

煤矿钻机机械手结构设计及分析

廖明蕾

(安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 钻杆的自动液压传送系统是我国现代钻井施工自动化设备中又一不可或缺的输送部分。根据钻杆自动输送系统设计要求, 系统研究分析钻杆自动输送排放系统设计和各种输送机械手条件, 确定了钻杆的自动传送装置方案, 主要对钻杆自动输送系统机械手部件进行设计。该技术及设计系统的理论研究初步实现了煤矿钻机钻杆的高效安全输送。借助 Solid Works 三维建模仿真软件绘制完成了三维结构模型, 并基于 Workbench 的仿真分析软件对机械手模型进行了静力学分析和模态分析, 验证了机械手设计结构的整体安全性, 为结构优化设计提供依据。

关键词: 煤矿钻机; 机械手; 结构设计; Workbench

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 2096-4706 (2022) 17-0056-04

Design and Analysis of Coal Mine Drilling Rig Manipulator Structure

LIAO Minglei

(State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The automatic hydraulic conveying system of drill pipe is another indispensable conveying part of China's modern well drilling construction automation equipment. According to the design requirements of the drill pipe automatic conveying system, the system studies and analyzes the design of the drill pipe automatic conveying discharge system and various conveying manipulator conditions, determines the automatic conveying equipment scheme of the drill pipe, and mainly designs the manipulator component of the drill pipe automatic conveying system. The theoretical research of this technology and design system has initially realized the efficient and safe conveying of coal mine drilling rig and drill pipe. With the help of Solid Works 3D modeling simulation software, the 3D structural model is drawn and completed, and the static analysis and modal analysis of the manipulator model are carried out based on the simulation analysis software of Workbench, and it verifies the overall safety of the manipulator design structure and provides the basis for structural optimization design.

Keywords: coal mine drilling rig; manipulator; structural design; Workbench

0 引言

近年来, 各种矿产资源日益短缺, 世界各国纷纷进行煤矿的深层开采, 以此来预防各种地质灾害, 达到保护环境的效果。钻机钻杆的自动化传送技术的实现是深层钻探专用钻机开发中采用的核心技术之一。钻杆在井口、地面及排放架之间进行连续往复的传送排放操作^[1-3], 传统钻杆的传输主要靠一些不同工种工人配合操作, 通过手动运送钻杆与通过人工导向系统完成了对钻杆的自动往复传送, 操作的流程稍有失误随时会引发安全事故。相关数据显示钻井作业的安全性深受威胁, 煤矿钻机钻杆人工运送钻杆引发的煤矿事故, 约占总体的煤矿钻井作业事故的 30% ~ 52%^[4]。

钻杆自动化传送系统则能够快速完成水平方向的平稳复杂的传输钻杆的工作, 达到自动传送目的, 用以代替传统的人工传动。这样的操作方法能充分地使广大施工人员远离复杂的现场和恶劣环境中作业和避开各种复杂危险的施工危险区域, 提高了整体安全工作环境运行安全效率, 使整个现场

施工作业的安全性能得到提高^[5-7]。

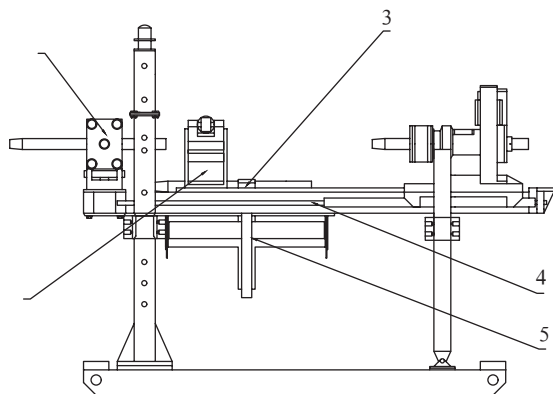
本文重点对钻杆的自动液压输送系统等展开研究, 结合钻机对煤矿特定的环境需求, 通过对人工运输钻杆操作的细节分析, 本文对机械手的形态进行结构设计及分析^[8]。通过本研究不仅可以逐步地实现煤矿钻杆物料的高度自动化的连续输送, 有效解决了施工作业人员工作劳动强度过大问题, 提高了煤矿钻井作业平台的安全问题, 节省了劳动力成本消耗, 提高了自动化连续操作生产水平和生产效率, 同时研究成果可为煤矿钻机的钻杆自动输送提供一种参考。

1 钻机自动上下钻杆机构设计

1.1 钻杆输送系统方案

本文以 ZDY4000R 型号钻机为例, 根据上下钻杆的功能需求, 设计出一种钻机施工过程中自动上下杆的机构, 用来代替工人操作。将上下钻杆机构安装在煤矿钻机机身下方位置, 机械手用支架连接固定在机身上面, 位置处于钻杆箱中间, 来完成钻杆的抓取操作, 而钻杆箱则安装在机身下面。为了保证机械手每次从钻杆箱夹取有且只有一根钻杆, 不会

出现多杆、空杆或钻杆掉落等情况,需要设计一个阻挡机构进行控制。该机构完全符合钻机现场施工所出现的情况,能保障足够的上下钻杆空间需求,且能够实现钻杆灵活输送。钻机结构示意图如图 1 所示。



1—中间夹持器;2—前夹持器;3—机械手;4—液压缸;5—钻杆箱

图 1 钻机结构示意图

当钻机需要进行上杆操作时,机械手从钻杆箱底部将钻杆运送到工作平面上,钻杆夹持器将一级杆拧紧固定,机械手撤出,动力机构带动主动钻杆不断向前推进,靠近一级杆螺纹连接处,当主动钻杆转速和推进速度匹配到满足螺纹旋合要求的时候,杆与一级杆进行螺纹旋合连接,夹持器松开,然后主动钻杆和一级杆继续向前推进,靠近前面的二级杆,以相同方式进行连接,最终上杆操作完成。下杆螺纹旋开流程和上杆螺纹旋合流程相反,在此不做过多表述。最后机械手将钻杆从钻机收回到钻杆箱内,即完成自动上下钻杆机构操作流程。

1.2 机械手的设计

确定煤矿钻机整体的结构系统方案后,钻机在施工过程中,需要进给装置、夹持器、机械手等主要机构部件相互配合协调,来完成工作要求。本节遵循机械设计要求,主要对机械手部件进行尺寸设计,使结构达到最优化。

机械手作为夹取上下钻杆机构运动体系中的最为重要的这一运动部分组成,需要完成夹取上下钻杆等动作,是传递取出上下钻杆的关键步骤,发挥着重要的作用。煤矿作业中的钻机机械手都是采用直接间接的方式,利用液压缸作为动力系统,驱动机械手运动。根据钻机的实际及工作中所采用的环境要求,液压机械手需要夹持的钻杆直径为 50 mm,利用液压缸控制机械手完成规定动作,保证精准定位钻杆连接位置以及钻杆与钻头、相邻钻杆之间的连接。根据对煤矿钻杆直径 50 mm 的设定,本文设计了一种机械手的具体方案,如图 2 所示。两侧的 \overline{ABC} 连杆段即作为机械手手抓部分和连杆部分,机械手整体围绕 C 点进行转动, C 点与机架采取铰接固定;机械手手抓的张角大小由 L_{BC} 段长度和连杆 L_{AB} 段长度决定, $\overline{AA'}$ 部分为活塞杆的顶端,驱动力 F_1 推动活塞杆零件做垂直方向上的运动。其机构得原理参照曲柄滑块机构,液压缸驱动活塞杆竖直方向上运动,带动连杆 L_{AB} 和 L_{BC} 和两根从动件转动,机械

手结构示意图如图 3 所示^[9]。

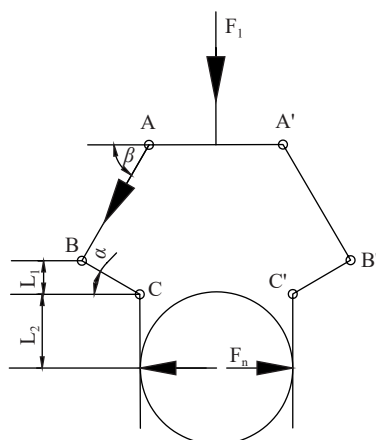


图 2 机械手原理图

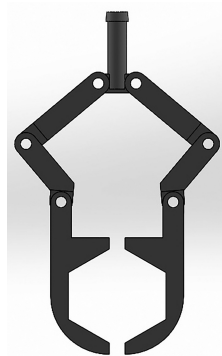


图 3 机械手结构图

$$2F_2 \cdot \sin\beta = F_1 \quad (1)$$

$$F_2 \cdot \frac{L_1}{\sin\alpha} \cdot \sin(\alpha + \beta) = F_N \cdot L_2 \quad (2)$$

$$F_N = \frac{F_1 \cdot L_1 \cdot \sin(\alpha + \beta)}{2L_2 \sin\alpha \cdot \sin\beta} \quad (3)$$

式中: F_1 表示液压气缸驱动力; F_2 表示驱动力传到连杆的分力; F_N 表示机械手的夹持力。设计中取以 $\alpha=50^\circ$, $\beta=40^\circ$, $AB=50 \text{ mm}$, $BC=30 \text{ mm}$, $L_1=31 \text{ mm}$, $L_2=50 \text{ mm}$, 根据式 (3) 计算出 $F_N=1\ 055 \text{ N}$, 利用三维建模软件 Solid Works 绘制出三维结构, 机械手厚度尺寸设为 120 mm。

2 机械手的有限元分析

完成钻杆传动系统整体的结构设计后,本节针对设备的机械手部件在 Workbench 中的静力学分析模块对其进行了静力学分析,通过对机械手结构的应力和总体应变进行分析,以此来保证液压钻机结构的正常工作,这样可以预先判断出潜在威胁,方便现场工作人员们为提高结构的安全性和可靠性,及时采取措施进行改进处理,做到避免不必要事故的发生。

在实际液压工况计算中,液压气缸对液压活塞杆轴的推动完成了对机械手的驱动或机械手手抓的夹持。可以根据特定工况条件,缸径大小选择以及额定液压缸工作压力大小

等参数,选择合适型号的液压缸,计算得出液压缸实际的压力,其中活塞杆零件杆径则设为 $D=8\text{ mm}$,液压缸缸径设为 $D=12\text{ mm}$,计算工作压力:

$$F=\frac{\pi D^2}{4}\cdot P=1\,810\text{ N} \quad (4)$$

机械手连杆是在机械设备连续回转的工作过程中,连杆由于受到外力作用,容易弯曲或机械磨损,于是对连杆机械手连杆的材料做了一次模型简化处理,根据煤矿井下的实际工况,机械手使用到的材料为 40 Gr,这种钢材适合于调制处理后的各类传动件的制造。其材料的各项属性为:质量密度范围为 $7.8\times 10^3\text{ kg/m}^3$ 屈服强度极限值范围为 786 MPa ;弹性模量范围为 $E=212\text{ GPa}$;泊松比为 $\mu=0.276$ 。根据机械手部件整体的设计尺寸,在 Workbench 的静力学模块中进行网格的控制及划分,为了得到更精确的分析结果,同时做到节约计算时间成本,在静力学分析模块对导入模型进行四面体网格划分,网格划分图 4 所示,网格单元尺寸设为 2 mm ,实心轴的有限元模型的节点数 (Nodes) 为 24 323,要素 (Elements) 为 12 286。

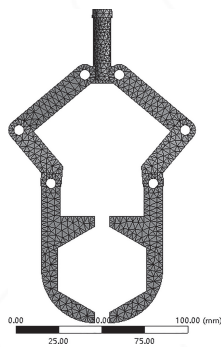


图 4 机械手网格划分图

液压缸动力机构驱动机械手上端活塞杆运动,对机械手活塞杆施加了一定的载荷与约束,在向活塞杆 (A 点) 施加方向沿着液压活塞杆竖直向下,大小为 $1\,810\text{ N}$ 的力,之后活塞杆带动连杆运动。机械手抓手与其机架之间采取铰接连接方式,液压缸支持对 B 点这两个销轴分别进行孔径轴向和轴向固定,销轴孔只进行径轴向的固定与转动。

在机械手部件的活塞杆部分施加向下的轴向载荷之后,对机械手部件进行仿真,静力学仿真用于测量液压缸对活塞杆施加的压力大小及连杆的总体受力变形量问题,通过这些分析能够得到机械手整体装置的应力云图和应变云图,如图 5、图 6 所示。

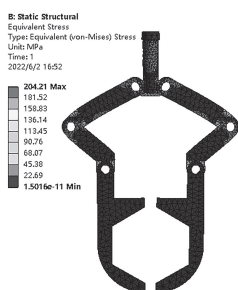


图 5 机械手应力云图

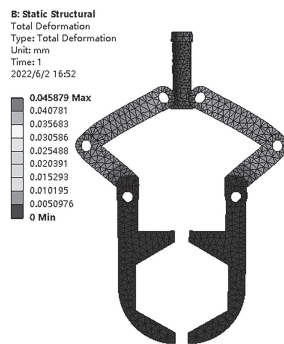


图 6 机械手总应变云图

从图 5、图 6 可以看出机械手整体应力值变化的分布很均匀,最大应力值发生地点在活塞杆上与连杆连接处约为 204.21 MPa ,最大应变发生位置在活塞杆上的 0.046 mm ,其变形最大应力远远小于材料极限屈服应力可以忽略,根据材料许用安全应力公式:

$$S=\frac{\sigma}{[\sigma]} \quad (5)$$

S 表示屈服安全系数; σ 表示材料屈服强度; $[\sigma]$ 表示材料的许用应力。

计算得到的安全系数:

$$S=\frac{786}{204.21}=3.849>2 \quad (6)$$

分析结果较为符合施工中的实际受力情况,从总体应变云图中来看,活塞杆零件部分受力最大,为防止可能发生的损坏状况,应对其材料做出适当的加强,总体完全符合煤矿机械的安全性要求。

将机械手模型导入 Modal 模块进行模块分析,沿用模型在静力学分析模块的四面体网格划分,输出参数选择机械手的前 6 阶模态振型总体变形 (Total Deformation),求解得到模态分析结果。如图 7 和表 1 所示。

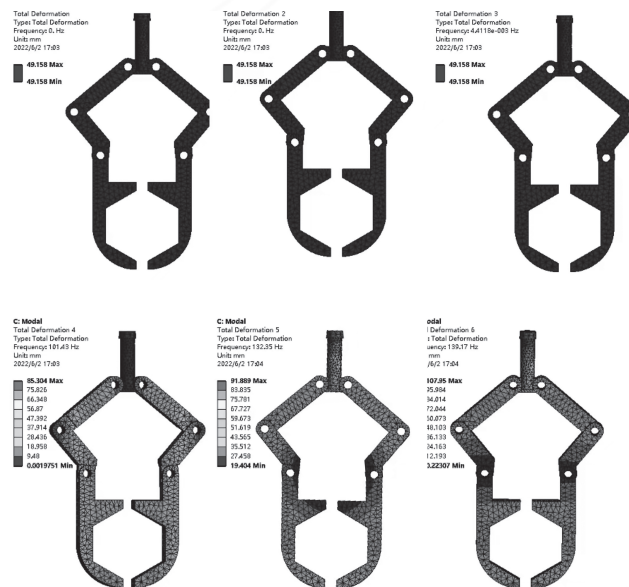


图 7 机械手 1 阶到 6 阶总体相对变形量

表 1 Workbench 模态分析求解结果

Modal	Frequency (Hz)
1 阶	0
2 阶	$4.775\ 6 \times 10^{-3}$
3 阶	5.691×10^{-3}
4 阶	98.365
5 阶	128.62
6 阶	135.03

由于其固有频率最大仅为 135.03 Hz, 通过 Workbench 模态分析可以得出该零件不易于机械本身的基振频率产生共振。使用模态分析方法可以及时改正设计错误, 是现代设计的必要的工作之一^[10], 可以有效地避免机械共振带来不必要的问题。

3 结 论

本文结合煤矿钻井作业生产要求, 在分析钻杆自动传送系统功能的基础上, 给出了钻杆自动传送系统的总体设计方案, 对煤矿钻机机构主要是输送机械手部件进行了设计。并利用 Solid Works 三维软件对系统部件进行了结构建模, 建立了传送系统的总体结构和机械手部件的三维模型。

对钻杆自动传送系统的机械手部件采用件 ANSYS Workbench 的 Statics Structural 模块进行了强度校核, 得出最大应力在活塞杆零件上, 以及最大变形量数值极小, 对机械手零件的影响可以忽略不计。通过最大应力计算出机械手装置的安全系数 S 符合煤矿对安全性的要求, 并且验

证其强度和刚度要求。同时对机械手零件进行六阶 Modal 分析, 得出其固有振动频率为 135.03 Hz, 振动频率极小, 因此不易于其他机械部件产生共振。结果表明, 零件整体结构设计较为合理, 系统结构相对安全。仿真分析结果将为结构优化提供了一定的参考依据, 为以后的设计提供了参考意见。

参考文献:

- [1] 朱吉良. 钻杆自动传送系统结构设计与仿真分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
 - [2] 国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划(2014—2020 年)的通知 [J]. 核工业勘察设计, 2014 (4): 21—28.
 - [3] 邓旭, 姚亚明. 能源成因分类及非常规能源发展研究 [J]. 创新科技, 2017 (10): 28—32.
 - [4] 尹晓丽, 牛文杰, 张中慧. 钻杆自动传送系统设计方案 [J]. 石油矿场机械, 2009, 38 (7): 42—46.
 - [5] 贾焕福. 煤矿超前钻孔防灾害保安全的应用 [J]. 山东煤炭科技, 2012 (1): 203+205.
 - [6] 赵一伟. 浅析煤矿井下灾害及其防治 [J]. 能源与节能, 2018 (7): 53—54.
 - [7] 方树林. 中国煤矿灾害防治技术的研究现状与发展趋势 [J]. 洁净煤技术, 2012, 18 (1): 90—94.
 - [8] 金流丞. 煤矿用自动钻机钻杆输送机械手结构及动态特性研究 [D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2020.
 - [9] 陈林. 液压钻机自动上下杆机构的设计与分析 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
 - [10] 孙光成. 矿用手持静力液压平衡式钻机的设计 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
- 作者简介: 廖明蕾 (1997.11—), 女, 汉族, 安徽淮南人, 硕士在读, 主要研究方向: 煤矿安全防控、智能煤矿开采。

(上接 55 页) 振荡对电路稳定性的干扰, 降低各电路参量的波动幅度, 提升耦合电路的稳定性。经过上述的研究分析, 为今后拓展忆阻器的应用范围与开展耦合电路的研究提供了理论参考。

参考文献:

- [1] 李芳苑, 陈墨, 武花干. 忆阻高通滤波电路准周期与混沌环面簇发振荡及慢通道效应 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42 (4): 811—817.
- [2] 李瑞芳, 胡豪, 曹晓斌, 等. 单芯电缆耦合电路等效模型及无功损耗影响因素研究 [J]. 高压电器, 2021, 57 (7): 119—126.
- [3] 徐昌进, 段振华. 分数阶混沌金融模型的时滞反馈控制策略 [J]. 应用数学和力学, 2020, 41 (12): 1392—1404.
- [4] 代晗, 赵艳影. 负刚度时滞反馈控制动力吸振器的反共振

优化 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (4): 4—13+35.

- [5] 杨坤一, 董云宁. 时滞反馈控制下五维能源供需系统的稳定性分析及 Hopf 分支性质 [J]. 系统科学与数学, 2021, 41 (8): 2113—2136.
- [6] 章勇高, 王小村, 付伟东. 一种光伏微逆变器中六开关功率耦合电路研究 [J]. 电源技术, 2020, 44 (8): 1137—1141+1234.
- [7] 杨占刚, 蔡进, 黄琨, 等. 飞机变压整流器供电电路稳定性分析 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (3): 325—330.
- [8] 聂雪媛, 郑冠男, 杨国伟. 含间隙非线性机翼跨声速颤振时滞反馈控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47 (10): 1980—1988.

作者简介: 闫德鑫 (1988.05—), 男, 汉族, 河南信阳人, 讲师, 硕士, 研究方向: 电气控制与电子电路系统。