

油气地球物理技术 新进展

—— 第 80 届 SEG 年会论文概要

中国石化石油物探技术研究院 编

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

内 容 提 要

本书根据美国勘探地球物理学家学会(SEG)第80届年会论文摘要分专题编写而成。内容包括:地震采集技术、岩石地球物理学进展、地震波场数值模拟技术、地震各向异性研究、噪声衰减与多次波消除技术、地震偏移成像技术、层析反演与偏移速度分析技术、地震反演技术、地震干涉法研究、地震解释技术、AVO反演技术、多波多分量地震勘探技术、井中地球物理技术、储层预测与油藏描述技术、VSP技术、时延地震技术、近地表和环境地球物理研究、重力和磁法勘探技术等。本书基本反映了近年来勘探地球物理技术,特别是地震技术的最新发展。

本书可供从事地球物理勘探技术研究和应用的专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

油气地球物理技术新进展——第80届SEG年会论文概要/
中国石化石油物探技术研究院编. —北京:石油工业出版社,2012.5
ISBN 978-7-5021-8997-6

I. 油…

II. 中…

III. 油气勘探-地球物理勘探-学术会议-文集

IV. P618.130.8-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第058702号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523533 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京晨旭印刷厂

2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:29.25

字数:750千字

定价:98.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

**《油气地球物理技术新进展
——第 80 届 SEG 年会论文概要》
编 委 会**

主 任：张永刚

副主任：曲寿利

编 委：管路平 赵改善 杨勤勇 胡中平 曹 辉
关 达 魏 嘉 吕公河 陈 伟

目 录

地震采集技术	吕公河 索重辉 李 霞 黎 娜 杨瑞娟 周小慧(1)
岩石地球物理学进展	周中彪 李呈呈 周 枫(31)
地震波场数值模拟技术	肖云飞 杨 丽 余德平(73)
地震各向异性研究	程玖兵(95)
噪声衰减与多次波消除技术	王立歆 熊艳梅 吕秋玲 孙文艳 肖 盈 刘小民(115)
地震偏移成像技术	段心标 方伍宝(145)
层析反演与偏移速度分析技术	张 兵(166)
地震反演技术	孙振涛 魏三妹 冉 琦 徐 佳 柯兰梅(198)
地震干涉法研究	谢金娥 刘定进 方伍宝(219)
地震解释技术	罗 延 向雪梅 陈 勇 朱蓓蓓(230)
AVO 反演技术	周 单 张亚红(261)
多波多分量地震勘探技术	唐建明 胡治权(281)
井中地球物理技术	谭茂金 卢新莉 吕公河 郭 越(307)
储层预测与油藏描述技术	王世星 李 弘 朱 克(342)
VSP 技术	陈 林(398)
时延地震技术	陈 伟(422)
近地表和环境地球物理研究	朱文杰(442)
重力和磁法勘探技术	李智宏(452)

地震采集技术

吕公河 索重辉 李霞 黎娜 杨瑞娟 周小慧

一、引言

本届年会在地震采集及设计技术方面共设立 5 个专题 35 篇论文,其中包括海洋拖缆、设计与海底系统、陆上地震勘探技术,以及有关陆地与海洋勘探方法实例的张贴论文。内容涉及目标照明设计、多目标设计和海上双检、环形激发采集、双方位角观测,以及陆上高效采集、宽方位盐下采集、复杂地表的激发接收等,下面分三部分归纳综述。

二、采集设计技术

地震勘探设计技术本年度主要集中在空间随机采样、双程波动方程照明分辨率分析技术,以及多目标采集设计技术,下面重点介绍随机采样技术。

1. 随机采样技术

在过去的 5 年中,出现了压缩采样理论(compressive sampling),这在一些应用科学和工程领域产生了重要的作用和影响,如信号处理、信息论、医学成像、编码理论、数模转换及其他学科。这一理论的基本概念是:如果不按照尼奎斯特(Nyquist)定律条件采样,就应该采用随机抽样,而不用规则抽样(Donoho,2006)。在地震数据处理领域,犹他大学的 Schuster 和他的同事在 1994 年就应用了该理论。最近,英属哥伦比亚大学的 Herrmann 和他的团队也涉入该理论。1995 年 Zhou 和 Schuster 发表了 3D 偏移的拟随机蒙特卡罗采样(quasi-random Monte Carlo sampling)理论。Hennenfent 和 Herrmann(2008)证明了用随机欠采样数据对波场进行重构,要比用规则欠采样数据的效果好。Herrmann 还在 2009 年 SEG 年会上发表了一些别的应用。

压缩采样理论对观测系统设计者来说很有吸引力。该理论也可以应用在地震信号处理(去噪、插值和数据规则化)和地震成像上。这些应用都需要随机采样。本文讨论了随机采样在海洋地震采集上如何应用。由于海洋地震勘探是典型的欠采样数据,应用随机采样则可以减小欠采样的影响,如假频和采集脚印。

海洋采集的地震资料获取对于检波器和震源来说一般都是采样不足的,且有规则地沿平行线分布。压缩采样的理论认为:如果数据是采样不足的,且采样是随机分布的,地震波场就应更好地重建。WesternGeco 的 Nick Moldoveanu 等人研究了随机采样如何能用于不同类型的海洋采集形式;生成 3D 有限差分模拟数据来模拟具有常规和随机采样的采集形式。如图 1 是按照海上拖缆设计的规则环形中心点网格和随机环形中心点网格对比,图 2 是对应图 1 的覆盖次数分析,二者有很强的相似性。

为了比较规则采样和随机采样的优劣,设计了两个观测系统:其一是规则采样的 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 的炮点网格、 $400\text{m} \times 400\text{m}$ 的海底节点网格;其二是随机采样的 2×4 环形观测系统(2 艘拖缆船,2 艘炮船)。注意前者的节点个数是后者个数的 2.744 倍。通过 3D 声波波动方程有

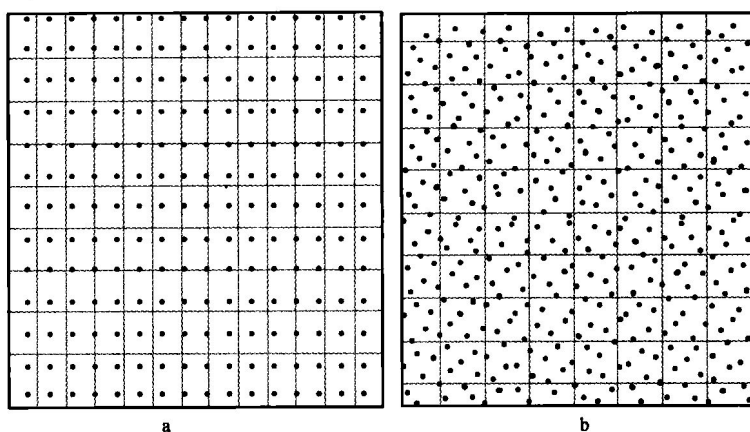


图1 规则环形中心点网格(a)和随机环形中心点网格对比(b)●

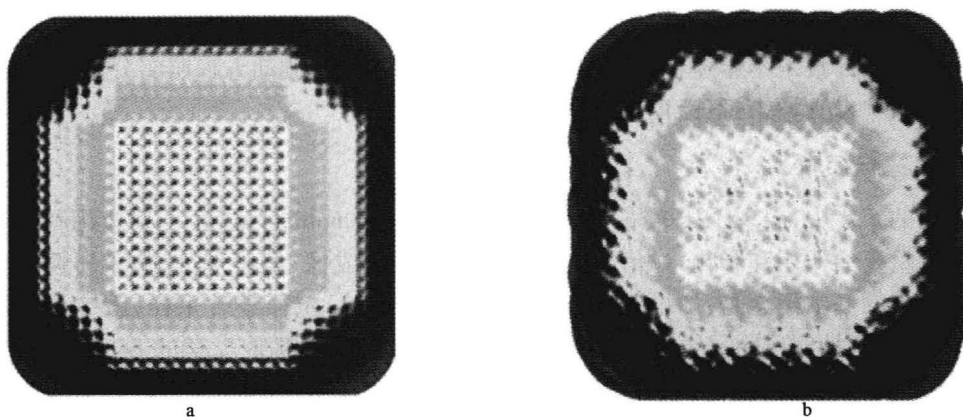


图2 规则(a)和随机(b)的环形中心点网格覆盖次数对比

限差分模拟方法,分别对两种采样数据进行了岩下模型的模拟。结果显示,用两种数据处理生成的偏移剖面质量较为接近,而用随机采样数据生成的剖面效果甚至更好一点。

当对随机采样的数据再次削减(抽取)到原来的25%时(50m×50m的炮点网格),仍能得到较好的偏移图像(图3)。不过一般不建议削减随机采样的个数。图4是由规则采样数据得到的偏移剖面。图3所示的随机采样偏移图像中没有采集脚印影响。由此可见,随机采用技术在海上地震采集中有着巨大优势。

以上研究认为,海洋地震勘探采集的随机采样是能够实施的,且得出以下结论:(1)用单船或多船拖缆环形激发采集是能够实现震源和检波器随机采样的;(2)在海底节点采集中,节点和震源也可以随机分布。为了使震源随机分布得以实现,可以让震源船沿着一些重叠圆圈航行并环形激发。同样的方法也可以用在3D VSP的炮点分布上。(3)对环形激发和节点采集随机采样的数据进行3D有限差分模拟和处理,得到了非常好的没有采集脚印的地下成像效果。(4)随机采样海洋观测系统模拟是没有环境噪声的,比如:海浪和水流噪声;下一步的研究就需要评估剩余噪声影响和用于随机采样数据处理的地质模型的缺陷。

● 本书图件源自 SEG 第 80 届年会论文摘要,对彩色说明有兴趣的读者请查阅相关原文的彩图。

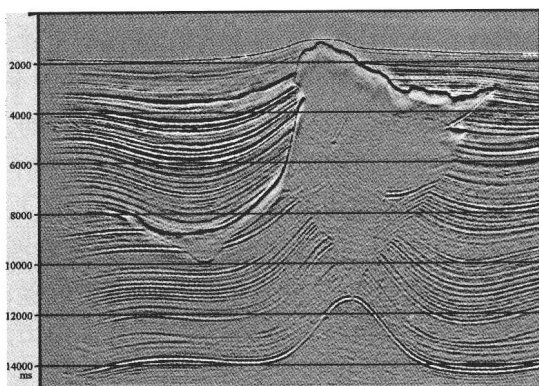


图3 随机节点采集偏移剖面
(再次抽取到 25%, 50m × 50m 炮点,
炮点和节点随机分布)

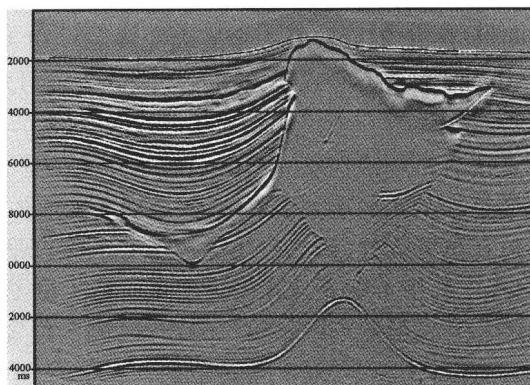


图4 规则节点采集偏移剖面
(400m × 400m 节点, 30m × 30m 炮点, 规则抽样)

2. 其他

另外, WesternGeco 的 Cintia Lapilli 等人研究开发了基于双程波动方程波场传播的目标定向照明的分辨率分析技术, 进一步展示了基于把波场分解到方向束分量可以将局部反射倾角和方位角恢复的思路达到接近全方位信息成图的可能性。这项技术有望用于: RTM 的孔径最佳的照明图的计算、振幅随入射角度变化 (AVA) 或者振幅随炮检距变化 (AVO) 指向目标的照明补偿、最适宜的采集形式的勘探设计分析的选择、用于分辨率和不确定性分析的点分布函数的计算等。

来自科威特的基于多目标的成像和特征描述的 3D 地震勘探设计, 为多目标设计提供了一些技术实例和参考。采用多设计参数方法分析对比, 可确定较佳的观测方式。

三、陆上地震勘探采集技术

1. 陆上地震勘探可控震源扫描技术

今年 SEG 会议在震源扫描方面主要有两个方向比较突出: Galcode 编码技术和扰动滑动扫描技术。

1) Galcode 编码多震源同时采集技术

Galcode 编码方法是由伽罗瓦序列 (Galois sequence) 构成的, 一个 m 阶伽罗瓦序列是由 $2m - 1$ 个 0 或 1 的元素组成。例如一个 3 阶伽罗瓦序列 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1 含有 7 个元素。该序列中的每个元素具有一个确定且相等的时间间隔。把伽罗瓦序列中“1”元素用连续扫描信号 (chirp) 或锤击信号 (thump) 替代, 就得到 Galcode 编码。一个连续变频信号定义为一个连续振动扫描, 它具有带宽、线性度、斜坡和长度等于基本时间间隔的特征。一个锤击信号 (thump) 定义为一个激发震源或等效的可控震源产生的地震脉冲。一个空信号 (null) 定义为代码长度等于采样时间间隔的无源信号。即连续变频信号和锤击信号即是伽罗瓦序列里的“1”, null 是伽罗瓦序列里的“0”值。举例来说, 一个连续变频信号可以用 4 ~ 9Hz 带宽、长度 3s、起始和终止斜坡为 100ms 的线性扫描表示。一个上述 3 阶的伽罗瓦序列结合连续扫描信号构成的 Galcode, 可以表示成 7 个 3s 时长的片段连接而成: 首先是 2 个连续变频信号, 然后是 2 个空信号,

再紧接着一个连续变频信号,再后是一个空信号,最后以一个连续变频信号结束。因此,该 Galcode 时长 21s,包含 4 个连续变频信号和 3 个空信号部分。Galcode 通常含有奇数个元素,其中连续变频信号或锤击信号一般比空信号多一个。在本文中一套震源设备是指一个或多个可控震源作为一个单元整体为某个震源点产生特定的 Galcode。Galcode 可以认为是循环的,或者说有自环绕性质。因此对一个 3 阶伽罗瓦序列来说,可以达到 7 个震源被同时记录。下面通过一个实例来说明 Galcode,在震源位置 1 处,第一台震源采用 Galcode 编码 1,1,0,0,1,0,1;在位置 2 处,第二台震源执行 Galcode 编码 1,0,0,1,0,1,1。值得注意的是将第一台震源 Galcode 的第 1 个元素移动到序列的第 7 位置处,并将原序列第 2~7 元素依次前移 1 个位置,得到一个新的序列赋给第二台震源;第 7 位置处的第七台震源执行 Galcode 编码 1,1,1,0,0,1,0。这种情况下,从一个震源到任何其他震源的 Galcode 偏移,仅仅是一个简单的代码元素改变。然而根据震源的类型和使用需要,偏移可以是多个元素。震源之间的 Galcode 偏移法则就是,元素偏移所代表的时间间隔必须大于或等于期望输出的激发震源的记录长度或可控震源连续振动的接收时间。Galcode 偏移法则确保了在数据解编过程中震源之间不直接相互干扰。当用锤击信号作为地震震源时,典型代码之间有许多元素,因为锤击信号之间的时间间隔要远小于连续变频信号的时间间隔。一个 10 阶的锤击信号 Galcode 可以有 1023 个 20ms 时间采样的元素,总记录时间长度为 20.46s。鉴于一个记录时间长度为 3s,一个 10 阶的锤击信号 Galcode 变换到另一个锤击信号 Galcode 必须大于或等于 150 个元素。因此,考虑到所讨论的锤击信号 Galcode 的限制,一次部署不能超过 6 台震源同时采集。

2009 年 6 月在得克萨斯州内陆,布置了 8mile 长的 2D 垂直分量检波器,地面站以 220ft 间隔分布。在持续 3 个阶段的试验中,其中 5mile 测线用来做震源。由于农场耕作的原因一些震源被甩掉,名义上覆盖次数略大于 90 次。对所有的试验过程来说,2 台可控震源组成一套震源设备,并且无论常规震源还是连续变频扫描都具有扫描参数为 4~96Hz 带宽和线性增强性质。第一阶段试验,采用常规方式,12s 扫描长度和 3s 接听时间。第二和第三个阶段的试验采用 3 台可控震源作为一套震源设备,每一套震源设备都有单独的 Galcode。并且每一套震源设备分别以相距大约 1.4mile 的间隔沿着 2D 测线部署。第二阶段采用 7 点 Galcode 记录,第三阶段采用 15 点 Galcode 记录。两个试验阶段的 Galcode 都分别采用了 100ms 末端衰减持续 3s 时长的扫描组成的连续变频信号。第二和第三阶段试验的不同之处在于,每一个震源点震动时间和能量不同,分别为 21s 和 45s。图 5 显示了常规炮点记录和 15 点 Galcode 数据。注意震源位置 2 和 3 处的振幅和残余噪声,尽管图中椭圆形圈出的部位有些模糊,但仍能显示出反射能量。该技术所面临的挑战是克服噪声的影响需要增加单位面积接收的道数,但这又和提高生产效率的经济效益相矛盾。这一挑战不单独是 Galcode 方法面临的问题,它也是任何同步震源所要解决的问题。图 6 显示了没有其他同步震源的记录,其中图 6a 是单独一个 7 点 Galcode 序列(1,0,1,1,1,0,0)震源点产生的记录,图 6b 是处理后解编的记录。图 7 显示了 3 套可控震源设备的同时激发产生的记录,由图 7a 可清楚看到他们各自 7 点 Galcode,图 7b 是第一套可控震源的解编后记录。分析显示,常规震源记录和单独震源 Galcode 记录具有良好的相关性。然而,同时震源采集数据中,位于震源 2,3 处的噪声可以识别出来。幸运的是大块干扰看起来不像是典型的可控震源产生的能量,而像是可控震源发动机产生的噪声。换句话说,扫描数据中很少看到可见的干扰,如折射波、面波或者其他两个可控震源产生的反射波。如果残余噪声实际上和能量噪声相关,就应该增大震源位置去压制噪声,震源位置处的地震道将要被不同相位重新采样。图 8 是一个普通震源经过静校正、自动增益(AGC)、动校正

(NMO)和 $f-x$ 反褶积得到的数据。从中可以看出,左边两张图显示较好的相关性,最左边图是7点 Galcode 单震源点记录,相邻的(左边第二张图)是常规 12s 扫描数据。从右边两张图可以看出,同时采集震源记录比单震源记录的残余噪声显著增加(增加了相邻震源产生的干扰)。15 点 Galcode 比 7 点 Galcode 的残余干扰要稍微小点。这一点是合理的,因为震源点通过更长的编码获得额外能量。图 9 是频数域分析($f-k$)处理后的炮集数据,从中可以看出,无论是在噪声域还是信号域都有很好的相似性。

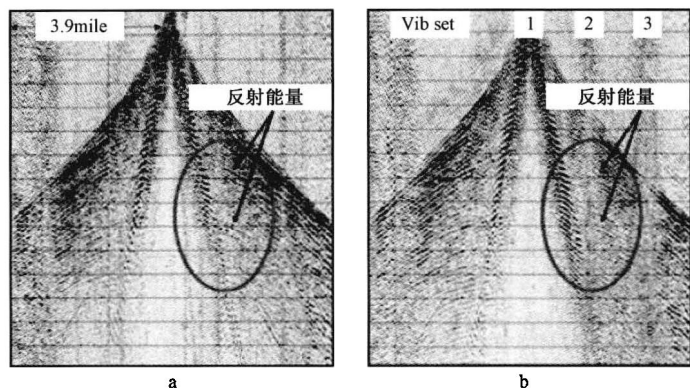


图 5 常规炮点采集(a)和 15 点编码(b)

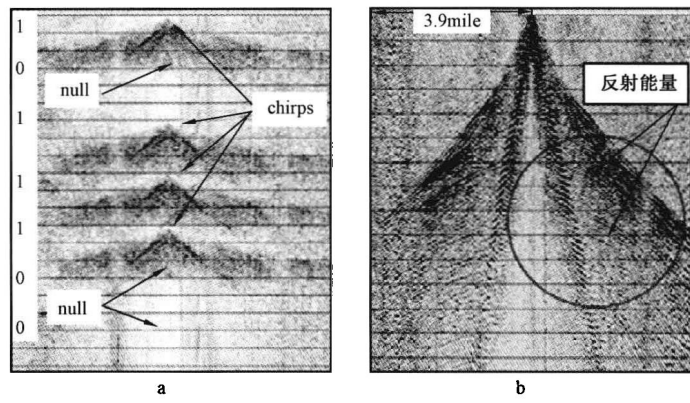


图 6 7 点 Galcode(1,0,1,1,1,0,0)(a)和解编(b)

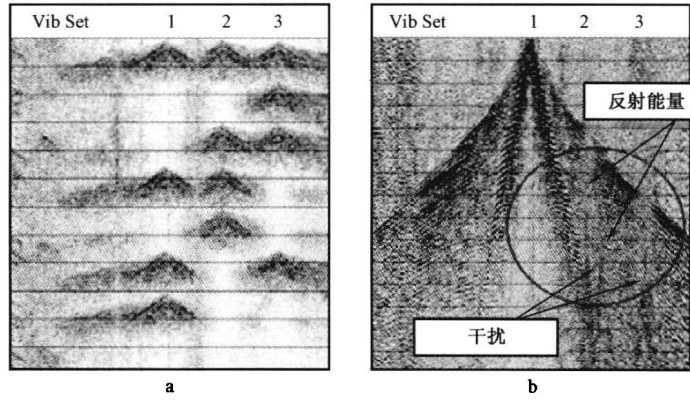


图 7 7 点 Galcode(3 震源)同步震源(a)和震源 1 解编(b)

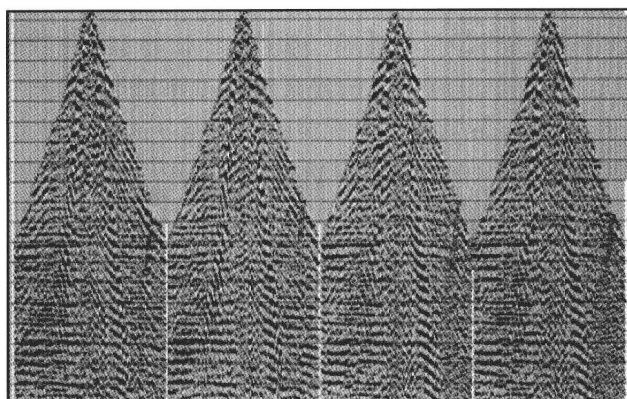


图8 处理(解编)后的炮集

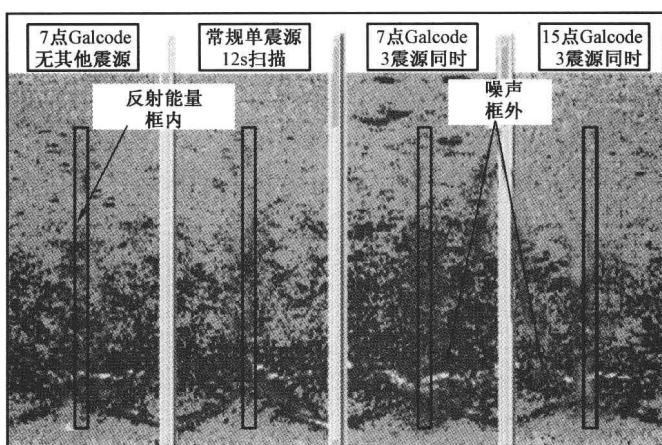


图9 $f-k$ 分析处理后炮集

通过处理,图10显示了初步叠加后剖面的比较。经过静校正、自动增益(AGC)、共面元(CDP)叠加和8-12-80-90带通滤波处理后,从剖面上570ms和1130ms处反射轴的连续性来看,常规方法数据比任何一个Galcode叠加的效果都有更高的信噪比(S/N)。另外,15点Galcode的同相轴要比7点Galcode的稍微好一点。考虑到15点Galcode序列有8次3s的连续变频信号,而7点Galcode只有4次3s连续变频信号,是前者能量的一半,所以这一点也不惊奇。图11是经过 $f-x$ 反褶积去噪后的倾斜时差校正偏移剖面,处理流程经过静校正、自动增益(AGC)、叠加(DMO)、偏移 $f-x$ 反褶积去噪。观察发现,在剖面930ms和1130ms处,这3个数据体看起来一样,显示出很大的相关性,然而常规方法数据在580ms和1650ms处显示出连续性更好。在图12中,对500~1800ms时窗内的偏移数据进行频数域分析,考虑到带宽和信噪比,证实了3种数据的相似性。

应用Galcode方法进行多震源同时采集在提高生产效率方面有很大的潜力。下面是一个使用该方法使得震源生产效率提高6倍的例子:一套常规震源设备参数构成需要3台可控震源,并在每个震点位置进行4次持续12s扫描,每次扫描后需要5s的记录时间和2s的重置时间,因此震源记录的持续时间是19s的4倍,即76s,包括了延迟时间28s[注:4次 $\times(5+2)s=28s$]和之前3台可控震源为每个震源点提供能量而扫描的48s[注:4次 $\times 12s=48s$]。而采用

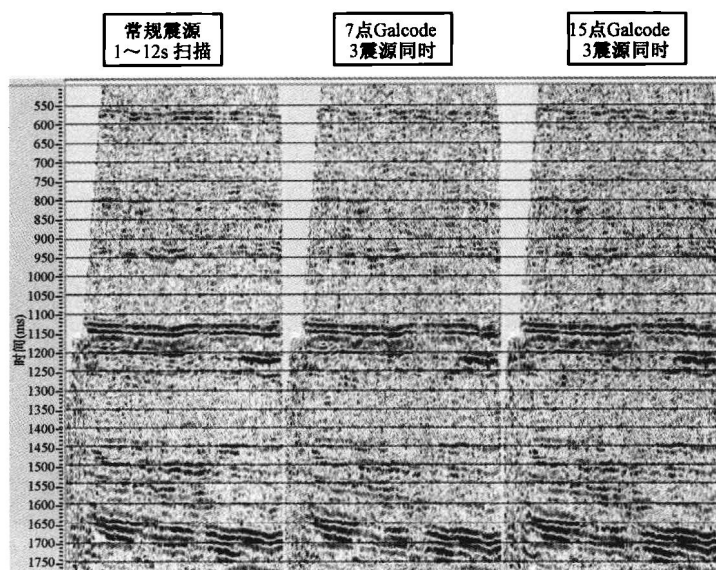


图 10 80 次覆盖初步叠加剖面

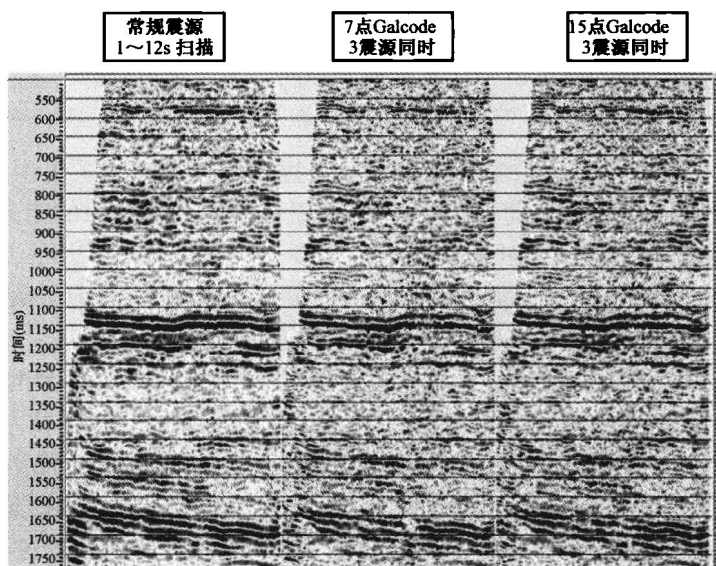


图 11 80 次覆盖倾斜时差校正偏移剖面(DMO)

7 点 Galcode 方法,连续变频信号为 12s 的长度,只有持续 89s 才能获得同常规震源扫描 48s 时间相同的能量。增加到 7 个震源点采用 7 点 Galcode 方法同时工作 89s,和一个常规震源点需要工作 76s 的工作效率相比,接近 6:1(注:计算方法 $76s \times 7: 89s = 6:1$,作者未考虑震源搬家所需要的时间)。这种 Galcode 方法概念性验证的试验结果显示,生产率提高是可能的,也是可行的,但也存在一些问题需要声明和评估。根据上述例子,要在 89s 内得到 7 个震源点相同的能量,需要部署 21 台可控震源,而不是 3 个。确定可控震源单位个数不能不考虑经济因素,解决的办法是减少每组震源设备里震源的个数,但是这样又需要增加代码的长度,反过来又影响了生产效率。本文里的试验结论说明数据质量并不是完全一一对应的。因此要使每一个震

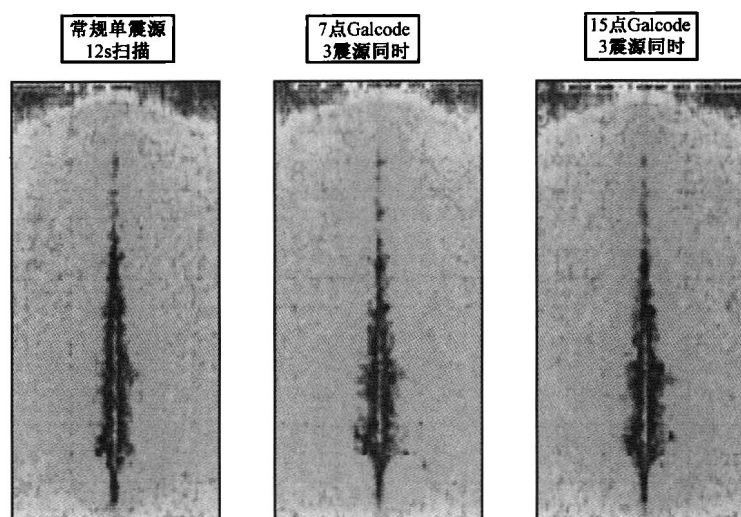


图 12 $f-k$ 分析偏移数据

源取得相同的数据质量品质,需要综合考虑道数的因素。权衡考虑之前,需要取得一定的野外应用经验。在考虑多震源同时采集方案时,观测系统设计的重点在震源,而检波器排列与海底电缆观测系统类似。一些技术相关的执行问题需要通过将来的野外试验来回答。不管怎样,Galcode 方法最初的概念性的验证试验证实了多震源同步实施是可行的。

2) 扰动滑动扫描采集技术

过去 30 年里,已发展出多种采集和处理方法来提高可控震源的采集生产效率(Bagaini, 2010)。超大道数连续记录系统的可行性、可控震源系统管理大量震源的能力,使得这些技术在今天能够实现并成为一种高效的采集手段。2009 年,最高生产能力是 1000VPs/h(Howe 等,2009;Matheny 等,2009),该生产能力几乎是过去中东地区 3D 陆地地震队平均生产能力的数十倍(Bureger 等,1999;Al - Ghamdi 和 Al - Shammery,2008)。

如果所有的可控震源扫描都是独立的且无需步调一致,就可获得最大的生产能力(Howe 等,2009)。依据振动器之间的距离和激发时间,多台独立震源同时扫描技术(ISS)会产生干扰噪声,这些噪声对单独的炮集有严重的影响。因此,对叠前数据中干扰噪声进行压制是一项挑战性的工作,可以尝试在干扰噪声不相干的情况(如共检波点或共偏移距道集)利用滤波技术或利用反演方法对随机噪声进行衰减(Abma 和 Yan,2009)。多道处理过程(如:叠加和偏移衰减)可以在某种程度上对剩余噪声进行压制。

C. Bagaini 等人(2010)介绍了一种新的采集和处理技术——扰动滑动扫描(DSS)采集。在采集阶段,它主要包括:

- (1) 扰动采集(Stefani 等,2007;Moore 等,2008)。
- (2) 滑动扫描采集技术(最初由 Rozemond 于 1996 年提出)。

在处理阶段,主要包括:

- (1) 扰动震源分离(Moore 等人在 2008 提出的)。
- (2) 谐波噪声衰减(Jeffries,2006;Bagaini,2008)。

扰动滑动扫描(DSS)对激发时间的限制(下文中有介绍)使得叠前数据中干扰噪声得到控制,即用于噪声压制的算法比可控震源在非同时激发情况下会更有效。如果是利用超大道

数采集系统和数量足够多的可控震源进行大面积采集,震源之间的距离间隔确保了高效率地采集数据和每个记录的干扰最小。该思想是基于 Beasley 等人 1998 年提出的海上采集方案,在陆地情况下,Bouska(2010)提出了大距离间隔的多组同时扫描(DS3)。然而,由于 DSS 模式中可控震源激发的最小间隔小于 DS3 的情况,因此 DSS 允许同时激发两组以上的可控震源。尽管 C. Bagaini 等人(2010)介绍的是一个时间扰动 DSS 的实例,但应用相位扰动也是一种可能的选择。

基本原理

在采集阶段,扰动滑动扫描采集结合了扰动采集(Stefani 等,2007;Moore 等,2008)和滑动扫描采集(最初由 Rozemond 于 1996 年提出)两种方法。这种采集方式的干扰噪声是完全可以预测的,并可根据噪声的具体特点对其进行压制。利用 Jeffrye(2006)和 Bagaini(2008)介绍的方法可以对由液压振动器产生的谐波噪声进行压制。对扰动噪声可以采用 Moore 等人(2008)提出的技术进行处理。

一个振动器(或振动器组)开始扫描的最早时间需要两个条件。图 13 给出的双重(two-fold)扰动滑动扫描采集实例可以解释这两个条件。第一个条件是扰动时间,适用这一条件的振动器组成一个震动组。可以实时地设计或决定扰动时间(通常是几百毫秒),以便在不同于采集范围的其他区域生成不相干的扰动记录。然后将在这一区域对扰动记录进行分离,对于 3D 采集来说这可能是多维的。

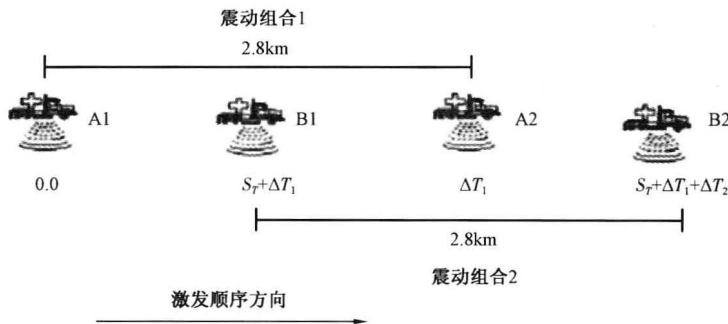


图 13 双重扰动滑动扫描采集实例

图中所示:根据扰动滑动扫描规则,4 个震动点(VPs)的所允许激发时间

如果仔细考虑各自的激发时间,两个几乎同时激发的炮点记录 A1 和 A2(这里任意称之为记录和扰动记录),就可以从扰动记录中提取出来。组成震动组合的振动器之间的最小间距,要求能够阻止在它中等或大偏移距上其他振动器产生的强信号干扰。

在振动器没有产生谐波噪声、大地响应时长有限的情况下,第二个条件(滑动时间条件)将简单施加一个时间延迟,该延迟等于大地脉冲响应实际持续的时间,或者说是接听时间;在有谐波噪声的情况下,需要更严格的条件,换言之,滑动时间是这两个炮点 B1 和 B2 激发时间的第二个条件。有关最小滑动时间和谐波噪声衰减方法的介绍见 Jeffrye(2006)和 Bagaini(2008)的文章。

因此,扫描起始时间部分地由扰动时间来决定,通常可能是正值也可能是负值,相对于同一扰动组合内主震源扫描的起始时间。扫描起始时间代表震动组合第二次扫描的起始时间。震动组合 2 的扫描炮点 B1 和 B2 的激发起始时间必须大于滑动时间 S_T ,这个时间在扫描炮点 A1 和 A2 起始时间之后。为了简便起见,图 13 显示了当扰动时间全部为正值时的扫描起始时

间。很显然,采集系统将选择那些满足距离和滑动时间条件的振动器,实时地组成震动组合,而不是按照原采集的顺序进行。

图 14 显示了在图 13 的扰动滑动扫描采集过程中,4 个炮点记录的时间—频率域道集示意图。大地对一次谐波和二阶谐波的响应分别用绿线和红线下方的灰色阴影表示。如果确定了如图所示的滑动扫描时间,则它们在扰动滑动扫描采集中不会相互冲突。绝大多数干扰噪声是由于扰动振动器导致的。在图 13 和图 14 的实例中,由于炮点 A2 导致了炮点 A1 受到干扰(反之亦然),炮点 B2 导致了炮点 B1 受到干扰(反之亦然)。

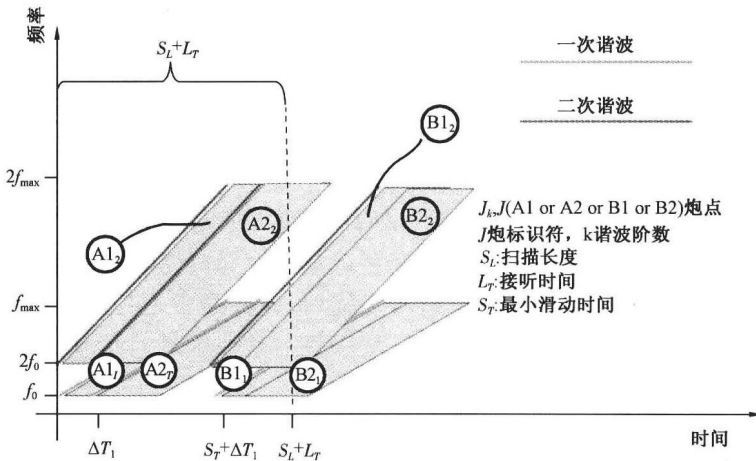


图 14 扰动滑动扫描过程示意图

能同时接收到 4 个震源点信号的一个检波器记录。大地对地面受力的
一次谐波及其二阶谐波分别用位于绿色和红色直线下方的阴影(灰色)平行四边形表示。
图中所示的大地响应的持续时间与频率无关(参见 PAPR 780, Figure 2)

数据实例

Moore 等人(2008)提出分离扰动滑动扫描地震数据的正演(模拟)和反演算法,为了评估该算法的有效性,从一条可控震源常规采集的 2D 地震测线数据中,生成一个扰动滑动扫描数据集。利用线性扫描(5~80Hz, 16s)和 25m 的炮检距生成一条 5.6km 的 2D 测线,检波点采取固定排列,排列长度大约 5.6km。通过对共炮点道集叠加来模拟震动组合,炮点道集的获得是通过采用一个振动器放置在测线起点、另一个振动器放置在测线一半,即大约 2.8km 的位置,具有合适的扰动时间。当间隔降至大约 1.2km 的小偏移距时,出现噪声干扰,扰动值显示为正值,范围为 300~800ms。

通过生成多个滑动扫描的数据集,用来模拟可能出现的不同情况。图 15 显示了从其中一个扰动滑动扫描数据集(滑动时间是 1.2s)中抽取的扰动记录和共检波点道集记录。

基于相同原理,可以考虑用几种其他算法对扰动记录进行分离。最简单的方法,称之为被动分离,包括复制扰动记录、依据主振动器和扰动振动器的激发时间校正(对齐)这两个记录(在成像阶段通过叠加来完成对干扰噪声的衰减)。当扰动噪声表现出不相关时,可以采用预测误差滤波器的算法(最初用于随机噪声的衰减),如图 15b 所示的共检波点道集记录。

图 16 是上述常规 2D 测线采集的共中心点(CMP)叠加剖面;利用被动分离,通过(正演)模拟和反演方法分离的扰动滑动扫描采集记录(Moore 等,2008)。尽管由于扰动组合的震源间距小而产生干扰,但被动分离后的叠加剖面却没有受到严重的干扰。干扰波的不同时差将

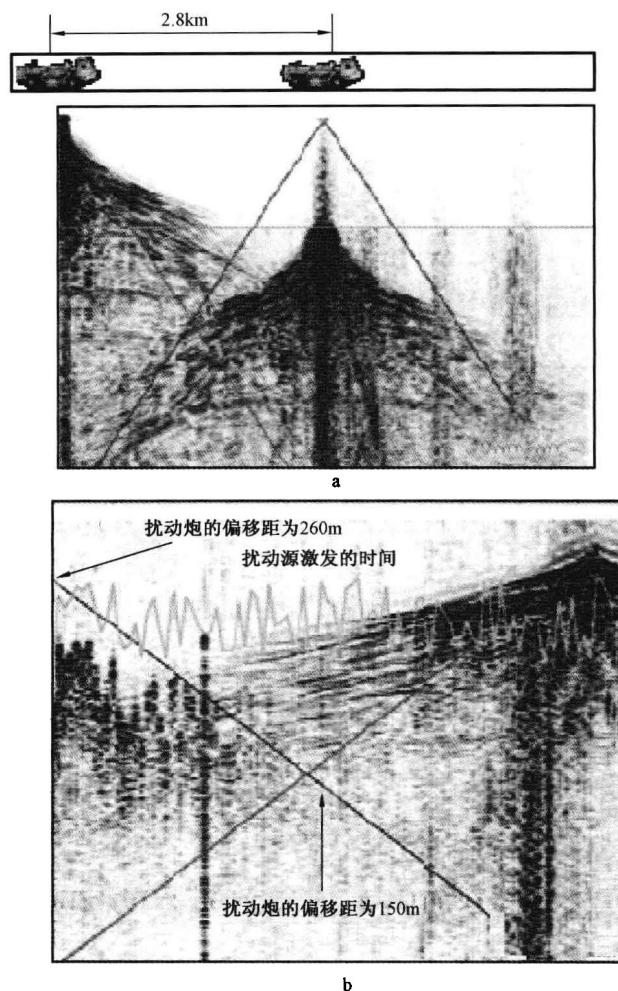


图 15 模拟的扰动可控震源采集扰动记录(a)和扰动的共检波点道集(b)

图中的绿线表示扰动源激发的时间,红线和蓝线的值与主炮和扰动炮的偏移距成正比(参见 PAPR 780, Figure 3)

有助于将噪声叠加消掉,但是在倾角较陡的同相轴处仍有明显的剖面干扰现象。由于在一个方向普遍倾斜,在剖面右侧炮道集上的振动器是正的抖动值,因此,它的干扰就更为严重,反之亦然。应用(正演)模拟和反演方法的进行去噪,结果显示去除了剩余倾斜同向轴,且信号保持完好。

结论

论文主要介绍了高效的可控震源采集和关于扰动滑动扫描采集的分离技术。它由两部分组成:滑动扫描和扰动采集,很早以前,两者就被分别用于陆地和海上采集。有关扫描起始时间和可控震源组之间距离的条件,要保证干扰波能够得到控制,以便能用分离算法进行噪声衰减。上文中利用常规数据集生成的扰动滑动扫描数据集,振动器最小间隔为 2.8km,证明了该方法的有效性。预计扰动滑动扫描采集的数据集比利用非同时震源扫描获得的数据集能更有效地分离,而不会明显影响生产效率。叠前分离数据的质量显著提高,可以使该项技术对成像以外的应用也适合,如 AVO 分析。

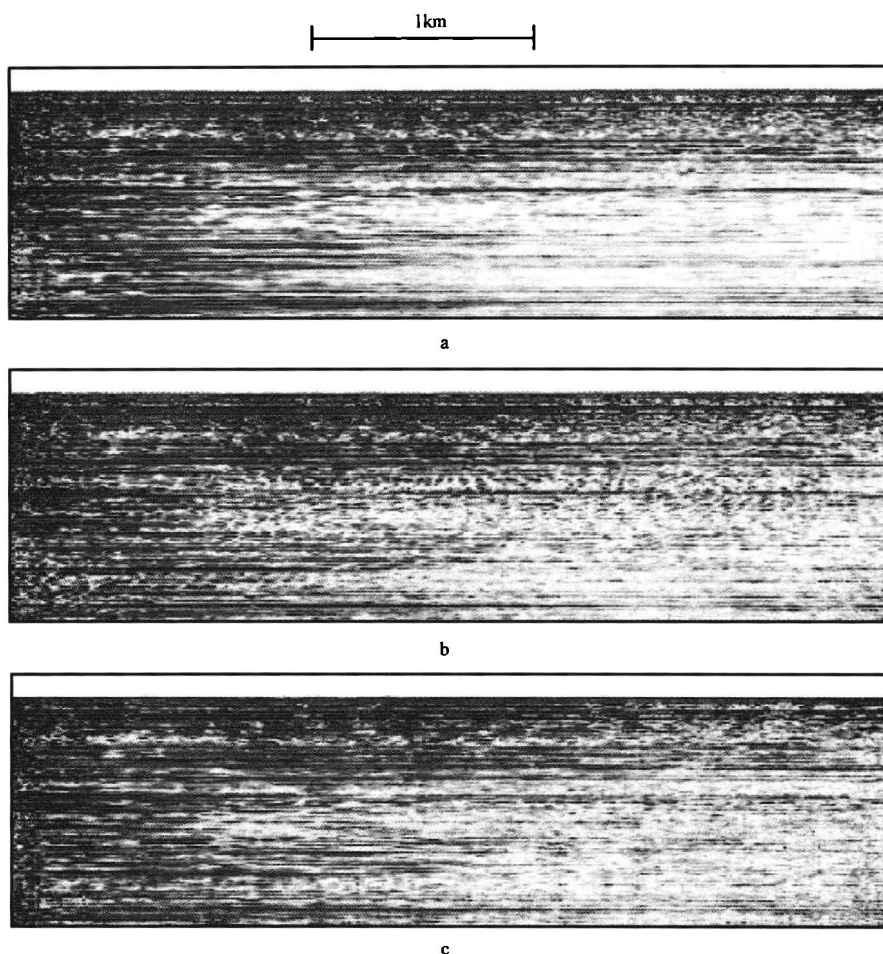


图 16 扰动滑动扫描采集叠加剖面对比

a—常规采集 2D 可控震源地震测线的叠加剖面;b—对扰动记录做“被动”分离后的扰动可控震源采集叠加剖面;c—对分离后的叠前数据应用(正演)模拟和反演方法后的扰动可控震源采集叠加剖面

2. 陆上拓宽低频信号的采集技术

1) 拓展低频带宽的伪随机扫描技术

近年来,人们对获得具有有效低频成分的地震数据集产生了浓厚的兴趣。通常,恢复有效的低频能量需要克服一个 30dB/oct 的阻挡层(barrier),作为解决低频挑战的一种途径,提出了与振动器机械约束相匹配的低停顿非线性扫描方法。最近,专门的伪随机扫描方法又提供了另一种可行的选择。伪随机扫描降低了对振动器的峰值要求,当扫描的起始频率降低时更为有效。野外测试数据分析显示,在保证合理的覆盖次数和有效分辨率的前提下,可以恢复低至 2Hz 的频率。

2009 年春天,在美国得克萨斯州 Devine 工区进行了一项专门的低频可控震源试验,目的是利用可控震源激发和记录低频能量,根据井中记录评估本次低频扫描的传播特性,并在一组综合性试验中对伪随机扫描和更传统的低停顿非线性扫描进行了评估。

伪随机扫描方法

伪随机扫描(Pseudo - Random Sweep)是1979年由Cunningham提出一种应用于地震的随机排列各段的非线性扫描方法。伪随机扫描与各段扫描的顺序无关,用伪随机扫描可以同时记录不同震源在不同位置产生的信号,并能在随后的数据处理中将它们分开。将可控震源放在测线的两端同时激发,则在同一段时间内采集的数据量可以增加一倍。伪随机扫描技术是由CGGVeritas公司开发的,它在同一时间激发所有的频率,该方法降低了对振动器的峰值要求,从而减少了质量块行程和振动器泵流量,成为一种很具吸引力的产生低频信息技术。也可以对这些扫描做适当的修改,以进一步减少质量块行程和增大驱动功率(在Devine试验中没有做这种修改)。

图17显示了一个典型的CGGV伪随机扫描,其中红色是控制信号波形,蓝色是与利用电子控制的VE423振动器估算的地面力加权。采用最小平方误差极小化的方法趋势逼近去控制VE423的震动,以便获得合理的全波形伪随机信号(Boucard和Ollivrin 2010)。

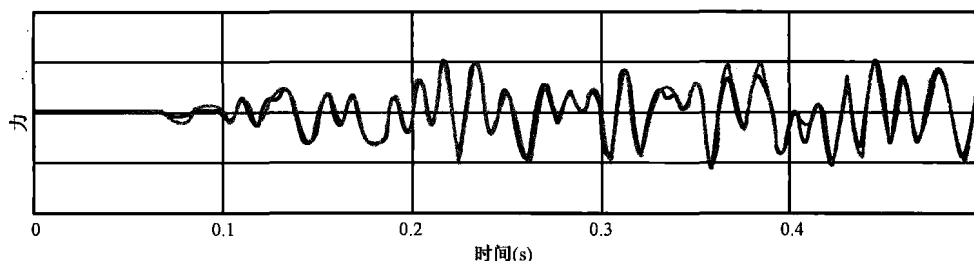


图17 CGGV伪随机扫描波形

红色表示控制信号,蓝色表示地面出力加权总和(参见PAPR 944, Figure 2)

针对已知的项目,在确定是低停顿扫描还是伪随机扫描更适合于产生低频成分时,应该权衡很多因素:(1)振动器模式;(2)扫描带宽;(3)振动器条件;(4)运作方面的注意事项。在下面介绍的野外试验中,利用不同扫描类型生成的结果差异最小。在本次低频试验中,伪随机扫描没有采用同时源。

野外试验与结果

2009年CGGVeritas和壳牌公司联手在美国得克萨斯州中南部Devine地区的实施了一个野外试验。采用一个振动器作为震源,通过简单采集系统记录井中、地面和噪声数据。利用几个辅助的加速度检波器和一个线性差动变压器(LVDT)装置获得有关振动器机械特性的额外信息。在Devine试验中,采用了低停顿扫描(以下指CGGV低停顿和Shell低停顿扫描)和CGGV伪随机扫描两种类型。Shell低停顿扫描采用一个质量块作为约束(阻尼)装置,而CGGV低停顿扫描额外还包括一套流体流动约束(阻尼)装置。扫描起始频率、扫描长度、驱动功率都不相同。

图18比较了CGGV伪随机扫描的地面力频谱和两种低停顿扫描方法的1~80Hz的频率扫描结构。观测结果显示CGGV伪随机扫描的地面力能量很可观。另外,图19中可以看出,在2~30Hz范围内,井中质子速度能量谱和图中每一种扫描方式观测到的地面力的能量谱保持一致。如同理论预测的一样(Baeten, 1988)。当频率在2Hz以下时,井中地震检波器位于近场,当频率高于30Hz以上时,吸收效应导致高频衰减。总之,图18和图19证明了特别设计的