天井钻机钻杆自动输送技术研究与应用*

颜武刚[1]，张连军[2]，唐世浩[1]，谭崎文[1]，熊钰明[1]

（1.湖南创远高新机械有限责任公司， 湖南 长沙 410205；
2.安标国家矿用产品安全标志中心有限公司， 北京 100013）

摘要：针对传统天井钻机施工依赖人工辅助完成钻杆的搬运和输送，存在自动化程度低、劳动强度大、效率低、安全风险高等问题，为满足天井钻机单班无人化施工要求，提出了“钻杆输送-钻杆抓取-钻杆转运-钻杆接卸”的自动化解决方案。首先，通过对天井钻机钻杆自动输送过程进行分析，明确了钻杆自动输送的功能需求和运动特点；其次，研发了钻杆自动输送装置和液压机械手，并应用有限元分析软件对其进行强度校核；最后，研究了自动输送液控系统及其控制逻辑，并通过现场应用验证了该技术的可行性。生产实践表明，天井钻机钻杆自动输送技术具有良好的定位精度、运动性能和稳定性，可准确、快速地输送、抓取、转运和存放钻杆，能够实现减少作业人数、降低安全风险和提升综合作业效率，满足天井钻机单班无人化安全高效施工的实际工程需求。

关键词：天井钻机；钻杆自动输送；液压机械手；单班无人化；强度校核

中图分类号：TD421 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2025)11-0233-09

Research and Application of Automatic Conveying Technology of Drill Pipe for Shaft Drilling

YAN Wugang[1], *ZHANG Lianjun*[2], *TANG Shihao*[1], *TAN Qiwen*[1], *XIONG Yuming*[1]

(1.Hunan Chuangyuan High-Tech Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205, China;
2.China Mining Products Safety Approval and Certification Center, Beijing 100013, China)

Abstract: To address the issues of low automation, high labor intensity, inefficiency, and significant safety risks in traditional shaft drilling operations, which rely on manual assistance for drill pipe handling and conveying, an automated solution was proposed to meet the requirements of single-shift unmanned shaft drilling. This solution encompasses “drill pipe conveying, drill pipe grabbing, drill pipe transportation, and drill pipe unloading”. Firstly, by analyzing the automatic conveying process of the drill pipe in the shaft drilling, the functional requirements and motion characteristics of the automatic conveying of the drill pipe were clarified. Secondly, an automatic drill pipe conveying device and a hydraulic manipulator were developed, and their strength was verified using finite element analysis software. Finally, the hydraulic control system for automatic conveying and its control logic were studied, and the feasibility of the technology was verified through on-site application. Production practice have shown that the automatic conveying technology of drill pipe for shaft drilling has good positioning accuracy, motion performance and stability, and can realize accurate and quick conveying, grabbing, transporting, and storing drill pipes. This technology can reduce the number of workers, decrease the safety risks, and improve comprehensive operational efficiency, meeting the practical engineering needs of efficient construction of single-shift shaft unmanned drilling.

Key words: Shaft drilling, Automatic conveying of drill pipe, Hydraulic manipulator, Single shift unmanned operation, Strength verification

0 引言

在地下竖向工程建设中，天井钻机是一种取代传统钻爆法施工，以机械破岩为基础，能够实现高效连续钻进的采掘装备，具有作业安全、成井质量好、掘进速度快等优点[1-2]，在地下矿山开采、水力发电、公路铁路隧道、人防军事工程、市政工程等领域得到了越来越广泛的应用[2-6]。

* **收稿日期**：2024-12-10
基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFC2907405)；湖南省重点研发计划项目(2024JK2028)
作者简介：颜武刚(1985—)，男，湖南长沙人，硕士，高级工程师，主要从事智能矿山装备研究。E-mail：yanwugang1985@163.com

我国传统天井钻机存在智能化程度低、管理粗放、综合作业效率低、施工质量严重依赖人工经验等不足,主要以现场遥控和手动操作为主,钻杆的搬运和输送依赖人工辅助完成,无法实现天井施工全流程智能自主作业。

为了解决钻机类采掘装备作业过程中钻杆自动抓取、搬运、接卸、更换、定位等难题,许多学者针对凿岩、钻探、锚固类钻机设备的自动化进行了不同程度的探索。王佳等[7]设计开发了一种基于六轴机械手自动加卸钻杆的一体式钻孔机器人及控制方法,实现了煤矿井下钻机钻孔作业的自动化;张溟晨等[8]设计了一种基于深度学习算法的钻杆定位系统,并将其应用于 ZYWL-4000Y 智能钻探钻机提升钻杆装卸效率;万祖保等[9]基于机器视觉及工业机器人设计了钻杆自动搬运系统,实现了煤矿钻机钻杆搬运的自动化;张强等[10]设计了一套锚杆自动抓取与搬运机械手装置,实现了煤矿掘进机锚杆自动抓取与搬运;马振纲[11]提出了一种自动换杆机构思路,用于解决煤矿钻机存放钻杆和自动换杆的问题;张刚等[12]设计了全断面电控钻机加杆装置及控制系统,该系统可实现钻杆的自动输送、辅助上扣、存储与搬运、安全保护等功能;颜武刚等[13-14]基于双阀芯电液数字阀控制技术,设计了一种自动接卸钻杆液压机械手,用于实现大直径深孔钻机钻杆的自动抓取、转运和放置。综上所述,目前国内对于采矿、凿岩及钻探类设备钻杆抓取、搬运、接卸及存储等环节的自动化研究较多,而关于天井钻机钻杆自动输送技术方面的研究较少。

本文以实现天井钻机单班无人化施工为目标,提出“钻杆输送-钻杆抓取-钻杆转运-钻杆接卸”的自动化解决方案,研发钻杆自动输送装置、重载液压机械手及液控系统,实现天井钻机自动输送钻杆,并通过工业应用验证了该技术的可行性。研究成果可为实现天井钻机全流程智能自主作业提供技术支撑。

1 钻杆自动输送、存储过程分析

1.1 导孔作业钻杆自动输送过程分析

天井钻机进行导孔作业时,根据作业指令控制自动输送装置,将钻杆准确移动至机械手抓取的初始位置。机械手卡爪抓取钻杆后,通过转臂和起落组合动作自动完成钻杆的转运和对中,动力头回转转速和推进油缸运动速度,通过闭环控制完成自动接杆[15]。导孔作业钻杆自动输送过程如图 1 所示,输送流程如图 2 所示。

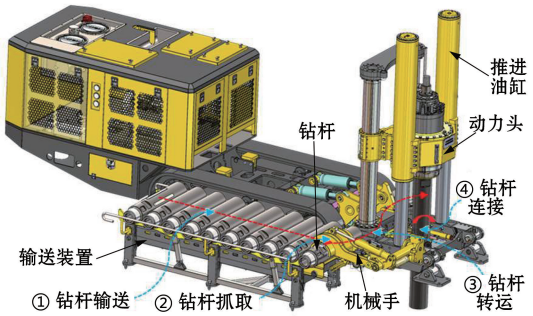


图 1 导孔作业钻杆自动输送

Fig.1 Automatic conveying of drill pipes in pilot hole operation

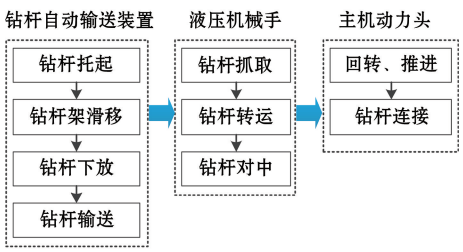


图 2 钻杆自动输送流程

Fig.2 Automatic conveying process of drill pipes

1.2 扩孔作业存储自动钻杆过程分析

天井钻机自下而上进行扩孔作业,每施工一根钻杆深度就需要卸除一根钻杆。当推进油缸提升到指定位置后,控制器发出卸杆作业指令,机械手卡爪抓取钻杆,动力头回转转速和推进油缸运动速度,通过闭环控制完成自动卸杆,再通过转臂和起落组合动作自动完成钻杆的转运、放置和存储。扩孔作业钻杆自动存储过程如图 3 所示,存储流程如图 4 所示。

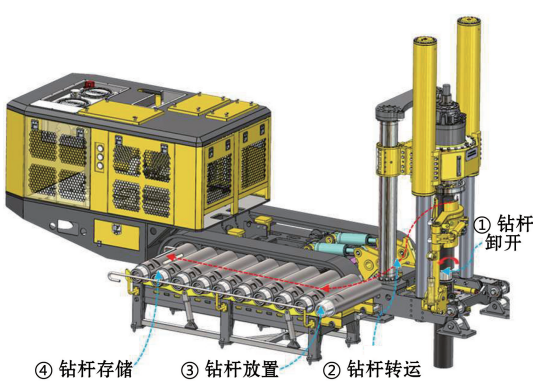


图 3 扩孔作业钻杆自动存储

Fig.3 Automatic storage of drill pipes in reaming operation

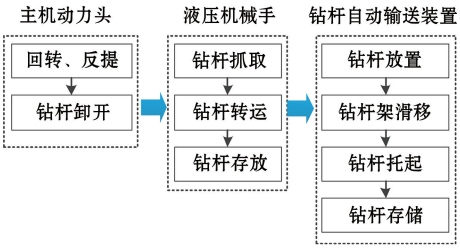


图 4　钻杆自动存储流程

Fig.4　Automatic storage process of drill pipes

钻杆自动输送技术通过集成数据采集传感装置、自动控制系统及高效执行机构，实现钻杆的自动化输送。在导孔作业时，该系统能将钻杆从存储装置自动抓取并精准对接至钻机工作位，完成稳定钻进；在扩孔作业时，能实现从钻机工作位到存储装置的自动卸杆与存储。

2　钻杆自动输送装置研究

2.1　钻杆自动输送装置设计要求

通过对多个天井钻机施工过程进行统计分析，发现单班平均进尺深度约为 10～15 m，消耗约 8～10 根钻杆，据此对钻杆自动输送装置提出如下设计要求：

(1) 可存储单班无人作业钻杆的数量；

(2) 单根钻杆重 205 kg，因此要求装置具有足够的强度，保证长期运行过程的稳定可靠；

(3) 根据控制器发出的作业指令，可通过传感装置自动控制输送装置，准确完成钻杆的输送和定位，便于机械手顺利抓取钻杆；

(4) 由于输送装置承载钻杆质量较大，升降油缸在装置下落过程中承受的是变化的负负载，因此要求装置在升降和平移运动过程中保持平稳，防止过大冲击损坏输送装置。

2.2　钻杆自动输送装置设计及输送过程分析

2.2.1　钻杆自动输送装置设计

根据上述设计要求，钻杆自动输送装置按 10 根钻杆的存储容量进行设计，主要由底座、升降板、滑架和连杆机构等组成，如图 5 所示。其中滑架用于存储和水平输送钻杆，升降板用于将钻杆托起，与滑架组合实现钻杆的自动输送[16]。

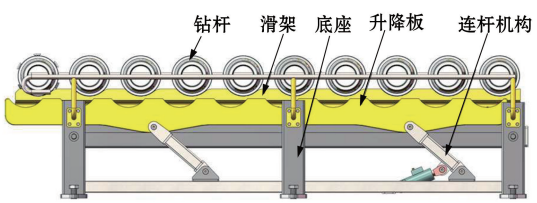
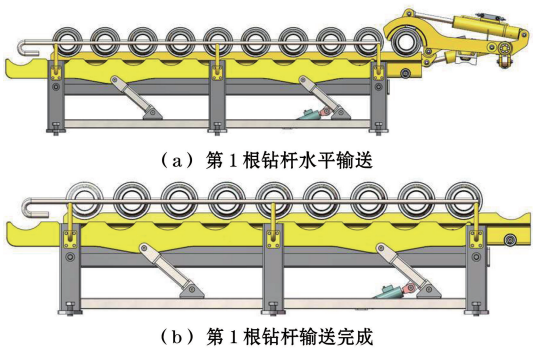


图 5　钻杆自动输送装置

Fig.5　Automatic conveying device of drill pipes

2.2.2　导孔作业钻杆自动输送过程分析

(1) 第 1 根钻杆自动输送。导孔作业前，将钻杆自动输送装置存储满 10 根钻杆(初始状态见图 5)。开始导孔作业，第 1 根钻杆输送只需要通过平移油缸驱动滑架向前移动至机械手抓取的初始位置，当传感装置检测钻杆移动到位后，机械手进行第 1 根钻杆的抓取和转运，第 1 根钻杆自动输送完成，如图 6 所示。



(a) 第 1 根钻杆水平输送

(b) 第 1 根钻杆输送完成

图 6　第 1 根钻杆自动输送

Fig.6　Automatic conveying of the first drill pipe

(2) 第 2 根钻杆自动输送的控制过程为：

1) 自动检测，当传感装置检测到第 1 根钻杆被机械手转运后，控制器发出指令，自动输送第 2 根钻杆；

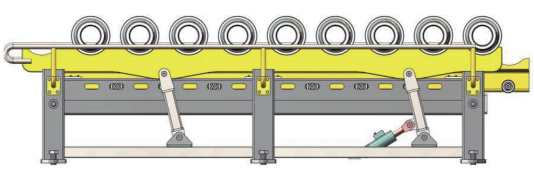
2) 控制升降油缸完成升降板的举升，将剩余的 9 根钻杆托起，使滑架处于空载状态，如图 7(a)所示；

3) 控制平移油缸完成滑架缩回，如图 7(b)所示；

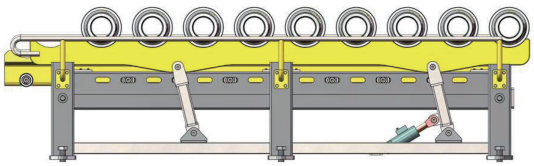
4) 控制升降油缸完成升降板的下落，将剩余的 9 根钻杆重新放置于滑架，此时第 2 根钻杆位于原来第 1 根钻杆的位置，完成了钻杆位置切换，如图 7(c)所示；

5) 控制平移油缸驱动滑架向前移动至机械手抓取的初始位置，完成第 2 根钻杆的自动输送循环，如图 7(d)所示。

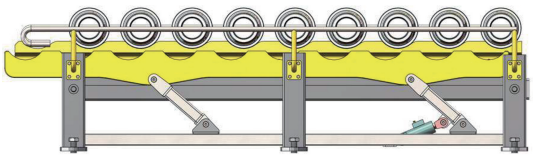
后续自动导孔作业过程中，按此方式自动输送钻杆，当存储的 10 根钻杆输送完成后，再重新存储 10 根钻杆至自动输送装置，重复以上步骤直至完成整个自动导孔作业。



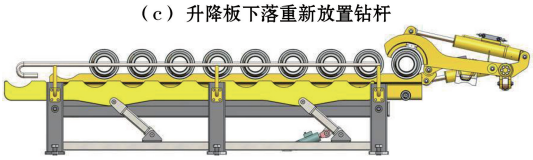
(a) 升降板托起钻杆



(b) 滑架缩回



(c) 升降板下落重新放置钻杆



(d) 滑架前移

图 7 钻杆自动输送循环

Fig.7 Automatic conveying cycle of drill pipes

2.2.3 扩孔作业钻杆自动存储过程分析

(1) 第 1 根钻杆自动存储。当扩孔作业完成 1 根钻杆的深度后,控制系统检测识别并停止反扩作业,系统通过闭环控制驱动动力头反转和推进油缸反提完成自动卸杆,机械手通过转臂和起落组合动作完成钻杆的抓取、转运、放置和存储。至此,第 1 根钻杆自动存储完成,如图 8 所示。

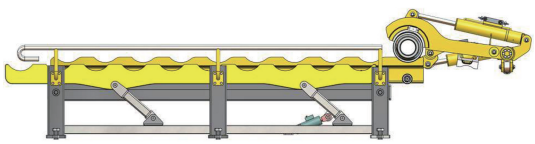


图 8 第 1 根钻杆自动存储

Fig.8 Automatic storage of the first drill pipe

(2) 第 2 根钻杆自动存储的控制过程为:

1) 自动检测,当传感装置检测到第 1 根钻杆被机械手放置在滑架时,控制器发出自动存储指令;

2) 控制平移油缸完成滑架缩回,如图 9(a)所示;

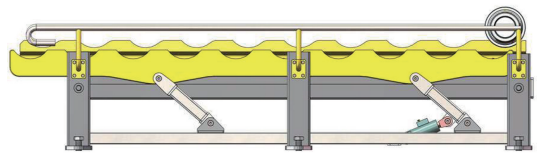
3) 控制升降油缸完成升降板的举升,将存储的第 1 根钻杆托起,使滑架处于空载状态,如图 9(b)所示;

4) 控制平移油缸完成滑架伸出至机械手存储钻杆的初始位置,如图 9(c)所示;

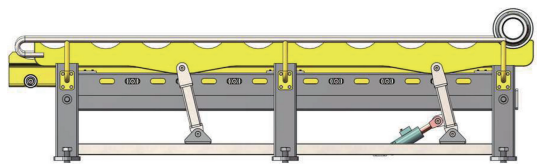
5) 控制升降油缸完成升降板的下落,将存储的第 1 根钻杆重新放置于滑架,完成钻杆存储位置的切换,如图 9(d)所示;

6) 进入第 2 根钻杆自动存储循环,如图 9(e)所示。

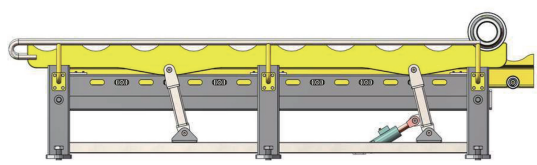
后续扩孔作业过程中,按此自动存储方式进行钻杆存储,当存储满 10 根钻杆时,人工辅助将存储的钻杆运离自动输送装置,如此循环直至完成整个自动扩孔作业。



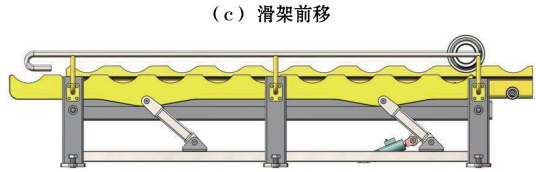
(a) 滑架缩回



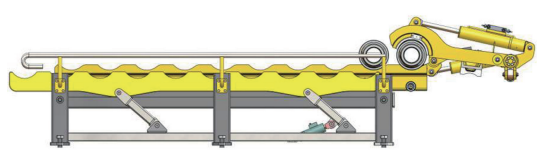
(b) 升降板托起钻杆



(c) 滑架前移



(d) 升降板下落重新存储钻杆



(e) 钻杆自动存储循环

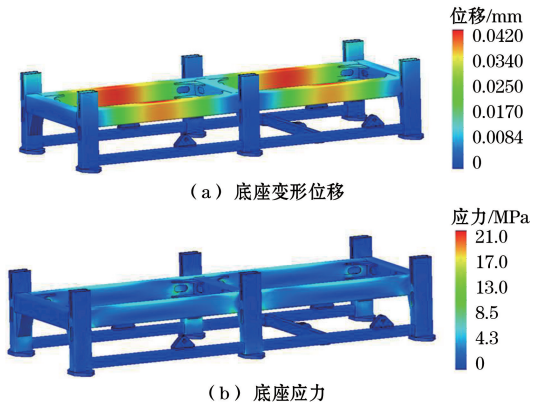
图 9 钻杆自动存储循环

Fig.9 Automatic storage cycle of drill pipes

2.2.4 钻杆自动输送装置结构强度分析

(1) 静态承载状态强度分析。钻杆自动输送装置存储满 10 根钻杆时处于满负载状态,此时全部负载作用于底座,该状态下的负载由底座两侧的横梁承受。单根钻杆重 205 kg,10 根钻杆的总质量为 2 050 kg,通过有限元仿真软件对底座进行静态强度校核分析,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,当底座承受 10 根钻杆的静态负载时,底座最大变形位移位于横梁中间,为 0.042 mm,位移变形量非常小;最大应力出现在横梁焊缝处,为 21 MPa。底座最大变形与应力均在设计允许范围内,符合要求。



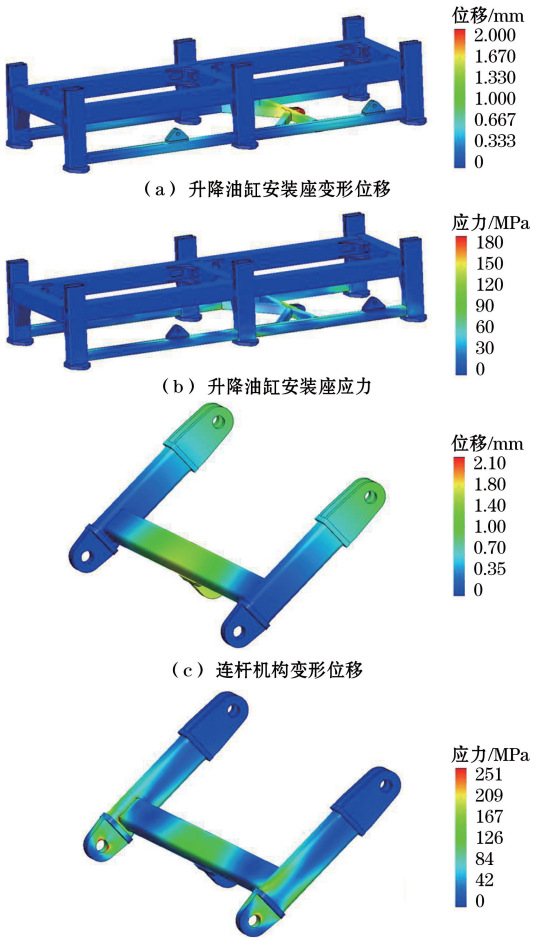
（a）底座变形位移

（b）底座应力

图 10　静态承载状态强度分析

Fig.10　Strength analysis of static bearing state

（2）托起状态强度分析。升降油缸驱动连杆机构推动升降板将 10 根钻杆托起的过程中，升降油缸安装座和连杆机构的结构强度是保证钻杆安全托起和下落的关键。通过有限元仿真软件进行静态强度校核分析，结果如图 11 所示。



（a）升降油缸安装座变形位移

（b）升降油缸安装座应力

（c）连杆机构变形位移

（d）连杆机构应力

图 11　托起状态强度分析

Fig.11　Strength analysis of lifting state

由图 11 可知，在升降油缸驱动连杆机构推动升降板将 10 根钻杆托起的过程中，升降油缸安装座最大变形位移为 2.0 mm，最大应力为 180 MPa；连杆机构最大变形位移为 2.1 mm，最大应力为 251 MPa。二者的结构强度均符合要求。

3　机械手研究

3.1　机械手设计及钻杆转运过程分析

3.1.1　机械手设计

天井钻机通过机械手完成钻杆转运[17]，机械手的重复定位精度影响抓取或存放钻杆时与自动输送装置的衔接，以及接卸钻杆时与动力头接杆装置的对中。机械手采用卡爪、转臂和起落三动作组合式设计，如图 12 所示。

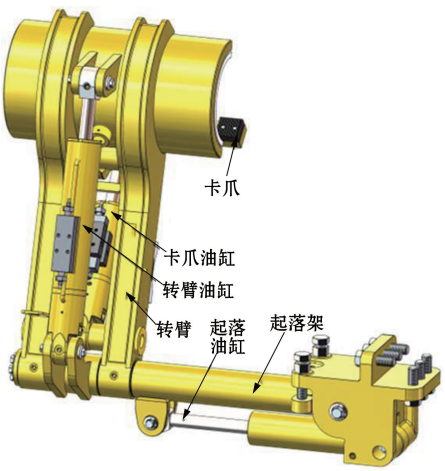
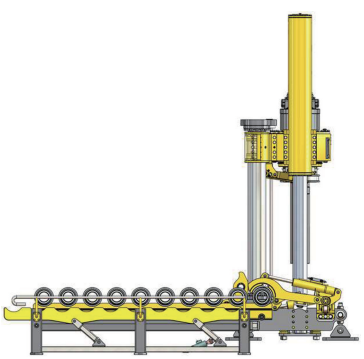


图 12　机械手

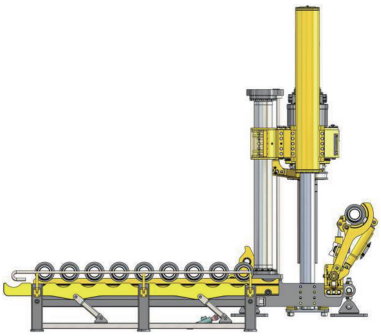
Fig.12　Manipulator

3.1.2　钻杆转运过程分析

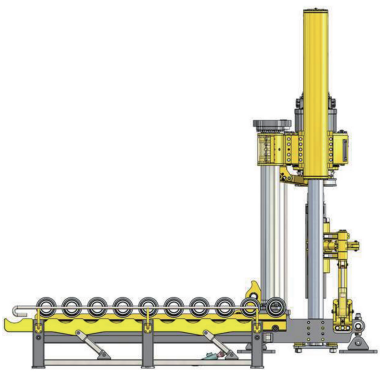
导孔作业时，机械手将钻杆从自动输送装置转运至动力头下方，转运过程为：卡爪抓取钻杆→转臂、起落组合转运钻杆→钻杆对中→自动接杆；扩孔作业时，机械手将钻杆从动力头下方转运至自动输送装置，转运过程与导孔作业相反：卡爪抓取钻杆→自动卸杆→转臂、起落组合转运钻杆→钻杆存放。钻杆转运过程如图 13 所示。



（a）抓取/存放钻杆



(b) 转运钻杆



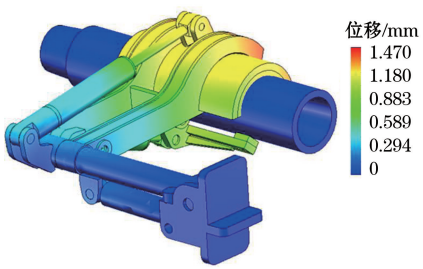
(c) 连接/卸开钻杆

图 13 钻杆转运过程

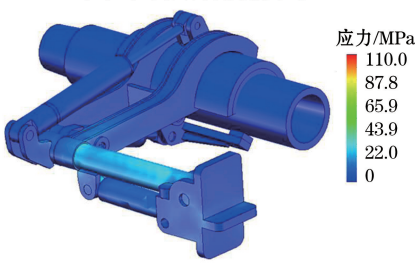
Fig.13 Transferring process of drill pipes

3.2 机械手结构强度分析

(1) 水平抓杆状态强度分析。机械手转臂油缸完全伸出,使转臂处于水平最远状态抓取钻杆,该状态下机械手起落架和安装座受负载的作用强度最大。通过有限元仿真软件对机械手进行静态强度校核分析,结果如图 14 所示。



(a) 水平抓杆状态变形位移



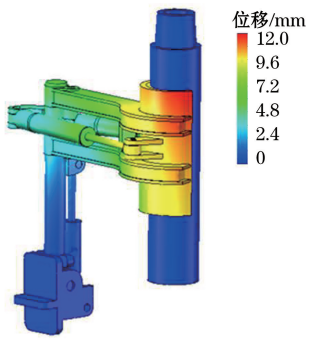
(b) 水平抓杆状态应力

图 14 水平抓杆状态强度分析

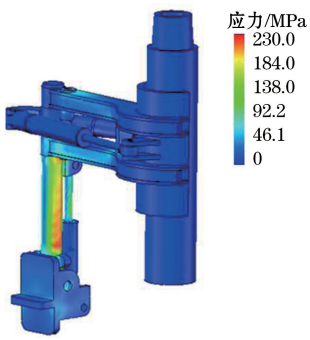
Fig.14 Strength analysis of horizontal grabbing drill pipe state

由图 14 可知,当转臂处于水平最远状态抓取钻杆时,机械手最大变形位移位于转臂侧板,为 1.47 mm;最大应力出现在起落架与安装座连接处,为 110 MPa。二者结构强度均符合要求。

(2) 接杆状态强度分析。机械手转运钻杆至动力头下方对中完成后,控制器发出自动接杆指令,动力头回转的同时推进油缸向下运动,直至动力头接杆装置与钻杆螺纹接触并进行接杆。接杆过程中,机械手在钻杆轴向将承受最大约 3 t 的极限负载,此时要求机械手具备足够的强度,否则将被轴向负载压溃。通过有限元仿真软件对机械手进行强度校核分析,结果如图 15 所示。



(a) 接杆状态变形位移



(b) 接杆状态应力

图 15 接杆状态强度分析

Fig.15 Strength analysis of loading drill pipe state

由图 15 可知,接杆过程中机械手最大位移变形位于转臂最远端半圆板上,为 12 mm;最大应力出现在起落架的起落杆上,为 230 MPa。二者结构强度均符合要求。

4 自动输送装置液控系统研究

自动输送装置液控系统主要由回转液压回路、推进液压回路和自动输送液压回路组成。回转液压回路用于控制动力头液压马达正反转,推进液压回路用于控制推进油缸推进或反提,自动输送液压回路用于控制自动输送装置的平移、升降以及机械手的起落、转臂和卡爪。自动输送装置液控系统结构如图 16 所示。

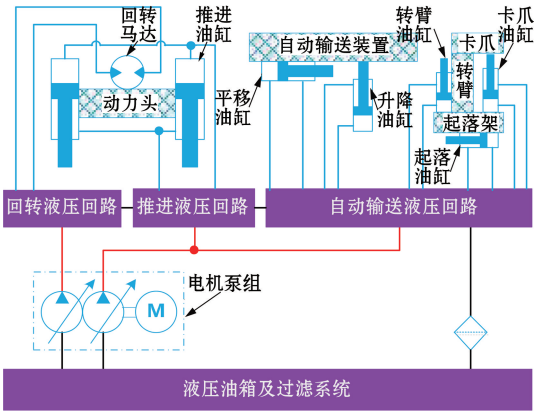
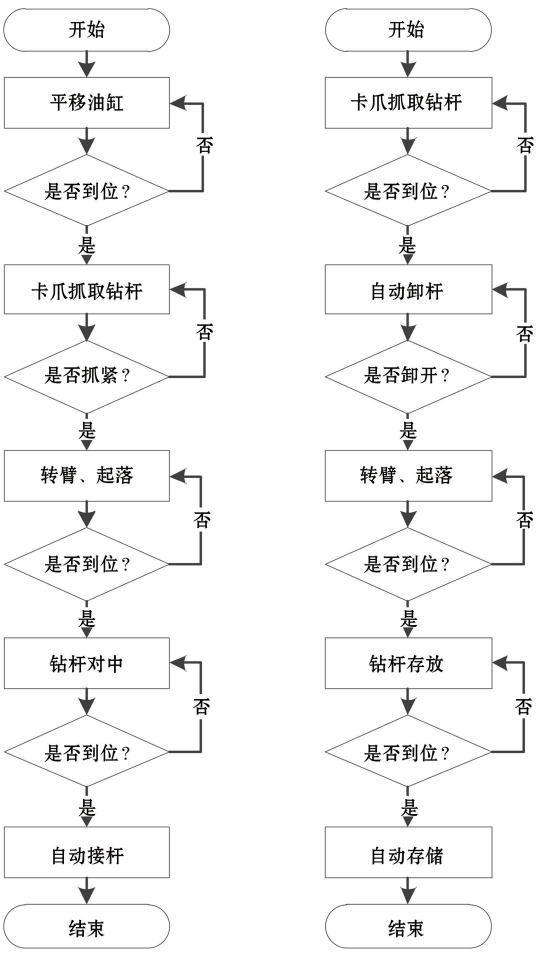


图 16　自动输送装置液控系统结构

Fig.16　Structure of hydraulic control system for automatic conveying device

为了实现钻杆自动输送，在各执行元件上安装传感装置，用于实时监测各执行元件的运行状态并进行闭环反馈控制，控制逻辑如图 17 所示。



（a）导孔作业自动接杆　（b）扩孔作业自动卸杆

图 17　导、扩孔作业钻杆自动输送控制逻辑

Fig.17　Automatic conveying logic of drill pipes in pilot and reaming operation

5　钻杆自动输送技术应用

国内某地下斑岩矿区采用大直径深孔阶段空场嗣后充填采矿法。该采矿工艺中，切割井施工采用搭载钻杆自动输送技术及智能控制系统（如图 18 所示）的智能化天井钻机，替代传统人工钻爆法和传统机械化天井施工，完成厂内测试后，在该矿区 890 m、950 m 中段采场进行了工业应用，从钻杆输送、钻杆抓取、钻杆转运、钻杆接卸及自主作业等环节进行了天井智能掘进测试验证。

现场应用发现，钻杆自动输送装置放置钻杆及钻杆对中时，机械手末端定位精度高、重复性好，运动过程平稳，满足使用要求，实现了钻杆自动化输送、抓取、转运、存储和接卸。与传统人工现场手动或遥控天井钻机机械化施工相比，自动化、智能化天井施工技术可满足全流程单班无人化导、扩孔作业。该技术已成功应用于 42 条井径为 2 m 的天井工程，累计完成 2 316 m 无人化施工作业。而应用自动化、智能化技术后，由单台设备作业人员 2 人减少至 2 台设备作业人员 1 人，天井钻机年平均工程量由 1 500 m 增加至 1 800 m，实现减人 50%以上，综合施工效率提高 20%以上，每年可增加创收约 135 万元。



（a）天井钻机智能控制系统



（b）钻杆自动输送装置

图 18　现场应用

Fig.18　Field application

6 结论

传统天井钻机施工依赖人工辅助完成钻杆的搬运和输送,作业人员需长时间暴露在井下采空区,劳动强度大、安全风险高。本文通过研究和应用钻杆自动输送技术,实现了天井施工全流程单班无人化导、扩孔作业,并以国内某地下斑岩矿区为试验对象,开展了现场实际工程应用,得出以下主要结论。

(1) 提出了"钻杆输送-钻杆抓取-钻杆转运-钻杆接卸"的自动化解决方案,通过对导、扩孔作业钻杆自动输送过程进行研究,理论上确定了该方案的可行性。研发了钻杆自动输送装置、液压机械手及其控制方法,并采用有限元分析软件进行结构设计的合理性分析,结果表明,自动输送装置、机械手的结构强度和变形位移均满足正常使用要求。

(2) 现场工业应用结果表明,钻杆自动输送技术具有定位精度高、过程控制平稳、重复性好等特点,通过搭载智能控制系统可满足天井钻机单班无人自主作业要求。该技术的应用可实现减少作业人数、降低安全风险和提升综合作业效率,经济效益显著。

(3) 钻杆自动输送技术为实现全系列天井施工无人化提供了重要的技术支撑,对类似钻机装备的自动化、智能化升级具有一定的借鉴和参考意义。

参考文献(References):

[1] 刘志强.反井钻机[M].北京:科学出版社,2017.
LIU Zhiqiang. Raise boring machine[M]. Beijing: Science Press,2017.

[2] 程守业.国内反井钻井技术发展综述[J].建井技术,2017,38(5):14-17+21.
CHENG Shouye. Overview on development of raise boring technology in China[J]. Mine Construction Technology,2017,38(5):14-17+21.

[3] 刘志强,陈湘生,蔡美峰,等.我国大直径钻井技术装备发展的挑战与思考[J].中国工程科学,2022,24(2):132-139.
LIU Zhiqiang, CHEN Xiangsheng, CAI Meifeng, et al. Challenges and thoughts on the development of large-diameter drilling technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE,2022,24(2):132-139.

[4] 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 Chaoyang, 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.

[5] 余铜柱,徐魁伍.大扭矩低矮型液控反井钻机关键技术研究[J].煤矿机械,2024,45(4):67-68.
YU Tongzhu, XU Kuiwu. Research on key technologies of high torque and low height hydraulic control reverse drilling rig[J]. Coal Mine Machinery,2024,45(4):67-68.

[6] 李高正.反井钻机施工技术在古皂水库竖井施工中的应用[J].水利水电技术(中英文),2022,53(增刊2):221-224.
LI Gaozheng. Application of raise boring machine construction technologyin guzao reservoir shaft construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2022,53(Suppl.2):221-224.

[7] 王佳,彭光宇,路前海,等.ZDY4500LK全流程自动钻机研制与应用研究[J].煤矿机械,2024,45(6):49-52.
WANG Jia, PENG Guangyu, LU Qianhai, et al. Research on development and application of ZDY4500LK full process automatic drilling rig[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(6):49-52.

[8] 张溟晨,唐敏,马振纲,等.基于深度学习的钻杆识别定位系统的研发与应用[J].智能矿山,2024,5(7):30-35.
ZHANG Mingchen, TANG Min, MA Zhen'gang, et al. Development and application of drill pipe identification and positioning system based on deep learning[J]. Journal of Intelligent Mine,2024,5(7):30-35.

[9] 万祖保,李伟,马国芳.矿用钻杆自动搬运系统设计研究[J].煤矿机械,2022,43(8):19-20.
WAN Zubao, LI Wei, MA Guofang. Design and research of mine drill pipe automatic handling system[J]. Coal Mine Machinery,2022,43(8):19-20.

[10] 张强,高鑫洲,刘峰.锚杆自动抓取与搬运机械手结构设计及振动试验[J].煤矿机电,2023,44(5):76-79.
ZHANG Qiang, GAO Xinzhou, LIU Feng. Structure design and vibration test on automatic grabbing and handling manipulator of anchor bolts[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology,2023,44(5):76-79.

[11] 马振纲.煤矿用钻机钻杆自动更换机构分析[J].煤矿机械,2024,45(5):70-72.
MA Zhen'gang. Analysis of automatic replacement mechanism of drill pipe for coal mine drilling rig[J]. Coal Mine Machinery,2024,45(5):70-72.

[12] 张刚,彭涛.全断面电控钻机加杆装置及控制系统[J].煤矿安全,2023,54(3):232-238.
ZHANG Gang, PENG Tao. Rod adding device and control system of full-face electric control drilling rig[J]. Safety in Coal Mines,2023,54(3):232-238.

[13] 颜武刚,王毅,代建龙,等.自动接卸钻杆液压机械手研发与应用[J].金属矿山,2024(11):158-166.
YAN Wugang, WANG Yi, DAI Jianlong, et al. Research and application of hydraulic manipulator for automatic loading and unloading of drilling pipes[J]. Metal Mine,2024(11):158-166.

[14] 颜武刚,代建龙,王锋,等.基于电液数字阀的智能型潜孔钻机机械手研究[J].采矿技术,2023,23(6):170-175.
YAN Wugang, DAI Jianlong, WANG Feng, et al. Research on the manipulator of intelligent down the hole drill based on electro-hydraulic digital valve[J]. Mining Technology,2023,23(6):170-175.

[15] 湖南创远智能发展有限责任公司.天井钻机控制方法、装置、存储介质及天井钻机:202310614399.1[P].2023-08-08.

[16] 湖南创远高新机械有限责任公司.一种钻杆自动输送装置及钻孔设备:202210859919.0[P].2022-11-04.

[17] 湖南创远高新机械有限责任公司.一种机械手及天井钻机:202222771038.1[P].2023-03-14.