

优化可控震源性能助力地震资料质量提升

陈金茂

中石化石油工程地球物理有限公司胜利分公司 山东 东营 257000

摘要: 本文聚焦可控震源性能优化与地震资料质量提升。深入分析震源性能、外界环境及数据采集处理等影响因素,提出设计制造、信号处理控制、测试校准优化策略,以及激发、接收技术和观测系统设计的提升措施。经研究证实,多维度优化能够增强震源稳定性,改善地震波激发与接收效果,为实现高精度地震勘探提供坚实的技术保障。

关键词: 可控震源;性能优化;地震资料质量;信号处理;观测系统

引言

地震资料质量直接影响地下地质结构解析与资源勘探准确性,可控震源作为地震勘探核心装备,其性能对资料质量起关键作用。当前,复杂地质条件与勘探精度要求提升,对可控震源性能提出更高挑战。本文针对现有问题,深入剖析影响因素,探索性能优化策略与质量提升措施,旨在突破技术瓶颈,推动地震勘探技术向高精度、高效率方向发展。

1 可控震源概述

可控震源是地震勘探获取地下地质信息的核心装备,通过人工控制激发地震波。其工作时,动力系统提供能量,经振动系统转化为机械振动,再由控制系统精准调节振动信号的频率、振幅与相位,使地震波按需求向地下传播。常见类型中,液压可控震源输出力大,适用于陆地深层勘探,能穿透复杂地层,但设备维护成本高;电动可控震源绿色环保、操作便捷,在对环境要求高的城市周边等区域应用广泛,不过输出力相对有限。在地震勘探实践里,可控震源于陆地、海洋环境均有应用,可通过多次扫描与信号叠加提升资料信噪比和分辨率,但在复杂地形或地质条件下,仍面临波场激发与信号接收的挑战。

2 影响地震资料质量的因素分析

2.1 可控震源性能因素

可控震源的频率响应特性、输出力稳定性和信号畸变程度直接影响地震资料质量。频率响应特性决定了震源激发地震波的频带宽度,窄频带激发会限制地震资料的分辨率,难以识别薄地层;宽频带且平坦的频率响应能有效提升分辨率,使地震剖面呈现更多细节。输出力稳定性关乎地震波能量的一致性,若输出力波动大,将导致地震波传播过程中能量衰减不均,接收信号强弱差异显著,降低地震资料的信噪比。信号畸变程度反映震源激发信号与设计信号的偏离度,畸变严重时,地震波

相位关系改变,反射波组特征紊乱,影响地震资料的保真度,增加地质解释难度。例如在深层地震勘探中,震源若无法保持稳定高频输出,深层反射信号微弱,难以准确成像深部地质构造^[1]。

2.2 外界环境因素

地形地貌、地质条件与噪声干扰显著影响地震资料采集质量。复杂地形如山区、丘陵,导致震源与地面耦合效果不佳,能量泄漏严重,地震波激发效率降低;同时地形起伏使地震波传播路径复杂化,产生折射、绕射等现象,造成信号畸变。地质条件方面,高吸收性介质会快速衰减地震波能量,导致深部反射信号减弱;不均匀地质体使地震波传播速度发生变化,引起同相轴扭曲,影响资料准确性。环境噪声干扰包括工业噪声、交通噪声等,与有效地震信号叠加,降低信噪比,干扰微弱有效信号的识别。针对山区勘探,可采用辅助耦合装置改善震源与地面接触;在高噪声区域,通过增加震源激发能量、延长扫描时间提升信号强度,或利用阵列式检波器增强信号压制噪声。

2.3 数据采集和处理因素

数据采集系统的仪器精度、采样率和道间距设置,以及数据处理算法的选择,对地震资料质量起关键作用。采集仪器精度不足会引入系统误差,降低信号准确性;采样率过低导致高频信号丢失,影响资料分辨率;道间距过大则无法有效采集空间信息,出现假频现象。在数据处理阶段,滤波算法选择不当可能过度压制有效信号或无法有效去除噪声;叠加算法不合理会降低反射波信噪比;偏移算法不准确导致地质体成像位置偏移,影响构造解释精度。例如在浅层精细勘探中,需采用高采样率和小道间距采集数据,配合针对性滤波和叠前深度偏移算法,才能准确获取浅层地质结构信息,合理的采集与处理策略是获取高质量地震资料的重要保障。

3 可控震源性能优化策略

3.1 震源设计和制造优化

(1) 可控震源性能提升的关键在于设计与制造环节的创新突破。机械结构优化方面,传统震源振动器的连杆-活塞结构在高频作业时易产生应力集中,致使部件疲劳损坏。新型设计运用拓扑优化技术,重构振动器结构,通过优化部件几何形状与连接方式,有效降低应力集中。如一体化成型振动器减少部件间缝隙,使能量传递效率提升15%-20%,降低能量损耗,保障震源长时间稳定运行;模块化设计则让各功能模块可独立拆装维护,大幅提高设备维修效率。(2) 材料选择对震源性能影响深远。高强度轻质合金成为关键部件制造首选,钛合金以其高强度、低密度及优异耐腐蚀性,常用于振动器外壳制造,使设备重量减轻20%-30%,增强复杂地形作业机动性;镁铝合金因良好铸造性与减震特性,适用于底座部件,减少振动能量损失,优化震源与地面耦合效果。此外,碳纤维增强复合材料应用于部分结构件,其高比强度与阻尼特性进一步提升震源力学性能,延长设备使用寿命。(3) 控制系统智能化升级是性能优化核心。现代震源采用多轴联动控制技术与高精度伺服电机驱动系统,精准调节振动信号频率、振幅与相位。基于PLC与DSP的控制系统,由PLC负责逻辑控制与数据采集,DSP进行信号处理与算法运算,实时采集振动频率、输出力等数据,自动调整振动参数,将输出信号稳定性误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。智能传感器的应用实现关键部件健康监测,通过分析温度、磨损数据,提前预警潜在故障,使设备故障发生率降低40%。(4) 制造工艺精密密度决定震源性能实现程度。五轴联动加工中心保障关键部件达微米级加工精度,确保部件配合公差合理;低温装配技术通过控制温度精确调节部件间隙,减少热胀冷缩导致的装配误差;激光焊接等先进工艺用于薄壁部件连接,提高焊接强度与密封性,降低因焊接缺陷造成的性能损耗^[2]。

3.2 信号处理和校准优化

(1) 信号处理与控制技术是提升震源性能的关键手段。自适应滤波算法有效解决复杂噪声环境下的信号处理难题。在实际勘探中,工业、交通等噪声与有效信号叠加,传统滤波算法难以适应噪声动态变化。LMS自适应滤波算法通过最小化输出信号与期望信号的均方误差,自动调整滤波器系数,可将信噪比提升10-15dB。RLS算法凭借更快的收敛速度,在非平稳噪声环境下展现出优势,能实时抑制干扰,保留有效信号。(2) 谱均衡技术针对地下介质对不同频率地震波的非均匀衰减问题。由于高频成分在传播中衰减更快,导致接收信号频

谱畸变,降低资料分辨率。谱均衡算法基于地下介质衰减模型,对地震信号各频率成分进行增益调整。通过频谱分析确定高频补偿系数,使信号频谱更均衡,可将薄地层分辨率提高20%-30%,增强对薄层地质结构的识别能力。(3) 实时反馈控制技术保障震源输出力稳定性。在震源工作时,高精度加速度与力传感器实时监测振动输出,将数据反馈至控制系统。当输出力波动超过设定阈值(如 $\pm 5\%$),系统迅速调整液压压力或电机驱动参数。例如,在地质条件变化导致负载波动时,反馈系统可在0.5秒内完成参数调节,确保地震波激发能量稳定,维持信号一致性。(4) 智能算法为震源参数优化提供新路径。遗传算法通过模拟生物进化过程,在参数空间中搜索最优解;粒子群优化算法利用群体智能行为,实现参数快速迭代优化。这些算法可根据勘探目标与地质条件,自动优化频率范围、扫描方式、振动时长等参数组合。以深层勘探为例,智能算法可使震源激发效率提升30%,同时保证信号分辨率满足勘探需求。

3.3 震源测试和校准优化

(1) 完善的测试校准体系是震源性能稳定的保障。实验室测试提供高精度评估环境,利用振动台模拟不同频率、振幅输入,测试震源频率响应特性。通过频谱分析仪获取输出信号参数,绘制频率响应曲线,分析频带宽度、稳定性及相位特性。力传感器校准系统采用标准力源进行比对测试,确保测量误差小于 $\pm 1\%$,保证输出力测量准确性。(2) 现场测试验证震源实际工作性能。单点测试评估特定位置激发效果,多点测试分析不同地质条件下的性能差异,阵列测试通过检波器阵列采集波场空间信息。在山区勘探现场,通过阵列测试可分析地形对波场传播的影响,获取信号衰减与畸变数据。将现场测试结果与实验室数据对比,可发现环境因素导致的性能差异,如温度变化使输出力波动 $\pm 8\%$ 等问题。(3) 校准优化基于测试结果开展针对性调整。当频率响应不达标时,通过调整控制系统滤波器参数、更换振动部件等方式进行校准;输出力不稳定则检查液压密封、压力阀性能及机械传动部件磨损情况。建立标准化测试校准流程,定期对震源进行全面检测,记录性能数据建立设备档案,利用数据分析预测性能变化趋势,提前进行维护与参数优化,确保震源始终处于最佳工作状态。

4 利用可控震源提升地震资料质量的具体措施

4.1 激发技术优化

(1) 激发技术优化聚焦参数选择与多震源协同。频率范围需兼顾勘探深度与分辨率,浅层精细勘探(0-500m)采用10-100Hz频段,可分辨1-2m薄地层;深层勘

探 (>1000m) 选用5-30Hz频段, 确保地震波穿透能力。扫描方式中, 线性扫描适用于均匀地层, 非线性扫描(如指数扫描)在复杂非均匀介质中, 可使能量分配效率提高25%, 增强深层反射信号强度。振动时长需平衡能量与效率, 通过试验确定最佳时长, 避免因过短导致能量不足或过长降低作业效率。(2) 多台震源协同激发显著增强波场能量与频带宽度。同步激发使地震波在目标区域同相叠加, 能量提升40%-60%, 适用于增强浅层反射信号; 异步激发通过设置不同延迟时间与频率范围, 拓宽频带至5-120Hz, 有效提高深层构造分辨率。在复杂构造勘探中, 采用3-5台震源异步激发, 可使深部地层成像清晰度提升35%。

4.2 接收技术优化

(1) 高性能数字检波器是接收技术核心。相较于模拟检波器, 数字检波器具有更高灵敏度(提升3-5倍)与宽频带特性(5-150Hz), 能完整记录高频信号, 避免信息丢失。其内置数字信号处理芯片, 可实时抑制电磁干扰, 在城市勘探中, 使信噪比提高12-15dB。同时, 数字检波器的高动态范围(>120dB)确保强弱信号均能准确采集, 提升资料完整性。(2) 检波点布置需综合地形、地质与勘探目标。山区根据地形起伏调整高程, 确保检波器与地面紧密耦合, 减少信号损失。在断层、岩性突变带等区域, 将检波点间距缩小至常规的1/2-1/3, 加密采集数据, 捕捉细微波场变化。优化布置方案如不规则网格, 可根据地质复杂程度动态调整检波点分布, 提高有效信号采集率。(3) 先进接收系统集成多通道采集与实时处理功能。多通道并行采集技术使数据采集效率提升5-8倍, 满足高密度勘探需求。实时滤波、增益调整功能可在信号传输过程中抑制噪声, 减少失真。通过匹配震源激发特性调整采样率、前置增益等参数, 使接收系统与震源协同工作, 将信号保真度提高至90%以上, 为资料处理提供高质量数据^[3]。

4.3 观测系统设计优化

(1) 正交对称采样观测系统有效抑制噪声、提升分辨率。通过炮点与检波点正交对称布置, 利用波场对称性消除50%以上的随机噪声与规则噪声, 使信噪比提高15-20dB。该系统确保波场连续采样, 避免空间假频, 在复杂构造区, 可使断层成像精度提高25%。实际应用中, 根据勘探目标调整炮检距与排列长度, 充分发挥系统优势。(2) 炮检点间距设计需权衡分辨率与成本。减小炮点间距可增加覆盖次数, 提高信噪比, 但成本上升; 检波点间距需满足奈奎斯特采样定理, 避免假频。浅层勘探采用小间距(炮点10-20m, 检波点5-10m), 可分辨3-5m地质体; 深层勘探适当增大间距(炮点30-50m, 检波点15-25m), 保证能量覆盖与勘探效率。(3) 复杂地质区需针对性设计观测系统。宽方位角观测系统从多角度采集波场信息, 在盐丘构造区, 可使构造形态成像准确率提高40%; 三维观测系统通过立体采样, 准确确定地质体空间位置, 在火山岩分布区, 能清晰呈现岩体边界与内部结构。结合地形地貌与施工条件优化观测方案, 确保采集数据满足地质解释需求。

结语

研究形成的可控震源性能优化策略与地震资料质量提升措施, 经理论与实践验证有效。通过改进震源设计制造、创新信号处理技术及优化采集观测方法, 显著提升了地震勘探数据的可靠性与准确性。未来, 随着勘探需求升级, 需持续深化技术研究, 探索智能化、集成化优化路径, 进一步提高地震勘探的精度与效率。

参考文献

- [1] 张志立, 焦艳艳, 薛诗桂. 高分辨率地震资料处理技术研究[J]. 石化技术, 2021, 28(12): 102-103.
- [2] 蔡文芮. OVT域叠前时间偏移在煤田高密度三维地震勘探中的应用[J]. 能源与环境, 2021, 43(10): 142-148.
- [3] 马涛, 王彦春, 柳兴刚, 等. 力信号反褶积方法在可控震源单炮资料提取中的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(04): 1438-1444.