制动钳的夹紧力,从而调节卷筒释放速度,实现钻具下放速度的比例调节。该模式适用于表层快速钻进、辅助下钻等对控制精度要求相对较低、但侧重于低能耗和操作简便的场景。

3种送钻模式的切换由司钻通过操作台完成,切换前控制系统会根据当前设备状态进行安全互锁判断。实际作业中,司钻可根据地层变化与工艺需求灵活选用:快速钻进段采用无动力盘刹送钻模式或伺服泵控送钻模式,以降低能耗、提高钻进效率;进入取心段后切换至小电机自动送钻模式,实现高精度恒钻压连续送钻,兼顾钻进效率与取心精度。

5 实验验证与经济性分析

5.1 浅孔实钻测试

为验证XY-8DG型钻机(图13)的技术性能,样机组装调试后开展了厂内浅孔实钻测试,钻孔深度50 m,地层为均质泥岩,钻头直径76 mm。测试内容包括回转与提升调速性能测试、伺服泵控送钻控制精度测试及整机运行稳定性测试。



图13 XY-8DG型钻机实物

Fig.13 Physical object of the XY-8DG drilling rig

测试结果表明,改造后钻机的回转与提升调速性能均满足设计要求,速度控制误差不超过 $\pm 1.5\%$ 。制动系统升级为液压盘式制动后,操作人员的劳动强度显著降低,同时由于改造后的钻机引入了电液比例控制技术,制动力的施加不再依赖司钻的操作反应,而是由控制系统根据工况自动判断完成,制动响应时间由原人工操作所需的1~2 s缩短至0.3 s。根据现场测试,升级了传动系统后的钻机在作业状态下的单位进尺能耗降低了约29%,待机能耗降低约75%。伺服泵控送钻模式下,钻压控制误差不超过 $\pm 5\%$,给进速度控制误差不超过 $\pm 2.8\%$,阶跃响应时间为0.9 s,能够满足快速钻进等工况的控制需求。小电机自动送钻模式采用钻压闭环PID控制,但由于孔深不足,仅进行了功能性动作测试,将在后续实际工程应用中进一步验证其钻压控制效果。

5.2 经济性分析

XY-8DG型电传动钻机的单台改造成本与购置1台同等性能的新型电传动钻机相比,可节约投资约25%。改造后的预期经济效益主要来源于3个

方面:(1)变频驱动与伺服泵控技术实现了按需供能,可有效降低空载与轻载状态下的能量损耗,节约工程应用中的能耗成本。(2)自动送钻系统减少了倒杆次数,增加了纯钻进时间,提升了作业效率。(3)数字化控制系统增强了钻进过程的可控性,有助于降低孔内事故率,减少事故处理成本,从而产生减损效益。综上所述,上述多方面的经济效益,可缩短改造成本回收周期,若进一步考虑设备残值提升及操作环境改善带来的间接效益,实际经济性更为显著。

6 展望

本研究建立了1套传统立轴钻机数字化改造的完整技术方案,为国内保有量巨大的传统立轴钻机提供了一条投资少、见效快、可复制的升级路径,对推动地质装备从“机械时代”向“数字智控时代”转型具有工程实践意义,但仍有若干方向值得进一步探索。

(1)模块改造包的系列化拓展。本研究的改造方案涵盖了动力单元选型、控制系统架构、送钻模式设计等关键技术环节,之后将根据XY-6、XY-9型等钻机的功率等级、接口尺寸、安装空间等特点进行调整,开发系列化的模块改造安装包,降低在不同型号钻机上推广应用的二次研发成本。

(2)基于机械比能的地层自适应控制。本研究虽已实现钻压、转速、扭矩等关键参数的实时采集,但钻压与转速的设定仍依赖司钻经验,未能实现根据地层变化进行自动优化。之后可利用实时采集的扭矩与钻速数据计算机械比能,反映地层可钻性与钻头工况,并通过滑动窗口算法识别岩性变化,进而构建以机械钻速最大化为目标的钻压-转速协同优化控制器^[18]。目前已积累初步的钻进数据,为后续建模与算法验证提供了基础。

(3)基于物联网的钻机集群远程监控。目前钻机的运行状态数据与钻进工艺数据已实现本地存储与显示,但尚未具备远程传输与集群监控能力。下一步拟采用4G/5G通信模块将钻机PLC与云端服务器连接,开发基于特征参数的设备健康状态评估算法,构建支持多机集群管理的远程运维平台^[19-20]。目前已完成通信协议与数据传输的初步测试,具备进一步开发的基础。

参考文献(References):

- [1] 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.
GAO Mingshuai, SUN Junying, ZANG Chenkun, et al. Digital upgrading of vertical shaft drilling rig based on XY-6[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):471-475.
- [2] 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.
GAO Mingshuai, WANG Chunlei, XUE Shanzhong, et al. The development and application of XY-5DB electric drive spindle drilling rig [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2020,21(5):11-14.
- [3] 周政,臧臣坤,秦爱国,等.XY系列电传动立式岩心钻机的研制[J].地质装备,2019,20(5):11-14.
ZHOU Zheng, ZANG Chenkun, QIN Aiguo, et al. Development of XY series electric drive spindle type core drill[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019,20(5):11-14.
- [4] 周政,臧臣坤,朱江龙,等.一种深孔用电传动立轴钻机:CN201910313761.5[P].2019-04-18.
ZHOU Zheng, ZANG Chenkun, ZHU Jianglong, et al. A deep-hole electric drive vertical spindle drilling rig: CN201910313761.5[P]. 2019-04-18.
- [5] 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)学术交流年会论文集.西宁:中国地质学会,2019:378-384.
ZANG Chenkun, HE Lei, SUN Junying, et al. The development and application of XY-9DB electric drive spindle drilling rig [C]//Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Xining: The Geological Society of China, 2019:378-384.
- [6] 黄俊才.煤炭TK-3型液压钻机回转器技术改造研究[J].中国煤田地质,2007,19(A01):12-13,28.
HUANG Juncai. A research on technical alteration of coal TK-3 hydraulic drilling rig rotors[J]. China Coalfield Geology, 2007, 19(A01):12-13,28.
- [7] 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):40-44,50.
WANG Yue, WANG Jinping, WANG Chunlei, et al. Application of digital spindle drill in deep scientific drilling holes [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2025,26(2):40-44,50.
- [8] 田鹏辉,冉飞,方青,等.多角度定向坑道钻探的设备改造及工艺研究[J].世界有色金属,2025(14):36-38.
TIAN Penghui, RAN Fei, FANG Qing, et al. Equipment modification and process research for multi angle directional tunnel drilling[J]. World Nonferrous Metals, 2025(14):36-38.
- [9] 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.
SUN Junying, SHEN Huaipu, SONG Zhiliang, et al. A braking control system for deep-hole electric transmission core drilling rigs [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2017,18(2):13-16.
- [10] 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:CN202021649034.0[P].2020-08-10.
GAO Mingshuai, SUN Weina, SONG Zhiliang, et al. A hydraulic braking device for the main hoist of a mechanical vertical spindle drilling rig: CN202021649034.0[P]. 2020-08-10.
- [11] 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.
WANG Long, BAI Zuwei. Development and application of hydraulic calipers disc brake winch [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(8):63-67.
- [12] 孙军盈.变频电驱动深孔地质钻机自动送钻系统的应用[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
SUN Junying. Research and application of auto-drilling system in deep hole electric spindle typecore drill[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2016.
- [13] 谭鑫,魏治利.立式回转钻机液压系统升级及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(9):58-60,71.
TAN Xin, WEI Zhili. Upgrading of hydraulic system of spindle rotary drilling rig and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(9):58-60,71.
- [14] 吴泽兵,闫哲, LIN Yaojun,等.基于AMESim和Simulink自动送钻液压绞车系统控制方法研究[J].液压与气动,2025,49(12):103-114.
WU Zebing, YAN Zhe, LIN Yaojun, et al. Research on control method of automatic drilling hydraulic drawworks system based on AMESim and Simulink [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2025,49(12):103-114.
- [15] 宋志亮,周政,何磊,等.深孔地质钻机XY-8DB的液压缸送钻现状与优化[J].地质装备,2019,20(2):11-14.
SONG Zhiliang, ZHOU Zheng, HE Lei, et al. The present situation and optimization of hydraulic cylinder feeding for XY-8DB deep hole geological drilling machine [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019,20(2):11-14.
- [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.
MA Fangjin, LI Ning, LI Ang. Design and implementation of control system for coalbed methane vehicle-mounted drilling rig based on PLC [J]. Mining Equipment, 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.
XU Shiguo, YANG Maolin, DU Ping, et al. Development of automatic control system of crawler drilling rig based on PLC technology [J]. Coal Mine Machinery, 2025,46(9):203-206.
- [18] 柴喜元,谭颖,欧阳志强,等.机械传动立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.
CHAI Xiyuan, TAN Ying, OUYANG Zhiqiang, et al. Research and application of automation upgrade for mechanical drive spindle core drilling machine [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2021,22(3):7-11.
- [19] 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.
ZHOU Qinzong, TAN Ying, LU Chunyang, et al. The smart update of traditional spindle type core drilling machines [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019,20(5):15-16.
- [20] 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.
YANG Weiming. Thoughts on the development direction and application of geological exploration drilling Rigs in China [J]. Plant Maintenance Engineering, 2018(14):34-36.

(编辑 王跃伟)