

面向复杂地层的 TBM 机载多功能钻臂设计与动力学分析

翁 凯

浙江海聚科技有限公司 浙江 杭州 311100

摘要: 本文聚焦面向复杂地层的TBM机载多功能钻臂设计与动力学分析。先剖析复杂地层特性与钻臂功能需求,明确设计约束条件。阐述了机械系统设计,包括总体、关键子系统及多工况适应性设计。随后进行钻臂动力学建模与分析,涵盖多体动力学模型构建、动态特性及多物理场耦合仿真。最后提出结构优化与减振控制策略,如拓扑优化、被动与主动减振技术,为复杂地层TBM施工提供理论与技术支持。

关键词: TBM机载钻臂;复杂地层;机械系统设计;动力学分析

引言:在TBM施工过程中,复杂地层是主要挑战,不同类型地层力学特性差异大,对钻臂功能提出多元需求。同时,设计需遵循空间、重量、动力等多重约束条件。为保障TBM在复杂地层高效、安全施工,设计具备精准钻孔、地层加固、围岩探测等多功能的钻臂十分必要。本文围绕钻臂机械系统设计、动力学分析以及结构优化与减振控制策略展开研究,以提升钻臂性能,适应复杂地层施工。

1 复杂地层特性与钻臂功能需求分析

1.1 复杂地层分类与力学特性

复杂地层是TBM施工过程中的主要挑战来源,依据地质成因、物质组成及工程特性可分为破碎带地层、高应力硬岩地层、富水软弱地层、复合夹层地层等典型类别。不同类型复杂地层的力学特性存在显著差异:破碎带地层完整性差、cohesion力低,易发生坍塌;高应力硬岩地层抗压强度高、脆性大,钻进时易产生剧烈振动;富水软弱地层含水量高、抗剪强度低,易出现涌水和围岩变形;复合夹层地层则因不同岩性交替分布,力学参数突变,增加了施工不确定性^[1]。通过室内试验与现场原位测试相结合的方式,可获取各类地层的抗压强度、弹性模量、泊松比、渗透系数等关键力学参数,为后续钻臂功能设计提供基础数据支撑,确保钻臂适应复杂多变的地层环境。

1.2 钻臂功能需求

基于复杂地层施工对TBM作业的要求,机载钻臂需具备多维度功能以保障施工效率与安全性。核心功能需求包括精准钻孔作业功能,需实现对不同地层的钻孔深度、孔径适配,确保钻孔定位误差控制在允许范围内;地层加固功能,能够配合注浆、锚杆安装等工艺,对破碎地层进行及时加固,防止围岩失稳;围岩探测功能,可搭载探测设备对前方地层进行超前探测,为施工决策提

供依据;应急处理功能,在遭遇涌水、坍塌等突发状况时,能快速响应并实施封堵、支护等应急措施。钻臂还需具备高效作业能力,满足TBM施工的连续化要求,同时具备良好的操作便捷性与可靠性,适应长时间、高强度的施工工况,降低设备故障率,保障施工进度顺利推进。

1.3 设计约束条件

面向复杂地层的TBM机载多功能钻臂设计需遵循多重约束条件,确保设备实用性与安全性。空间约束是核心约束之一,钻臂需适配TBM机身有限的安装空间,合理布局机械结构,避免与其他机载设备发生干涉,同时保证钻臂作业时的运动范围满足施工需求。重量约束要求钻臂在满足强度与刚度的前提下,尽量轻量化设计,降低对TBM机身承载能力的影响,避免因设备过重导致机身稳定性下降。动力约束需匹配TBM现有动力系统,确保钻臂作业时的动力输出稳定,同时控制能耗在合理范围内。另外,还需考虑环境适应性约束,应对复杂地层施工中的粉尘、水汽、振动等恶劣环境,保障钻臂各部件的防腐、防尘、抗震性能;同时需符合相关行业标准与安全规范,确保操作过程的安全性及合规性。

2 面向复杂地层的TBM机载多功能钻臂机械系统设计

2.1 总体设计方案

面向复杂地层的TBM机载多功能钻臂机械系统总体设计以“多功能集成、高适应性、高可靠性”为核心目标,采用模块化设计理念构建整体架构。系统主要由钻臂主体、进给机构、回转机构、变幅机构及连接基座等核心模块组成,各模块通过标准化接口连接,便于安装、调试与维护。钻臂主体采用高强度合金材料制造,保证结构强度与刚度;进给机构采用油缸结合磁删传感器,实现高精度进给运动;回转机构配备减速机,隧道场景中大量使用液压马达,液压马达结合精确的压力检测,实现精准的输出扭矩控制,确保钻孔过程的稳定回转;变幅

机构通过液压驱动实现钻臂的多角度调整,扩大作业范围^[2]。总体设计充分考虑TBM机身空间布局,优化各模块尺寸与安装位置,实现钻臂与TBM机身的精准适配。

2.2 关键子系统设计

关键子系统设计是保障钻臂机械系统性能的核心环节,主要包括进给传动子系统、变幅驱动子系统与末端执行器子系统。进给传动子系统采用“伺服电机+滚珠丝杠”的精密传动方案,搭配进给机构已明确的油缸驱动及磁删传感器),配备高精度位移传感器与力传感器,实现进给速度与进给力实时监测与闭环控制,确保在不同地层钻孔时的进给稳定性与精准性,避免因进给量不当导致钻孔偏差或设备损坏。变幅驱动子系统采用液压驱动方式,选用高性能液压泵、液压缸与控制阀组,通过液压系统的优化设计,实现钻臂变幅运动的平稳性与快速响应性,同时具备过载保护功能,防止因负载过大损坏驱动部件。末端执行器子系统采用可快速更换的模块化设计,适配不同类型的钻头、注浆管与探测探头,通过高精度夹具实现末端执行器的快速定位与夹紧,保障作业过程的可靠性,同时降低更换作业工具的时间成本,提升施工效率。

2.3 多工况适应性设计

针对复杂地层施工中的多工况需求,钻臂机械系统采用多维度适应性设计策略。在结构设计上,通过增强钻臂主体的刚度与强度储备,采用抗疲劳设计方法,提升系统对高应力硬岩地层钻孔时的振动耐受能力;在传动系统中,配备可调节的精确控制钻压与自适应负载调节模块,根据不同地层的阻力特性自动调整传动参数,确保在破碎带、软弱地层等不同工况下的作业稳定性。针对富水地层工况,对钻臂各运动关节、电气元件采用密封防水设计,配备排水装置,防止水汽侵入导致部件损坏;针对复合夹层地层的多变性,优化钻臂的运动控制策略,实现钻孔角度、进给速度与回转速度的快速切换与精准匹配。通过加装可拆卸的防护装置,应对施工过程中的粉尘、岩屑等恶劣环境,进一步提升系统在多工况下的适应性与使用寿命,保障复杂地层施工的连续性与安全性。

3 钻臂动力学建模与分析

3.1 多体动力学模型构建

钻臂多体动力学模型构建以多体系统动力学理论为基础,结合钻臂机械系统的结构组成与运动特性,采用虚拟样机技术完成模型搭建。首先对钻臂各部件进行结构简化,忽略次要细节,保留核心结构特征,明确各部件的质量、惯性矩等动力学参数,通过三维建模软件建

立各部件的实体模型。随后根据各部件的连接关系,定义运动副类型,如钻臂主体与变幅机构之间的旋转副、进给机构与末端执行器之间的移动副等,准确描述各部件的相对运动关系。同时,考虑传动系统的动力学特性,引入齿轮传动、丝杠传动的刚度与阻尼模型,同步融入液压驱动(适配变幅、回转机构)与电机驱动(适配进给传动子系统)的动力输出模型^[3]。最后,通过多体动力学仿真软件将各部件模型与运动副、驱动模型进行集成,构建完整的钻臂多体动力学模型,为后续动态特性分析与仿真提供可靠的模型基础。

3.2 动态特性分析

钻臂动态特性分析紧密依托于前期精心构建的多体动力学模型,将研究重点聚焦于钻臂在多样化作业工况下的振动特性、运动响应以及受力分布规律。在模态分析环节,借助专业方法获取钻臂的固有频率与振型,精准明确钻臂易发生共振的频率范围。这一成果意义重大,能为后续的减振设计以及作业参数优化提供坚实依据,有效避免在施工过程中,因外界激励频率接近钻臂固有频率而引发共振现象,进而保障钻孔精度,延长设备使用寿命。通过瞬态动力学分析,能够模拟钻臂在启动、制动、钻孔冲击等瞬态工况下的复杂动力学响应,详细获取各关键部件的位移、速度、加速度以及应力变化规律,从而精准识别系统的薄弱环节。充分结合不同地层的力学特性,深入分析钻臂在不同负载工况下的动态性能,全面验证钻臂对复杂地层的适应性,为钻臂结构优化和控制策略制定提供丰富且可靠的数据支撑。

3.3 多物理场耦合仿真

考虑到钻臂作业过程中涉及机械、液压、电气、热等多物理场的相互作用,采用多物理场耦合仿真方法对钻臂系统进行全面分析。首先构建钻臂的机械-液压耦合模型,将液压驱动系统的压力场与钻臂机械结构的力学场进行耦合,分析液压系统压力变化与钻臂机械运动之间的动态响应关系,优化液压系统参数,提升驱动性能。其次,建立机械-热耦合模型,考虑钻臂作业过程中电机、液压元件的发热与结构摩擦生热,以及外界环境温度的影响,分析温度场分布对钻臂结构材料性能与运动精度的影响,为热防护设计提供依据。此外,结合电磁感应原理构建机械-电磁耦合模型,分析电机驱动过程中的电磁力对钻臂振动特性的影响。通过多物理场耦合仿真,全面掌握各物理场之间的相互作用机制,发现单一物理场分析中难以识别的问题,为钻臂系统的优化设计提供更全面、精准的依据。

4 结构优化与减振控制策略

4.1 拓扑优化设计

钻臂结构拓扑优化旨在提升性能、实现轻量化,基于有限元分析与拓扑优化理论开展。设计之初,要明确钻臂设计空间,即其在整体设备中的物理范围;界定载荷条件,涵盖不同作业工况下钻臂承受的重力、钻孔反作用力等各类力;以及约束条件,如运动范围限制、连接部位固定要求等。以钻臂在不同工况下的最大应力、位移为关键约束指标,以结构重量最小化为核心目标,建立拓扑优化数学模型。运用变密度法等成熟算法,借助有限元软件对钻臂主体结构进行拓扑优化分析,经反复迭代计算,得到最优材料分布方案,删除冗余材料,保留核心承载结构。依据优化结果,结合工程实际与制造工艺要求,对钻臂结构全面重构与细节设计,优化截面形状、合理调整尺寸、改进连接方式,增强整体稳定性。通过这一系列设计,在确保钻臂结构强度、刚度与动态性能达标的前提下,有效降低结构重量,减少材料消耗与制造成本。

4.2 被动减振技术

被动减振技术通过在钻臂系统中巧妙设置减振装置,有效吸收或耗散振动能量,从而显著降低振动对钻臂作业精度与设备寿命的不良影响。该技术具有结构简单、成本低、可靠性高的显著特点,在工程应用中具有广泛的前景。针对钻臂作业过程中复杂多变的振动特性,采用多层减振策略进行精准应对。在钻臂主体与连接基座之间安装橡胶减振垫或金属弹簧减振器,利用减振元件的弹性变形特性,有效吸收低频振动能量,(TBM运行时,主要需要考虑TBM自身振动对于机械臂末端精确定位的影响,避免TBM的振动传导向机械臂,保障机身的稳定性。在进给机构与末端执行器之间加装阻尼器,借助阻尼材料的粘性摩擦作用,高效耗散高频振动能量,有力抑制钻孔过程中的冲击振动,提高钻孔精度。对钻臂的关键焊缝与连接部位进行加固与阻尼处理,采用阻尼涂层或约束阻尼层技术,提升结构的阻尼特性,降低结构振动幅值,增强结构的抗振能力。通过优化钻臂的结构布局,使质量分布更加科学合理,巧妙调整结构的固有频率,使其避开作业过程中的激励频率范围,进一步提升被动减振

效果,确保钻臂在复杂地层作业时能够保持高度的稳定性,为施工的顺利进行提供可靠保障。

4.3 主动控制策略

主动控制策略通过实时监测钻臂的振动状态,利用控制算法驱动执行机构产生反向控制力,实现对振动的主动抑制,适用于应对复杂地层作业中多变的振动工况。首先构建钻臂振动监测系统,采用加速度传感器、位移传感器等设备实时采集钻臂关键部位的振动信号,通过数据采集与处理模块对振动信号进行分析,识别振动的幅值、频率与相位等特征参数^[4]。基于现代控制理论,设计模糊PID控制、自适应控制等先进控制算法,根据振动监测数据与预设的控制目标,实时计算最优的控制量。选用压电陶瓷作动器、电磁作动器等高性能执行机构,根据控制算法输出的控制信号产生反向振动,抵消钻臂的振动能量,实现主动减振。通过搭建主动控制实验平台,对控制策略的有效性进行验证与优化,确保主动控制系统能够快速、精准地响应不同工况下的振动,进一步提升钻臂的作业精度与稳定性。

结束语

面向复杂地层的TBM机载多功能钻臂设计与动力学分析研究意义重大。通过对其机械系统精心设计,满足复杂地层施工多样化需求;动力学建模与分析,全面掌握钻臂动态特性;结构优化与减振控制策略,提升钻臂性能与稳定性。研究成果为TBM在复杂地层施工提供了可靠设备保障,有助于提高施工效率与安全性,推动隧道掘进技术发展,未来可进一步探索更优设计与控制方法。

参考文献

- [1]刘涛.TBM机载超前钻孔可视化系统研究及应用[J].建筑机械化,2020,41(11):87-89.
- [2]董琦,曾繁迪.五自由度桌面级多功能机械臂设计[J].科技创新与应用,2020,(08):25-26.
- [3]王志刚,李建国,刘伟.复杂破碎地层金刚石取心钻具结构优化及应用研究[J].钻采工艺,2021,44(3):58-63.
- [4]陈明,徐磊,张晓东.破碎地层钻进机理及取心钻具优化设计分析[J].矿业装备工程,2020,41(6):102-107.