房厢式全液压自动化岩心钻机研制与试验

高明帅[1,2]，刘 璐[1,2*]，王 悦[1,2]，张 伟[1,2]，张 凯[3]，
王宇哲[2,3]，沈怀浦[1,2]，臧臣坤[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 100015；3.中国地质大学（北京）工程技术学院，北京 100083）

摘要：针对我国北方矿区受气候制约钻探有效窗口期短、传统全液压岩心钻机依赖卷扬提升与人工拧卸、管柱作业劳动强度大等问题，研制了房厢式全液压自动化岩心钻机。该钻机采用集装箱式房厢一体化结构，利用液压系统余热供暖，适应北方矿区全天候钻探施工需求；采用以给进油缸替代主卷扬的卡盘式动力头，搭配六自由度模块化机械手，配置立式指梁与立根靠板实现立根竖直存放，有利于保护薄壁绳索取心钻杆并节省场地；依托多传感器反馈实现管柱起下钻自动化作业，PLC自主逻辑控制仍有待深化。基于ADAMS软件开展刚-柔耦合动力学仿真，分析夹持点位、运动加速度对立根管柱运移振摆的影响规律，仿真表明夹持点1摆幅最低，前移急停宜采用中低加速度，右移可采用中高加速度。厂内35 m钻孔验证及模拟起下钻试验表明：6 m立根作业效率约350 m/h，9 m立根作业效率约460 m/h；作业班组可缩减至2～3人，较常规全液压钻机减少1～2人。该装备可为高寒矿区岩心钻探装备自动化、少人化发展提供技术参考，但深孔与复杂工况下的长期可靠性仍需验证。

关键词：岩心钻机；全液压钻机；房厢式钻探装备；管柱自动化；立根作业；机械手；刚柔耦合仿真；长管柱抑振
中图分类号：P634.3^{+}1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-9686(2026)06-0137-10

Development and test of a container-type full-hydraulic automatic core drilling rig

GAO Mingshuai[1,2], LIU Lu[1,2*], WANG Yue[1,2], ZHANG Wei[1,2], ZHANG Kai[3],
WANG Yuzhe[2,3], SHEN Huaipu[1,2], ZANG Chenkun[1,2]

(1. *China Geological Equipment Group Co., Ltd., Beijing* 100015, *China*; 2. *China Geological Equipment Research Institute Co., Ltd., Beijing* 100015, *China*; 3. *School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To address the short effective drilling windows caused by climatic constraints in northern Chinese mining areas, the reliance of conventional full-hydraulic core drilling rigs on winch hoisting and manual make-up and break-out, and the high labor intensity of pipe string operations, a container-type full-hydraulic automatic core drilling rig was developed. The rig adopts an integrated container-type cabin structure and uses waste heat from the hydraulic system for cabin heating, meeting the requirements for all-weather drilling in northern mining areas. A chuck-type power head, in which feed cylinders replace the main winch, is combined with a modular six-degree-of-freedom (6-DOF) manipulator; vertical fingerboards and stand support racks are configured for vertical stand storage, which

收稿日期：2026-03-26；**修回日期：**2026-09-29　　**DOI：**10.12143/j.ztgc.2026.06.015
基金项目：国家科技重大专项（编号：2024ZD1003100、2024ZD1003102）；新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目（编号：ZKKJ202423）；中国机械工业集团有限公司科研专项（编号：ZDZX2025-54）

第一作者：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M3楼1幢4层，gmsstudy@163.com。
通信作者：刘璐，女，汉族，1997年生，工程师，地质工程专业，博士，主要从事钻探装备研发、钻探工艺研究等工作，北京市朝阳区酒仙桥东路1号M3楼1幢4层，1349843852@qq.com。

引用格式：高明帅，刘璐，王悦，等.房厢式全液压自动化岩心钻机研制与试验[J].钻探工程，2026，53(6)：137-146.
GAO Mingshuai, LIU Lu, WANG Yue, et al. Development and test of a container-type full-hydraulic automatic core drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 137-146.

helps protect thin-walled wireline core drill pipes and reduce the drilling site footprint. Automatic pipe string tripping is achieved through multi-sensor feedback, while autonomous PLC-based logic control remains to be further developed. Rigid-flexible coupling dynamic simulations were performed with ADAMS software to analyze the effects of clamping positions and motion accelerations on the swing of stands during transport. The simulation results show that the swing amplitude is lowest at clamping point 1; low-to-medium acceleration is recommended for emergency stops during forward movement, while medium-to-high acceleration can be used for rightward movement. In-plant verification with a 35 m borehole and simulated tripping tests showed that the tripping efficiency reached approximately 350 m/h for 6 m stands and 460 m/h for 9 m stands; the crew size could be reduced to 2～3 persons, 1～2 fewer than that for conventional full-hydraulic drilling rigs. This equipment provides a technical reference for the automation and manpower reduction of core drilling equipment in alpine mining areas; however, its long-term reliability under deep-hole and complex working conditions remains to be verified.

Key words: core drilling rig; full-hydraulic drilling rig; container-type drilling equipment; pipe string automation; stand operation; manipulator; rigid-flexible coupling simulation; long pipe string vibration suppression

0 引言

岩心钻探是矿产勘探的必要手段,是保障国家能源、资源安全的重要支撑。全液压岩心钻机凭借其传动平稳、负载适应性强等优势,已成为国内外岩心钻探的重要装备[1-4]。我国幅员辽阔,华北、东北、西北地区作为主要矿产勘探区,全年休工期4～6个月,作业窗口期短,现有钻探装备难以满足钻探工程24 h连续运转的施工需求,矛盾突出;同时,随着地质找矿钻探深度的不断增加,以及钻孔结构的日趋复杂,管柱作业的频次与难度显著提升[5-10]。传统全液压岩心钻机依赖卷扬起下钻杆和人工拧卸的方式,尤其在应对复杂工况时,作业效率与操作可靠性已成为制约深部钻探能力提升的瓶颈[11-12]。因此,提升全液压岩心钻机的全天候管柱自动化作业能力,实现全天候施工并完成从人工辅助到自动化的跨越,是该装备技术发展的核心方向之一。近年来,国内外钻机制造商与科研机构围绕这一难题开展了大量技术攻关,但现有研究多聚焦于自动化管柱输送,仅有少数科研机构和团队关注井口作业时的自动对扣与拧卸难题。

本文系统梳理了当前国内外岩心钻探领域所用自动化钻机的研究现状,重点调研了美国Boart Longyear公司、澳大利亚Titeline公司和瑞典Epiroc公司的代表性自动化岩心钻机,并对比分析了国内部分典型自动化岩心钻机。结果表明,近年来国内外均在发展房厢式、自动化、模块化的全液压钻探装备,以满足矿产勘探中快速搬迁、全天候作业、高效率施工的需求。该类钻机普遍采用全液压传动与轻量化设计,配置伸缩式桅杆、自动机械手加接钻杆及高速卡盘式动力头,更契合金刚石岩心钻探工艺,作业效率显著提高。为缩小国内外地质岩心钻探装备的技术差距,延长我国地质找矿施工窗口期,缓解人口老龄化导致的一线施工人员流失及劳动强度过大等问题,中地装(北京)科学技术研究院有限公司研制了一款房厢式全液压自动化岩心钻机。该设备可满足地质钻探野外多场景、四季连续、全天候施工的作业需要,契合新时代健康、安全、环保、智能(Health-Safety-Environment-Intelligent, HSEI)的发展要求。本文最后结合该设备的研制与试验情况,对全液压岩心钻机管柱自动化的发展方向提出了建议。

1 自动化岩心钻机研究现状

岩心钻机自动化发展是提升钻探效率、降低作业强度和保障施工安全的重要途径。国外在自动化岩心钻机领域,围绕全液压驱动、绳索取心工艺及管柱自动化处理等关键技术,已形成较为成熟的技术体系;国内相关研究虽起步较晚,但近年来在装备研制与关键技术攻关方面也取得了较大进展。

1.1 国外自动化岩心钻机

国外自动化岩心钻机起步较早,美国Boart Longyear公司研制的全液压钻机(图1a)通过可前摆动力头和孔口夹持器的配合实现管柱起下钻作业,并配合电液控制的多自由度管柱机械手,可完成最长6 m管柱的自动化起下钻作业,且公开资料显示,其LF300型自动化岩心钻机的自动化效率可达500 m/h。然而,该技术方案需要较大的前场地用于水平摆放管柱,同时在起下钻过程中需要多次拧卸动力头与钻杆之间的丝扣。这不仅增加了丝扣磨损风险,也在一定程度上降低了起下钻效率。

澳大利亚 Titeline 公司生产的自动化岩心钻机虽能实现管柱从存储到孔内的全流程自动化作业,但受钻杆盒长度限制,并不适用于自动化立根作业。瑞典 Epiroc 公司研制的 Diamec Smart 系列自动化岩心钻机(图 1b),安装在主机桅杆侧位的机械手通过上卸扣浮动弹簧实现丝扣的浮动拧卸,可有效保护薄壁钻杆丝扣,并提高机械手拧卸的成功率。该钻机可完成 3 m 钻杆的提升作业,但因机械手电液传感元器件较多、设备运维保养依赖专业技术人员,目前在国内市场的保有量不大。



(a) Boart Longyear自动化岩心钻机



(b) Diamec系列自动化岩心钻机

图 1　自动化岩心钻机

Fig.1　Automatic core drilling rigs

对比上述三种自动化岩心钻机,笔者认为其共同特征如下:均采用动力头完成钻柱的起下钻;均借助机上集成机械手(前摆动力头)实现管柱的运移;主要应用于绳索取心钻探施工,管柱多采用单根或双根水平存放。

1.2　国内自动化岩心钻机

面对国外自动化岩心钻机技术的快速发展,我国地质装备研究人员也意识到地质岩心钻探自动化发展的重要性和紧迫性。孙友宏等[13]研发了一种适用于岩心钻机和非开挖钻机的钻杆自动排放机械手,可将钻杆排架上水平摆放的钻杆单根垂直运移至动力头下方,实现钻杆自动化运移。张喜超等[14]设计了适用于全液压岩心钻机的自动上下钻杆装置,采用可升降的钻杆架配合机械手实现钻杆的自动输送与回收(图 2)。蔡志宏等[15]设计了适用于全液压岩心钻机的钻杆自动运移装置,采用多臂结构的机械手实现对任意摆放钻杆的抓取和排放。

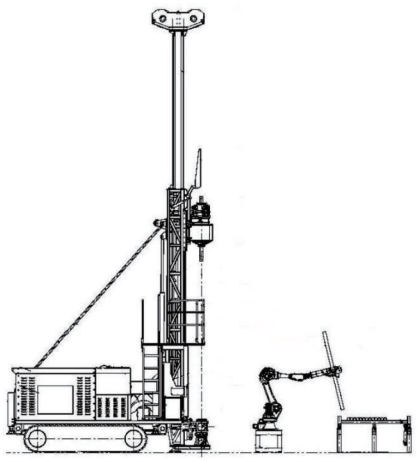


图 2　六轴机械手自动化上下钻杆装置

Fig.2　Six-axis manipulator automatic loading and unloading drill pipe device

连云港前沿重工机械有限公司 2025 年展出的 CR15 管柱机器人采用机械手与钻杆运输车结合的方式,实现存储和移运的模块化设计,通过多自由度机械手加装特制夹爪,可适配不同规格的管柱,但尚未见到该技术相关应用报道。由中国地质大学(北京)牵头联合中国地质装备集团有限公司和北京天合众邦勘探技术股份有限公司承担的“一带一路国家重点研发计划”研制了 XD12R 多工艺自动化钻机(图 3)和 CSD1800ZD 型自动化岩心钻机。两种钻机均采用履带底盘装载的方式,其中 XD12R 采用了顶驱式动力头,配合桅杆前置的摆臂机械手实现钻杆的单根移摆,CSD1800ZD 采用中空卡盘式动力头,配合主卷扬和桅杆侧置的多自由度翻转机械臂可完成 6 m 单根的起放作业。对比两种设备的施工效率,采用立根起下钻作业在深孔作业时的效率更高。

对比上述国内外多种自动化钻机可知,国外机型虽已在硬件上实现了自动化,但其技术先进性更体现在基于扭矩闭环的浮动拧卸控制(如 Epiroc)和



图3 XD12R多工艺自动化岩心钻机

Fig.3 XD12R multi-process automatic core drilling rig

整机动作的时序优化上。然而，这些机型在实际应用中仍存在明显局限：Boart Longyear的自动化岩心钻机依赖开阔的前场布置，Titeline的钻杆盒容量有限（仅支持单根存放），Epiroc的传感器系统过于精密且依赖外方维护。上述限制使其难以适应我国山区矿区场地狭小、追求深孔立根高效起下钻、野外快速维保及环境恶劣且需全天候作业的现实需求。此外，尽管国内多数钻机生产企业都在基于自有的主机形式开展管柱自动化研究[16-19]，但受限于基础工业水平与核心控制技术方面的差距，国内钻机仍存在自动化程度低、起下钻作业效率不足、钻探施工休工期占比较大等问题，目前尚未见到既能满足自动化立根作业需求、又具备良好主机适配性的系统解决方案。因此，亟须研制一种能够满足国内“快速转场、紧凑场地、立根提效、全天候连续作业”要求的管柱自动化解决方案。

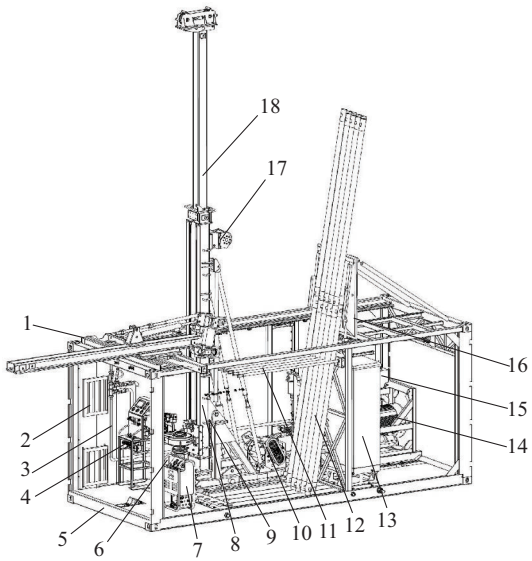
2 房厢式自动化岩心钻机研制

基于上述自动化岩心钻机的研究现状，为提升现有全液压岩心钻机的管柱自动化水平，缩短管柱自动化作业周期，提高起下钻效率，延长全年钻探施工窗口期，从而真正实现自动化减员增效的目标，本文基于卡盘式全液压岩心钻机，提出了一种可实现立根作业的房厢式管柱自动化岩心钻机解决方案。

2.1 钻机整体方案

华北、东北及西北等地区野外作业窗口期较短，低温环境下设备防护能力不足，人员操作条件恶劣。针对这一问题，本方案提出房厢一体化设计思路，将钻机主体与操作维护舱体进行融合，旨在使野外钻探作业摆脱对气候条件的依赖，实现全天候常态化施工。

针对复杂地形矿区对快速转场、紧凑场地及立根提效作业的需求，研发了基于动力头式岩心钻机的6自由度机械手系统。研制的ZDX12FA型岩心钻机及管柱自动化作业系统样机结构见图4。该系统具备一键式自动操作功能，能够完成钻杆自动抓取、转移及与孔口对正，并可协同卡盘完成立根的起下钻作业。国外钻杆普遍采用水平摆放，虽便于机械手取拿，但薄壁钻杆在长期自重作用下易产生弯曲变形，且占用大量钻台面积。因此，本方案采用立于指梁与立根靠板之间的方式，钻杆仅轴向受力，无弯矩作用，对保护绳索取心薄壁钻杆尤为有利，同时节省了钻场横向空间。此外，为满足机械手高效作业与摆放需求，同时确保深孔钻进所需立根的稳定摆放，本装置专门配置了机械手作业支架与立根架。钻机的管柱自动化作业状态如图5所示。



1—机械手；2—换热器；3—管汇；4—主操作台；5—钻机房厢；6—卡盘式动力头；7—机械手操作台；8—主桅杆；9—立根铺台；10—打捞绞车；11—指梁；12—立根；13—电控柜；14—液压动力站；15—液压油箱；16—立根靠板；17—辅助绞车；18—副桅杆

图4 ZDX12FA型全液压自动化岩心钻机

Fig.4 ZDX12FA full-hydraulic automatic core drilling rig



图5　立根自动化作业

Fig.5　Automatic operation of stands

研制的ZDX12FA型自动化岩心钻机的主要性能参数见表1,N口径钻深能力可达1200 m,且采用了给进油缸替代主卷扬的卡盘式动力头结构,动力头的最大扭矩为3000 N·m,最高转速为600 r/min。连续起下钻系统的自动化依托于液压卡盘回转系统和液压油缸升降系统,回转与拧卸合一,卡盘与提引器合一,升降与给进合一,能实现可自动抓取的提吊作业、可连续倒杆的升降作业及可一键自动完成的拧卸作业,简化了操作流程、降低了作业风险、实现了自动化运行,显著提高了起下钻全流程的效率。此外,房厢式设计与钻机主体之间的模块化设计,也为改善作业安全性、延长全年施工作业窗口期及提高作业效率创造了有利条件[20-22]。

2.2　多功能房厢一体化设计

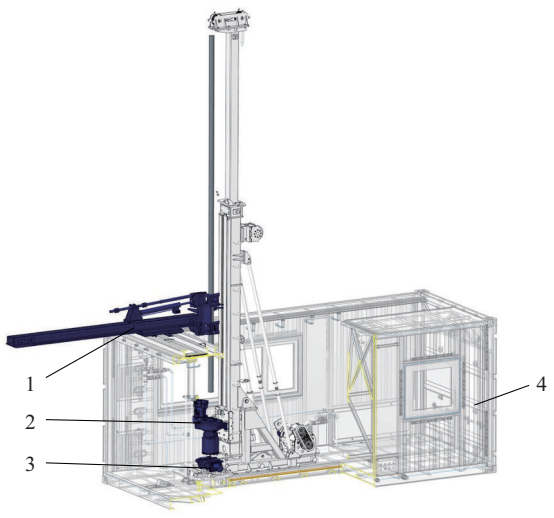
为满足全天候施工需求,开展了一体化多功能房厢设计,如图6所示。该房厢采用标准集装箱外形尺寸,便于设备的搬迁和运输。在功能设计方面,将钻机底座、自动化机械手安装、立根指梁固定等多种功能融入到房厢功能设计中;同时,为便于快速搬迁与作业,将气、水、浆多重管汇与房厢结构融为一体,通过外部快速连接即可实现钻进过程中所需的气体和泥浆循环介质供给。考虑到全天候施工过程中,尤其在北方或冬季施工时人员的御寒需求,采用钻机热能再利用方案,利用全液压钻机运行产生的热量经多组热交换器对房厢内部进行供暖;夏季施工时,亦可切换为强制风冷散热模式。

基于图6所示的房厢式结构,钻机主机采用了

表1　ZDX12FA型钻机主要性能参数

Table 1　Main performance parameters of the ZDX12FA drilling rig

参数名称		性能参数
钻深能力	N口径/m	1200
	H口径/m	750
	P口径/m	500
给进系统	给进力/kN	62
	起拔力/kN	159
	给进行程/mm	3200
动力头	最高转速/(r·min^{-1})	600
	最大扭矩/(N·m)	3000
	最大通径/mm	96
绳索绞车	绳速/(m·min^{-1})	0～313
	拉力/kN	8.7
	容绳量/m	1200
夹持器	夹持能力/kN	324
	夹持范围/mm	Ø53～Ø146
	最大通径/mm	Ø180
液压系统	系统流量/(L·min^{-1})	150/40
	系统压力/MPa	25/21
	驱动功率/kW	75
泥浆系统	最大泵量/(L·min^{-1})	320
	最高压力/MPa	8
	驱动形式	交流变频
主机	质量/kg	7270



1—机械手;2—卡盘式动力头;3—孔口夹持型背钳;4—多功能房厢

图6　研制的ZDX12FA型钻机核心功能模块示意

Fig.6　Core functional modules of the developed ZDX12FA drilling rig

油缸直推式给进，给进油缸既可以实现钻进过程中的加减压，又可以实现动力头起下钻作业。相较于采用主卷扬起下钻的传统方式，该方式既可以优化桅杆的受力状态，又能实现管柱位置的精准控制。同时，通孔式卡盘动力头每次可以提升3.2 m，通过一次倒杆即可实现6 m立根的提放，配合孔口夹持型背钳，动力头在数字化扭矩控制的前提下精准实现绳索取心钻杆的柔性拧卸。位于房厢顶部的机械手通过多层夹爪实现对立根的抓取，在动力头完成丝扣拧卸后通过机械手轴向滚送马达实现对立根的抽放。当机械手进入立根转运流程时，动力头即可进行下一回次的起下管柱作业，二者并行作业，可大幅提高起下钻作业效率。

此外，考虑到机械手抓取立根进行运移时，立根易受运移速度、抓取位置等因素影响产生往复振动与摆动，该问题会造成立根进入指梁及与孔内管柱丝扣对中困难，降低作业效率。因此，本文采用仿真与现场试验结合的方法，对机械手轨迹控制逻辑和管柱抓取位置开展了优化，从而进一步提升管柱自动化作业效率。

3 管柱自动化控制与试验优化

3.1 长管柱自动化控制

钻机和管柱自动化机械手之间采用模块化物理衔接和基于数据反馈的闭环逻辑控制，通过马达转速传感器调节拧卸丝扣过程中的回转速度，同时控制给进油缸的浮动力或浮动速度，从而实现对薄壁绳索取心钻杆的精准旋扣。机械手与给进油缸之间采用多传感器技术，能够实时监测其运移速度和所处位置，并具备空间干涉紧急停车功能，从而确保管柱自动化作业过程中的多工况安全性。

由图7管柱自动化控制流程框图可以看出，自动化装置的起下钻效率受动力头起拔、下放速度及多机构交叉运行时间等因素影响。通过不断的厂内调试与测试，初步提出基于双单根的起下钻作业模式。该模式可以有效平衡起下钻效率与管柱运移稳定性之间的关系。同时，也尝试通过进一步加长立根长度及高效抑制管柱运移振动等措施来提高起下钻效率，从而更好地将该设备及其自动化解决方案推向实际应用[23-25]。

3.2 长管柱抑振优化研究

设计的机械手整体结构见图8。机械手具备前后左右移动、轴向滚送、倾角调节等功能[26]。当机械手夹持长度6 m、壁厚仅约5 mm的绳索取心钻杆快速移运时，急停或启动所产生的惯性力极易引发杆柱弹性摆动。若摆幅过大，轻则导致丝扣对中失

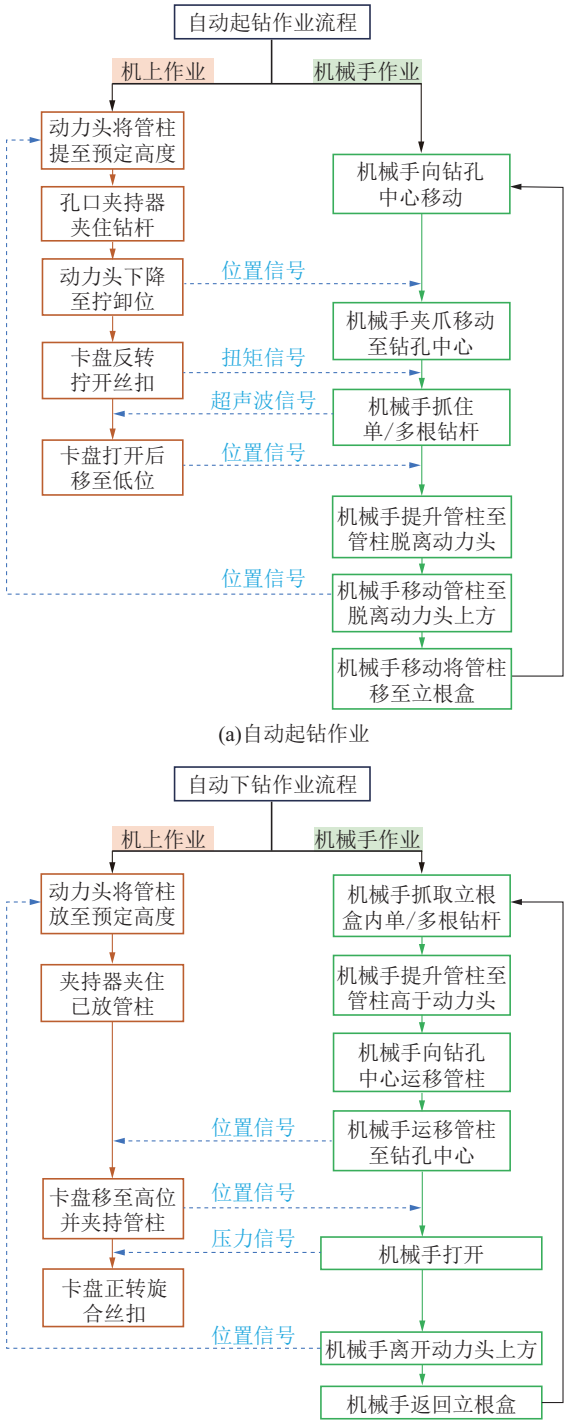


图7 自动起下钻作业流程

Fig.7 Flowcharts of automatic tripping operations

效,造成拧卸失败;重则撞击房厢壁或指梁,引发安全事故。因此,有必要在设计阶段明确夹持位置与运动加速度对振动的影响边界,从而为控制系统提供底层输入参数。为此,本文开展了基于双单根的管柱动力学仿真分析。

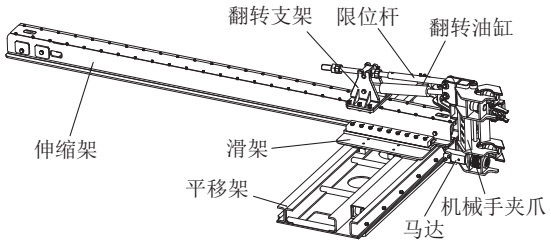


图 8　机械手整体结构

Fig.8　Schematic diagram of the overall structure of the manipulator

利用 ADAMS 软件进行了机械手与立根的刚柔耦合动力学仿真。以 Ø89 mm 钻杆为模型开展了仿真模拟。在长度为 6 m 的立根(双单根)上,以中间位置为起始点(夹持点 1),向下设置了四个夹持点,各相邻夹持点的间距均为 320 mm,分别作为夹持点 2、3、4、5;左右方向设置了五个加速度变量(48～240 mm/s²),前后方向运移设置了五个加速度变量(96～480 mm/s²),各加速度对应唯一运动模式。通过分析二者对钻杆振动的影响规律,能够确定适配动力头提钻作业的夹持与运动策略,在保证立根运移稳定性的同时进一步提高作业效率。

仿真结果如图 9 所示,当机械手夹持立根前移急停时,钻杆顶端摆幅随加速度增大呈显著上升趋势,夹持点 1 附近摆幅最低,运移稳定性最优,夹持点越靠近钻杆底面,钻杆摆幅越大,振动风险越高;在右移急停工况下,钻杆摆幅随加速度增大呈正相关,整体振动幅度可控,稳定性良好;受机械手夹持滚轮结构与安装位置约束,相同加速度条件下,右移急停的钻杆摆幅远小于前移急停,加速度可选区间更宽泛。

由于机械手在夹持运移作业时具有“快进慢退”的动作特点,因此,立根从孔口移送至指梁为高振动风险工况。结合上述振动影响规律,本文给出了兼顾稳定与时间匹配的核心作业参数。

综上所述,立根作业时,夹持位置应选在夹持点 1 附近,此时,钻杆的摆幅最低。这是由于钻杆自由端长度较短,可从结构层面抑制振动,保障运移

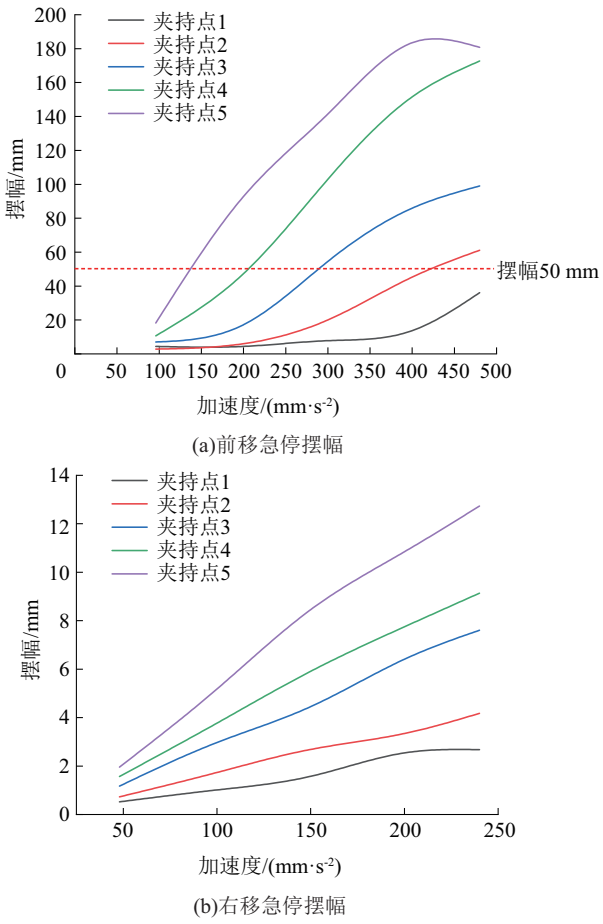


图 9　机械手单方向急停摆幅

Fig.9　Swing amplitude of stand vibration during unidirectional emergency stop of the manipulator

过程的稳定性。另外,由于相同加速度条件下,前移急停的钻杆摆幅远大于右移急停,因此,前移工况为高风险工况,作业时需选取中低加速度,在保证整体运动时间与动力头提钻时间精准匹配的同时,有效控制钻杆所受惯性力,避免过度摆动;右移工况夹持约束性好、整体稳定性高,作业时可选取中高加速度,在钻杆摆幅可控的范围内缩短运动时间,从而提升工序衔接效率。

因此,在实际管柱自动化作业过程中,为了实现立根的平稳高效运移,需精准把控夹持位置与加速度大小这两大核心因素。以夹持点 1 为核心夹持位置抑制振动,针对不同运动方向进行加速度优选,使对应的运动模式能保证钻杆在摆幅较小的前提下,实现与动力头提钻时间的节奏匹配,从根本上避免“过快摆杆、过慢低效”的问题,保障岩心钻机管柱自动化作业的连续、可靠进行。

3.3 工程验证与优化

经过对管柱自动化机械手控制逻辑的优化和轨迹控制，在厂内开展了钻孔验证试验（图10）。验证钻孔采用Ø89 mm外平钻杆，搭配Ø95 mm金刚石钻头进行钻进，钻孔深度为35 m。钻进验证结果表明，钻机各项功能指标运行正常。依据多次模拟起下钻试验的统计数据：当采用6 m立根进行起下钻作业时，可以在44 s内完成单立根起下钻，起下钻效率达到350 m/h；当采用9 m立根进行起下钻作业时，可以在61 s内完成单立根起下钻，效率可达460 m/h。此外，工程验证还发现，机械手夹持位置越靠近立根中段，其顶部（近指梁处）与底部（对扣处）的振动幅度越小。因此，通过在机械手运移过程中同步进行管柱轴向滚送的方式，可有效控制管柱两端的振幅，进而提高入指梁与对扣作业的效率。

通过对目前常用岩心钻探装备施工情况调研发现，常规液压类钻机采用卷扬提吊＋人工拧卸的方式，起下钻效率约为400 m/h；采用高钻塔配合卷扬机与动力钳的立轴钻机，起下钻效率可达700 m/h；而公开资料显示美国Boart Longyear公司LF300型自动化岩心钻机的起下钻效率约为500 m/h。基于上述不完全数据统计，得到如表2所示的不同类型岩心钻机的起下钻效率对比表。由表可知，本文所研制的自动化作业装置能够实现较好的起下钻效率，且相较于便携式岩心钻机和常规全液压岩心钻机，可极大减轻劳动强度。



图10 ZDX12FA型自动化钻机试验

Fig.10 Experimental drilling of the ZDX12FA automatic rig

表2 典型岩心钻机起下钻效率对比

Table 2 Comparison of tripping efficiency of typical drilling rigs

钻机类型	提吊方式	拧卸作业方式	起下钻立根长度/m	钻杆摆放方式	施工班组人数/人	起下钻效率/(m·h^{-1})
便携钻机	动力头	人工	1.5	平铺	2～3	350
全液压岩心钻机	主卷扬	人工	6	平铺	3～5	400
Boart Longyear LF300	动力头	机械化	6	平铺	3～5	500
立轴钻机	主卷扬	动力钳	15	立靠	4～5	630
立轴钻机	主卷扬	动力钳	18	立靠	4～5	700
ZDX12FA	卡盘式动力头	机械化	6	立靠	2～3	350
ZDX12FA	卡盘式动力头	机械化	9	立靠	2～3	460

4 结论与展望

（1）国内钻机制造厂家已初步认识到管柱自动化作业对促进地质岩心钻探减员增效的重要意义。通过装备升级延长野外地质勘探有效作业窗口的思路具有可行性。房厢式钻探工作环境可大幅降低自然环境对施工人员及设备的影响，其板片式结构有利于提高运输效率与现场组装便捷性，而房厢与钻机功能的融合，既可满足多样化的施工需求，又具备灵活配置的优势。

（2）传统全液压岩心钻机采用卷扬＋人工方式起下6 m立根，动力头式便携式岩心钻机仅能进行1.5 m单根起下钻。相比之下，本文基于油缸给进系统的通孔卡盘式动力头，既可满足钻进需求，又可实现6或9 m立根的提升和丝扣拧卸，并配合多传感器技术实现对管柱位置的精准控制，为起下钻管柱自动化的实现奠定了基础。

（3）基于立根的自动化机械手配合卡盘式动力头，可实现快速起下钻和管柱排列，相较于单根起下钻模式，其作业效率提升数倍。此外，与国外水平式立根摆放方式相比，本文研制的立式立根摆放

方式对管柱非工作状态下的受力更为有利,尤其适用于地质绳索取心薄壁钻杆,且场地占用面积大幅降低。

(4)基于多传感器技术的管柱运移全流程闭环运动轨迹精准控制仍有待进一步研究和优化,可通过PLC自主逻辑控制,真正实现钻进与起下钻过程中的管柱运移控制。同时,基于该模式的多机型适配自动化装置亦有待广大科研工作者关注与攻关,未来可结合AI数据大模型技术,持续推进多机型、模块化、智能化全流程管柱自动化地质勘探装备的研发。

参考文献(References):

[1] 张鑫鑫,梁博文,张晓龙,等.智能钻井装备与技术研究进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):20-30.
ZHANG Xinxin, LIANG Bowen, ZHANG Xiaolong, et al. Research progress of intelligent drilling equipment and technology [J]. Coal Geology & Exploration, 2023,51(9):20-30.

[2] 梁春苗.煤矿用钻孔机器人自动加杆识别与钻臂定位误差补偿研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2022.
LIANG Chunmiao. Study on recognition of automatic drill pipe-adding and positioning error compensation of drilling boom for the drilling robot in coal mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2022.

[3] 张林霞,李艺,周红军.我国地质找矿钻探技术装备现状及发展趋势分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(2):1-8.
ZHANG Linxia, LI Yi, ZHOU Hongjun. Analysis on the present situation of drilling technical equipment and the development trend of geological prospecting in China[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(2): 1-8.

[4] 李建华,刘凡柏.YDX-3型全液压岩心钻机的研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(S1):46-49.
LI Jianhua, LIU Fanbai. Research & manufacture of YDX-3 all hydraulic core drill and the application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(S1): 46-49.

[5] 刘凡柏,李文秀,王庆晓,等.YDX-5型全液压岩心钻机的研制及应用[C]//第十六届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会.南宁:中国地质学会探矿工程专业委员会,2011:50-57.
LIU Fanbai, LI Wenxiu, WANG Qingxiao, et al. Research & manufacture of YDX-5 all hydraulic core drill and the application [C]// Proceedings of the 16th National Academic Annual Conference on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling). Nanning: Professional Committee of Exploration Engineering, China Geological Society, 2011:50-57.

[6] 徐国辉,梁俭,刘鹏,等.CSD1800A型钻机在青藏高原应用效果及对比分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(10):42-44,54.
XU Guohui, LIANG Jian, LIU Peng, et al. Application effect and comparison analysis of CSD1800A drilling machine in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(10):42-44,54.

[7] 焦映辉,郭宪军.CSD1800X型履带式全液压动力头钻机的应用与实践[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集.哈尔滨:中国地质学会探矿工程专业委员会,2015:72-75.
JIAO Yinghui, GUO Xianjun. Application and practice of CSD1800X tracked full-hydraulic power head drilling machine [C]//Proceedings of the 18th National Academic Annual Conference on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling). Harbin: Professional Committee of Exploration Engineering, China Geological Society, 2015:72-75.

[8] 白晓峰.CSD1300L全液压岩心钻机钻进过程参数监控系统研究[D].北京:中国地质大学(北京),2017.
BAI Xiaofeng. The research of drilling process parameters monitoring system on CSD1300L hydraulic core drilling machine[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.

[9] 程志.CSD1800A动力头式全液压岩心钻机使用体会[J].内蒙古煤炭经济,2019(3):33-34.
CHENG Zhi. Operation experience of CSD1800A power head full hydraulic core drilling machine[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2019(3):33-34.

[10] 文治国.连云港黄海机械厂HYDX-5型全液压岩心钻机[J].地质装备,2007,8(1):37.
WEN Zhiguo. Lianyungang Yellow Sea Machinery Factory HYDX-5 type fully hydraulic core drilling machine[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2007,8(1):37.

[11] 高明帅,沈怀浦,臧臣坤,等.XD-800型便携式全液压岩心钻机的研制[J].地质装备,2018,19(3):3-6.
GAO Mingshuai, SHEN Huaipu, ZANG Chenkun, et al. The development of XD-800 portable hydraulic coring drill [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018,19(3):3-6.

[12] 高明帅,沈怀浦,何磊,等.XD系列全液压钻机液压系统分析及冷却系统设计[J].地质装备,2019,20(1):18-20.
GAO Mingshuai, SHEN Huaipu, HE Lei, et al. Cooling system design and hydraulic system analysis of XD series hydraulic drilling machine[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2019,20(1):18-20.

[13] 孙友宏,张飞宇,王清岩,等.适用于岩心钻机的钻杆自动排放机械手:CN201420460043.3[P].2014-12-31.
SUN Youhong, ZHANG Feiyu, WANG Qingyan, et al. An automatic drill rod storage and handling manipulator for core drills: CN201420460043.3[P]. 2014-12-31.

[14] 张喜超,陈赤武,刘文杰.一种全液压岩心钻机用自动上下钻杆装置:CN202610395335.0[P].2026-05-05.
ZHANG Xichao, CHEN Chiwu, LIU Wenjie. An automatic drill pipe loading and unloading device for fully hydraulic core drilling rig: CN202610395335.0[P]. 2026-05-05.

[15] 蔡志宏,赵慧,王安新,等.一种岩心钻机钻杆自动排放机械手:CN201810777915.1[P].2018-12-07.
CAI Zhihong, ZHAO Hui, WANG Anxin, et al. An automatic drill rod stacking manipulator for a core drill: CN201810777915.1[P]. 2018-12-07.

[16] 高科,郭京坤,吕兰,等.深部大陆科学钻探装备关键技术发展

综述[J].吉林大学学报(地球科学版),2026,56(1):295-314.
GAO Ke, GUO Jingkun, LÜ Lan, et al. Review on the development of key technologies for deep continental scientific drilling equipment[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026,56(1):295-314.

[17] 么玉鹏,姚坚毅,张尧禹,等.国内外综合钻探船及海洋钻探装备研发现状[J].中国港湾建设,2025,45(8):8-15,28.
YAO Yupeng, YAO Jianyi, ZHANG Yaoyu, et al. Research and development status of integrated drilling vessels and offshore drilling equipment at home and abroad[J]. China Harbour Engineering, 2025,45(8):8-15,28.

[18] 张金昌,尹浩,刘凡柏,等.自动化智能化地质岩芯钻探技术装备研发与应用[J].地质论评,2022,68(4):1382-1392.
ZHANG Jinchang, YIN Hao, LIU Fanbai, et al. Development and application of intelligent and automatic drilling technology and equipment[J]. Geological Review, 2022,68(4):1382-1392.

[19] 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.

[20] 陈夫旭.钻杆自动移摆机械手参数化研究及其系统开发[D].北京:中国地质大学(北京),2022.
CHEN Fuxu. Parametric research and system development of drill pipe automatic swing manipulator[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2022.

[21] 刘欣,胡远彪.地质钻杆移摆系统运动学及动力学仿真实验研究[J].煤矿机械,2023,44(6):56-59.
LIU Xin, HU Yuanbiao. Experimental study on kinematic and dynamic simulation of geological drill pipe swing system[J]. Coal Mine Machinery, 2023,44(6):56-59.

[22] 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.
ZANG Chenkun, SUN Junying, GAO Mingshuai, et al. Development of pipe string handling system for XD50DB core drilling rig[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2022,23(1):3-8.

[23] 张越.地质钻杆自动排放系统设计与分析[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
ZHANG Yue. Design and analysis of automatic handle system of geological drill pipe[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.

[24] 张强,王定亚,邹涛,等.8000 m四单根立柱自动化钻机研制[J].石油矿场机械,2021,50(4):66-70.
ZHANG Qiang, WANG Dingya, ZOU Tao, et al. Research and development of 8000 m four-joint stand drilling rig[J]. Oil Field Equipment, 2021,50(4):66-70.

[25] 刘蓓,杨可,张雄.国内绿色勘查地质岩心钻探装备进展与发展建议[J].地质与勘探,2026,62(4):687-702.
LIU Bei, YANG Ke, ZHANG Xiong. Progress and development suggestions of geological core drilling equipment for green exploration in China[J]. Geology and Exploration, 2026,62(4):687-702.

[26] 张凯,沈怀浦,高明帅,等.一种适用于极地房厢式钻机的钻杆运移装置和运移方法:CN202510856161.9[P].2025-09-09.
ZHANG Kai, SHEN Huaipu, GAO Mingshuai, et al. A drill rod handling device and handling method applicable to polar enclosed drilling rigs: CN202510856161.9[P]. 2025-09-09.

(编辑 王跃伟)