

可控震源地震数据谐波滤除方法

伍建*^① 王润秋^① 魏加明^② 张晓磊^③

于骏清^① 孙立鹏^① 江勇勇^①

(^①油气资源与探测国家重点实验室, CNPC物探重点实验室, 北京 102249; ^②恒泰艾普石油天然气技术服务股份有限公司, 北京 100094; ^③中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

伍建, 王润秋, 魏加明, 张晓磊, 于骏清, 孙立鹏, 江勇勇. 可控震源地震数据谐波滤除方法. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 47-52.

摘要 本文分析了可控震源滑动扫描中各种谐波产生的原因, 指出高次谐波是其中最严重的谐波干扰类型; 通过原理分析及数值试验探讨了滑动扫描方法, 并基于高次谐波与原始激发信号在各频段的能量呈线性关系这个假设建立了谐波滤除的数学模型; 利用参考信号倍增法生成各次谐波, 并用各次谐波相关对比法估算各次谐波的能量比。将本文滤除谐波算法应用于实际数据处理, 所得结果表明该方法不仅滤除谐波效果好, 而且运算速度快。

关键词 可控震源 谐波畸变 地震数据采集 滑动扫描 滤除高次谐波

中图分类号: P631 文献标识码: A

1 引言

自20世纪60年代以来, 可控震源已逐渐成为地震勘探中最重要的激发源之一^[1]。随着全球对环境保护要求的不断提高, 除在某些特殊地区外, 炸药震源最终将被更安全、更经济的激发源(如可控震源)取代。然而在实际勘探中, 可控震源激发的信号相对于理想信号往往会有畸变。当地表或地质情况较复杂时, 震源平板与地面耦合往往不佳, 如当地表土质太硬或太软时, 会导致可控震源信号出现严重谐波畸变^[2]。因不同型号可控震源的振动器及平板设计结构存在差异, 导致信号谐波畸变大小也不相同; 当可控震源激发某一频率信号时, 会在震源的整个作用力时间内伴有此信号频率整数倍的信号, 称之为“高次谐波”。

Seriff等^[3]率先探讨可控震源与地面耦合时出现的高次谐波畸变问题; 随后, Sallas^[4]通过分析测井接收到的可控震源信号, 并结合理论推导, 对

可控震源平板与地表耦合时产生的高次谐波畸变进行了更深入研究, 提出采用平板加速度信息抑制谐波畸变产生的方法, 提高了激发信号的可靠性和稳定性。

Schrodt^[5]、Martin等^[6]和 Reust^[7]分别从井下接收的远场子波, 硬、软地表可控震源耦合等方面, 讨论了可控震源谐波畸变和相位变化问题, 得到“出力越大, 地面越坚硬, 则可控震源的谐波畸变就越严重”的结论。Li^[8]提出一种基于小波变换的可控震源地震信号高次谐波滤除方法, 且取得了很好效果, 但因其处理速度尚达不到工业要求, 故未得到实际应用。

本文主要探讨可控震源滑动扫描去谐波方法, 即假定高次谐波与原始激发信号在各频段的能量呈线性关系, 以此估计各次谐波的能量之比, 推出一套在频率域滤除高次谐波的算法; 建立了应用于滑动扫描信号处理的一整套处理流程, 取得了令人满意的处理效果; 该套处理方法速度快、实用性强, 适宜在可控震源勘探数据的处理中推广应用。

*北京市昌平区府学路18号中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院, 102249. Email: wujian441460844@sina.com

本文于2013年4月8日收到, 最终修改稿于同年12月30日收到。

本研究受“973”计划项目“深层油气藏地球物理探测基础研究”(2013CB228602)及国家重大专项“多波地震勘探及裂缝储层预测配套技术”(2011ZX0519-008-02)联合资助。

2 方法原理

2.1 滑动扫描信号记录分离

滑动扫描技术^[9]是可控震源地震勘探中一种高效数据采集方法。与常规可控震源数据采集相比,它不必等到前一组震源扫描结束后下一组震源才开始工作。但滑动扫描各组的振动是相互重叠的,因此其检波器检测到的记录也是重叠的。在扫描激发方式下,数据是连续记录的,这种记录称为母记录。为了将各组记录分开^[10],在进行相关处理前,根据辅助道中的时断(TB)信号对原始记录按不同的时间进行剪切,并与各自时刻的参考信号进行相关运算,从而将各组的听记录分开。具体操作步骤是:首先从时断脉冲位置开始,截取长度为 $T_1 + T_s$ (听时间+扫描时间)的一段地震记录,然后将截取地震记录与各自时刻的参考道信号做相关;最后截取相关记录中时间为 $0 \sim T_1$ 的一段相关记录,即为单炮的听记录。

2.2 高次谐波滤除法

可控震源激发的信号通常是线性扫描信号,即

频率呈线性规律增加的正弦信号。如果单次扫描信号的振幅为 A , (扫描)时间长度为 T_s , 起始最小频率为 f_s , 终止时最大频率为 f_e , 则扫描信号可写成

$$h(t) = A \sin 2\pi [f_s + (f_e - f_s)t / (2T_s)]t \quad (1)$$

本文探讨的去谐波方法主要是针对使用线性升频扫描信号的可控震源滑动扫描方式。

由可控震源勘探基本原理可知,扫描信号自相关脉冲对分辨率有至关重要的影响。从图1可看出高次谐波对震源波形及相关脉冲的影响,高次谐波影响了尖脉冲,使其有明显的旁瓣。

由本炮谐波造成的旁瓣主要集中在相关地震记录负时间轴方向,而相关地震记录的有效波在正时间轴方向,所以本炮的高次谐波对结果影响不大。对于滑动扫描采集方式,需滤除的高次谐波主要是下一炮信号的谐波。

根据理想情况下的褶积模型,相关前每道可控震源信号 d 可表示为

$$d = h * r \quad (2)$$

假设在发生高次谐波畸变时,谐波与原始激发信号在各频段的能量呈线性关系。如果用 ω_i ($i=1, 2, \dots, n$) 代表第 i 次谐波所占的权重, h_i ($i=1, 2, \dots, n$)

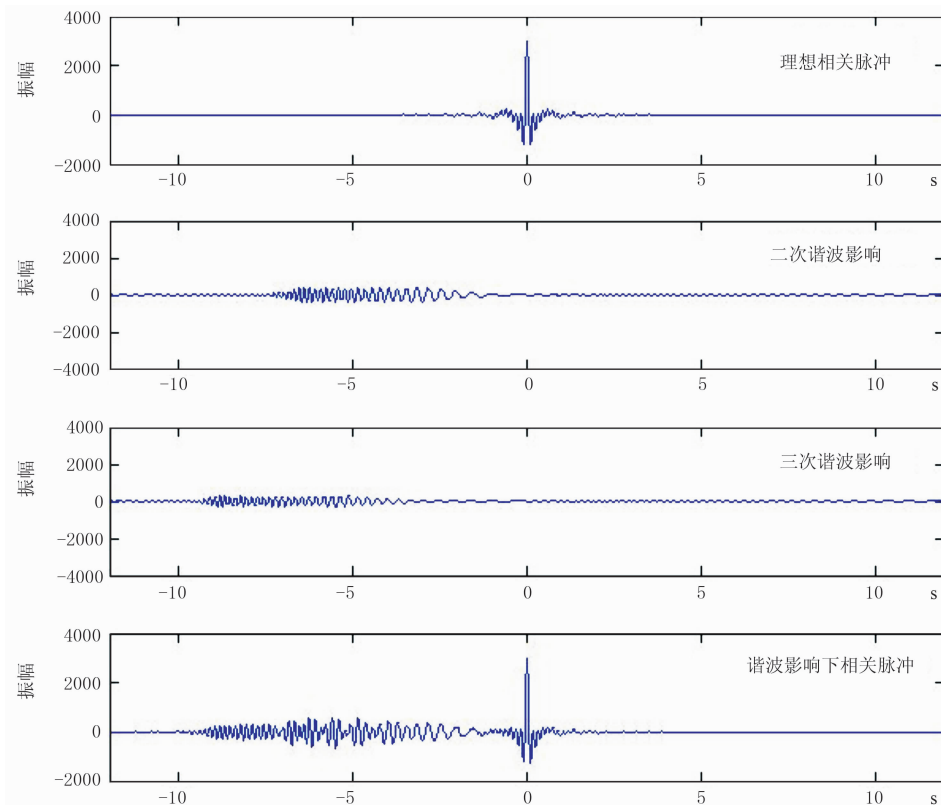


图1 高次谐波对相关脉冲的影响

表示第 i 次谐波,则在有谐波干扰情况下,式(2)可改写为

$$d = (\omega_1 h_1 + \sum_{i=2}^n \omega_i h_i) * r \quad (3)$$

转换到频率域,可写成

$$D = R(\omega_1 H_1 + \sum_{i=2}^n \omega_i H_i) = R\omega_1 H_1 \left(1 + \sum_{i=2}^n \frac{\omega_i H_i}{\omega_1 H_1}\right) \quad (4)$$

其中 $D, R, H_i (i=1, 2, \dots, n)$ 分别是 $d, r, h_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的傅里叶域的复数序列,且有

$$R\omega_1 H_1 = \frac{D}{1 + \sum_{i=2}^n \frac{\omega_i H_i}{\omega_1 H_1}} \quad (5)$$

将上面的信号再变换回时间域,即是滤除谐波后的信号。但对于实际信号而言, $H_i, \frac{\omega_i}{\omega_1}$ (各次谐波的权重值)等变量都是未知的,需要采用一定的方法估算出来。

3 正演模拟试算

3.1 高次谐波滤除法模型试算

用可控震源理想激发信号方程生成基波 h_1 及高次谐波 h_2, h_3 , 即

$$\begin{aligned} h_1(t) &= A_1 \sin 2\pi [f_s + (f_e - f_s)t/(2T)]t \\ h_2(t) &= A_2 \sin 4\pi [f_s + (f_e - f_s)t/(2T)]t \\ h_3(t) &= A_3 \sin 6\pi [f_s + (f_e - f_s)t/(2T)]t \end{aligned} \quad (6)$$

再用基波与 0.4 倍的二次谐波、0.2 倍的三次谐波进行叠加,生成带谐波的模拟扫描信号 h , 即 $h = h_1 + 0.4h_2 + 0.2h_3$ 。并把这样的两炮信号错位叠加在一起,生成前后炮相连的模拟扫描信号 x , 与地

层反射系数序列 r 褶积,得到模拟地震道记录 $d = x * r$, 此地震道记录频率随时间变化情况如图 2a 所示。

H_1, H_2, H_3 是用标准的正弦函数方程生成信号傅里叶变换得到的复数序列; $\frac{\omega_2}{\omega_1}$ 和 $\frac{\omega_3}{\omega_1}$ 还是先前设计模拟信号时的二次和三次谐波的权重值,即 0.4 和 0.2。对下一炮信号运用式(5)算法,所得处理效果如图 2b 所示。可以看出,本文算法处理得到的下一炮信号中的二次及三次谐波的滤除效果明显。

3.2 高次谐波生成法模型试算

在上述模拟运算中, H_1 的振幅谱类似于 (f_s, f_e) 区间内的矩形窗。同理, H_2 和 H_3 的振幅谱分别类似于 $(2f_s, 2f_e), (3f_s, 3f_e)$ 区间内的矩形窗(图 3),其时频图如图 2a 所示。

对 H_1 通过振幅谱稀疏和线性插值法生成的各次谐波的振幅谱如图 4 所示、时频图如图 5 所示。通过波形、振幅谱及时频图的对比,认为用振幅谱稀疏后插值及相位谱加倍法生成的高次谐波与模型吻合较好,可将通过这种方法得到的高次谐波应用于本文提出的谐波滤除算法中。

3.3 高次谐波权重估计法试算

首先以 $h = h_1 + 0.4h_2 + 0.2h_3$ 生成一个标准的模拟扫描信号,当该模拟扫描信号分别与 h_1, h_2, h_3 进行相关时,发现时间零点尖脉冲位置大约就是 $h_1 \otimes h_1, h_2 \otimes h_2, h_3 \otimes h_3$ 的主要能量集中处,而且尖脉冲能量的比值非常接近于各次谐波权重的比值。因此可用 h 与 h_1, h_2, h_3 相关运算生成的信号初至波位置的尖脉冲能量比来近似 $\frac{\omega_2}{\omega_1}$ 和 $\frac{\omega_3}{\omega_1}$ 。具体操作时是以初至波位置为中心,取一个窗口(如 Tukey

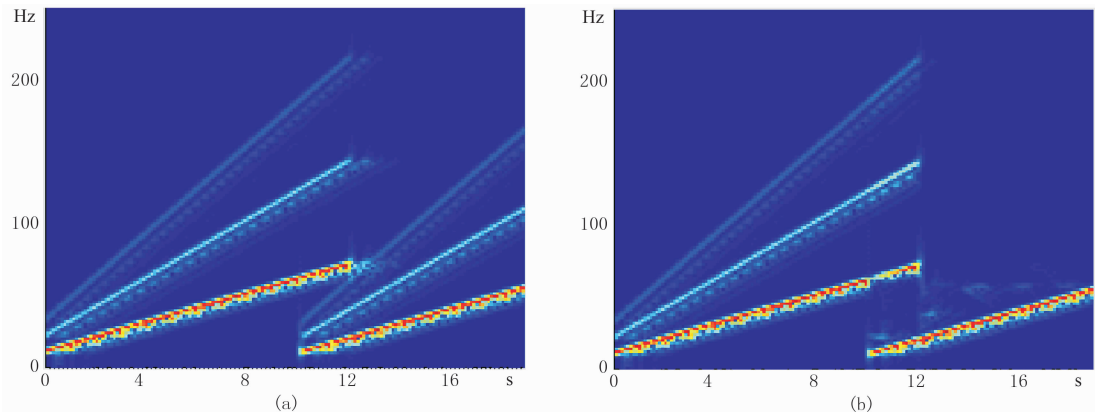


图 2 模拟地震道记录处理前(a)、后(b)的时频图

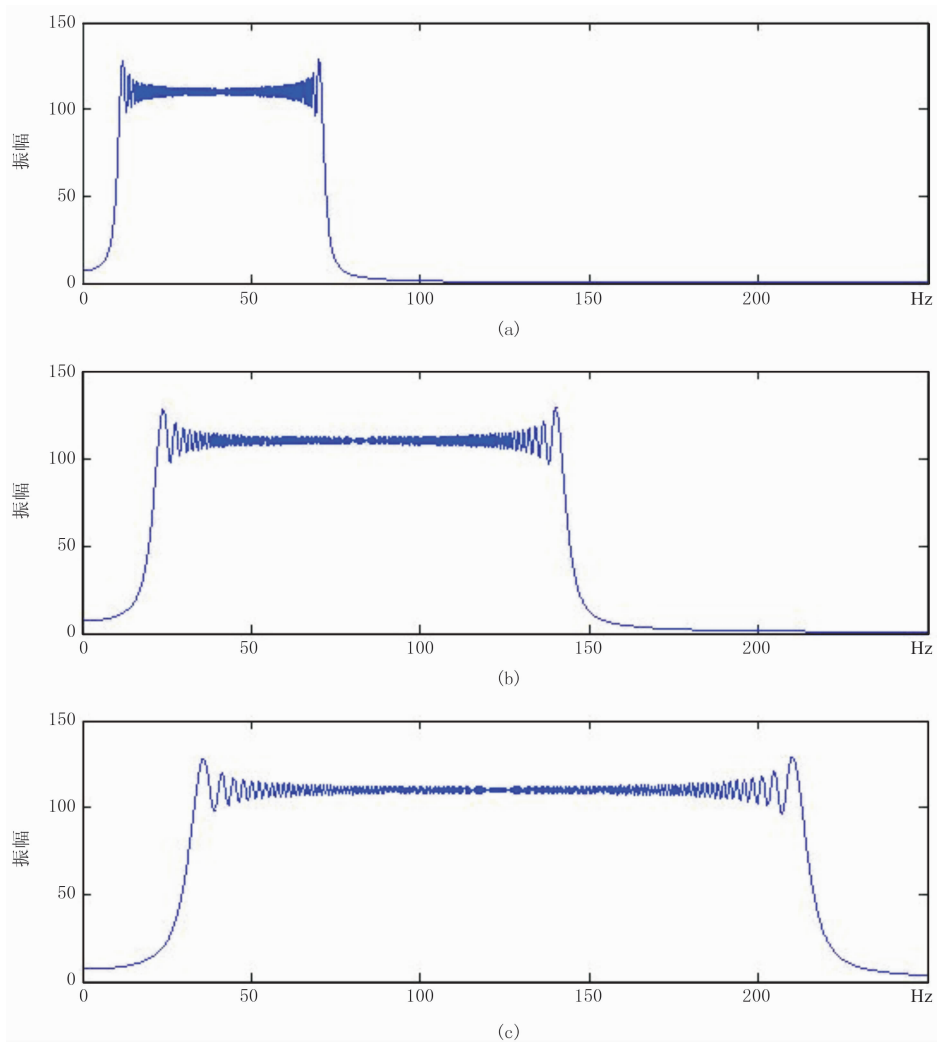


图3 数值模拟所用的基波(a)和二次(b)、三次(c)谐波的振幅谱

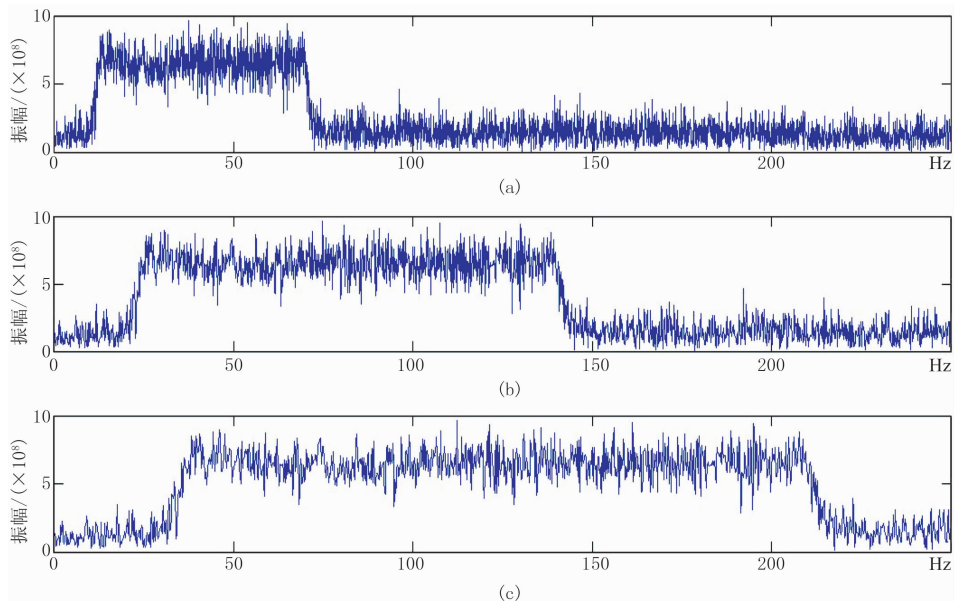


图4 通过振幅稀疏法生成的基波(a)和二次(b)、三次(c)谐波的振幅谱

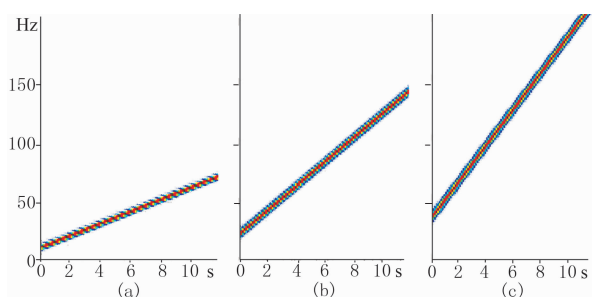


图 5 基波(参考信号,a)及频率倍增法生成的二次(b)、三次(c)谐波的时频图

窗),将尖脉冲取出,然后对比各个尖脉冲的模,即

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\text{norm}[(d \otimes h_2) * \omega_{\text{tukey}}]}{\text{norm}[(d \otimes h_1) * \omega_{\text{tukey}}]} \quad (7)$$

$$\frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{\text{norm}[(d \otimes h_3) * \omega_{\text{tukey}}]}{\text{norm}[(d \otimes h_1) * \omega_{\text{tukey}}]}$$

由该式可计算出此道信号的谐波能量权重: $\frac{\omega_2}{\omega_1} \approx$

$$0.3958, \frac{\omega_3}{\omega_1} \approx 0.1924。$$

4 实际资料处理

本次试验数据由中国石油集团东方地球物理公司采集于利比亚,共 $280 \times 4 = 1120$ 炮,280 道。试验参数如下:扫描时间 $T_s = 12\text{s}$,听时间 $T_l = 7\text{s}$;信号起始频率 $f_s = 10\text{Hz}$,信号终止频率 $f_e = 72\text{Hz}$ 。母记录已被剪切好,即每炮地震数据都由本炮起始时刻起剪切时间长度为 $T_s + T_l = 19\text{s}$ 的一段,且废炮都已被剔除。

对共炮点道集相关前的原始地震数据进行处理,此记录时间长度为 19s ,用本文的高次谐波滤除法去除每道中含有的下一炮谐波。滤波前、后的结果对比见图6和图7,从中可看出处理后信号的波形

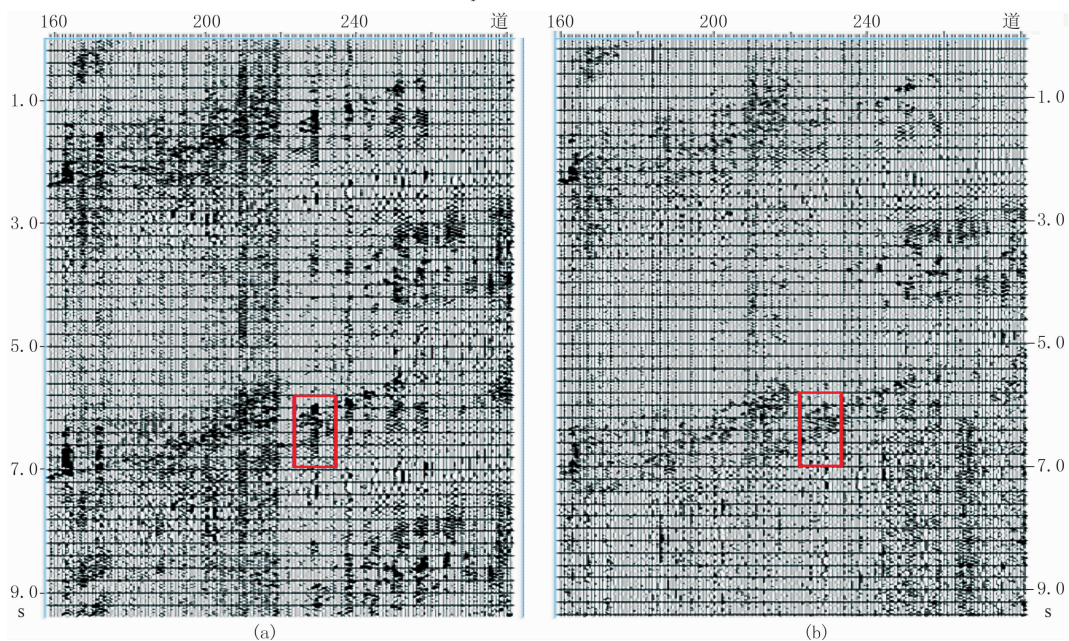


图 6 未相关共炮点道集数据滤波前(a)、后(b)的对比

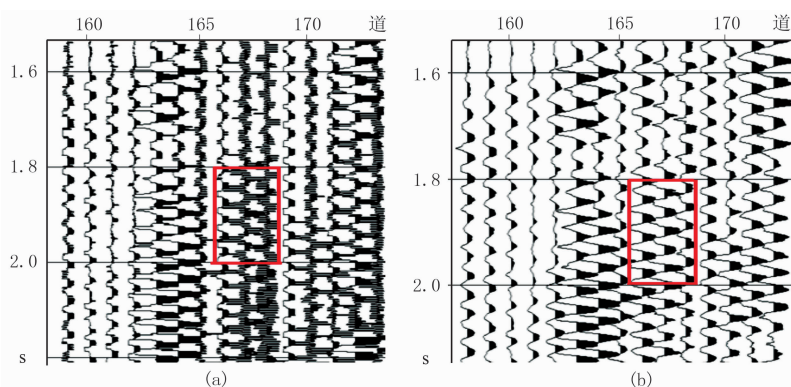


图 7 未相关共炮点道集数据滤波前(a)、后(b)局部放大图的对比

更规则、同相轴更清晰,这表明高次谐波的滤除效果明显,能为后续处理提供可靠的基础数据。

5 结束语

为了去除可控震源在激发某一频率信号时伴生的高次谐波,本文提出了可控震源滑动扫描去谐波法,即假设在发生高次谐波畸变时,谐波与原始激发信号间呈线性关系;通过正演模拟生成高次谐波、估算谐波权重并探究谐波滤除法;将本文滤波法应用于实际资料处理,结果表明不仅滤除谐波效果好,而且处理速度快。需要指出的是,关于谐波能量之比的估算以及各次标准谐波的确定还有待在后续研究中做进一步完善。

参考文献

- [1] 南文海,丁志滢. 可控震源发展中有关问题的探讨. 物探装备,1999,9(2):26-29.
Nan Wenhai, Ding Zhigang. Discussion on the development of vibroseis. Equipment for Geophysical Prospecting, 1999, 9(2): 26-29.
- [2] 魏铁,于世东,于敏杰等. 可控震源噪声分析. 石油地球物理勘探,2008,43(增刊2):38-43.
Wei Tie, Yu Shidong, Yu Minjie et al. Analysis of noise in vibroseis. OGP, 2008, 43(S2): 38-43.
- [3] Seriff A J, Kim W H. The effect of harmonic distortion in the use of vibratory surface sources. Geophysics, 1970, 35(2): 236-246.
- [4] Sallas J J. Seismic vibrator control and the downgoing P-wave. Geophysics, 1984, 49(6): 732-740.
- [5] Schrodt J K. Techniques for improving vibroseis data. Geophysics, 1987, 52(4): 469-482.
- [6] Martin J E, White R E. Two methods for continuous monitoring of harmonic distortion in vibroseis signals. Geophysical prospecting, 1989, 37(7): 851-872.
- [7] Reust D K. Pressure feedback servovalve for a seismic vibrator. US Patent 07/608834, 1992.
- [8] Li Xiaoping. Decomposition of vibroseis data by the multiple filter technique. Geophysics, 1997, 62(5): 980-991.
- [9] 付金洲,王庆明. 滑动扫描 Salvo 方法在复杂地区的使用. 物探装备,2009,19(3):162-167.
Fu Jinzhou, Wang Qingming. Salvo of slip sweep used in complex area. Equipment for Geophysical Prospecting, 2009, 19(3): 162-167.
- [10] 刘益成,陈联青,易碧金等. 可控震源滑动扫描记录信号分离原理分析. 石油天然气学报,2009,31(2):50-52.
Liu Yicheng, Chen Lianqing, Yi Bijin et al. Analysis of signal separation principle for slip-sweep records of vibrator. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 50-55.
- [11] Okaya D A, Karageorgi E A, McEvelly T V et al. Removal of ground-induced vibroseis correlation artifacts by frequency-uncorrelated time filtering. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1990, 9: 1547-1550.
- [12] Jeffryes B P. Processing simultaneous vibratory seismic data. US Patent 10/203435, 2003.
- [13] Allen K P, Johnson M L, May J S. High fidelity vibratory seismic (HFVS) method for acquiring seismic data. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1998, 17: 140-143.

(本文编辑:朱汉东)

作者简介



伍建 硕士研究生,1989年生;2012年本科毕业于中国石油大学(北京)勘查技术与工程专业,获学士学位;现在中国石油大学(北京)攻读地球探测与信息技术专业硕士学位。