

扇区水泥胶结测井仪实验研究

沈永进¹, 余翔宇¹, 杜黎君², 沈建国¹

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640; 2. 中原地球物理测井公司引进中心, 河南濮阳 457001)

摘要: 扇区水泥胶结图像是通过扇区水泥胶结测井仪器(Scan Bound Tool, SBT)获得的。仪器的底端是发射探头, 在距离发射探头 0.6m 处安装了一个接收探头。接收探头用一个压电圆管, 分成 8 个等间隔的扇区极化, 每个扇区接收到一个波形, 一共 8 个波形。用实验的方法研究了激发脉冲宽度和幅度对波形幅度和频率的影响。取出每个波形的首波幅度得到 8 条曲线, 描述圆周 8 个扇区的水泥胶结情况。将每个深度点对应的 8 个幅值用颜色表示出来, 得到整个圆周的水泥胶结图像。由于圆周方向只有 8 个扇区, 分辨率比较低, 图像边缘不清晰。对观测到的 8 个扇区的幅度值用高斯函数进行插值处理后, 图像边缘得到了一定改善。分别用线性插值, 二次插值处理后, 图像连续、边缘清晰, 对比度明显增强, 整个圆周不同扇区水泥胶结的差异显示明显, 为进一步分析扇区水泥胶结提供了基础。

关键词: 测井仪器 SBT; 首波幅度; 图像; 水泥胶结; 扇区; 插值

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0416-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.009

Experimental study of sector cement bond tool

SHEN Yong-jin¹, YU Xiang-yu¹, DU Li-jun², SHEN Jian-guo¹

(1. Electronic and Information Engineering School of South China Technology University, Guangzhou 510640, China;

2. The Geophysical Logging Company of Zhongyuan Oilfield, Puyang 457001, Henan, China)

Abstract: A sector image of cement bond can be obtained by using a SBT logging tool. At the bottom of SBT, there is a transmitter with a circular receiver at a distance of 0.6 meters above the transmitter. On the receiver's surface, there are eight electrodes equally separated around the circle. Each electrode receives a waveform and total eight waveforms are in logging. In this paper, some experiments are made for studying the amplitude and frequency of waveforms by changing the pulse amplitude and width. The first positive half cycle from the each waveform is used to describe the quality of a sector of cement bond. The eight amplitudes show the image of cement bond in eight azimuths, so the image's resolution is lower and the edge of the image is not clear. In order to solve this problem, an interpolation method based on the Gauss function is introduced to improve the image resolution. The linear and quadratic interpolation methods are applied respectively. The better images are obtained to show the difference of different sectors of cement bond more evidently. This image can provide a reference for studying the quality of cement bond.

Key word: SBT; amplitude of headwave; image; cement bond; sector; interpolation

0 引言

扇区水泥胶结测井仪能够测量 8 个扇区的水泥胶结图像, 现在已分别在四川油气田^[1]、三高气井固井质量评价中得到了应用^[2]。并进一步用于研究压裂工艺对水泥环的影响^[3]。

国外的测井公司目前进一步发展了固井胶结测井仪器^[4], 固井胶结检测的精度得到了提高。本文在偏心声源激发的三维声场理论结果^[5,6]的指导下对扇区水泥胶结测井仪器 SBT 进行了研究。根据仪器是偏心接收的实际情况, 增加了接收探头的直

径, 使接收探头到井壁的距离比较近, 提高了接收探头的灵敏度和不同扇区水泥胶结的分辨能力; 然后测量了不同源距下接收到的波形, 确定了能够分离出套管波的最短源距。以此为基础重新设计了源距, 制作了声系统和线路, 并将波形在井下数字化, 通过遥传短接 TCC 传送到地面, 最大限度地减小了电缆对波形的过滤作用, 保留了波形中不同扇区的水泥胶结信息。用三种方法对套管波幅度进行成像, 图像质量得到了明显改善。最后根据超分辨率图像重建的方法为仪器的进一步改进提出了建议。

1 探头及源距实验

图 1 所示为 8 扇区接收探头的横截面, 圆周被均匀分成 8 等份, 分别进行极化。每个扇区接收一

收稿日期: 2010-10-09; 修回日期: 2010-12-30

基金项目: 科技部 863 项目(2007AA06Z226)

作者简介: 沈永进(1985—), 男, 天津人, 硕士研究生, 研究方向为声波信号处理和声波测井信号处理与应用。

通讯作者: 沈建国, E-mail: sjanguo2003@eyou.com

个声波信号。每个扇区对应井壁 45° 范围内的套管波, 接收探头的外直径为 62mm, 比较大, 其扇区距离套管壁比较近。在自由状态下测量的每个扇区的阻抗和导纳以及相应的谐振频率和反谐振频率如图 2、3 所示, 每个扇区的阻抗和导纳均比较接近, 探头的一致性比较好。

图 4、5 所示为测井仪器 SBT 探头实验装置和发射电路。直接取一段石油工业用的套管, 在套管里面充满硅油, 在套管底端放置了一个 8 扇区发射探头, 在发射探头的上方, 初始距离为 10 cm 处放置一个 8 扇区接收探头, 该探头连接在机械装置上, 可上下移动, 向上每移动 2cm 记录一个波形。图 5 是发射电路, 直流电源的电压可以在 0~250V

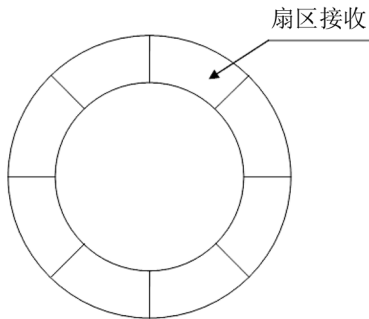


图 1 8 扇区接收探头横截面示意图

Fig.1 Schematic diagram of the acoustic receiver with 8 sector probes

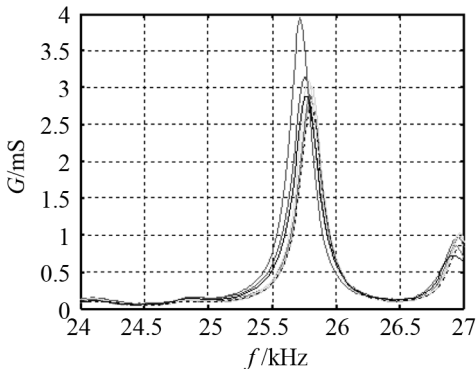


图 2 8 个扇区接收探头导纳的实部

Fig.2 The real part of admittance of each sector probe

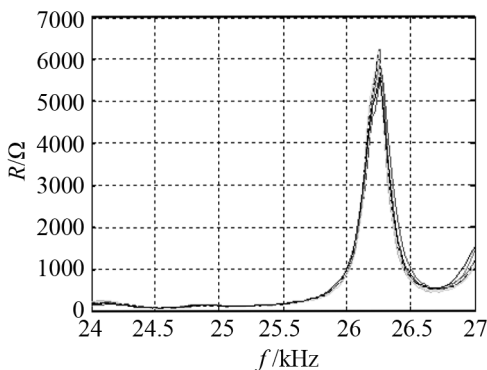


图 3 8 个扇区接收探头阻抗的实部

Fig.3 The real part of impedance of each sector probe

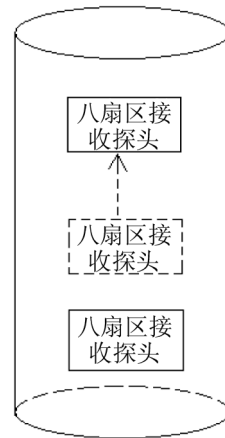


图 4 SBT 测井源距实验装置

Fig.4 Experimental setup for SBT logging tool

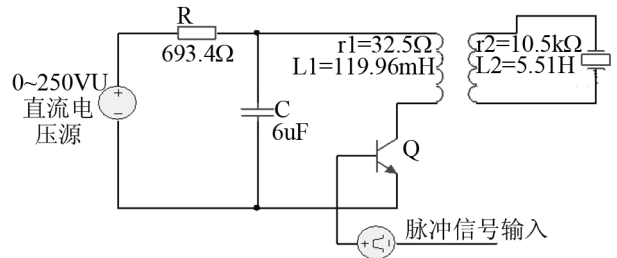


图 5 发射电路

Fig.5 Transmitting circuit for acoustic transducers

之间调节, 电源通过电阻给电容 C 充电, 当脉冲信号来临时, 场效应管 Q 导通, 电容上的电压通过变压器放电, 变压器将电压脉冲升高后加到 8 扇区发射探头上。实验时, 固定源距为 10 cm, 固定脉冲宽度为 10μs, 直流电压从 10 V 增加到 100 V 时所测量波形的幅度谱如图 6 所示。随着所加直流电压的增加, 接收波形的幅度增加。但是, 激发声波的频率比较高。固定直流电压是 100 V, 脉冲宽度从 10μs 增加到 20μs 时测量波形的幅度谱如图 7 所示。图中曲线分别对应脉冲宽度为 10us、12us、14us、16us、18us、20us 时的测量结果。随着脉冲宽度的增加, 所激发的振动频率从 26kHz 降低到 21kHz。从图 2 知道, 26kHz 是探头第二个谐振峰, 导纳比较大, 容易激发, 但不是固井质量检测所需要的声波频率^[5], 21 kHz 是激发(用于固井胶结检测的)套管波的频率^[5]。因此, 本实验确定了声波测井仪器的激发脉冲宽度和电压幅度。

固定脉冲宽度为 20μs, 直流电压为 100 V, 图 8 为不同源距所接收到的波形。从图 8 可见: 发射探头发出的声波分别沿套管和液体传播。当源距较近时, 所测量的波形中首波是液体波, 即液体波最先到达; 随着源距的增加, 在接收波形中可以看到明显的套管波, 其振动周期比较多, 开始时其幅度

比较小，当源距为 60 cm 时，首波的传播速度比较快，是所需要的套管波，而且波形也比较好，因此最终确定仪器的源距为 60 cm。

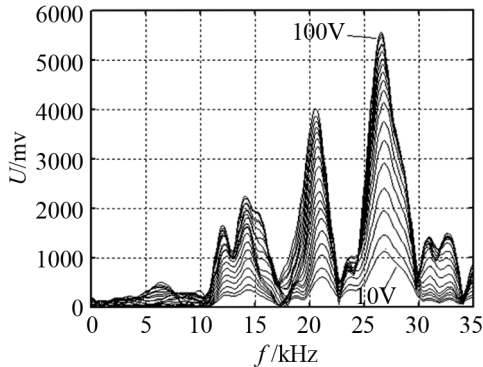


图 6 直流电压改变时所接收到的波形的幅度谱
Fig.6 Amplitude spectrums of waveforms for different voltage U

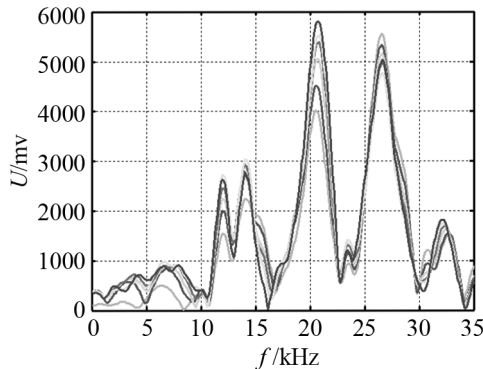


图 7 输入脉冲宽度改变时所接收到的波形的幅度谱
Fig.7 Amplitude spectrums of waveforms for different width of input pulse

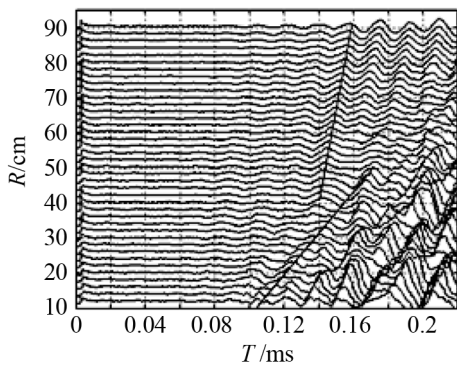


图 8 不同源距接收到的波形
Fig.8 The received waveforms for different range between acoustic transmitter and receiver

2 首波幅度曲线

将上述探头装配成 SBT 仪器如图 9 所示，从左到右分别是 3 个单极子阵列接收探头、一个 8 扇区接收探头和发射探头。8 扇区接收探头到发射探头的距离是 60 cm，其它 3 个单极子接收探头

到发射探头之间的距离分别是 3 inch、4 inch 和 5 inch。其中 3 inch 和 5 inch 接收探头与现有固井胶结测井仪器兼容，分别显示声幅和声波变密度。



图 9 扇区水泥胶结测井仪器
Fig.9 Sector cement bond SBT

图 10 是 8 扇区探头所接收到的 8 个扇区套管波的幅度随深度的变化曲线。图中从左至右的四条实线分别是第 1、3、5、7 个扇区探头所测量的，从左至右的四条虚线分别是第 2、4、6、8 个扇区探头所测量的。它们在不同深度处的幅度有差异：在 2578.2~2579.4 m 的井段内，套管波的幅度比较大；在 2578~2578.2 m 的井段内，套管波的幅度比较小。同一深度的 8 个套管波幅度也有差异，将深度为 2578.8m 的 8 个幅度值画出，得到图 11，可见 8 个幅度的差异明显，说明不同扇区的水泥胶结差异显著。

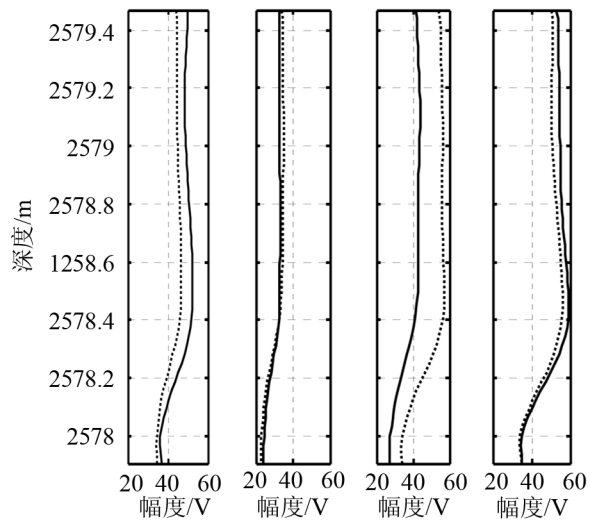


图 10 八个扇区接收探头接收到的首波幅度随深度的变化曲线
Fig.10 Variation of 8 amplitudes of headwaves received by the 8 sector probes with depth

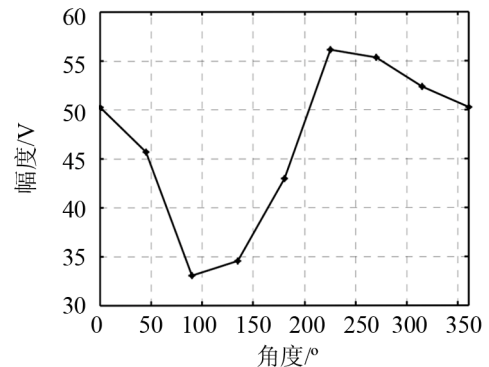


图 11 2578.8m 处的 8 个首波幅度随扇区位置的变化
Fig.11 The 8 amplitudes of headwaves received by the 8 sectors probes at the depth of 2578.8m

3 图像显示及插值

将 2578~2579.5 m 的首波幅度数据一并绘出,即以扇区位置为横坐标,深度为纵坐标,幅度用灰度表示得到图 12,右边的色标是幅度值,单位:V。

从图 12 可以看到,由于图像的横向分辨率低,只有九个点,导致图像上有明显的竖格,且图像中右边的斑块边缘不清晰,看不出明显的形状。为了改进图像质量,需要对原始测量数据进行插值。

3.1 高斯函数插值

用高斯函数 $\exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)^2\right]$ 对图 11 所示的 8

个首波幅度进行插值得到图 13,其中参数 $b=0.305$,每相邻的两个点之间插入 150 个点。对 2578~2579.4 m 的所有测量点用高斯函数进行插值(参数 $b=0.305$),其结果用图像显示后如图 14 所示。

从图 12 和图 14 可以看到,高斯插值后的图像比未插值的原始数据图像平滑,图像右边斑块的边缘得到了改善,可以分辨出它的形状。

3.2 线性函数插值

对 2578~2579.4 m 的所有测量点进行线性插值

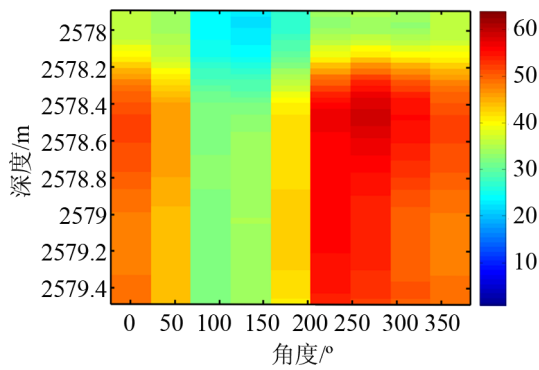


图 12 2577.9~2579.5m 深度段的水泥胶结质量图(原始数据)
Fig.12 Cement bond image between 2577.9m and 2579.5m(row data)

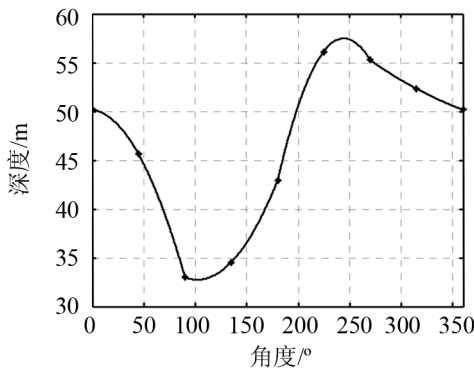


图 13 2578.8m 处的八个首波幅度值经高斯函数插值后的结果
Fig.13 Gaussian interpolation for 8 first amplitudes at depth of 2578.8m

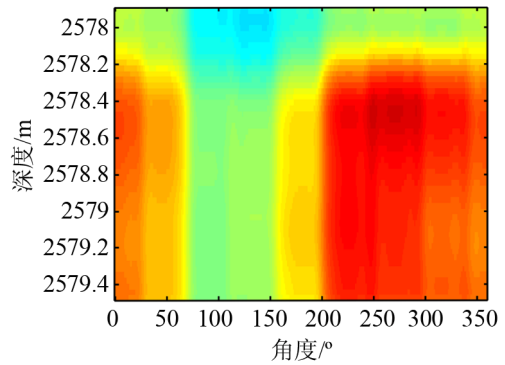


图 14 2577.9~2579.5m 的水泥胶结质量(高斯函数插值)
Fig.14 Cement bond image between 2577.9m and 2579.5m(Gauss interpolation)

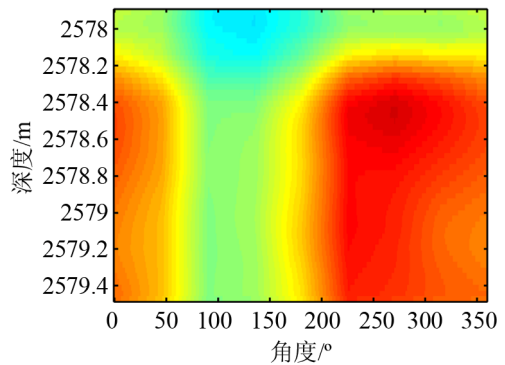


图 15 2577.9~2579.5m 的水泥胶结质量(高斯函数插值)
Fig.15 Cement bond image between 2577.9m and 2579.5m(linear interpolation)

后得到图 16。对比图 14 和图 15 可见,线性插值后的图像没有竖格,图像平滑,图像边缘的清晰度进一步得到提高,位于图像右边的斑块形状更为明显。

3.3 二次函数插值

对图 11 所示的八个幅度进行二次插值,其结果如图 16 所示,每两个相邻点之间插入 150 个点。从图 16 可以看到:在 230°~270° 之间,曲线出现了一个峰,其最大值大于原始测量的两个幅度值。

对 2578~2579.4 m 的所有测量点进行二次插值,

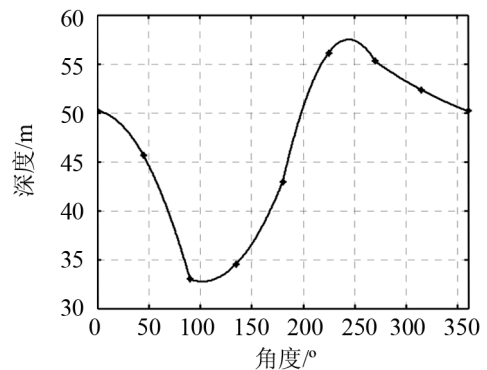


图 16 2578.8m 处的八个幅度值二次插值后的结果
Fig.16 Quadratic interpolation for 8 first amplitudes at depth of 2578.8m

将插值后的结果用图像表示得到图 17。由图可见，位于 230°~270° 之间的斑块向下进行了延伸。

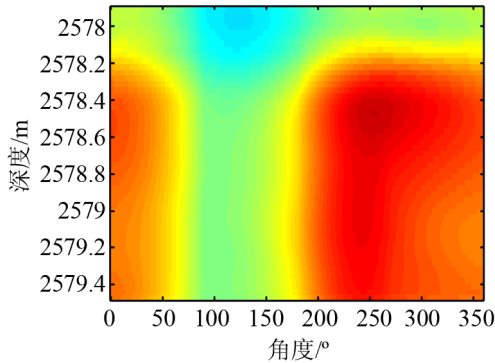


图 17 2577.9m 到 2579.5m 的水泥胶结质量(二次函数插值)
Fig.17 Cement bond image between 2577.9m and 2579.5m(quadratic interpolation)

对比图 17 和图 15 可以发现，二次插值后的水泥胶结图像比线性插值后的水泥胶结图像连续、平滑、边缘清晰。

4 应用

用线性插值和二次插值方法对实际测量的井资料进行处理。图 18 所示为插值以后的结果，图 18(a)为线性插值结果，图 18(b)为二次插值结果。

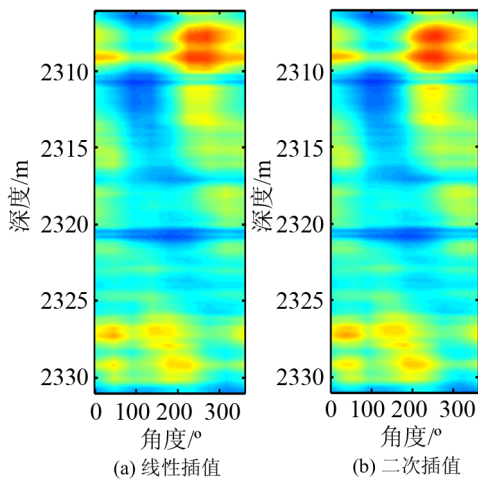


图 12 2285m 到 2305m 的水泥胶结质量图
Fig.12 Cement bond image between 2285m and 2305m (a) linear interpolation (b) quadratic interpolation

从图 18 可以看到，在 2300~2305m 井段，右边图像里的斑块比左边图像的斑块圆滑，且斑块面积较大。

图 19 是用新研制的仪器在实际井中与进口仪器所进行的对比：左边是进口原装仪器的测量结果，右边是新研制仪器的测量结果。两者明显的差异是新研制的仪器的图像分辨率提高，水泥胶结细

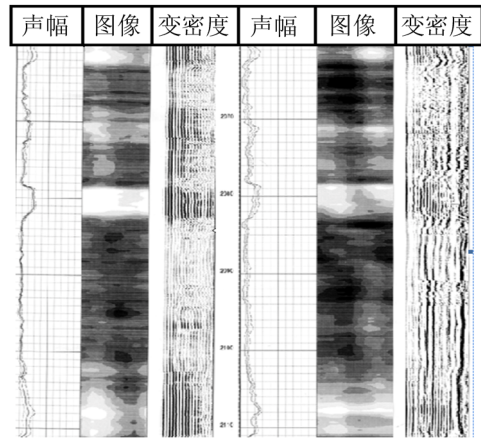


图 19 进口仪器 (左) 与新研制仪器测量结果的对比(右)
Fig.19 Comparison of cement bond image with varying density between the new developed logging tool (right) and an import logging tool (left)

节清楚，变密度波形中第一个波的幅度(灰度)反应水泥胶结质量，后续的地层波清楚。这样，新研制的仪器既保证了水泥胶结测井又实现了地层参数的有效测量。

5 仪器改进建议

从图 18 可以看到，水泥胶结不好的区域占据的横向(角度)范围比较大，不能区分更小扇区范围内的水泥胶结，即仪器的周向分辨率比较低。为增加周向分辨率，可增加周向上采样点的个数。直接将扇区再次细分，则每个扇区探头的几何尺寸减小、接收信号的灵敏度降低，测量精度也相应降低。

从图 6~8 可以看到：在源距为 0.5m 和 0.7m 处，首波仍然是套管波。因此，可在仪器的 0.5m 和 0.7m 源距处各安装一个 8 扇区接收探头，这两个接收探头的 8 个扇区与现有探头的扇区不在一个方位角上，即相对于 0.6m 处的接收探头各旋转一定角度。这样便得到了 3 个不同源距、24 个不同方位角的原始测量波形，即对圆周 360° 的水泥胶结进行了三次低分辨率采样。这些采样数据的灵敏度比较高，测量了不同扇区的水泥胶结情况。用图象处理中的超分辨率重建的方法对这 24 个波形进行处理、成像，便可以提高扇区水泥胶结测井的周向分辨率。

6 结论

增大接收探头的直径和选取 0.6 m 源距可以对不同扇区的水泥胶结质量进行比较有效的探测。采用线性插值和二次插值可以改善图像的光滑度和

连续性,但不能提高所测量的不同扇区水泥胶结图像的分辨率。借助于超分辨率图像重建的方法改进扇区水泥胶结测井仪器应该是一个比较有效的方向,可以在保证测量波形幅度的前提下有效提高所测量的扇区水泥胶结的周向分辨率。

致谢:感谢中原地球物理测井公司引进中心肖坤德高级工程师提供了现场测井电路、进行了现场实验,赵希军工程师提供了声波探头机械设计。苏克晓高级工程师编写了现场操作软件。感谢中心领导王士震安排了现场实验。感谢任跃廷同志提供了数据解编软件。

参 考 文 献

- [1] 罗宁,何豹,陈正明,张丽萍. 分区水泥胶结测井在四川油气田中的应用[J]. 石油仪器, 2007, 21(6): 44-46, 49.
LUO Ning, HE Bao, CHEN Zhengming, ZHANG Liping. Application of sector bond tool(SBT) to Sichuan oilgas field [J]. Petroleum Instruments, 2007, 21(6): 44-46, 49.
- [2] 胡海涛,李翠,任兴国,唐洪明. 扇区水泥胶结测井技术在三高气井固井质量评价中的应用[J]. 测井技术, 2007, 31(4): 380-383.
HU Haitao, LI Gao, REN Xingguo, TANG Hongming. Application of segmented bond tool to cementation quality evaluation in high dangerous gas wells with high pressure and high sulfur content[J]. Well Logging Technology, 2007, 31(4): 380-383.
- [3] 李宏艳,宋杰,王维国,石正兴. 用扇区水泥胶结测井技术研究压裂工艺对水泥环的影响[J]. 国外测井技术, 2004, 19(4): 28-31.
LI Hongyan, SONG Jie, WANG Weiguo, SHI Zhengxing. Study on the effect of fracture technology on the cement sheath in fan-shaped area by using cement bond logging[J]. World Well Logging Technology, 2004, 19(4): 28-31.
- [4] Pistre V, Kinoshita T, Endo T, Schilling K, Pabon J, Sinha B, Plona T, Ikegami T, Johnson Schlumberger D. A modular Wireline Sonic Tool for Measurement of 3-D(Azimuthal Radial and Axial) Formation Acoustic Properties[C]// Annual logging Symposium, 2005.
- [5] 沈建国. 声波测井原理与技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2009, 119-121, 132-133.
SHEN Jianguo. Sonic logging theory and technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 119-121, 132-133.
- [6] 沈建国. 应用声学——实轴积分方法与二维谱技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2004: 48-51.
SHEN Jianguo. Basic of applied acoustics -real axis integration and 2-dimensions spectrum method[M]. Tianjin: Tianjin University Press. 2004: 48-51.