

低频可控震源技术发展现状及趋势研究

葛雪钦 赵国勇 李雪娇 胡照乾 郝晓敏

中石化石油工程地球物理有限公司科技研发中心 江苏 南京 211100

摘要: 随着地震学研究的不断进展,可控震源技术已成为地震学领域中的一个重要分支。可控震源是一种地震勘探信号激发设备,在石油勘探中具有施工成本低、安全环保、施工组织灵活、激发信号可人为控制等优点。随着可控震源技术自身的发展,以及各油公司对可控震源认识的深入和深层-超深层勘探的技术需求,近年来可控震源应用越来越广泛,主要是朝着低频激发和高效、高保真采集方向发展[1]。本文对现有低频可控震源技术进行了综述,包括低频可控震源主流装备、低频可控震源高效采集方法、高保真采集技术。本文探讨了低频可控震源技术的发展趋势,并提出该技术领域未来攻关方向。

关键词: 低频可控震源;高保真采集技术;发展趋势

Research on the Development Status and Trends of Low Frequency Vibroseismic Source Technology

Ge Xueqin, Zhao Guoyong, Li Xuejiao, Hu Zhaoqian, Hao Xiaomin

Technology Research and Development Center, Sinopec Petroleum Engineering Geophysics Co., LTD., Jiangsu, 211100 Nanjing

Abstract: With the continuous progress of seismology research, vibroseis technology has become an important branch in the field of seismology. Vibroseis is a kind of seismic exploration signal excitation equipment, which has the advantages of low construction cost, safety and environmental protection, flexible construction organization and artificial control in petroleum exploration. With the development of vibrator technology itself, as well as the technical requirements of oil companies in their deep understanding and deep-ultra-deep exploration, vibrator has been used more and more widely in recent years, mainly in the direction of low-frequency excitation and efficient and high-fidelity acquisition. This paper summarizes the existing low-frequency vibrator techniques, including the mainstream equipment, the efficient method of acquisition, and the high-fidelity acquisition techniques. This paper discusses the development trend of low-frequency vibrator technology, and proposes the future direction of the technical field.

Keywords: Low frequency vibrator; High fidelity acquisition technology; Development Trends

1 低频可控震源技术原理

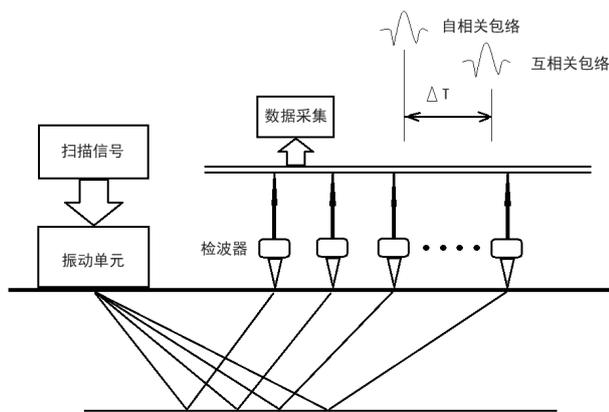


图1 可控震源工作原理

可控震源系统是一种应用较为广泛的非炸药震源,它是通过连续振动系统激发长扫描信号,最后采用互相关处理

方法压缩成反应地质信息的地震记录,其工作原理见图1。可控震源和炸药震源不一样,它产生的是一种随时间变化,频率呈线性或非线性变化的正弦振动信号,但是这两种震源的地震勘探理论基础是相同的,地震记录都可以采用褶积模型来表示。可控震源可以采用多台多次叠加来增强地震波能量,低频可控震源可以产生更宽频带的地震波,提高深层、超深层地质目标体的成像精度,因此,在石油及天然气勘探领域具有广阔的应用前景。

低频可控震源通常是指激发信号达到满驱状态的最低频率低于5Hz^[2]。在通常的情况下,可控震源的起始扫描频率小于3Hz,产生的振动信号也发生严重的振幅和相位畸变,并且会严重损坏可控震源的振动系统和液压系统,甚至会导致不可修复的损伤。目前最有效的拓展低频的方法有两种,一种是在低频段通过降低出力的方式满足液压流量和重锤行程的要求,由于低频段出力较小,因此必须通过降低频率变化

率、同时延长低频扫描时长来补偿低频能量,为了保证中、高频段激发能量,通常会适当延长扫描长度;第二种方法是改进可控震源振动系统和液压系统,或者升级控制箱体的算法,实现更优质的低频能量输出。

通过对可控震源的液压系统进行改造,可以实现低频段的稳定能量输出。可控震源低频扫描需要更多的液压油流供给振动系统,然而在低频时,供油不足和压力波动降低了低频的下行能量。为了解决这个问题,BGP对可控震源系统泵的液压流进行了合成改造,减少了振动系统的液压波动,提高了泵的中低频性能,有效提升低频端的能量。

2 低频可控震源电控箱体改造设计

低频可控震源电控箱体是一个非常复杂的电子控制系统,相当于可控震源的电脑,也是可控震源的核心部件。可控震源电控箱体是功能强大的全自动适应伺服机械数字控制系统,如伪随机扫描、滑动扫描、HPVA扫描。电控箱体主要包括数字信号发生器(用于发送扫描信号)和数字伺服驱动器(用于控制震源振动和收集质控信息)。可控震源控制系统都是由在连续振动过程中的反馈信号与参考信号锁相环路概念这一重要基础之上发展起来的。这种锁相控制环路的基础模型认为:可控震源受控信号(包括震源平板加速度信号,重锤加速度信号或地面力信号)相位应与参考信号相位同步。

控制系统的综合控制环路主要用于震源在产生扫描振动期间,对震源振动器和平板的运动进行控制以达到使地面力信号相位和畸变误差最小的目的。因此,使用最优控制技术和先进的KALMAN滤波器技术,即便震源工作在变化剧烈的地表情况下,震源也可获得最佳的系统响应。

该状态控制环路是一个子控制环路,它在控制系统中使用的伺服控制环路的整个过程中属于基础控制部分。状态控制环路具有4个特点:

2.1 该环路反映可控震源性能的4个物理参量:重锤加速度、平板加速度、重锤位移、伺服阀芯位移。

2.2 可以通过震源模型计算出上述4个物理量的理论值来。

2.3 可以将KALMAN滤波器看成一个状态观测器;观测结果取决于实际的检测结果(来自震源系统)和理论计算数据(来自震源理论模型),通过对可控震源的10个状态变量的优化,控制环路可以超前为系统提供合适的预校正增益值。

2.4 采用最小平方差控制可以提供时间超前250 μ s的控制指令,并将该控制指令以并行方式送入到震源力矩马达。该指令不是从2个加速度传感器检测到的数值直接计算出来的,而是考虑到震源的10个状态信号并结合震源理论模型计算出来的。

为了实现可控震源低频信号的稳定输出且不伤害可控震源硬件本身,除了改造可控震源液压系统外,还可以通过改造电控箱体的部分功能模块,增加非线性信号设计和自适应优选功能,实现低频信号的稳定输出,减少谐波畸变。

在控制箱体主板新增低频非线性扫描信号设计模块,根据工区实测的力信号数据、平板反馈的加速度、相位畸变数据优化设计非线性低频扫描信号。另外,通过现场实时测得不同地表条件刚度、黏度数据和不同频率力信号数据,换算可控震源弹性、阻尼系数,优化设计不同地表条件优势频段子波,进一步优化设计工区不同地表条件的扫描信号,建立非线性低频扫描信号库,并通过数据接口导入电控箱体中。在施工过程中,根据不同地表条件反馈数据,自适应优选非线性扫描信号,实现低频可控震源高精度地震采集,提高深层地质目标的成像精度。可控震源电控箱体改造设计技术方案如图2,该方案相比通过单炮记录振幅谱分析实现自适应扫描方法效率更高,地表适应性更好。

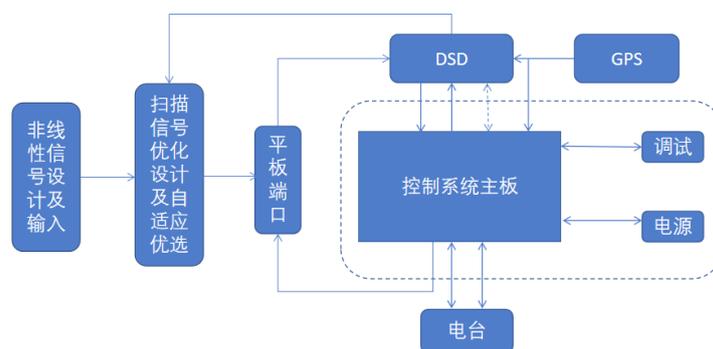


图2 低频可控震源电控箱体改造设计技术路线

3 低频可控震源地震勘探技术发展趋势与攻关方向

随着可控震源向低频拓展,应用场景从简单地表向复杂地表、从浅层向中深层、超深层发展,现有技术难以满足要求,需在以下四个方面进行深入研究:

3.1 在重锤质量不变的情况下,可控震源低频峰值出力主要受重锤单边行程影响。在保持可控震源出力不变的情况下,理论上1.0Hz的重锤单边行程要远大于1.5Hz时的重锤单边行程,未来低频可控震源研究的重点应是进一步改进震源

结构和控制算法, 确保极限低频出力稳定, 减少谐波畸变, 同时兼顾震源高频性能, 实现宽频高效可控震源采集。

3.2 城镇复杂地表障碍区对可控震源勘探提出新的需求, 因此未来需要发展适应于城镇勘探的小型化低频可控震源。由于城市勘探目的层多为浅层, 激发能量小于常规震源, 因此可以从机械、液压结构入手适当降低震源出力, 研制小型化低频可控震源。

3.3 为了满足多波勘探和裂缝型储层精细预测的需求, 需要创新研发高效高精度宽频的横波可控震源, 改善横波激发效果。通过改进横波振动器的结构, 更好地实现激发两种振动方向互相垂直的横波, 从而提高横波勘探的精度^[3]。

3.4 可控震源自动化、智能化勘探将成为未来重要的发展方向之一, 可控震源智能化主要体现在勘探过程中减少人工操作流程, 尽量采用智能化控制系统完成勘探作业, 比如

震源车自动驾驶、多震源自主激发、激发参数的自动选取等。随着可控震源智能化水平的不断提高以及高效采集技术的进步, 可控震源勘探效率必将得到进一步提升。

参考文献

[1]陈玉达,林君,邢雪峰等.可控震源技术发展与应用[J].石油物探, 2020, 59(5):666-682.

[2]王力伟,李丽,杨微等.低频可控震源激发信号特征及高精度动态监测应用[J].地震研究,2021,44(4):622-634.

[3]郝磊,刘志刚,黄玉峰等.一种横波可控震源振动器结构及其性能分析[J].物探装备, 2021, 31(5):311-313.

作者简介: 葛雪钦(1983年11月), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地震采集方法研究工作。