

文章编号 1004-924X(2009)10-2569-07

# 可控震源的伪随机扫描与系统测试

孙 锋,王忠仁,陈祖斌,樊丹丹

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院,吉林 长春 130062)

**摘要:**为满足地震信号分辨率和信噪比的要求,针对地震勘探用可控震源的特点,对伪随机编码扫描方式进行了研究。讨论了二元伪随机扫描工作方式的特点,并提出了三元伪随机扫描工作方式。研究了伪随机码的原理,给出了伪随机码的生成方法,利用得到的伪随机码设计了实际应用的伪随机码序列。将所研制的三元伪随机编码扫描信号发生器嵌入到电磁驱动可控震源上,并进行了实际测试,测试结果显示调制频率对最终的相关结果有很大影响。对得到的自相关函数的分析表明,采用三元伪随机编码扫描方式得到的信噪比比采用二元伪随机编码扫描方式提高了9%,得到了适用于地震勘探的伪随机编码扫描信号。

**关键词:**可控震源;三元伪随机序列;编码;相关噪声

**中图分类号:**P631.443;TP391 **文献标识码:**A

## Pseudorandom sweeping and system testing for seismic vibrator

SUN Feng, WANG Zhong-ren, CHEN Zu-bin, FAN Dan-dan

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China)

**Abstract:** To improve the resolution and Signal to Noise Ratio(SNR) of seismic signals, the sweeping mode of pseudo-random code of a seismic vibrator was investigated. The sweeping mode of binary pseudo-random code was discussed, then a new sweeping mode for ternary pseudo-random code was presented. The principle of the pseudo-random code was researched and how to generate the pseudo-random code was given. Based on the obtained pseudo-random code, a pseudo-random code sequence was designed for practical applications. Furthermore, a signal generator of ternary sweeping for the pseudo-random code was embedded into the vibrator, and tested results show that modulation frequency has significant effects on the final self-correlation results. Analysis results on self-correlation function indicate that the SNR obtained from the sweeping mode of ternary pseudo-random code has been improved by 9% as compared with that of the sweeping mode of binary pseudo-random code, which means that obtained sweeping signals are suitable for the seismic exploration.

**Key words:** seismic vibrator; ternary pseudo-random sequence; code; correlation noise

收稿日期:2008-10-15;修订日期:2008-11-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40574079;No. 40774097);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2006AA09Z335)

## 1 引言

地震勘探是用震源向地下发射弹性波(称为地震波),当地震波遇到地下波阻抗分界面时,地震波被反射并返回到地表,由放置在地表的地震检波器阵列所接收,然后将接收到的地震数据通过专门的数据处理算法进行处理并成像<sup>[1]</sup>。

目前可控震源已经广泛应用于地震勘探中。可控震源通常采用 Chirp 信号<sup>[2]</sup>或非线性调频信号<sup>[3]</sup>,然而,这种线性调频扫描信号与非线性调频扫描信号的地震子波具有较大的旁瓣效应,严重影响了地震记录的分辨率<sup>[4]</sup>。

可控震源最早采用的扫描信号也是 Chirp 信号,它的主要参数有扫描长度(持续时间)和频带宽度。

线性扫描和狭义的非线性扫描——单一指数或对数形式的扫描信号,都属于调频扫描<sup>[2]</sup>,采用调频扫描及相关技术,会带来相关噪声的特殊干扰,为了压制相关噪声,可控震源多采用两种扫描方式,即联合扫描和编码扫描。

联合扫描<sup>[5]</sup>由 Werner 和 Krey 于 1979 年提出。联合扫描由两个或两个以上的短线性扫描段构成,段间可以隔以时隙(用于“听”)。在联合扫描中,扫描段没有极性,如果给不同的扫描段赋以极性(从而成为码元),而后按照一定的编码顺序排列到一起,码和其补码之间间隔以时间段,就构成编码扫描。编码扫描的最佳效果是在 1 s 长的编码序列内有 8 个码元。

目前国际上用于地震勘探研究的大多数可控震源<sup>[3]</sup>是液压式的,但由于其工作原理限制,它的扫描频率和响应效果时间不如电磁式可控震源,目前液压式可控震源大多数采用的仍然是扫频方式。

编码技术最早出现于通讯领域,该技术目前在通讯领域应用也最为广泛<sup>[6]</sup>。除此之外,在图像信息领域及航空航天技术领域也衍生出多种基于编码的新技术<sup>[4]</sup>。伪随机编码在伪码测距、导航、遥控遥测、扩频通信、多址通信、分离多径、数据加乱、信号同步、误码测试、线性系统测量、天线方向图测量和各种噪声源等均有一定应用<sup>[7]</sup>。此外,智能金融卡加密、基于伪随机码的扩频技术、伪随机多频信号在电法仪器中的应用以及运用彩

色伪随机阵列重构三维的动态场景、免疫系统的信息传输等方面,也都应用了伪随机技术<sup>[6]</sup>。由于通讯领域不存在类似于地震震源的机械结构特性,因此在使用过程中很容易达到伪随机编码的“0”和“1”的要求。

## 2 伪随机序列研究

1979 年, 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(Pseudo-Random Sweep)<sup>[8]</sup>。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。

随机序列<sup>[6]</sup>由 0 和 1 两个元素组成二元(或二进制)序列,它可以用波形进行模拟。通常把二元序列(或波形)中的元素称做比特或码元,而把它的持续时间称做比特长度。

伪随机信号可由两个信号相乘得到,一个是恒频载波信号,另一个是二进制的伪随机编码序列。Golomb 讨论过涉及雷达的伪随机信号。伪随机信号的自相关函数表达式为:

$$\Phi(\tau) = \frac{A^2}{2} \left[ \left(1 - \frac{2^N f_c \tau}{2^N - 1}\right) \cos 2\pi f_c \tau + \frac{2^N}{2\pi(2^N - 1)} \sin 2\pi f_c \tau \right],$$

$$(0 \leq |\tau| \leq \frac{1}{f_c})$$

$$\Phi(\tau) = \frac{A^2}{2(2^N - 1)} \cos 2\pi f_c \tau, \left(\frac{1}{f_c} \leq |\tau| \leq \frac{T}{2}\right). \quad (1)$$

这种基于二元{0,1}伪随机编码信号的可控震源信号设计方法,经相关运算之后所得到的地震响应剖面中存在严重的相关噪声<sup>[9]</sup>,降低了地震记录的信噪比。因此,本文提出了利用具有理想相关特性的三元伪随机序列进行可控震源信号编码设计。虽然在地震研究领域伪随机编码扫描技术早已提出,但是在应用过程中由于震源本身机械特性的限制,伪随机编码一直没能得到实际应用,本文针对于电磁式可控震源的伪随机扫描方式,首次提出了三元伪随机编码扫描技术,并对其进行了深入的研究。

## 3 三元伪随机序列的构造

设  $q$  是一个素数,令  $F_q$  是由所有小于  $q$  的

非负整数构成的集合,即

$$F_q = \{0, 1, 2, \dots, q-1\} .$$

对任意的  $a, b \in F_q$ , 定义其加法和乘法为

$$\begin{cases} a \oplus b = (a + b) \bmod q \\ a \otimes b = (a \cdot b) \bmod q \end{cases} .$$

则  $F_q$  构成了一个伽罗瓦 (Galois) 域<sup>[10]</sup>, 其中  $x \bmod q$  表示  $x$  与  $q$  的模运算。

设多项式

$$g(x) = \sum_{i=0}^n c_i x^i (c_i \in F_q, c_0 \neq 0, c_n \neq 0) , \quad (2)$$

是  $F_q$  上的一个  $n$  次本原多项式<sup>[7]</sup>, 给定非零的初始向量  $(a_0, a_1, \dots, a_{n-1})$ , 其中  $a_i \in F_q$ 。当  $k \geq n$  时, 按照公式

$$a_k = -c_0^{-1} (c_1 a_{k-1} + c_2 a_{k-2} + \dots + c_n a_{k-n}) \bmod q , \quad (3)$$

可以生成周期为  $m = q^n - 1$  的  $q$  元  $m$ -序列  $\{a_k\}$ 。

设  $G_q$  是  $F_q$  中所有非零元素构成的集合, 则  $G_q$  中必存在元素  $\mu$ , 使得

$$G_q = \{\mu^0 = 1, \mu^1 = \mu, \mu^2, \dots, \mu^{q-2}\} \pmod{q}$$

这样的  $\mu$  称为  $F_q$  的一个本元。

设  $\mu$  为  $F_q$  的一个本元, 则当  $a_k \neq 0$  时, 必有唯一的非负整数  $r (0 \leq r \leq q-2)$ , 使得  $a_k = \mu^r$ , 做映射

$$\theta(a_k) = \begin{cases} 0, & a_k = 0 \in F_q \\ (-1)^r, & a_k = \mu^r \in G_q \end{cases} . \quad (4)$$

构造序列

$$b_k = (-1)^k \theta(a_k) . \quad (5)$$

则序列  $\{b_k\}$  是在  $\{-1, 0, 1\}$  中取值的周期为  $N = (q^n - 1) / (q - 1)$  的周期序列。

定义  $\{b_k\}$  的周期自相关函数为

$$R(i) = \sum_{k=0}^{N-k} b_k b_{k+i} . \quad (6)$$

则当  $q$  为奇素数时, 有

$$R(i) = \begin{cases} q^{n-1}, & i = 0 \pmod{N} \\ 0, & i \neq 0 \pmod{N} \end{cases} . \quad (7)$$

归一化后

$$R(i) = \begin{cases} 1, & i = 0 \pmod{N} \\ 0, & i \neq 0 \pmod{N} \end{cases} . \quad (8)$$

由式(8)可见, 按上述方法构造的三元伪随机序列  $\{b_k\}$  的自相关函数相对于二元  $m$ -序列而言具有更好的脉冲特性, 自相关函数满足式(10)的序列  $\{b_k\}$  称之为具有理想相关特性的三元伪随机序列。

根据伪随机序列仿真出二元和三元伪随机编码扫描信号的示意图及其自相关函数, 如图 1~4 所示。

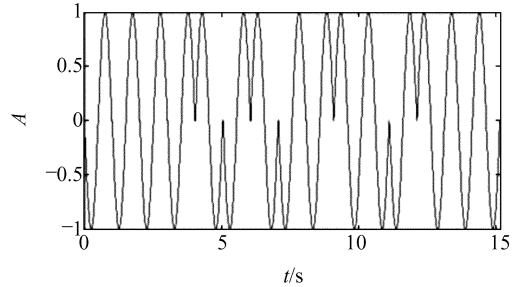


图 1 二元伪随机编码扫描信号示意图

Fig. 1 Binary pseudo-random sweep signal

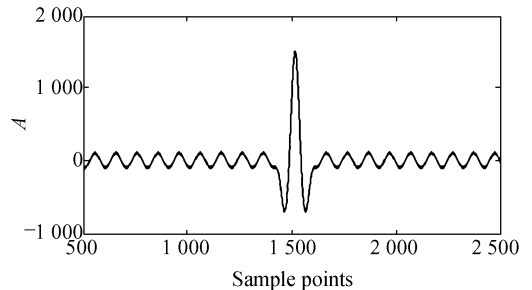


图 2 二元伪随机编码扫描信号的自相关函数

Fig. 2 Auto-correlation of binary pseudo-random sweep signal

图 3 为三元伪随机编码扫描信号的示意图。

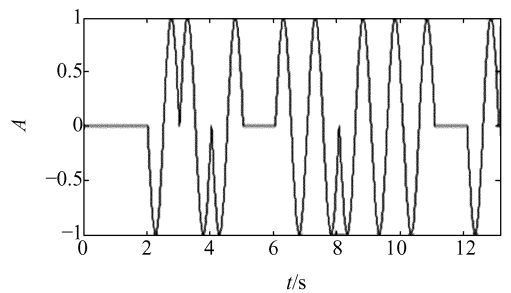


图 3 三元伪随机编码扫描信号示意图

Fig. 3 Ternary pseudo-random sweep signal

图 4 为图 3 所示三元伪随机编码扫描信号的自相关函数。从图 4 中可以看出, 三元伪随机编码扫描信号的自相关函数完全消除了旁瓣和尾振, 接近白噪声的自相关函数——脉冲函数。

从图 2 与图 4 的比较中可以很明显的看出, 二元伪随机编码扫描信号的自相关函数带有一定

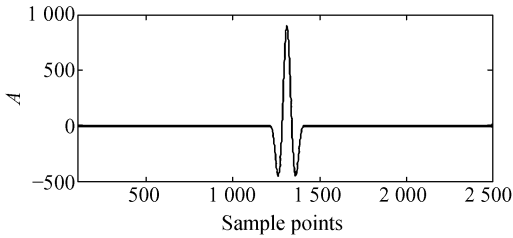


图 4 三元伪随机编码扫描信号的自相关函数

Fig. 4 Auto-correlation of ternary pseudo-random sweep signal

程度的尾振,而三元伪随机扫描信号的自相关函数完全消除了尾振,其自相关特性优于二元伪随机扫描信号。

## 4 伪随机扫描信号产生电路设计

伪随机扫描信号产生电路设计以 AD9852 为核心,控制器采用了 PHILIPS89C58,结构图如图 5 所示。

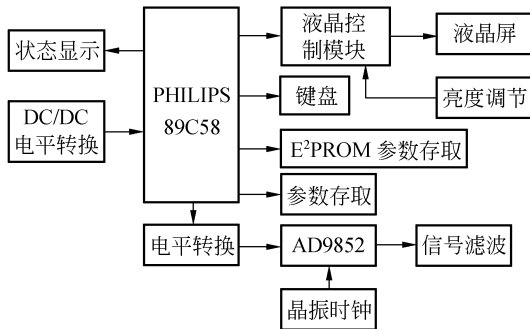


图 5 振动控制仪的基本结构图

Fig. 5 Structure of vibrator controller

振动控制器的功能单元包括 CPU 控制、DDS 扫频信号产生、输出信号幅度调节、人机交互以及电源等模块。CPU 控制模块采用了 PHILIPS 89C58 芯片,对系统进行控制,液晶模块和键盘模块主要负责人机交互,采用中文显示,通过在单片机 89C58 的程序存储区自建字库实现;E<sup>2</sup>PROM 主要负责参数的及时存取,采用了 I<sup>2</sup>C 总线接口的 E<sup>2</sup>PROM 24C01。

信号发生模块是相控可控震源的核心部分,它产生的激励信号经过功率放大,再通过电磁驱动的激振器送入地下。因此,激励信号的质量直接影响整个系统的性能。

AD9852 的一种工作模式 Single-Tone 模式的工作原理为单片机通过工作模式寄存器选择 AD9852 的工作模式为 Single-Tone 模式,然后设定好 AD9852 所产生信号的幅度、频率以及初始相位,此时单片机送给 AD9852 一个开始工作的信号,AD9852 即开始工作,产生所设定频率的正弦波。系统软件部分的设计思想是:AD9852 采用 Single-Tone 模式,利用单片机的定时器控制 AD9852 的工作时间,使 AD9852 按照三元伪随机序列中元素的值,依次产生所对应的一个周期的正弦波,零电平通过将波形的幅度设定为 0 来实现。将这些单周期的波形连接起来,就能得到所需的三元伪随机编码扫描信号。

## 5 系统测试

在实际应用中,我们看重的是激震器基板的信号结果,采用加速度计对基板信号进行采集,对于同一伪随机编码,采用 40 Hz 和 80 Hz 的频率进行扫描,结果如图 6~7 所示。

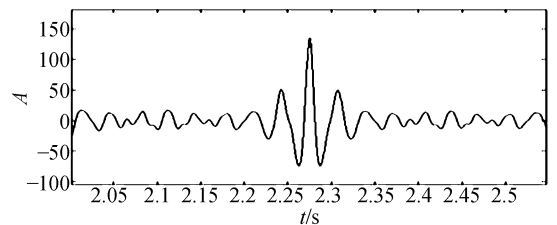


图 6 40 Hz 三元编码扫描基板信号的自相关函数

Fig. 6 Auto-correlation of ternary code sweep in substrate with 40 Hz

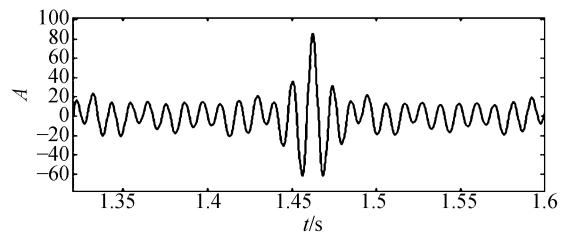


图 7 80 Hz 三元编码扫描基板信号的自相关函数

Fig. 7 Auto-correlation of ternary code sweep in substrate with 80 Hz

图 6 中的自相关函数的主旁瓣比为 -19.885 dB,图 7 中自相关函数的主旁瓣比为 -18.832 dB,此外图 7 中自相关函数的尾振情况

比图 6 中自相关函数的尾振情况严重。从两图的比较可以看出,旁瓣随着载波信号频率的增大而增大,而且尾振的幅度随着频率的增大也呈现出增大的趋势。这说明,载波信号的频率越高,基板振动信号发生变化的程度越大。在二元伪随机编码过程中,在相位突变时,由于激震器是弹簧结构的机械体,无法时时根据相位的突变来改变运动行程,需要一定的时间来缓冲并达到信号的变化,因此,采用三元伪随机编码,加入一定的“0”,这样可以使相位突变的影响降低。

下面给出二元伪随机扫描和三元伪随机扫描的实际测试图形。

采用实验室自行研究的 PHVS500 型电磁式可控震源,接收地震仪采用实验室研制的 GEIS 地震仪采集系统。

采用二元伪随机扫描方式时,当序列为 1 1 1 1 -1 1 1 -1 1 1 1 -1 -1 1 -1 -1,扫描频率为 40 Hz 时,基板信号自相关结果如图 8 所示。图 8 中自相关的主旁瓣比为 -22.294 dB。

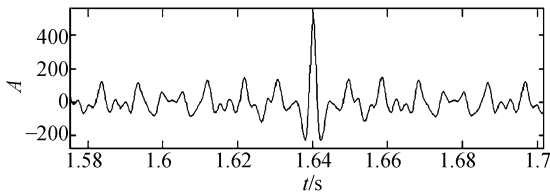


图 8 二元伪随机编码扫描频率为 40 Hz 的相关图形  
Fig. 8 Correlation of binary code sweep in 40 Hz

采用二元伪随机扫描方式,当序列为 1 -1 -1 -1 -1 -1 1 1 -1,扫描频率为 40 Hz 时,基板信号自相关后结果如图 9 所示。图 9 中自相关的主旁瓣比为 -23.275 dB。

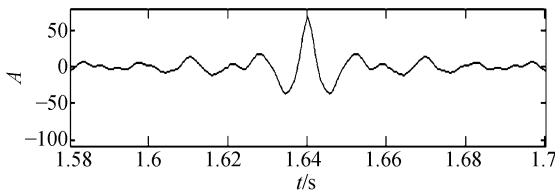


图 9 二元伪随机编码扫描频率为 40 Hz 的相关图形  
Fig. 9 Correlation of binary code sweep in 40 Hz

采用二元伪随机扫描方式,当序列为 1 -1 -1 1 1 -1 1 1 -1 -1 -1 1,扫描频率为 80 Hz 时,

基板信号自相关后结果如图 10 所示。图 10 中自相关的主旁瓣比为 -22.43 dB。

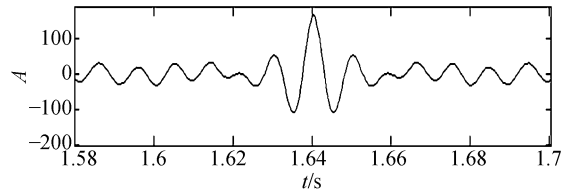


图 10 二元伪随机编码扫描频率为 80 Hz 的相关图形  
Fig. 10 Correlation of binary code sweep in 80 Hz

采用三元伪随机扫描方式,当序列为 0 0 1 -1 1 0 -1 -1 1 1 1 0 1,扫描频率为 40 Hz 时,基板信号自相关结果如图 11 所示。图 11 中自相关的主旁瓣比为 -22.028 3 dB。

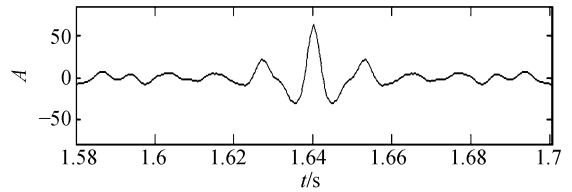


图 11 三元伪随机编码扫描频率为 40 Hz 的相关图形  
Fig. 11 Correlation of ternary code sweep in 40 Hz

采用三元伪随机扫描方式,当序列为 0 0 1 -1 1 0 -1 -1 1 1 1 0 1,扫描频率为 80 Hz 时,基板信号自相关结果如图 12 所示。图 12 中自相关的主旁瓣比为 -27.542 dB。

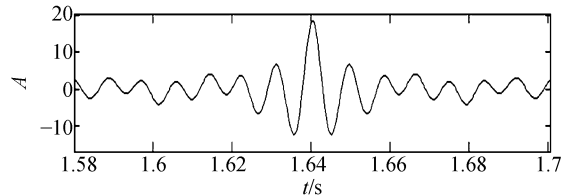


图 12 三元伪随机编码扫描频率为 80 Hz 的相关图形  
Fig. 12 Correlation of ternary code sweep in 80 Hz

采用三元伪随机扫描方式,当序列为 0 0 0 0 1 0 -1 0 1 0 0 0 -1 0 -1 0 1 0 1 0 1 0 0 0 1 0,扫描频率为 40 Hz 时,基板信号自相关结果如图 13 所示。图 13 中自相关的主旁瓣比为 -28.415 dB。

根据上述实验结果可知,三元伪随机编码扫描的长度对于相关结果的自相关主旁瓣比值也有一定的影响,当序列长度越长时,主旁瓣比越小。相对于二元伪随机编码扫描,三元伪随机编码扫

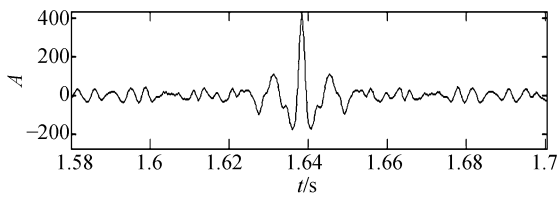


图 13 三元伪随机编码扫描频率为 40 Hz 的相关图形

Fig. 13 Correlation of ternary code sweep in 40 Hz

描降低了相位 1 和 -1 的直接连接,这样就减小了相位突变造成的干扰,最终得到的自相关结果效果较好。

## 6 结 论

本文首先研究了伪随机编码的原理,并研究

了如何取得伪随机编码,使用二元、三元伪随机序列信号应用于电磁式可控震源进行测试,得到了伪随机编码序列的实际测试结果。在实际测试中,调制频率对最终的相关结果有很大的影响,调制频率越低,自相关的结果越好。但是对于可控震源来说,由于震源是一种弹簧结构的机械构造,因此频率不能过低,否则对震源本身有一定的损害。在测试中三元伪随机序列加入了“0”,这样使得震源在信号的相位发生突变时有了一定的缓冲时间,最终采用三元伪随机序列编码扫描方式时,地震子波的主旁瓣比值可达到  $-28.415$  dB。三元伪随机序列编码扫描相对于二元伪随机序列编码扫描方式而言,可以使信噪比提高 9%。采用三元伪随机编码扫描方式满足地震信号分辨率和信噪比的要求。

## 参考文献:

- [1] 林君. 电磁驱动可控震源地震勘探原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 41-52.  
LIN J. *Seismic Exploration and Application of Vibrator Driven by Electromagnetism* [M]. Beijing: Science Press, 2004: 41-52. (in Chinese)
- [2] CUNNINGHAM A B. Some alternate vibrator signals[J]. *Geophysics*, 1979, 44(12): 1901-1921.
- [3] CRAWFORD J M, WILLIAM E N, LEE M R. Continuous signal seisgraphy [J]. *Geophysics*, 1960, 25: 95-105.
- [4] 赵秀影, 商玉凤, 翟林培, 等. 基于 EBCOT 的平衡多小波航空图像压缩编码[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11): 1796-1801.  
ZHAO X Y, SHANG Y F, ZHAI L P, *et al.*. Balanced multiwavelet aviation image compression coding based on EBCOT [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1796-1801. (in Chinese)
- [5] CHEN Z B, LIN J. Design for vibrator field experiment based on vibrator-earth system [J]. *Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia*, 2000, 3(1): 107-113.
- [6] 肖国镇, 梁传甲, 王玉民. 伪随机序列及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.  
XIAO G ZH, LIANG CH J, WANG Y M. *Ternary Array and Application* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [7] 万哲先. 代数和编码[M]. 北京: 科学出版社, 1980.  
WAN ZH X. *Algebra and Code* [M]. Beijing: Science Press, 1980. (in Chinese)
- [8] 王忠仁, 林君, 冯声涯. 地震勘探中相控阵震源的方向特性研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1191-1197.  
WANG ZH R, LIN J, FENG SH Y. Directivity of phase array vibrators in seismic exploration [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2006, 49(4): 1191-1197. (in Chinese)
- [9] 苏金名, 阮沈勇. MATLAB 实用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.  
SU J M, RUAN SH Y. *Matlab Utility Guide* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
- [10] 李跃峰. AD9852 的应用[J]. *火控雷达技术*, 2000, 29(4): 7-14.  
LI Y F. Applications of AD9852 [J]. *Fire Control Radar Technology*, 2000, 29(4): 7-14. (in Chinese)

## 作者简介:



孙 锋 (1981—),男,吉林长岭人,博士研究生,主要从事地震仪器研制和地震数据仿真算法的研究。E-mail: sun-feng4997@yhao.com.cn



王忠仁 (1954—),男,吉林农安人,工学博士,教授,主要从事地震勘探方法与信号处理算法的研究。E-mail: wzr@jlu.edu.cn

## 通讯作者:



陈祖斌 (1971—),男,汉族,湖南澧县人,工学博士,教授,主要从事地球信息探测仪器和数字信号处理研究。E-mail: czb@jlu.edu.cn



樊丹丹 (1981—),男,山东郓城人,工学硕士,主要从事地震勘探方法的研究。E-mail: sdd1202@126.com

## ● 下期预告

## 线电极原位制作的微细电解线切割加工试验

王 昆<sup>1</sup>,朱 荻<sup>2</sup>

(1. 同济大学 机械工程学院,上海 200092;

2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

微细电解线切割加工是一种微细加工新方法。为了提高加工精度,将微米尺度线电极的制作与后续加工集成在一个工艺系统中完成,进行了基于线电极原位制作的微细电解线切割加工技术的研究。从理论上分析了线电极直径大小对微细电解线切割加工精度的影响,提出了原位制作微米尺度线电极的方法,并制作出直径  $5\ \mu\text{m}$  的钨丝线电极。通过试验,加工出缝宽为  $20\ \mu\text{m}$  左右的微型浆叶结构和曲率半径在  $1\ \mu\text{m}$  以下的微细尖角结构。试验结果表明:线电极的原位制作技术能提高微细电解线切割的加工精度,工艺兼容性好,能满足微米尺度微细结构的加工要求。