

## 随钻声波测井声系短节的研制与测试

朱祖扬, 陆黄生, 张 卫, 吴海燕, 吴金平

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101)

**摘 要:**为满足钻井过程中对地层压力实时监测和地质力学计算的需要,开展了随钻声波测量关键技术研究,研制了随钻声波测井声系短节。该短节内外径分别为 57.2 mm 和 171.0 mm,采用“一发两收”的工作模式,发射声系安装一个单极子发射换能器,接收声系安装 2 个接收器,每个接收器由 4 个宽频接收换能器组成。发射声系和接收声系采取分离式设计,声波发射器和接收器之间的距离可以调整,接收器之间的距离固定为 200 mm。利用声波测量试验装置测试发现,发射声系的声波激发频率为 12.92 kHz,声场指向性图近似于一个椭圆,接收声系的 8 个接收换能器的谐振频率为 30.84~33.53 kHz,平均谐振频率为 32.23 kHz;利用该短节和随钻声波测量电路获得了试验套管井的声波全波列波形,计算得到套管的声速为 5 100 m/s。随钻声波测井声系短节的成功研制,为国内随钻声波测井仪器的开发提供了新的技术思路。

**关键词:**随钻声波测量 声波换能器 采集电路 套管井

**中图分类号:**TE927 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0890(2015)05-0083-05

## Development and Testing of Acoustic Nipples While Drilling

Zhu Zuyang, Lu Huangsheng, Zhang Wei, Wu Haiyan, Wu Jinping

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirement for real-time formation pressure monitoring and geomechanical parameters calculation, an acoustic nipple while drilling was developed based on the analysis of key technologies of acoustic measurement while drilling. The internal and external diameters of the nipple are 57.2 mm and 171.0 mm, respectively. It has one emitter and two receivers in operation mode. The emitting acoustic system is equipped with one monopolar sub-emitting transducer, and the receiving acoustic system is equipped with two receivers with four broad-band receiving transducers for each. The emitting and receiving acoustic systems consist of two separated parts. The spacing between the emitter and the receiver can be changed, but it is fixed at 200 mm among receivers. Based on the test of acoustic measurement, acoustic excitation frequency of emitting acoustic system is 12.92 kHz and its directivity pattern is similar to an ellipse. In the receiving acoustic system, the resonance frequency of eight receiving transducers is in the range of 30.84-33.53 kHz, averaging 32.23 kHz. The full wave form of the cased hole in the test was recorded by using the nipple and the acoustic measurement circuit while drilling, and the calculated acoustic velocity was 5 100 m/s. The successful development of the acoustic nipple while drilling will provide significant technical data for the development in China of acoustic logging devices while drilling.

**Key words:** acoustic logging while drilling; acoustic transducer; acoustic measurement circuit; cased hole

随着油气勘探开发向复杂储层发展,水平井、大斜度井和分支井钻井技术应用越来越广泛,水平井已作为常规技术应用于裂缝性碳酸盐岩、页岩和砂岩储层开发。为了控制水平井井眼轨迹,使钻头沿储层的走向钻进,需要进行水平井测井和地质导向钻井等。因为测井仪器很难下放到水平段以及测井仪器在水平段很难居中从而影响测井效果,电缆测井技术在水平井测井中受到限制。随钻声波测井技

术可以在钻井过程中测量地层的纵横波速度,间接测量地层的压力和地质力学参数,实现储层岩性识

**收稿日期:**2015-05-16;**改回日期:**2015-08-27。

**作者简介:**朱祖扬(1981—),男,江西南昌人,2004年毕业于云南大学地球物理专业,2007获中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业硕士学位,2011年获中国科学院声学所声学专业博士学位,工程师,主要从事声波测井技术和随钻仪器研发工作。

**联系方式:**(010)84988092,zhuzuyang\_2001@126.com。

别、地层过压监测和地质导向钻井等目的<sup>[1-4]</sup>,已成为非常规页岩气水平井开发过程中必不可少的技术手段。

目前,国外石油公司研制出了随钻声波测井仪,并已经实现了商业化应用<sup>[5-7]</sup>;国内也开展了随钻声波测井仪的研究工作,在声波测井理论等方面形成了很多研究成果<sup>[8]</sup>,但总体上处于起步阶段,还没有实现工业化应用。笔者进行了随钻声波测量关键技术的探索,研制了随钻声波测井声系短节,为国内随钻声波测井仪器开发提供了新的技术思路。

### 1 随钻声波测井基本原理

随钻声波测井是把声波发射器和声波接收器阵列安装在钻铤上,在钻井作业时,声波发射器向地层辐射声波信号,声波接收器阵列接收来自地层的反射波信号。根据接收器阵列接收到的声波信号,可以估算地层的慢度等声波信息。它与电缆声波测井的主要区别是:1)钻铤占据井眼大部分空间;2)钻井噪声会对接收到的声波信号产生严重干扰。

随钻声波测井模型如图 1 所示,井眼内充满流体,钻铤直径较大,钻铤把井眼内流体分为钻铤内流体和钻铤外流体(钻铤与地层之间的环形流体)。为了有效接收沿地层传播的滑行波,声波发射器和声波接收器的距离一般为 1.0~3.0 m。钻铤内流体声场是无源的,钻铤外流体声场既有入射波又有反射波。声波接收器放置在钻铤的外壁,处于钻铤和钻铤流体的耦合界面,接收到的声波是来自钻铤的 P 波(钻铤流体入射波)和来自地层的反射波(钻铤流体反射波)。通常地层慢度估算使用 4 个接收器的阵列,阵列跨度 1 000 mm 左右,而使用的最短阵列只有 2 个接收器,阵列跨度 150 mm 左右。

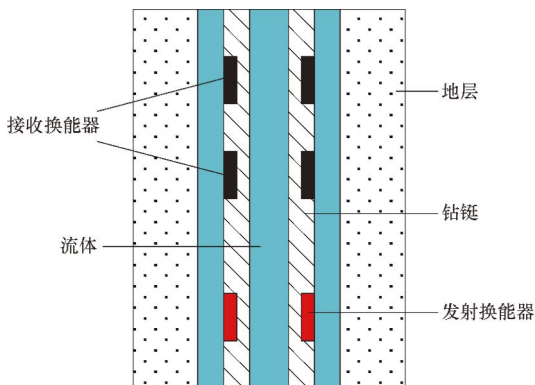


图 1 随钻声波测井模型  
Fig. 1 Acoustic logging while drilling model

### 2 随钻声波测井声系短节设计

按照声波换能器的设计、声波换能器在钻铤上的安装和密封以及电路性能检验的研究思路,设计了随钻声波测井声系短节,该短节包含发射声系和接收声系(见图 2)。发射声系和接收声系均由铝质材料加工而成,外径均为 171.0 mm,内径均为 57.2 mm,长度分别为 417.0 和 543.0 mm,在发射声系上装有一个声波发射换能器,换能器为圆管形状,外径、内径和长度分别为 170.0,140.0 和 120.0 mm。在接收声系上安装有 2 个接收器,接收器之间的跨度为 200.0 mm,每一个接收器包含 4 个三叠片压电换能器,4 个换能器按照 90°的夹角环形均匀分布,换能器为长方形结构,尺寸为 51.0 mm×25.0 mm×6.0 mm。



图 2 随钻声波测井声系短节  
Fig. 2 Acoustic nipple while drilling

为了给随钻声波测井声系短节提供高压激励信号和进行数据采集分析,研制了随钻声波测量电路,主要包含发射、接收、采集控制和电源电路(见图 3)<sup>[9-11]</sup>。

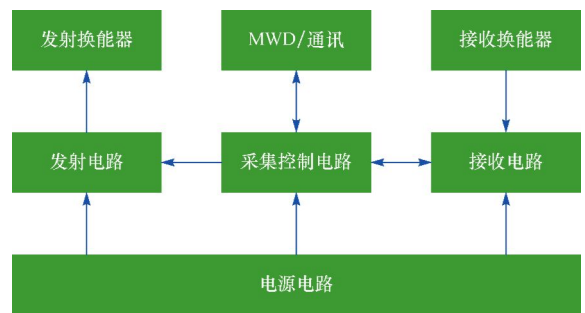


图 3 随钻声波测量电路功能结构框图  
Fig. 3 The circuit function framework of acoustic measurement while drilling

发射电路由开关电源电路、CMOS 门电路和大功率驱动电路组成,提供高压脉冲信号驱动声波发射换能器振动,向地层辐射声波信号。接收电路由前置放大电路、多通道信号选择电路、程控放大衰减电路和带通滤波电路组成,通过多通道开关实现多路模拟信号的接入,并根据信号的强度自动调整放大倍数,滤波电路的带宽为 1~20 kHz。采集控制电路采用“ADC+DSP”的控制结构,ADC 电路对接收到的模拟信号进行高精度采样,转换为数字信号,DSP 对数字信号进行实时处理。利用采集控制电路设置通道增益、采集深度、采集速率等参数,发送发射启动脉冲、采集启动命令,并对波形数据进行实时计算和存储,提供与 MWD 通讯的接口。

### 3 随钻声波测井声系短节性能测试

利用声波测量试验装置对该短节进行了测试。声波测量试验装置主要包括水池、主机、定位控制系统、多通道大功率激励和采集系统、增益控制放大器、水听器、单极子发射器和示波器等(见图 4)<sup>[12]</sup>。

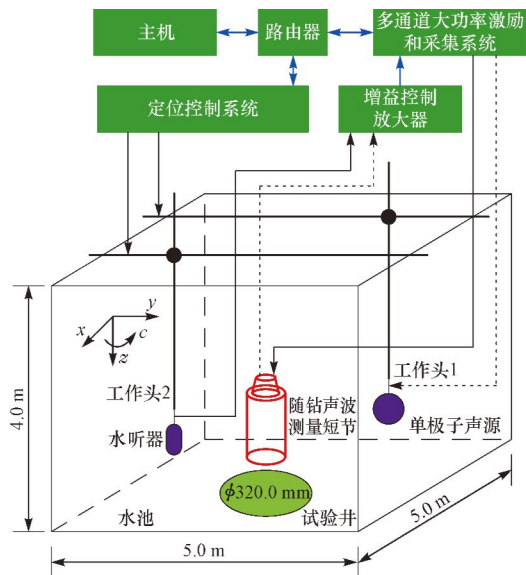


图 4 声波测量试验装置

Fig. 4 Experimental device for acoustic measurement

水池的尺寸为 5 000 mm×5 000 mm×4 000 mm,水的密度和声波在水中的速度分别是 1 000 kg/m<sup>3</sup>和 1 500 m/s,作为自动测试装置,定位控制系统有 2 个工作头,每个工作头有 4 个自由度,即笛卡尔坐标系和旋转方向,主机通过网络和定位控制系统相连,可以控制工作头灵活移动,从而精确调整单极子发射器和水听器之间的位置。大功率激励和采集系

统产生的激励电压高于 800 V,激励脉冲宽度为 20~50 μs 且可调,采集时延为 0.5~127.5 μs 且可调,数据采集的位数是 16 bit,采样频率和连续采样点数量可选,最大值分别为 1 MHz 和 8 192。单极子发射器安装在工作头 1(可选),水听器安装在工作头 2。在进行换能器发射试验时,大功率激励和采集系统输出的激励电压驱动换能器,同时水听器接收声波信号;在进行换能器接收试验时,换能器与增益控制放大器相连,同时单极子发射器作为发射源。在水池底部有一个套管试验井,可用于模拟快速地层的声波测量。

#### 3.1 声波发射换能器声场特性测试

声波发射换能器<sup>[13]</sup>由 4 个发射压电振子沿着空心圆柱体的外表面周向排列组成。采用阻抗特性分析仪对发射换能器的电导和电纳特性进行了测量,得出发射换能器在水中的谐振频率为 12.92 kHz,如图 5(a)所示。

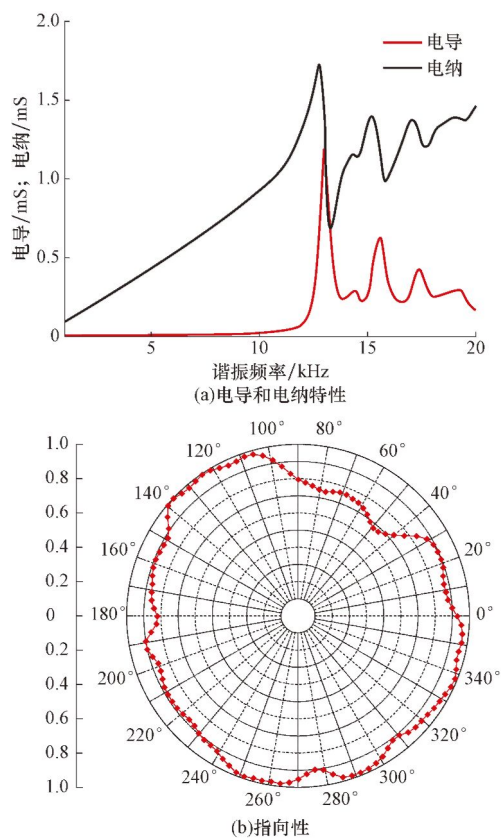


图 5 发射换能器声场特性测试结果

Fig. 5 Acoustic properties testing results of emitting transducers

水平指向性测量时,采用发射换能器固定不动、水听器围绕发射换能器的声场中心在水平定向平面内旋转的测量方式。因受水池空间大小的限制,仅



在每个振子的主瓣方向附近测量振子的指向性。试验测量时发射换能器和水听器的距离为 1 500 mm, 基本满足自由远场条件。发射换能器辐射声场指向性类似于一个椭圆, 最大和最小两点的声压比值为 1.5(3.52 dB), 如图 5(b)所示。对于单极子声波测量, 由于声波测量结果是各个方向上信号的叠加, 因此设计的换能器能够满足要求。

### 3.2 声波接收换能器声场特性测试

声波接收换能器<sup>[14]</sup>采用三叠片压电结构, 利用阻抗特性分析仪对接收换能器的电导、电纳特性进行了测量。8 个接收换能器(记为 R1, R2, …, R8)的谐振频率分别为 32.76, 30.84, 32.68, 32.68, 31.94, 31.56, 33.53 和 31.81 kHz, 平均为 32.23 kHz, 偏离程度小于 4.3%, 电导、电纳特性一致性良好(见图 6)。

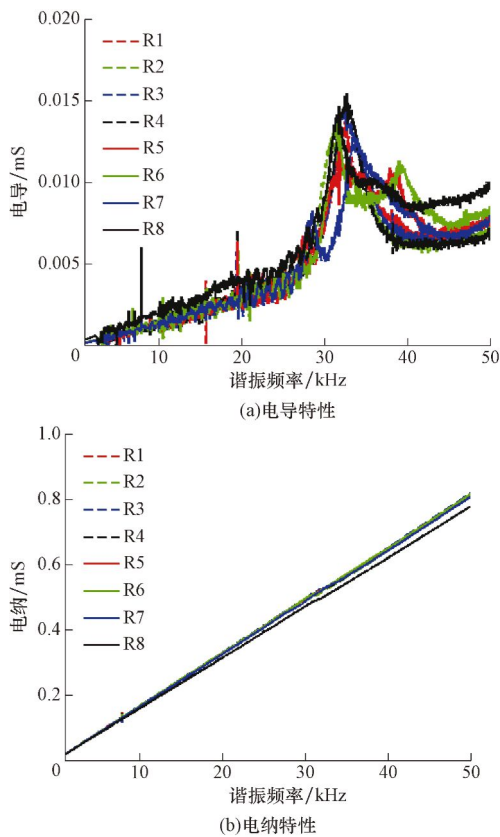


图 6 接收换能器声场特性测试结果

Fig. 6 Acoustic properties testing results of receiving transducers

接收换能器的谐振点远离发射换能器的谐振点, 保证了接收响应在整个工作频段内变化相对缓慢, 使接收信号可靠。将 8 个接收换能器分成 2 组, R1—R4 位于接收声系的上部, R5—R8 位于接收声系的下部。在水池内对接收换能器的一致性进行了测量, 水池内的单极子发射器固定不动, 每一个接收

换能器位于 1 500 mm 的距离接收声波信号, 这个距离基本满足自由远场条件, 在测试过程中, 转动声波接收短节, 使每一个接收换能器能够对准单极子发射器。8 个接收换能器的波形峰峰值分别为 345.44, 319.01, 400.04, 315.79, 408.63, 356.06, 421.11 和 298.03 mV, 平均为 358.01 mV, 偏离程度控制在 17.6%, 接收灵敏度基本相近, 一致性良好。其中 R1—R4 出现了后续波形, 是因为接收声系的上部更靠近水面, 导致水面产生了反射波信号(见图 7)。

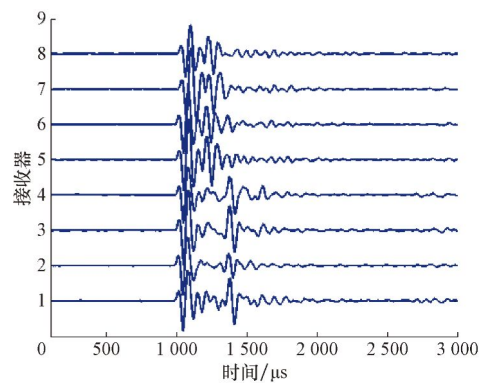


图 7 接收换能器一致性测试结果

Fig. 7 The consistence of receiving transducers

### 3.3 试验套管井声波测量

水池底部的试验套管井直径 320.0 mm, 深度 3 200 mm, 管壁厚度 6 mm, 套管内充满了水, 套管外是水和砂岩层。在试验过程中, 发射声系位于套管井的下部, 接收声系位于套管井的上部, 发射声系和接收声系在套管井内居中, 采用了“一发两收”的工作模式, 即 T 发射, R1 和 R2 接收, 发射器和最近的接收器的距离为 1 200 mm, 接收器之间的距离为 200 mm, 如图 8(a)所示。利用随钻声波测量电路驱动发射器工作, 发射电路将 12 V 的脉宽信号经过功率放大电路转换为高压脉冲信号, 瞬时电压达到 1 000 V, 采集和控制电路每 5 s 定时向发射电路输出一个开关控制信号, 电路的采样间隔为 5 μs, 每一次连续采样 2 000 个点。R1 和 R2 接收到的声波全波列波形如图 8(b)所示, 从接收到的波形可以看出, 沿套管井壁传播的纵波首先到达接收器, 后续波形是横波、导波和反射波等叠加的结果, R1 接收到首波的到达时间是 480 μs, R2 接收到首波的到达时间是 519 μs, 2 个接收器之间的时差是 39 μs, 计算得到套管壁的声速为 5 100 m/s, 这与钢管的纵波速度是一致的。由于声波接收部分和发射部分之间没

有钻铤, 中间介质是水, 因此接收器接收到的波形没有钻铤波。

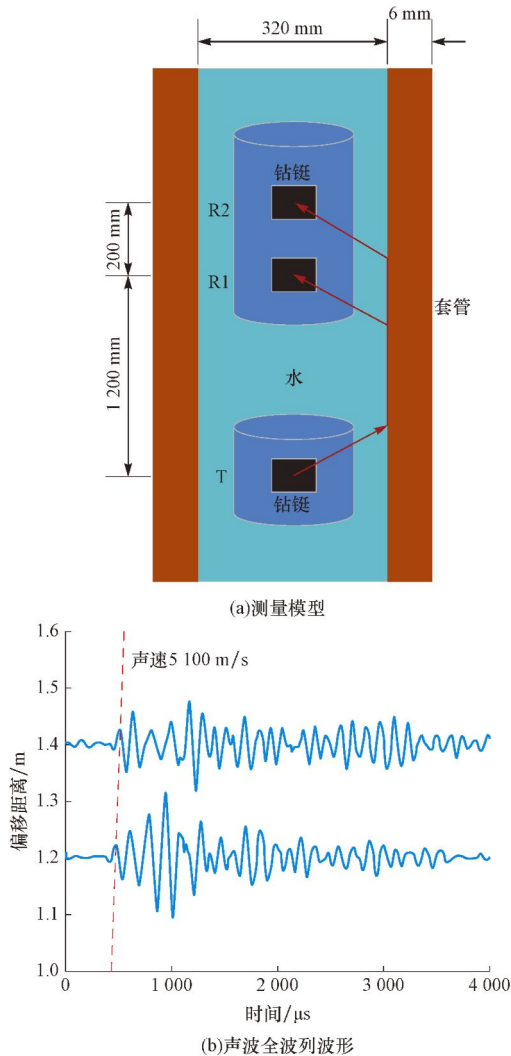


图 8 套管井声速测量

Fig. 8 Acoustic velocity measurement in cased holes

## 4 结论及建议

1) 随钻声波测井声系短节采用“一发两收”的工作模式, 满足了声波测量的基本要求, 发射声系和接收声系采用分离设计, 解决了钻铤波的干扰问题。

2) 室内测试得到的发射声系声场指向性图近似于一个椭圆, 能够满足单极子声波测量的要求, 接收声系的换能器频带宽、一致性良好。利用该短节获取到了套管井的声波全波列波形, 计算得到的套管井声速和实际声波传播速度一致。

3) 为了适应下井要求, 建议对该短节的结构进行优化设计, 特别是换能器在钻铤上的安装和密封, 进一步开展短节的耐温、抗振动测试。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 158-161.  
Tang Xiaoming, Zheng Chuanhan. Quantitative borehole acoustic methods[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 158-161.
- [2] 王秀明, 张海澜, 何晓, 等. 声波测井中的物理问题[J]. 物理, 2011, 40(2): 79-87.  
Wang Xiuming, Zhang Hailan, He Xiao, et al. Physical problems in acoustic logging[J]. Physics, 2011, 40(2): 79-87.
- [3] 王华, 陶果, 张绪健. 随钻声波测井研究进展[J]. 测井技术, 2009, 33(3): 197-203.  
Wang Hua, Tao Guo, Zhang Xujian. Review on the development of sonic logging while drilling[J]. Well Logging Technology, 2009, 33(3): 197-203.
- [4] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 声波测井技术研究进展[J]. 测井技术, 2011, 35(1): 14-19.  
Qiao Wenxiao, Ju Xiaodong, Che Xiaohua, et al. Progress in acoustic well logging technology[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(1): 14-19.
- [5] Degrange J M, Hawthorn A, Nakajima H, et al. Sonic while drilling: multipole acoustic tools for multiple answers[R]. SPE 128162, 2010.
- [6] Tang X M, Wang T, Patterson D. Multipole acoustic logging-while-drilling[R]. SEG-2002-0364, 2012.
- [7] Tang Xiaoming, Dubinsky V, Wang T, et al. Shear-velocity measurement in the logging-while-drilling environment: modeling and field evaluations[J]. Petrophysics, 2003, 44(2): 79-90.
- [8] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 从换能器技术的变化看声波测井技术的发展[J]. 物理, 2011, 40(2): 99-106.  
Qiao Wenxiao, Ju Xiaodong, Che Xiaohua, et al. Transducer and acoustic well logging technology[J]. Physics, 2011, 40(2): 99-106.
- [9] 肖红兵, 鞠晓东, 卢俊强. 随钻声波测井仪控制和数据处理系统设计[J]. 测井技术, 2009, 33(6): 555-558.  
Xiao Hongbing, Ju Xiaodong, Lu Junqiang. Design on control and data processing system of acoustic logging while drilling [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(6): 555-558.
- [10] 肖红兵, 鞠晓东, 杨锦舟. 随钻声波测井仪高效电源设计[J]. 声学技术, 2009, 28(5): 620-623.  
Xiao Hongbing, Ju Xiaodong, Yang Jinzhou. Design of high efficiency power supply for acoustic logging while drilling tool [J]. Technical Acoustics, 2009, 28(5): 620-623.
- [11] 卢俊强, 鞠晓东, 乔文孝, 等. 方位声波测井仪电子系统设计[J]. 测井技术, 2011, 35(3): 284-287.  
Lu Junqiang, Ju Xiaodong, Qiao Wenxiao, et al. Electronic system design of azimuthally acoustic bond tool[J]. Well Logging Technology, 2011, 35(3): 284-287.
- [12] Wu Jinping, Qiao Wenxiao, Che Xiaohua, et al. Experimental study on the radiation characteristics of downhole acoustic phased combined arc array transmitter[J]. Geophysics, 2013, 78(1): D1-D9.
- [13] 杨锦舟. 声波测井偶极子发射换能器性能的实验研究[J]. 声学技术, 2008, 27(1): 141-144.  
Yang Jinzhou. Experimental investigation on properties of dipole transmitters for acoustic well logging[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(1): 141-144.
- [14] 吴金平, 乔文孝, 车小花, 等. 声波测井压电振子温度性能一致性实验研究[J]. 测井技术, 2012, 36(2): 109-113.  
Wu Jinping, Qiao Wenxiao, Che Xiaohua, et al. Experimental investigation on temperature performance consistency of piezoelectric benders used in acoustic well logging[J]. Well Logging Technology, 2012, 36(2): 109-113.

[编辑 滕春鸣]