

钻探过程中机电设备的震动抑制与稳定性控制策略

张爱堂^{1, 2}

1. 河北省煤田地质局第二地质队（河北省干热岩研究中心） 河北邢台 054000

2. 邢台市深地资源勘探开发技术创新中心 河北邢台 054000

摘要：钻探工程机电设备振动问题始终是钻探效率高及设备寿命长短最关键的因素。钻探设备工作于复杂地质条件，特别是深井钻探、超深井钻探时，经常要承受剧烈的震动与冲击。这类振动不但使钻探速度下降，而且可能造成钻具疲劳失效，设备损坏乃至钻探事故。所以如何对机电设备产生的振动进行有效抑制，提高机电设备运行的稳定性已经成为当前钻探工程领域急需解决的一个重要问题。文章将对钻探期间机电设备震动抑制及稳定性控制策略进行探究，目的是为钻探工程的施工提供更安全、更有效的技术支持。

关键词：钻探；机电设备；震动抑制；稳定性控制

引言

随着世界范围内对能源的需求越来越大，对石油和天然气的勘探深度也在逐步加大，钻探技术也受到了较大的挑战。在此情况下钻探设备稳定性与可靠性就显得非常重要。震动问题是钻探中普遍存在的一种现象，它的主要根源有钻头和岩层的相互作用，钻具转动时的扭转振动和井内流体造成的压力波动。一直以来，学术界与工业界积极研究有效抑制上述振动、提高钻探设备工作稳定性的方法。常用的震动抑制方法主要有被动减振、主动控制、半主动控制及其他技术手段。另外，在传感技术与智能控制技术不断发展的背景下，以实时监测与反馈调节为核心的智能控制策略逐步成为人们关注的焦点。

一、钻探过程中机电设备震动的成因分析

钻探机电设备工作时振动的成因，主要是由多种物理因素共同影响。钻探设备工作于高速旋转、复杂地下环境中，地质不均匀性使钻头承受地层阻力不稳又诱发振动。钻头和岩层间摩擦力经常发生变化，摩擦系数起伏增大系统动态不稳定。另外，钻探系统多个机械部件之间耦合运动，特别是传动系统与钻柱之间复杂动力学行为使震动幅度与频率进一步被放大。钻探时设备刚性不足或者局部结构存在设计缺陷都会引起共振现象，从而使震动强度明显增大。系统固有频率因钻探深度增大而不断发生变化，当接近外部激励频率时易陷入共振状态而诱发强烈振动。另外，钻探液体的流动所产生的流

体动力学效应还能引起震动，特别是当钻井液流速变化很大时这一影响尤为明显。综合考虑，振动的发生是地层条件，机械结构动态特性和流体动力学效应多种因素相互耦合的结果，它们共同构成钻探机电设备振动行为的复杂性。

二、震动抑制的方法

1. 被动震动抑制技术

被动震动抑制技术通过改变或者优化装置的结构设计及材料特性来减小或者吸收外界震动能量来减小震动对系统性能造成的影响。常用的被动震动压制手段主要有采用阻尼器、弹簧、隔振器以及质量块等部件，对这些部件进行合理的配置以及优化设计来实现震动压制。选择和配置阻尼器是至关重要的，通常是通过调整阻尼系数（C）来控制系统的震动反应。常见阻尼系数范围为0.01 Ns/m到1 Ns/m。选择合适的弹簧刚度（K）是非常关键的，其标准值通常落在1000 N/m至100000 N/m的范围内，这将直接决定系统的固有振动频率和其对地震的

表1 被动震动抑制相关参数

参数	范围	作用
阻尼系数（C）	0.01 Ns/m–1 Ns/m	控制系统震动响应，调节震动衰减速率
弹簧刚度（K）	1000 N/m–100000 N/m	影响系统固有频率，增强抗震能力
质量（M）	10 kg–1000 kg	调整系统固有频率，避免共振
传递率	≤ 5%	表示隔震效果，越低越好

抵抗力。隔振器是通过在震源与设备间加入弹性部件来减少震动的传播效率,从而达到隔震的目的。高效的被动隔震设计可以使传递率减小到小于1。质量块的加入通过调节系统质量(M),使其固有频率发生变化,从而避免了与外在激励频率发生共振现象。通常系统质量调节范围为10 kg–1000 kg。基于上述参数组态的被动震动抑制技术可显著地减小某一频率区间的震动幅度并提高装置稳定性及寿命。

2. 主动震动抑制技术

主动震动抑制技术利用实时监测与反馈控制主动产生反向振动信号来抵消外界震动,从而达到系统动态调节与优化的目的。这种技术一般取决于传感器、控制器、执行器之间的协同工作关系。传感器能够实时监控设备的震动状况,并将收集到的震动信号输入到控制器中。控制器会基于预先设定的算法,例如自适应滤波或模糊控制等,来计算出需要施加的反向力或位移信号。执行器再把控制器的输出信号转换成物理作用力,并通过作用于原振动相位相反且振幅一致的力而抵消振动。主动控制系统响应速度的快慢、精度的高低直接关系到震动抑制效果的好坏,一般情况下执行器响应时间要求达到毫秒级才能保证与震动信号保持同步。另外,该系统的控制算法要求适应性较强,能对各种运行条件下的控制参数进行自动调节,以便对震动频率、幅度等变化做出响应。由于主动震动抑制技术可以对具体频率、方向的振动实现精确控制,所以在复杂、多变环境中抑制效果明显好于被动振动抑制方法。但该技术复杂且造价昂贵,一般需将高精度传感器与快速执行器相结合才能对震动进行有效控制。

三、钻探设备的稳定性控制策略

1. 稳定性控制的基本概念

稳定性控制的基本概念围绕系统在面对外部扰动时维持其预定工作状态的能力展开,尤其是在钻探机电设备中,稳定性控制尤为关键。设备工作时可能受到地质不均匀性,机械磨损及操作误差等诸多不确定性因素的干扰,而这些扰动因素易诱发系统发生振荡,共振或者结构变形等失稳行为。稳定性控制的中心目的就是要保证系统在上述干扰情况下仍能稳定地工作,避免失控或者失效。要达到这一目的,关键是要准确地建立系统动力学特性模型,并采用反馈控制策略来实时调节系统操作参数以适应外界环境变化。通过对系统的固有频率、阻尼特性和外部负载的影响进行分析,控制策略需要动

态调整输入信号,例如力矩、速度或位置,以抑制可能的不稳定因素。另外稳定性控制涉及系统结构优化设计以获得较高刚度及抗扰动能力。综合运用上述技术手段,稳定性控制能够有效地提高装备工作的可靠性与寿命,保障钻探过程持续安全。

2. 钻探设备的力学模型与稳定性分析

钻探设备的力学模型与稳定性分析是确保设备在复杂地质条件下稳定运行的关键环节。力学模型通常包括钻柱、钻头和地层相互作用的综合力学描述,其核心在于准确建模设备在钻探过程中的动力学行为。钻柱的动力学行为可以简化为一维或二维的弹性体模型,通常采用弹性波理论或有限元方法对其进行分析。钻柱在钻探过程中受到的主要力包括轴向力 F_a 、横向力 F_l 和扭矩 M ,这些力的相互作用决定了钻柱的振动模式和稳定性。钻柱的弯曲刚度 EI 和钻柱的质量密度 ρ 是影响系统固有频率 ω_n 的关键参数,其中固有频率可表示为:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$

其中 k 是等效弹性系数, m 等效质量, A 为截面积, L 为钻柱长度。地层与钻头之间的相互作用力可以通过库伦摩擦模型或非线性接触力学模型来描述,通常这些相互作用力对钻柱稳定性有重要影响。

在稳定性分析中,利用线性化方法对系统的动态方程进行特征值分析,判断系统是否存在不稳定模态。若系统的某些特征值实部为正,则表明系统可能发生自激振动或共振失稳。此外,钻探设备的阻尼系数 C 对系统的稳定性也起到关键作用,阻尼比 ζ 的计算公式为:

$$\zeta = \frac{C}{2\sqrt{km}}$$

通过调整阻尼系数和钻柱刚度,可以有效抑制不稳定模态的增长,增强系统的稳定性。最终,力学模型的准确性和稳定性分析的深度直接影响钻探设备的设计和控制策略,确保在各种工况下的高效稳定运行。

3. 稳定性控制方法与技术

稳定性控制的方法和技术是钻探设备的关键,采用各种策略保证系统处于复杂的环境中。反馈控制作为其中一种核心方法,通过对装置动态响应进行实时监控,并将传感器获取到的数据送入控制器中,由控制器按照预设控制算法进行控制,采用比例积分微分(PID)控制、自适应控制或鲁棒控制等方法,可以计算出合适的调整信号,以修正系统的偏差,并抑制可能引起不稳定

的振动或位移。自适应控制策略特别适合钻探中不确定性较强的场合,能自动调节控制参数以适应环境变化和维持系统稳定性。模型预测控制(MPC)得到了广泛的应用,它通过构建系统的数学模型来预测未来的系统状态,并计算出最优的控制策略,从而提前采取措施避免不稳定的现象。为提高系统鲁棒性,鲁棒控制技术以优化控制器设计为手段,使得系统抵抗外部扰动及参数不确定性的能力更强。另外,本文还利用主动隔振技术将执行器设置于关键部位,并依据实时监测到的振动信号对其施加反向力以抵消外界干扰,从而进一步增强了系统稳定性。

4. 基于自适应控制的震动抑制与稳定性控制策略

以自适应控制为核心的震动抑制和稳定性控制策略,在复杂钻探环境下显示出了特有的优越性。自适应控制是通过设备运行状态及环境变化进行实时监控,并对控制参数进行动态调节来处理由于地质条件改变,机械磨损及操作误差带来的各种不确定因素。此策略的核心优势在于它出色的在线学习功能,可以利用如递归最小二乘法或卡尔曼滤波这样的系统识别技术,对钻探设备的动态模型进行即时的更新,使得控制器能根据系统的新特性对控制律进行调节,保证了对震动进行有效地抑制并保持了系统的稳定性。自适应控制策略一般将增益调度技术融入其中,并通过对不同运行点进行控制增益调节来适应可变的运行工况。另外,参数自整定机制使控制系统在非平稳运行时可自动进行参数优化配置以避免共振及非线性振荡。自适应控制器也可与预测模型相结合,通过预测误差对控制信号的校正,使其在振动初

现前即被主动抑制。这种策略既加强了系统鲁棒性又能显著减小震动幅度、提高装备稳定性与寿命,对于高精度、高可靠性需求的钻探任务尤其具有重要意义。

结束语

钻探时机电设备震动抑制及稳定性控制策略是保证高效安全运行的关键环节。通过对震动成因进行深入剖析,并将被动与主动震动抑制技术相结合,可有效降低装置运行过程中不稳定因素。同时建立准确的力学模型并进行稳定性分析可对设备的设计及操作参数进行优化,进一步提升系统稳定性。自适应控制策略为复杂的钻探环境提供了一种动态响应机制,确保系统能在各种不确定的条件下保持稳定的运行。总的来看,综合运用各种控制方法及技术,既可以有效地抑制震动、延长设备寿命又可以促进钻探作业整体效率及安全性。

参考文献

- [1] 机电之家. 简析岩土工程勘察中钻探设备及工艺的选择[J]. 中国招标, 2019(4): 2.
- [2] 王春莲. 论地质勘查钻探设备及其技术创新策略[J]. 机电信息, 2011(36): 2.
- [3] 刘伟. 煤矿机电设备常见故障分析及其处理策略探讨[J]. 山东工业技术, 2019.
- [4] 蒋明, 邹涛, 朱奇先. 变频钻机大功率拖动方案研究[J]. 电气应用, 2019(9): 5.
- [5] 刘洋. 露天煤矿机电设备生产效率提升的措施[J]. 探索科学, 2021(12): 91, 93-91, 93.