

◇ 研究报告 ◇

声波远探测测井仪发射电路的优化实现*

贺洪斌^{1†} 晁永胜² 汪正波¹

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中石化胜利石油工程有限公司测井公司 东营 257096)

摘要 声波远程探测需要低频大功率发射和宽频带接收技术,从而使得仪器看得远、看得清。目前,采用单脉冲的激励方式,需要增加发射脉宽或者提高发射电压来提高发射能量。而增加发射脉宽会降低成像分辨率,提高发射电压又对发射换能器提出了新的挑战。该文在现有换能器基础上,提出并采用线性调频脉冲信号激励换能器的方法,以提高探测距离和精度。具体采用 DDS 技术产生线性调频脉冲信号并由 FPGA 实现;采用高效的 D 类放大器来最大化功率;采用一个全桥电路实现了两路发射控制。测井表明,设计的电路能稳定有效地工作,相对于单脉冲发射电路而言,它得到了更好的成像效果图像。该文工作为远程声波探测测井仪器的自主研发提供了一种技术参考。

关键词 横波远探测,线性调频脉冲,直接数字式频率合成,D类功放

中图分类号: P631.5+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)02-0281-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.02.015

Optimization of the transmitting circuit of acoustic remote detecting tool

HE Hongbin¹ CHAO Yongsheng² WANG Zhengbo¹

(1 Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190, China)

(2 Well Logging Company, Shengli Petroleum Administration, SINOPEC, Dongying 257096, China)

Abstract Acoustic remote detecting tools requires low-frequency and high-power transmission and wide-band receiver technology, which can make the tool see farther and see more clearly. In order to increasing transmitting energy while using single-pulse signal to stimulate the transmitting transducer, it's necessary to increase the pulse width of the excitation signal or increase the transmitting voltage. However, the imaging resolution will be decreased while increasing the pulse. And increasing the voltage will give more challenge for transducers. This article proposed a method of using linear frequency modulated pulse signal to drive transducers which will improve the detection range and precision. Practically, using DDS to generate this chirp signal and implemented by FPGA, using high efficient Class D amplifier to maximum the energy, using a full bridge circuit to achieve the two-way emission. Field logging shows that the circuit can work stably and efficiently, which gets better imaging resolution compared to single pulse transmit circuits. This article provides a technical reference for the independent and development of acoustic remote detecting tools.

Key words S-wave remote detection, Linear frequency modulated chirp, Direct digital frequency synthesis, Class D amplifier

2017-02-10 收稿; 2017-12-28 定稿

*国家自然科学基金项目(11404370), 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-1)

作者简介: 贺洪斌(1982-), 男, 四川资阳人, 本科, 工程师, 研究方向: 声波测井仪器研制。

† 通讯作者 E-mail: Hongbin40@163.com

1 引言

远程探测技术即对井周围数米或数十米的地层地质进行探测的技术^[1-2]。该技术可以探测到地层中的裂缝、断层等,具有巨大的应用前景。

声波远探测测井仪发射声系包括两个同深度

且互相垂直的偶极发射换能器和两个同深度且相互垂直的低频远探测发射换能器^[3-4]。为了使发射换能器充分激励产生足够的能量向地层辐射,需要给换能器施加上千伏的激励信号。其激励信号由电源电路、发射控制逻辑、驱动电路、激励电路、高压变压器和储能电容组成的电路来产生。激励电路的组成如图1所示。

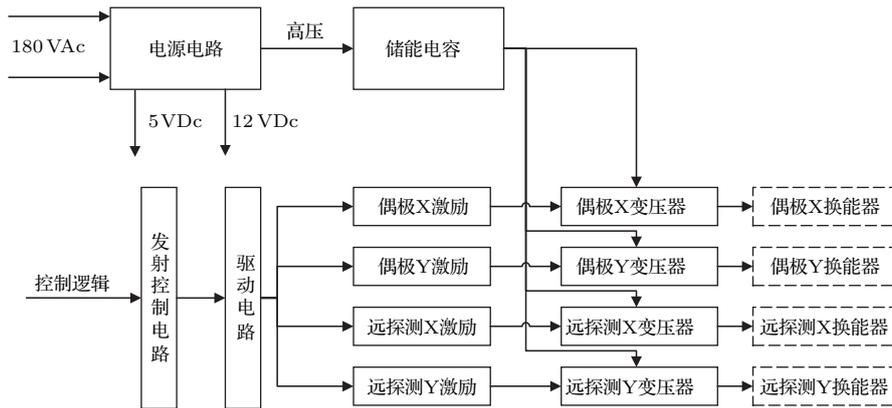


图1 声波远探测测井仪发射结构图

Fig. 1 Transmitting structure diagram of acoustic remote detecting tool

图1中,电源电路为发射部分电路提供所需的电压,并用高压给储能电容充电;储能电容电路存储发射换能器所需要的能量;发射控制电路从系统总线上获取控制逻辑信号;驱动电路在发射控制电路的控制下,产生相应的激励信号;激励信号送入变压器驱动相应的换能器工作。

传统激励发射换能器的方式是单脉冲激励,即利用固定的矩形高压脉冲再经过变压器激发换能器^[5]。其中,矩形高压脉冲的宽度设置为探头频率周期的一半时,回波具有最大的灵敏度和最高的分辨率。采用高压脉冲信号激励方式能够激发出换能器所有频点的能量,能够产生比较宽频带的声波信号,且其激励电路简单,易于实现。然而,该种激励方式下,能量分散到各个频点上,导致每个频点能量较小,探测距离较近,只适用于一般的情况,对于复杂且特殊的井孔环境下的远探测成像(如不规则井孔)则不能得到很好的效果。在远探测成像系统中,为解决传统单脉冲发射方式中成像分辨率和测井距离之间的矛盾,需要合理构造激励信号^[6]。

针对该问题,本文设计了线性调频脉冲激励方

式。该激励方式能够在一定程度上满足声波远探测测井的大功率和特定频带范围需求。由于线性调频信号占用的频带宽度远大于信息带宽,所以也可以获得很大的系统处理增益。且利用其激发声波测井偶极换能器,能够产生大功率的当前地层的弯曲波,从而得到更加清晰的成像。通过实际测井结果表明,线性调频脉冲激励方式可以增大探测距离和提高成像的清晰度。

2 线性调频脉冲信号

本文设计的线性调频脉冲信号的表达式为 $x(t) = \sin 2\pi ft \cdot w(t)$, 其中 f 为需要的信号频率, $w(t)$ 为窗函数。

利用矩形脉冲信号和线性调频脉冲信号分别激励同一组放置在油槽中的偶极发射换能器,采用宽频带接收探头作为接收装置,其结果如图2所示。

图2中,发射信号(黄色)经过1000:1的衰减器进行采集,图2(a)中接收信号(绿色)每一个刻度为100 mV;图2(b)中接收信号(绿色)每一个刻度为200 mV。

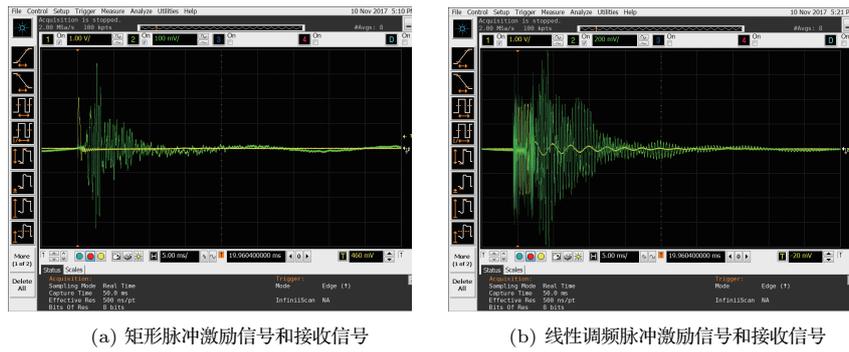


图2 实测的发射信号与接收信号图

Fig. 2 Tested transmit signal and receive signal

将两组数据画到同一幅图中，其结果如图3所示。从图3中可以看出，在发射电压相同的情况下，采用线性调频脉冲激励方式，接收信号幅度远大于采用矩形脉冲激励方式所产生的接收信号，且在较长时间内都能捕获到反射信号。

对两种激励的发射信号和接收信号分别做傅里叶变换，观察其频谱如图4所示。从图4(a)中可以看出，采用矩形脉冲激励方式，能量主要集中在2.7 kHz以下，具有较宽的频带；而采用线性调频脉冲激励的方式，能量主要集中在设计的2.5 kHz左右，且采用线性调频脉冲激励的方式，能够辐射出更大的发射能量。从图4(b)中可以看出，与矩形脉冲激励方式相比，线性调频脉冲激励方式所获得的反射信号具有更好的信噪比，且其能量主要集中在发

射探头固有频率附近。

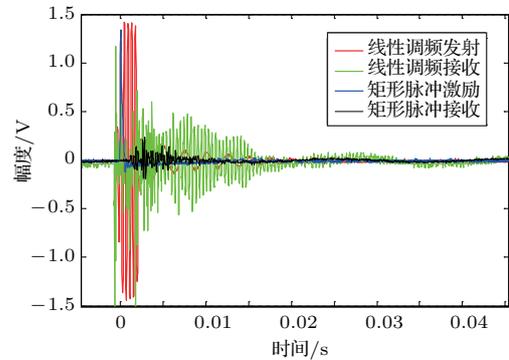


图3 发射信号和接收信号对比图

Fig. 3 Comparison of transmit signals and receive signals

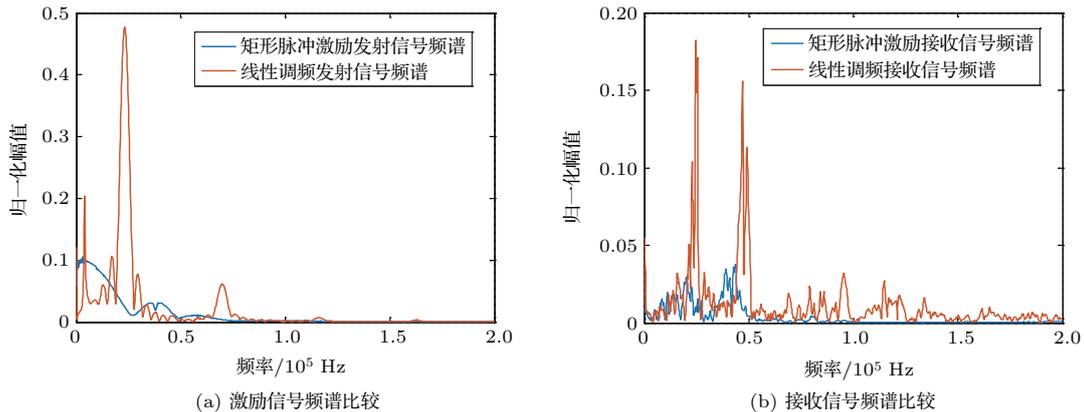


图4 发射信号和接收信号频谱对比图

Fig. 4 Comparison of transmit signals and receive signals' frequency spectrum

3 线性调频脉冲信号的实现

线性调频脉冲激励电路主要由两部分组成：波形与时序控制部分和功率放大电路部分。其中，功率放大电路的方案选择会直接影响其他模块的实

现方式。

3.1 功率放大器

目前有很多种功率放大器，但是主要使用的是AB类放大器和D类放大器。AB类放大器结合了A类和B类两种放大器的优点，是目前普遍采用的一

类功率放大器。其所用的两个器件可以同时导通，但在交越点仅导通较短时间，因此，每个器件导通时间多于半个周期，但又少于整个周期，克服了B类放大器的非线性失真问题和A类放大器效率低的缺点。AB类放大器效率可达50%。D类放大器是一种开关或PWM功放。在这种功放中，器件要么完全导通，要么完全关闭，大幅度减少了输出期间的功耗，效率可高达90%~95%。此外，D类放大器在提高效率方面还起了质的变化，把有源器件作为连通、断开的开关运用，MOS场效应管工作在伏安特性曲线的饱和及截止区，激励时进入线性电阻区，断开时进入截止区，这样G极功耗降到最低限度，提高了放大器的能量转换效率。

鉴于D类放大器的上述特性，利于井下仪器能量的充分利用，因此，选用D类放大器来实现功率放大。

3.2 波形与时序控制

基于D类放大器的电路结构如图5所示。

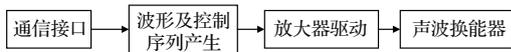


图5 发射电路结构图

Fig. 5 Structure of transmitting circuit

通信接口模块从仪器控制逻辑接收激励信号参数信息，包括发射换能器的选择、发射频率等命令信息。波形及控制序列产生模块根据通信模块接收到的命令，产生对应放大器的控制信号，实现对放大器的控制。放大器驱动即为D类放大器的实现。声波换能器为压电陶瓷片。

本文的主要设计内容为波形及控制序列产生模块和放大器驱动模块两个部分。

3.2.1 波形及控制序列产生模块

波形及控制序列产生模块产生D类功放的控制信号，其主要功能框图如图6所示。

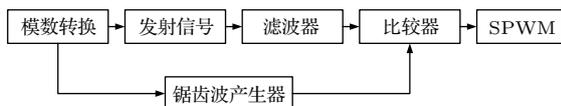


图6 波形及控制序列产生模块功能框图

Fig. 6 Waveform and control sequence generation module function block diagram

波形及控制序列产生模块有模拟和数字两种实现方式。

图7为一个典型的锯齿波产生电路。电路中运算放大器U1A及其周边器件组成同相迟滞比较器，运算放大器U1B及其周边器件组成反相积分电路。该电路产生的锯齿波频率为 $f = R_4 / (4 * R_2 * C_1 * R_2)$ 。其产生的锯齿波频率由电路中的电阻和电容值决定。

该电路中使用了较多的电阻电容器件，其产生的锯齿波频率由电阻电容的值确定。在高温环境下，电阻电容值随着温度的漂移，锯齿波的频率将发生改变，电路的稳定性和精度不能得到保证。此外，模拟电路的器件确定后，电路的参数将固定，不能根据实际需求而改变。相应的滤波器电路和模数转换电路存在同样的问题。

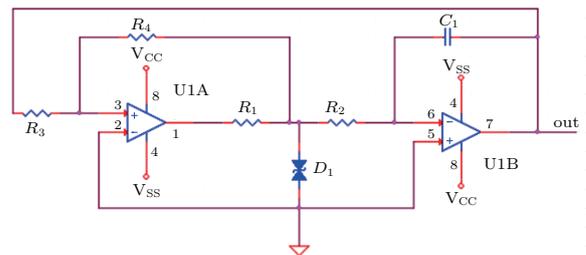


图7 锯齿波产生电路

Fig. 7 Sawtooth wave generating circuit

当采用数字的方式实现时，可以根据发射参数，直接产生符合发射要求的正弦脉宽调制(Sinusoidal pulse width modulation, SPWM)波。与模拟方式相比，数字方式产生的波形不受外部电阻电容影响，产生的SPWM波形不会受到温漂的影响，电路稳定且精度高。此外，数字化设计还可以根据实际需求，实时调整输出的SPWM波形的频率，更改锯齿波的频率，调整电路的输出精度。因此，波形及控制序列产生模块采用数字化的设计方式。

为了简化电路设计，该模块采用FPGA来输出SPWM波，其结构如图8所示。图8中，控制字模块从发射控制端接收SPWM波参数信息，包括加窗和编码的参数、发射信号的频率、锯齿波的频率。加窗和编码模块根据参数信息，确定发射信号的包络形状，给发射信号添加一个发射窗口，限制发射信号的形状。发射信号即为设定频率的正弦波信号，其频率根据实际发射探头和地层信息决定，采用

直接数字式频率合成器 (Direct digital synthesizer, DDS) 来实现。锯齿波发生器由一个累加器实现, 根据累加器的步长来确定锯齿波的频率, 频率越高, 步长越短, 输出精度越高。调制模块将加窗和编码模块输出的值与发射信号进行计算, 得出实际的发射信号。比较器模块将调制信号与锯齿波信号进行比较, 得到需要的SPWM波形信号。SPWM波控制放大器电路的通断。

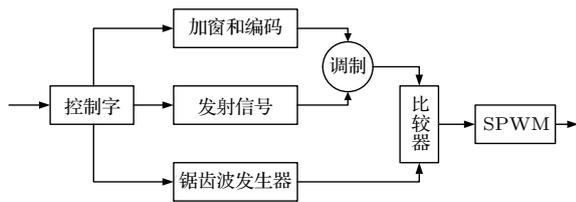


图8 FPGA产生SPWM波框图

Fig. 8 FPGA generates SPWM wave diagram

以上所有的模块均在FPGA中实现, 硬件电路简单可靠, 且不受温度等条件的影响。性能稳定且输出的SPWM波形可以根据实际需要进行调节, 减少了电路设计的复杂性, 使其具有通用性。

3.2.2 放大器驱动

本案中的D类放大器用于驱动两路相同的负载, 负载具有相同的参数, 且其输入电压和输出波形参数固定, 因此, 将其驱动电路简化为图9的结构。图9中V1和V2之间连接一组发射变压器的初级, V2和V3之间连接另一组发射变压器的初级, 两个发射变压器的次级直接连接声波发射探头。

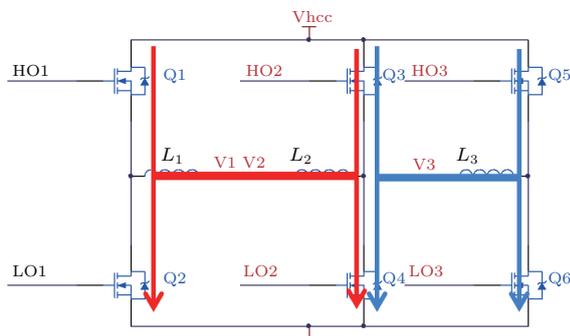


图9 放大器驱动等效电路

Fig. 9 Amplifier drive equivalent circuit

图9中, 当需要正相导通换能器1时(即V1和V2之间施加正电压), 只需要打开Q1和Q4; 当需要反相导通换能器1时(即V1和V2之间施加负电

压), 只需要打开Q2和Q3; 当需要正相导通换能器2时(即V2和V3之间施加正电压), 只需要打开Q3和Q6; 当需要反相导通换能器2时(即V2和V3之间施加负电压), 只需要打开Q4和Q5。其余的开关均处于关闭状态。通过对三组开关的打开和关闭, 将三个半桥电路组成两个全桥驱动电路, 驱动两路换能器的工作。

3.2.3 线性调制脉冲信号的FPGA实现

通过FPGA生成的线性调制脉冲信号波形如图10和图11所示。

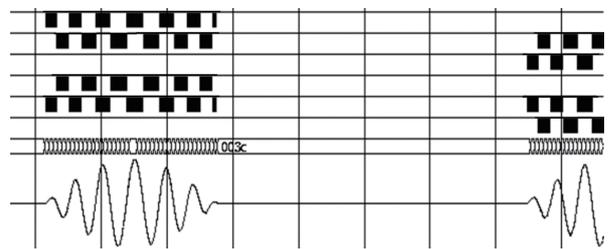


图10 单频率线性调制脉冲信号

Fig. 10 Single frequency linear modulated pulse signal

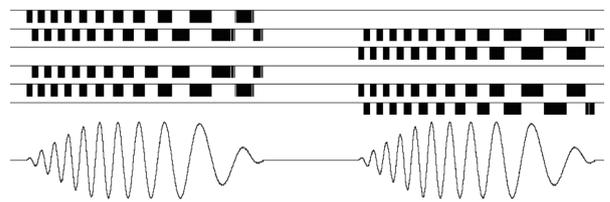


图11 变频率线性调制脉冲信号

Fig. 11 Variable frequency linear modulated pulse signal

其中, 图10中为单频率线性调制脉冲信号, 图11为变频率线性调制脉冲信号。两张图片中, 第一行为HO1的控制信号, 用于控制Q1的打开和关闭; 第二行为HO2的控制信号, 用于控制Q3的打开和关闭; 第三行为HO3的控制信号, 用于控制Q5的打开和关闭; 第四行为LO1的控制信号, 用于控制Q2的打开和关闭; 第五行为LO2的控制信号, 用于控制Q4的打开和关闭; 第六行为LO3的控制信号, 用于控制Q6的打开和关闭。此六行开关信号即为我们需要的SPWM波。这些SPWM信号控制功率管(Q1-Q6)的通断, 输出信号经过电感(L1, L2, L3)的滤波后, 得到加载到发射变压器两端的正弦调制信号, 如图10和图11中的最后一行波形。

4 实际测量与结果分析

将所研制的远探测阵列声波仪器在山东省孤岛镇孤古-8井场进行了实际井场测试。线性调频脉冲信号为7个具有辛格函数窗口的正弦波,其幅度为1800 V,频率为2.8 kHz。对采集的反射信号进行处理,得到的处理资料如图12所示。

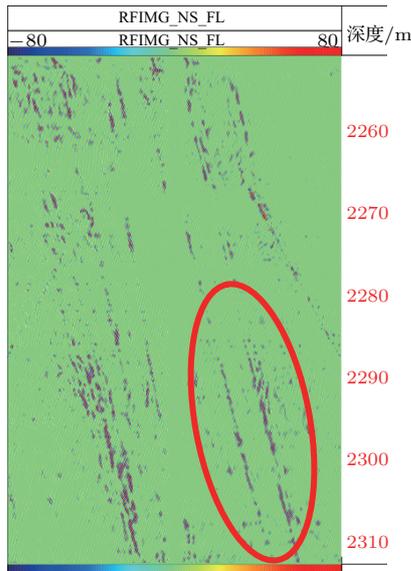


图12 测试结果图
Fig. 12 Test results

从图12中可以看出,采用线性调频脉冲激励方式探测到了井中的裂缝,其缝隙横向最远距离为60 m左右,其深度从2310 m延伸到2280 m。从成像结果看,该仪器成像具有较高的清晰度。

此外,在新疆的多次测井结果显示,该仪器能清晰地测量出地层中的碳酸盐裂缝,且仪器电路工作稳定。

5 结论

文章根据市场的需求出发,对目前阵列声波仪器的状态进行分析,结合理论分析和实验结果,最终设计了线性调频脉冲激励的方式来激励发射换能

器,使其辐射出更大的发射能量,在增大了反射波信噪比的同时,提高了仪器的探测深度。在标准井和实际井测量过程中,发射电路工作稳定,且取得了较好的测井结果。证明了本文所设计的发射电路在远程探测阵列声波仪器中具有很高的实用性。

参 考 文 献

- [1] 陈雪莲,唐晓明. 孔、裂隙并存地层中的声波测井理论及多极子声场特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2129-2140.
Chen Xuelian, Tang Xiaoming. Numerical study on the characteristics of acoustic logging response in the fluid-filled borehole embedded in crack-porous medium[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2129-2140.
- [2] 魏周拓,唐晓明,苏远大,等. 利用井中低频偶极横波进行声波远探测的新方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(10): 3572-3580.
Wei Zhoutuo, Tang Xiaoming, Su Yuanda, et al. A new acoustic remote sensing method utilizing borehole low-frequency dipole shear wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(10): 3572-3580.
- [3] 卢俊强,鞠晓东,成向阳. 多极子阵列声波测井仪的换能器激励方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 324-328.
Lu Junqiang, Ju Xiaodong, Cheng Xiangyang. Transducer firing method for multi-pole array acoustic logging tool[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 324-328.
- [4] 成向阳,鞠晓东,卢俊强,等. 井下大功率多极子声波换能器激励源的设计[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(6): 40-43.
Cheng Xiangyang, Ju Xiaodong, Lu Junqiang, et al. Design of downhole multipole acoustic transducer transmitter with high power[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2007, 31(6): 40-43.
- [5] 戴郁郁,于其蛟,王秀明,等. 横波远探测测井换能器研究[J]. 应用声学, 2015, 34(3): 195-200.
Dai Yuyu, Yu Qijiao, Wang Xiuming, et al. Investigation of acoustic reflection imaging logging transducer[J]. Journal of Applied Acoustics, 2015, 34(3): 195-200.
- [6] 唐晓明,魏周拓. 声波测井技术的重要进展——偶极横波远探测测井[J]. 应用声学, 2012, 31(1): 10-17.
Tang Xiaoming, Wei Zhoutuo. Significant progress of acoustic logging technology: remote acoustic reflection imaging of a dipole acoustic system[J]. Journal of Applied Acoustics, 2012, 31(1): 10-17.