

# 滑动扫描谐波的现场压制方法

蓝益军\*<sup>①②</sup> 张树慧<sup>②</sup> 孟银龙<sup>①②</sup>王新全<sup>①②</sup> 杨 飙<sup>③</sup> 刘 阳<sup>①</sup>

(①中国石油东方地球物理公司吐哈物探处,新疆哈密 839009; ②中国石油东方地球物理公司采集技术支持部,河北涿州 072750; ③中国石油吐哈油田分公司勘探公司,新疆哈密 839009)

蓝益军,张树慧,孟银龙,王新全,杨飙,刘阳. 滑动扫描谐波的现场压制方法. 石油地球物理勘探,2013,48(4): 507~512

**摘要** 高密度宽方位三维勘探在成为主流地震勘探技术的同时,也带来激发成本的大幅度提高。应用滑动扫描能有效降低激发成本,提高施工效率。但可控震源激发本身存在的谐波因采用滑动而不可避免地干扰了相邻炮记录,因此压制谐波成为确保滑动扫描采集地震资料品质的前提。本文从可控震源激发的基本原理出发,分析了谐波产生的机理、谐波干扰的能量级别,并有针对性地设计滑动扫描相关参数,侧重压制滑动扫描产生的能量较强的二、三次谐波。试验及滑动扫描实际采集的地震资料显示本文的谐波压制方法效果良好。

**关键词** 滑动扫描 谐波 可控震源 扫描频率 扫描长度 滑动时间 宽方位三维

中图分类号:P631 文献标识码:A

## 1 引言

油气勘探的不断深入对地震资料品质的要求越来越高,高密度宽方位三维地震是现今提高地震资料品质的一种有效而现实的方法。但由于受投资限制,项目利润空间越来越小,方法与成本的矛盾更突出。从降低地震数据采集成本角度分析,采用可控震源施工是最有效和实用的方法。目前国内常用的可控震源交替扫描技术已逐渐被更高效的滑动扫描技术替代,因此有必要更好地研究和应用滑动扫描技术。

从可控震源激发原理<sup>[1]</sup>可知,地震记录是利用数学相关得到的,相关过程会将激发产生的谐波显性化——谐波虚反射<sup>[2]</sup>。相对于地震信号,谐波是需要压制和剔除的干扰波。根据可控震源扫描信号相关的规律,在常规可控震源及其交替扫描中,多采用线性升频信号,由此产生的高次谐波出现在有效记录的前部。但在滑动扫描情况下,由线性升频产生的谐波会干扰到上一炮记录。因此,有效地压制

这类谐波是滑动扫描技术应用必须解决的一个问题。

从本质上说,谐波是由可控震源与大地系统的非线性畸变引起,尤其在辐射平板有较大位移时<sup>[2,3]</sup>。地震记录中除了有规则谐波外,还有谐振(“源致谐波”<sup>[3]</sup>)问题。对此人们已进行过研究,并提出了一些有效压制方法,如野外数据采集时的优选可控震源参数(包括起止频率、扫描长度、出力等<sup>[3]</sup>)。本文将着重讨论线性升频时的谐波问题。

## 2 方法原理

### 2.1 滑动扫描简介

滑动扫描是一种快捷的可控震源多源激发方式,其特点是在前次扫描还未结束时就开始第二次扫描,缩短了等待时间,从而提高了采集效率,尤其适用于(高密度)三维地震数据采集。图1是滑动扫描时序图,可见滑动扫描的滑动时间(扫描连续启动最小间隔时间)不能小于听时间。

这种勘探方法最先由阿曼石油发展公司提出并

\* 新疆维吾尔自治区哈密市中国石油东方地球物理公司吐哈物探处,839009。Email:lanyijun@cnpc.com.cn

本文于2012年5月8日收到,最终修改稿于2013年6月5日收到。

本研究受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”之“高密度宽方位地震配套技术”(2011ZX05019-004)资助。

进行了试验。其最大特点就是不必等待前一组震源扫描完全结束,另一组震源即可开始新的振动扫描。在对地震数据进行相关处理得到炮点单张记录。该方法能缩短震源施工时间,提高施工效率<sup>[4]</sup>。

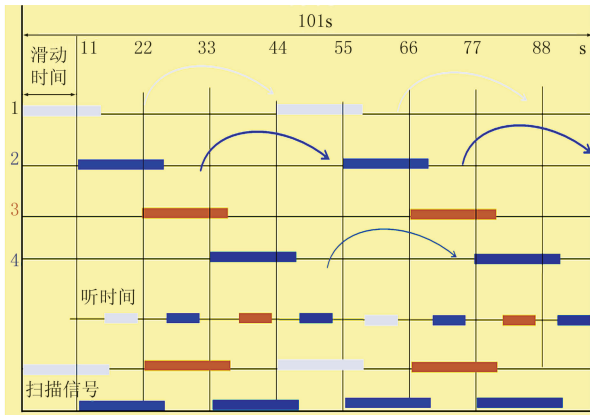


图1 滑动扫描时序

随着采集设备的进步,野外不需要记录未相关的长记录,通过仪器设置超级排列和可控震源箱体,可独立记录每一炮的未相关记录和相关记录,前后炮的接收排列也是独立的,只有部分重复(两震源距离足够远也可能不重复)。震源产生的谐波在本接收系统上,时间靠前,因此震源距离分离,共排列少,也可有效压制谐波干扰。

## 2.2 谐波的产生

谐波产生的物理机制,文献[2]做了系统论述。谐波畸变以扫描信号频率范围的倍数出现,分别称作二次谐波、三次谐波,直至 $N$ 次谐波, $N$ 由扫描起止频率决定。升频扫描有下列公式

$$N = \text{INT}[(f_E/f_B) - 0.5] \quad (1)$$

式中 $f_B$ 和 $f_E$ 分别为起止扫描频率。例如,8~64Hz的扫描信号最高可产生7次谐波。

下面从可控震源记录生成的相关过程分析谐波如何从原始数据生成到地震记录中。可控震源相关的目的是把延续时间很长的扫描信号压缩成延续时间很短的有限带宽脉冲信号。所谓相关即是用参考扫描信号与振动记录进行互相关运算。相关运算实际上也是一种滤波,相关资料的频率范围与扫描信号一样。

在常规可控震源相关中,输出相关记录只是保留了正向时移的听时间段。升频扫描情况下有些谐波的成分被剔除掉,针对滑动扫描可用还原相关的数学运算,将参考扫描信号完全对应原始记录为零

时刻(图2);但在数学运算上,零时刻前还有参考扫描时间长度的数据,对升频扫描而言,高次谐波即存在于这一段数据内;对滑动扫描来说,前一炮的参考扫描信号是一样的,在做相关时就会形成干扰记录。

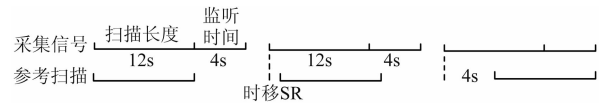


图2 可控震源相关示意图

零时刻的定义与前面一致,故时间均为负数。对 $k$ 次谐波的起止时间,存在

$$t_B(f_E) = -\frac{(k-1)f_E}{k(f_E - f_B)}T \quad (2)$$

$$t_E(kf_B) = -\frac{(k-1)f_B}{f_E - f_B}T \quad (3)$$

式中 $T$ 为扫描信号长度。 $k$ 次谐波的频率变化与基波一致,均为线性变化,相关后时频关系为

$$f_k = -\frac{k(f_E - f_B)}{(k-1)T}t \quad (4)$$

式中 $t$ 的取值范围是 $[t_B, t_E]$ 。

因谐波主要是由震源机械引起,故可通过采用改进措施减弱其能量<sup>[2]</sup>。在机械性能一定时对谐波能量进行简单估算。扫描长度决定了激发能量,对于谐波,在可控震源施工时同步输入地下的,相关后只是对应基波段的一部分。谐波的能量强度由谐波段记录长度决定,即 $k$ 次谐波所在的有效频段( $f_B, f_E/k$ )在相关后谐波其实只是该段能量的一部分。能量相当于功率谱,而功率谱即为信号频谱的平方。以基波为标准,相对谐波能量估算为

$$E_k = \frac{\left(\frac{f_E}{k} - f_B\right)^2}{(f_E - f_B)^2} \times 100 \quad (5)$$

对于上面的分析,可举一个实例直观表示:设参考扫描长度为14s,谐波频段为8~64Hz,记录长度为6s,则谐波各项参数计算如表1所示。

## 2.3 谐波压制

根据谐波的能量强度,确定目标区需压制的谐波。一般野外主要考虑压制二次谐波,谐波能量强的地区还应考虑压制三次谐波。

要压制二次谐波,可采用

$$S \geq \frac{f_E}{2(f_E - f_B)}T \quad (6)$$

要压制三次谐波,就有

表 1 谐波参数计算表

波次	谐波频段/Hz	基波频段/Hz	有效频宽/Hz	相对能量/(%)	谐波起止时间/s
基波	8~64	8.0~64.0	56.0	100.000	0
二次谐波	16~64	8.0~32.0	24.0	18.367	-8.0~-2.0
三次谐波	24~64	8.0~21.3	13.3	5.641	-10.7~-4.0
四次谐波	32~64	8.0~16.0	8.0	2.041	-12.0~-6.0
五次谐波	40~64	8.0~12.8	4.8	0.735	-12.8~-8.0
六次谐波	48~64	8.0~10.6	2.6	0.216	-13.3~-10.0
七次谐波	56~64	8.0~9.1	1.1	0.039	-13.7~-12.0

$$S \geq \frac{2f_E}{3(f_E - f_B)} T \quad (7)$$

式中  $S$  为滑动时间。

要压制二、三次谐波,滑动时间要足够大,可增大相对频宽或减小扫描长度。一般滑动时间大于扫描时间时能完全压制谐波。增大滑动时间与增大滑动扫描长度的目的不一致,减小扫描时间应考虑激发能量问题。在选择时要考虑同组震源台数、出力等参数;在保障扫描能量足够的情况下应选择最小的扫描长度。提高起始频率有利于高次谐波的野外压制,因为高次谐波与资料有效频段分离,在后续处理中易去除。此外,在选择起始频率时还应兼顾频宽的选择,因为频宽决定最终资料的分辨率,通常要求终止频率/起始频率应大于 3 个倍频程。

实际应用中,要结合压制谐振干扰综合考虑,一般通过试验选取起止频率和扫描长度。在此基础上,计算二、三次谐波出现的时间以确定滑动时间并要通过试验验证。

### 3 谐波压制试验

#### 3.1 数字试验

采用 6~84Hz、扫描长度为 14s 的扫描信号进行模拟,理论计算二次谐波出现在 -7.5~-1.1s,相对能量为 25%;三次谐波出现在 -10.0~-2.1s,相对能量为 9.3%。图 3 是滑动时间分别为 6, 8, 10, 14s 时的理论时频图。从该图可看出:滑动时间为 6s 时,下一炮的二次谐波已干扰到本炮基波;滑动时间为 8s 时,下一炮的二次谐波刚好不干扰本炮基波的高频段;滑动时间为 10s 和 14s 时,本炮基波已避开下一炮的二次和三次谐波干扰。这些与理论计算相一致。

#### 3.2 模拟试验

为验证理论滑动时间,我们在现场相邻两点上采集了常规扫描的未相关原始记录 Raw1 和 Raw2,震源参数是 1 台-1 次-(6~84)Hz-14s-70%,听时间

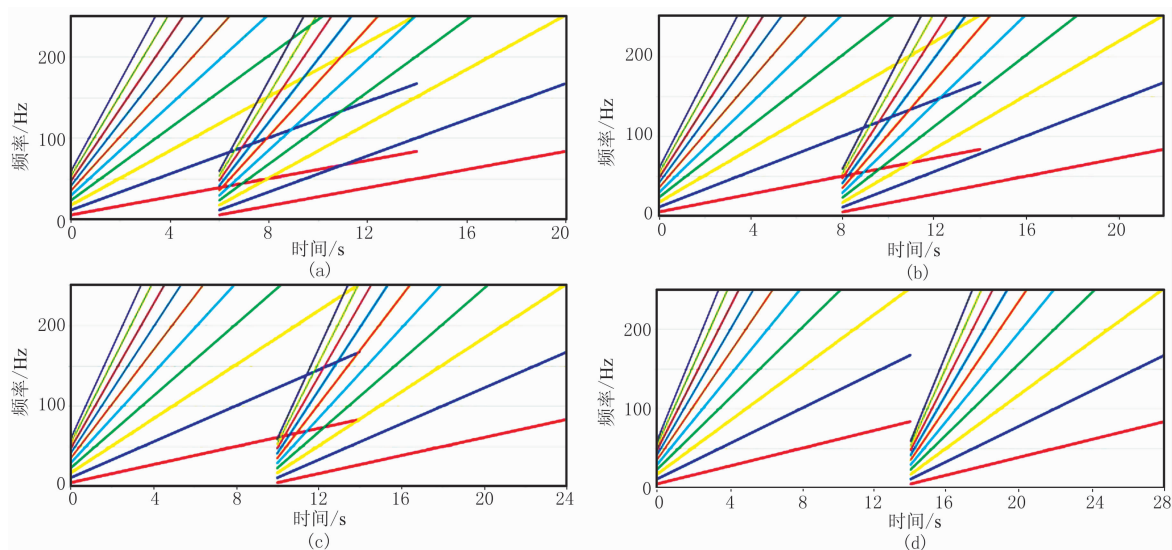


图 3 滑动时间分别为 6(a), 8(b), 10(c), 14s(d) 时的理论时频图

红色为基波、蓝色为二次波、黄色为三次波

为6s。室内利用 Raw1 和 Raw2 记录模拟野外滑动扫描的不同滑动时间来分析谐波干扰影响。具体模拟方法如下。

将 Raw2 记录在时间域分别延迟 6s 和 12s, 延迟后记录记作  $Raw2_{(6s)}$  和  $Raw2_{(12s)}$ ; 然后将  $Raw2_{(6s)}$  和  $Raw2_{(12s)}$  与 Raw1 垂直叠加, 得到一个新的未相关原始记录  $Raw_{(6s)}$ , 即

$$Raw_{(6s)} = Raw2_{(6s)} + Raw2_{(12s)} + Raw1$$

依此类推, 分别得到模拟滑动时间为 8, 10, 12, 14s 的原始记录, 即

$$Raw_{(8s)} = Raw2_{(8s)} + Raw2_{(16s)} + Raw1$$

$$Raw_{(10s)} = Raw2_{(10s)} + Raw1$$

$$Raw_{(12s)} = Raw2_{(12s)} + Raw1$$

$$Raw_{(14s)} = Raw2_{(14s)} + Raw1$$

由于扫描长度为 14s, 听时间为 6s, 模拟滑动时间为 6s 和 8s 的记录受相邻两炮影响, 因此模拟时要分别再加上  $Raw2_{(12s)}$  和  $Raw2_{(16s)}$ 。

图 4 分别是 Raw1 和 Raw2 相关后记录, 将上述模拟不同滑动时间的记录 Raw 与扫描信号  $S(t)$  相关, 分别得到模拟滑动时间为 6, 8, 10, 12, 14s 的地震记录  $R(t)_{6s}$ 、 $R(t)_{8s}$ 、 $R(t)_{10s}$ 、 $R(t)_{12s}$ 、 $R(t)_{14s}$  (图 5), 图 6 是与其对应的时频图。

从图 4 所示的常规相关记录看, 试验区的谐振相对基波能量较弱, 在记录上谐振干扰较弱, 只干扰到近道排列, 说明所选参数合理。从图 6e 时频图分

析, 除二次谐波能量稍强外, 其他高阶谐波干扰很弱, 对资料品质影响较小。

从图 5 所示的滑动扫描模拟不同滑动长度的相关记录看, 干扰主要来自相邻炮的二次谐波, 随着滑动时间的增加, 谐波干扰逐渐减弱。在模拟滑动长度为 6s 的记录及其时频图 (图 6a) 可看出, 本炮受到后续相邻两炮的谐波干扰, 干扰最强, 在模拟滑动长度 8s 的记录上, 谐波干扰也很强, 但只受到后续一炮的谐波干扰, 对深层干扰较强。从图 6b 可看出下一炮的二次谐波只干扰到基波的高频部分。而模拟滑动长度分别为 10, 12, 14s 记录的谐波干扰相对较弱, 仅是干扰到近道排列。从其时频图 (图 6c~

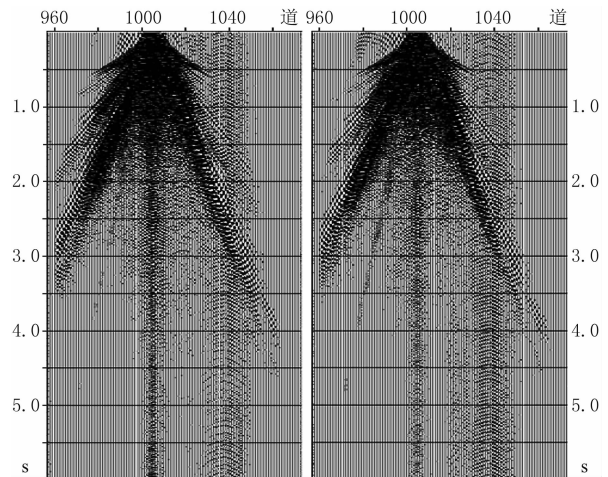


图 4 原始记录 Raw1(左)和 Raw2(右)的相关记录

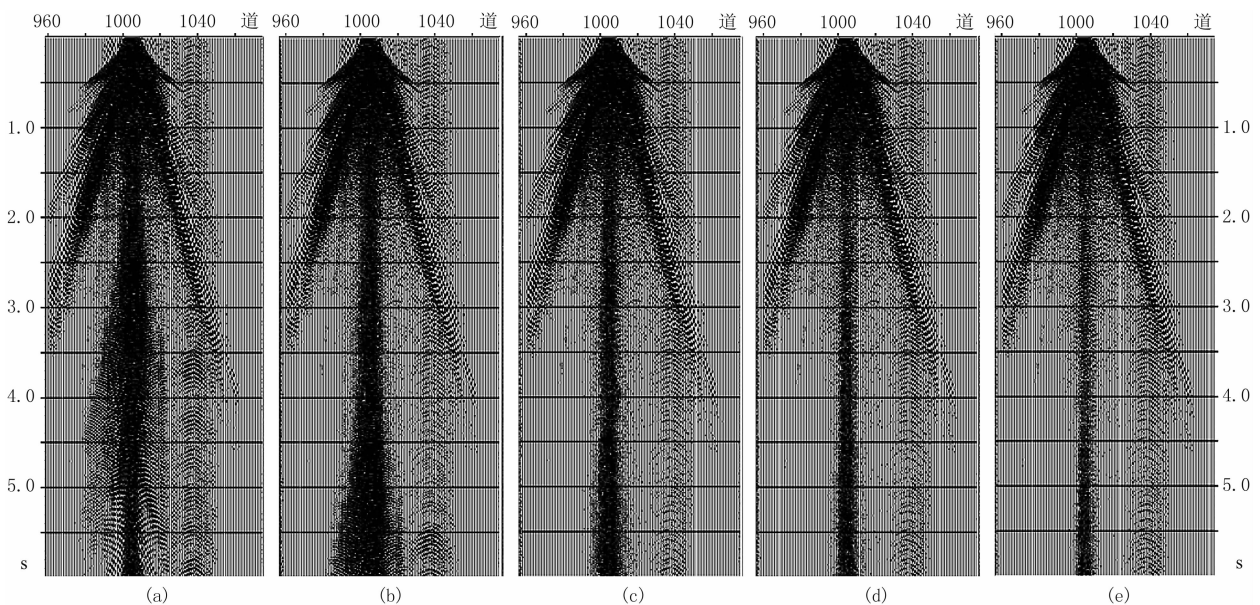


图 5 不同滑动时间模拟的相关记录

(a)6s; (b)8s; (c)10s; (d)12s; (e)14s

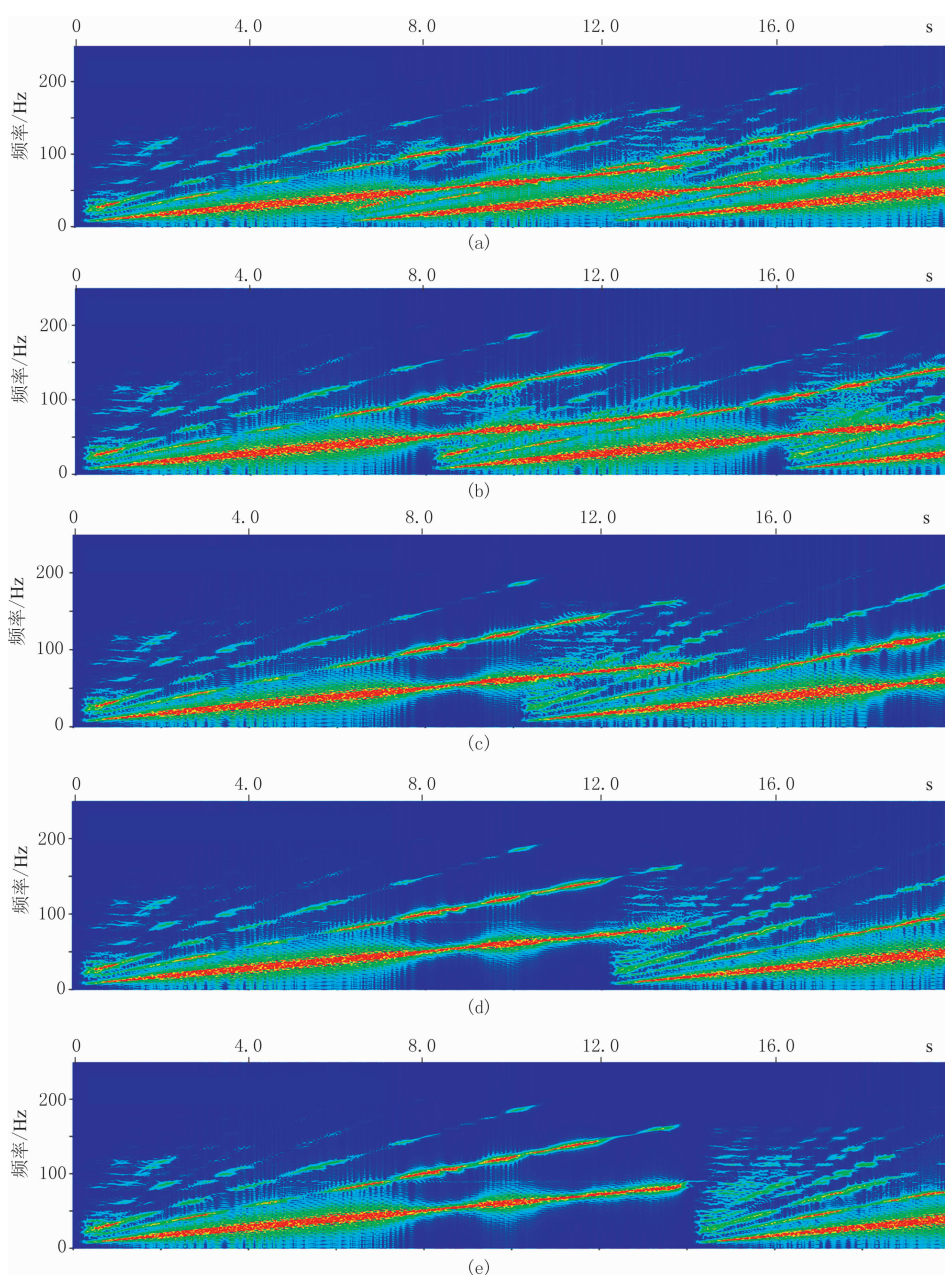


图 6 不同滑动时间模拟记录相关前时频图

(a)6s; (b)8s; (c)10s; (d)12s; (e)14s

图 6e)看,基波已经避开二次谐波干扰。因此,从模拟滑动时间分析,当扫描长度为 14s 时,选择 10s 滑动时间可较好地压制谐波干扰。

#### 4 应用效果

2011 年,东方地球物理公司在吐哈盆地胜北地区进行了国内首次滑动扫描现场试验。通过试验,选用以下激发参数:扫描信号频带为 6~84Hz,扫描

长度为 14s,听时间为 6s,滑动时间为 10s,可有效地避开谐波干扰且减轻谐振干扰,取得了较好的勘探效果(图 7)。

对试验数据进行统计,得知平均滑动时间为 10.88s,其中大部分炮避开了二、三次谐波。图 7 是利用野外相关后数据,未作谐波压制及其他任何处理,直接应用高程静校正后的初叠剖面,叠前采用了加大时窗增益显示(未进行滤波)。从该图可见谐波得到了很好的压制。

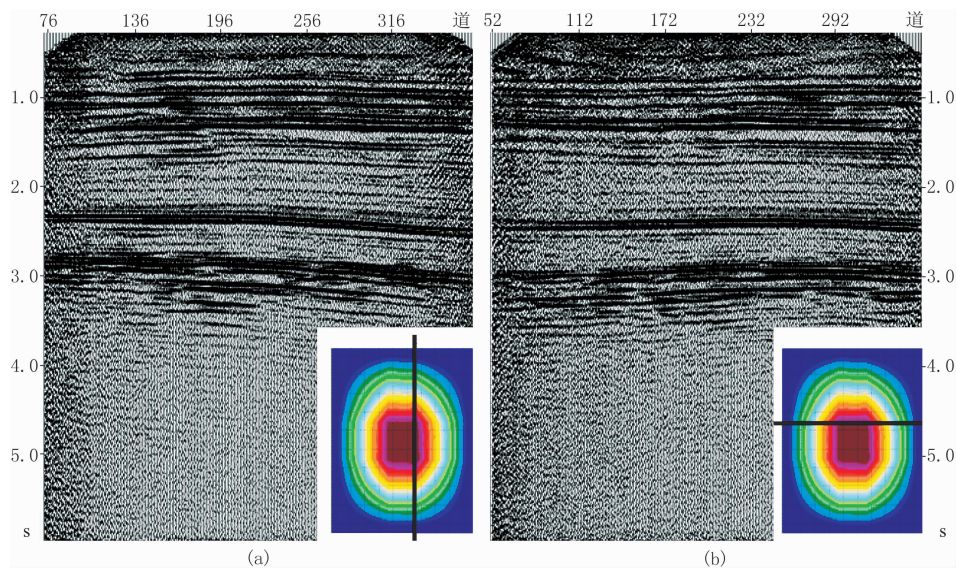


图7 胜北工区滑动扫描初叠剖面

(a) inline 240; (b) crossline 260。右下图图中黑线标示剖面位置

## 5 结论

本文基于数学相关原理推导了谐波出现位置,并以试验验证。在实际地震数据采集中应用效果良好,且获得以下认识和结论。

(1)滑动扫描是一种可控震源高效施工方法,与常规方法相比可大幅度提高野外施工效率,适用于高密度三维地震勘探。

(2)滑动扫描不可避免地产生谐波干扰,理论计算谐波出现的位置,通过设置合理的扫描参数和滑动时间,可在野外地震数据采集环节压制强谐波干扰。

(3)滑动扫描的大覆盖次数和高空间采样密度,在采集成本相同或增幅不大的情况下,显著优于常规扫描。

(4)据谐波的规律性,在处理环节较易消除<sup>[6]</sup>。

本文撰写过程中,东方地球物理公司吐哈物探处郭红启、孙梦、董世伟、王小丰等给予指导和帮助,该处2264地震队承担了滑动扫描现场试验,在此表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] M B 什内尔索纳. 可控震源地震勘探. 北京:石油工业出版社,1993
- [2] Wei Zhouhong, Thomas F Phillips. Harmonic distortion reduction on seismic vibrators. *The Leading Edge*, 2010, 29(2): 256~261
- [3] 张宏乐. 可控震源信号中的谐波畸变影响及消除. 物探装备, 2003, 13(4): 223~230  
Zhang Hongle. Influence of distorted harmonics in vibroseis signal and how to remove it. *Equipment for Geophysics Prospecting*, 2003, 13(4): 223~230
- [4] 曹务祥, 张慕刚. 滑动扫描谐波分析. 石油地球物理勘探, 2005, 40(5): 499~503, 509  
Cao Wuxiang, Zhang Mugang. Slide-sweeping harmonic analysis. *OGP*, 2005, 40(5): 499~503, 509
- [5] 田新琦, 周彤. 滑动扫描可控震源地震数据谐波干扰的消除方法. 石油物探, 2011, 50(6): 565~574  
Tian Xinqi, Zhou Tong. Method of eliminating harmonic noise for vibroseis data in slip sweep technique. *GPP*, 2011, 50(6): 565~574
- [6] Charles Sicking, Tom Fleure et al. Slip sweep harmonic noise rejection on correlated shot data. *SEG Program Technical Expanded Abstracts*, 2009, 18

(本文编辑:朱汉东)