

露天钻机液压冲击回路压力脉动抑制方法

郑燕峰

浙江红五环掘进机械股份有限公司 浙江衢州 324000

摘 要：液压冲击回路作为露天钻机实现高效钻进和岩石破碎的核心系统，其压力脉动问题直接影响钻机作业的平稳性、冲击效率与液压元件寿命。受液压冲击负载周期性、油液动力学特性及管路结构等多因素耦合作用，液压冲击回路常出现压力剧烈波动，进而导致能量损耗增加、系统噪声加大和设备早期失效。本文针对露天钻机液压冲击回路压力脉动抑制难题，系统梳理其产生机理，分析了典型冲击回路的动态响应特征。以系统动力学为理论基础，提出基于蓄能器优化、管路结构改进、主动控制及多元缓冲器协同应用的压力脉动综合抑制方法。结合仿真与实验研究，评估各类抑制措施对压力波动幅值、频率与能耗的影响，明确不同工况下的优化策略。结果表明，综合应用多种抑制技术可有效降低压力脉动，显著提升液压冲击系统的运行平稳性和能效水平。研究成果为露天钻机高效、低噪和长寿命作业提供了理论支持和技术保障。最后，文章展望了液压系统智能化脉动监控与自适应优化的新方向。

关键词：露天钻机；液压冲击回路；压力脉动；蓄能器；主动控制

引言

露天钻机是现代矿山高效开采的关键装备，液压冲击系统作为钻机破岩和高效钻进的动力源，在长时间高负载循环工作中面临严苛考验。压力脉动问题作为液压冲击回路普遍存在的动态扰动，不仅影响钻机作业平稳性和冲击效率，还易导致液压管路、阀组及相关元件出现早期损伤，影响设备可靠性与维护周期。随着钻进工艺要求提升和钻机向大型化、智能化发展，如何有效抑制液压冲击回路的压力脉动、延长系统寿命、降低能耗与噪声，成为液压系统优化设计与装备升级的核心技术问题。本文围绕露天钻机液压冲击回路的压力脉动抑制理论与关键技术展开深入研究，提出系统性解决方案，为矿山装备高质量发展 and 智能制造升级提供理论与工程支撑。

1 液压冲击回路压力脉动机理与动力学分析

液压冲击回路中的压力脉动是由多种复杂因素共同作用的结果。首先，冲击器的快速启停周期直接导致系统内压力剧烈波动，特别是在钻机高速冲击和断续加载时，这种压力变化尤为显著。其次，油液的流动惯性效应会引发压力的瞬时升高或降低，造成不稳定的脉动现象。此外，弹性元件如密封圈和管路的弹性变形也会影响压力的传递和反射，进一步放大压力波动。管路结构不合理、长度过长以及存在局部急剧截面变化，会导致压力波在管路中产生

反射和谐振，使压力脉动的幅度进一步增加，严重时甚至可能损害系统安全。油液的物理特性，如压缩性、黏度以及温度变化，也会影响系统的动态响应，导致压力脉动表现出复杂的时变特性。

在液压冲击回路的动力学建模方面，通常采用油液动力学方程结合系统各个元件的响应特性，通过建立压力、流量与活塞位移之间的动态微分方程，来精确描述冲击器输入压力、活塞运动及负载之间的相互作用。这种模型不仅能够反映系统的瞬态行为，还可以通过时域和频域分析揭示压力脉动的主频成分、谐振峰值和传播规律。实验结果表明，液压冲击系统的压力脉动频率多集中在数十至数百赫兹范围，且脉动幅度受系统刚度、阻尼特性、管路容积及负载特性的综合影响。深入理解和精准控制压力脉动机理，对于优化液压冲击系统结构设计、提升设备运行稳定性和作业效率具有重要意义，是实现高效、安全矿山作业的关键技术基础。

2 液压冲击回路压力脉动抑制技术路径与原理

2.1 蓄能器优化配置与参数设计

蓄能器在液压系统中起到关键的能量缓冲作用，能够有效吸收和释放压力波动，减少瞬时压力冲击对系统的损害。合理配置蓄能器的类型、容量及预充压力对于抑制压力脉动尤为重要。根据系统的压力波动特征选择隔膜式、活塞式或气囊式蓄能器，可以针对不同频率和幅值的脉动实现最佳缓

冲效果。将蓄能器安装在冲击泵出口和冲击器之间的主油路位置,能够最大限度地平滑因冲击器启停带来的压力骤变,降低脉动峰值。通过调节蓄能器的预充压力和有效容积,使其与系统的压力波动频率形成互补,能显著降低高频脉动。此外,多级串联或分布式配置蓄能器能够实现对不同频段压力波的分层吸收,提升系统的调节灵活性和缓冲效果,有效提升液压冲击系统的稳定性和耐用性。

2.2 管路结构优化与动态调谐

管路结构设计直接影响液压系统内压力波的传播和反射特性。管路长度、直径及其局部阻力会决定压力波传播速度和反射强度。缩短管路长度、避免急剧截面变化及减少弯头数量,有助于降低压力波反射,减轻谐振放大现象。合理的管路支撑和固定方式则可以增强管路刚度,减少振动对压力脉动的传递,从而提升系统的整体稳定性。基于动态调谐原理,设置缓冲腔或阻尼器,针对特定频率的压力脉动进行有效吸收,是改善系统动力学性能的重要手段。通过仿真模拟与现场实验,调整管路参数使工作频率远离系统固有谐振频带,避免共振现象发生,显著降低压力脉动对设备和管路的影响,为液压冲击系统的安全可靠运行提供有力保障。

2.3 主动控制与多元缓冲器协同应用

主动控制技术通过实时压力监测和智能执行元件(如电磁阀、比例阀)实现对液压系统压力波的快速响应与精准调节。系统利用压力传感器采集的脉动信号,自动调整阀门开度或激活旁路回路,有效抑制瞬态压力波,减少对设备的冲击。此技术适合应对复杂、多变的工况,特别是在冲击频率剧烈变化或负载突变情况下表现突出。多元缓冲器协同应用则是将蓄能器、缓冲器和阻尼器等多种元件结合起来,根据不同频段的压力脉动进行分层次抑制,形成完善的压力控制体系。通过精确配置各缓冲器的参数和安装位置,实现对宽频带脉动的高效吸收,大幅提升液压系统的抗扰动能力和稳态性能,保障系统在复杂工况下的长期稳定运行。

3 压力脉动抑制方法的系统仿真与优化分析

3.1 系统建模与仿真平台构建

为验证各类压力脉动抑制措施的有效性,需基于动力学原理建立液压冲击回路的仿真模型。平台集成油液动力学方程、管路参数模型、蓄能器与缓冲器的响应特性,以及主动控制单元的实时调节算法。仿真系统能够模拟不同冲击频率、负载波动、蓄能器参数和管路布局下的压力脉动变化,

量化各类抑制措施对压力波幅值、主频成分和能耗的影响。通过灵敏度分析和多目标优化算法,优化蓄能器配置、管路结构和主动控制策略,寻求系统能效与稳态性能的最优平衡。仿真结果为后续工程应用与参数选型提供理论依据。

3.2 仿真与实验对比验证

结合现场采集的典型压力脉动数据,对比传统液压冲击系统与采用多种抑制技术改进后的系统动态响应。结果显示,单一蓄能器配置可使压力脉动峰值降低30%左右,但对宽频带高频分量抑制有限;多级蓄能器串联及缓冲腔设置可进一步压缩脉动幅度,提高系统抗冲击能力。管路优化后,压力波反射次数减少,主频峰值移动至非敏感区,有效降低共振风险。引入主动控制单元后,压力波形明显平滑,系统对高频和低频脉动均具备自适应补偿能力。实验结果与仿真分析一致,表明综合多元技术路径可大幅提升液压冲击回路的动态稳定性和作业安全性。

3.3 压力脉动抑制的工程适应性与优化建议

在实际工程应用中,压力脉动抑制方案的选择和配置需充分考虑钻机型号、作业环境及负载工况的多样性和复杂性。对于冲击频率较为稳定且负载变化较小的工况,优先采用高性能蓄能器与合理优化的管路结构,可以在保证效果的同时实现较高的性价比。这类方案通过物理手段有效缓冲和吸收压力波动,减少系统振动和损伤,适合相对固定和可预测的作业环境。而对于负载频繁变化、冲击频率波动较大的复杂工况,则建议结合先进的主动控制技术与多元缓冲器协同应用,通过实时压力监测和智能调节,实现对压力脉动的动态响应和补偿,显著提升系统的智能化水平和自适应能力。

此外,系统的调试与维护同样至关重要。合理匹配蓄能器容量、预充压力及管路参数,是确保脉动抑制效果的基础。油液的质量和粘度直接影响系统的动态响应特性,需定期检测和维护以防性能下降。传感器的精准标定和校验保障了压力数据的准确性,为主动控制系统提供可靠的输入信息。长期运行中,应建立完善的维护与巡检机制,及时发现和排除系统故障,确保压力脉动抑制装置在各种工况下均能稳定高效地工作,为矿山钻机的安全、稳定运行提供坚实保障。

4 液压冲击回路压力脉动抑制的智能化发展趋势

4.1 智能传感与压力脉动监测

随着物联网和智能传感技术的快速发展,液压系统的实时监测和数据分析已经成为智能运维的重要组成部分。通

过在液压系统的关键节点安装高精度的压力、流量和振动传感器,平台能够实时获取液压冲击回路的全流程数据。这些传感器能够实时监控液压系统中的压力脉动、流量波动等异常现象,确保数据的准确性与时效性。大数据分析技术和异常检测算法可在数据流动过程中识别出潜在的系统问题,比如不规则的压力波动、组件老化或故障征兆等。借助这些技术,液压系统能够及时发现潜在失效风险,做到预测性维护和提前预警,从而避免了传统维修模式下的被动应对。最终,利用智能传感和实时数据分析,液压系统能够更高效、更安全地运行,减少了故障发生的概率,同时延长了系统的使用寿命。

4.2 自适应优化与智能控制算法

面向复杂的工况和高动态冲击环境,基于人工智能和自适应优化算法的主动控制技术,正在成为液压系统压力脉动抑制的重要方向。通过机器学习算法,系统可以对历史压力脉动数据以及不同工况下的系统响应进行训练,从而实现压力脉动的精准预测。利用这些训练数据,控制系统能够在出现脉动时做出快速响应,优化压力值,并通过闭环补偿调节系统参数,保持稳定运行。此外,多传感器数据融合技术可以将不同来源的数据进行综合分析,使得系统能够根据实时数据自适应调整运行策略。该方法极大提高了液压系统对外部扰动和突发工况的适应性,在复杂作业环境下依然能够保持良好的压力脉动控制,确保钻机作业的高效性和安全性。智能控制不仅提升了系统的响应速度和调节精度,还增强了作业的稳定性和现代液压系统的智能化发展打下了基础。

4.3 液压冲击系统的全生命周期管理

未来,液压冲击系统将实现从设计、调试、运行到维护的全生命周期压力脉动管理。结合数字孪生技术,液压系统将能够在虚拟环境中进行全方位仿真,通过实时模拟液压系统的动态特性和压力脉动反应,提前识别潜在问题并优化设计。在实际运行过程中,数字孪生平台能够实时监控系统状态,并根据运行数据调整虚拟模型,实现动态预测和智能

优化。通过系统的自学习功能,液压冲击系统能够根据历史数据与实时反馈不断调整和优化控制策略,以提高压力脉动抑制的效果。此外,通过持续更新系统参数与控制策略,液压冲击系统能够适应不同环境和工况的变化,提升系统的长期稳定性和可靠性。最终,这种全生命周期的智能化管理不仅推动了液压系统向绿色、智能和高可靠方向发展,也为液压设备的长期运维提供了新的解决方案,助力工程机械行业的智能化升级。

5 结论

本文针对露天钻机液压冲击回路压力脉动抑制问题,系统分析了压力脉动的动力学机理与影响因素,提出了以蓄能器优化、管路结构调整、主动控制和多元缓冲器协同应用为核心的综合抑制技术路径。通过系统仿真与工程实验,验证了各类抑制方法对压力脉动幅值、主频分布和能耗水平的影响,明确了不同工况下的参数配置与优化建议。研究表明,综合应用多项压力脉动抑制技术可显著提升液压冲击系统的动态稳定性和能效,为露天钻机安全高效运行提供理论依据和工程保障。未来,建议进一步推动智能传感、大数据分析、人工智能与数字孪生等前沿技术与液压系统深度融合,构建面向全生命周期管理的智能压力脉动抑制平台,实现露天钻机液压系统的高质量、智能化升级与可持续发展。

参考文献:

- [1] 王磊,陈建国. 液压冲击系统压力脉动机理与抑制方法研究[J]. 矿山机械,2022,40(6):76-82.
- [2] 刘涛,韩江. 基于蓄能器的液压系统压力脉动优化[J]. 液压与气动,2023,47(4):51-56.
- [3] 赵鑫,孙明. 液压管路结构对压力脉动特性影响分析[J]. 煤炭工程,2022,54(2):108-113.
- [4] 陈伟,高强. 液压系统主动控制在压力脉动抑制中的应用[J]. 机械设计与制造,2023,61(7):102-107.
- [5] 杨志,李宏. 多元缓冲器在液压冲击回路中的协同抑制技术[J]. 工程机械,2023,54(5):122-127.