

基于倒双谱的套管井声学评价系统特性辨识^{*}

闫向宏^{1†} 张亚萍¹ 乔文孝²

(1 石油大学应用物理系 山东东营 257061)

(2 石油大学资源与信息学院 北京 102200)

摘要 将发射探头(T)、接收探头(R)和TR之间介质视为套管井声学评价系统的组成部分,由套管井声波测井响应,采用倒双谱技术辨识该声学系统的冲激响应,计算得到了该声学系统的特性曲线(冲激响应曲线)。当T、R同时位于自由套管区域时,声学系统特性曲线幅度最高,并且曲线的两端和中心点附近都有比较大的起伏;当T、R同时位于水泥完全胶结区域时,特性曲线幅度最低且比较平坦;随着T、R间窄槽面积的增大,特性曲线幅度逐渐增加并且中心点附近幅度的增加比较明显。通过对该声学系统特性的辨识,从冲激响应曲线瀑布图中可直观反映出套管井水泥胶结的质量。该方法对丰富、完善声波水泥胶结测井资料解释工作具有重要参考价值。

关键词 倒双谱, 声学系统, 冲激响应, 辨识, 套管井

Identification of the acoustic evaluation system's characteristics for cased hole based on the Bicepstrum

YAN Xiang-Hong¹ ZHANG Ya-Ping¹ QIAO Wen-Xiao²

(1 Department of Applied Physics in the University of Petroleum, Shandong, Dongying 257061)

(2 Faculty of Geo-Resource and information in the University of Petroleum, Beijing 102200)

Abstract The transmit transducer (T), receive transducer (R) and the medium between TR are the component parts of the acoustic evaluation system for a cased hole. The characteristic curve (impulse response curve) of the acoustic evaluation system can be calculated using the acoustic logging response based on the Bicepstrum. The amplitude of the characteristic curve is maximal and the central part of characteristic curve is fluctuant when the T and R transducer are all in the free region of the casing; the amplitude of the characteristic curve is minimal and the curve is flat when the T and R transducer are all in the bonded area; the amplitude of the characteristic curve increases, especially in the central part, with increasing area of the un-bonded region between the

2004-04-14 收稿; 2005-03-16 定稿

* 石油科技中青年创新基金资助 (W010113)

作者简介: 闫向宏 (1966-), 男, 陕西蓝田人, 副教授, 硕士, 从事检测声学研究。张亚萍 (1967-), 女, 副教授, 硕士。
乔文孝 (1956-), 男, 教授, 博士。

† 通讯联系人 Email: yanxh@mail.hdpu.edu.cn

T-R transducers. The cement bond quality can thus be seen directly on the waterfall figure of the characteristic curve. This method has reference value for the explanation of cement bond logging.

Key words Bicepstrum, Acoustic system, Impulse response, Identification, Cased hole

1 引言

系统的辨识方法包括以脉冲响应、最小二乘法、极大似然法、谱分析等传统方法和基于神经网络、基于遗传算法和基于小波网路等新方法^[1]。功率谱分析、双谱分析和倒谱分析是谱分析中常用的分析方法。文献 [2] 给出了基于双谱提取固井胶结特征信息的方法，从超声回波中获取了固井胶结模式特征，使得不同胶结模式具有明显的可分性；倒谱技术是一种专门处理通过卷积组合在一起的信号的有效方法，例如：实现气声发音的重建^[3]，提取声门下噪音源特性^[4]，识别震源性质^[5]，实现雷达距离像幅度归一化和实现距离像方位对齐^[6]；语音识别、说话人识别^[7]，人体脉搏信号特征的提取^[8]都应用了倒谱技术。文献 [9] 在地震子波基本不变基础上，利用二维复倒谱技术处理地震资料，得到地震子波和反射系数序列在二维复倒谱上有较好的可分性，可进行子波提取和地震资料的高分辨率处理。由于高阶倒谱不但具有倒谱的许多优良性质，如它的衰减速度很快，应用它可以分别辨识出系统冲激响应的最小相位部分和最大相位部分，而且它和高阶累量一样对高斯有色观测噪声不敏感，因而能够有效地抑制高斯有色观测噪声对辨识结果的影响。文献 [10] 将倒双谱分析技术应用于机械动态载荷的识别，文献 [11] 将钻井过程中井筒液视为一个系统，考虑到油气侵入前后，由于井筒液内介质的变化导致系统的固有特性也将发生变化，即系统脉冲响应发生变化，提出了一种基于三阶统计且能抑制任意高斯噪声的系统辨识的井筒液油气侵入检测方法。为丰富、完善现有的声波水泥胶结测井评价解释方法，从另外一个角度探索套管井第 I 界面胶结质量的识别方法，本文将发射探头 (T)、接收探头 (R)

和 TR 之间介质视为套管井声学评价系统的组成部分，由套管井声波测井响应，采用倒双谱技术辨识该声学系统的冲激响应。套管井水泥胶结状况不同，声学系统的固有特性不同，计算得到的套管井声学评价系统的冲激响应曲线不同，由此可实现对套管井水泥胶结质量的评价。

2 微型模拟井的结构

在实验室内将实际中的套管井按照 10:1 缩小制作微型模拟井，用以研究、测量套管井各种胶结状况下的声波测井响应。用长为 1.5m，内、外直径分别为 15.6mm 和 17mm 的钢管，在管外包裹厚度约为 3mm 的水泥环组成微型井 (共 20 个)。实验中选用两个 8103 水听器实现声波的发射和接收，发射、接收探头同步移动且保持源距固定。使用惠普公司生产的 HP

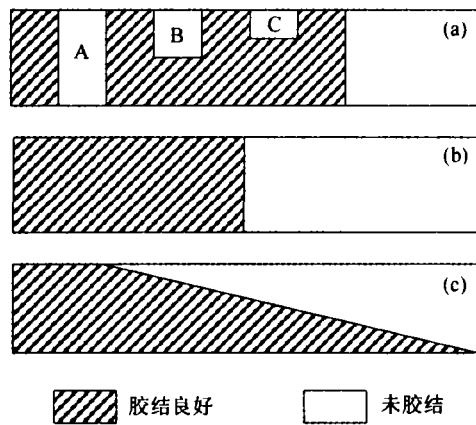


图 1 微型模拟井结构示意图

(a) 长 50mm 的 360° 窄槽 (A)、180° 窄槽 (B) 和 90° 窄槽 (C) 构成的未胶结面积不同的角宽度窄槽型声学系统 (b) 突变窄槽型声学系统 (c) 渐变窄槽型声学系统

E1437A 采集卡进行声波信号的采集。微型模拟并结构如图 1 所示(发射接收探头略去)。

3 基于倒双谱的声学系统特性(冲激响应)计算方法

3.1 声学系统冲激响应的表示

设 $y(n)$ 是一有限冲激响应系统的输出, 即:

$$y(n) = \sum_{i=0} h(i)e(n-i) \quad (1)$$

则系统的传递函数 $H(z)$ 可表示为^[12]:

$$H(z) = A \cdot H_{\min}(z) \cdot H_{\max}(z) \quad (2)$$

其中: A 为一常数, $H_{\min}(z)$ 和 $H_{\max}(z)$ 分别表示 $H(z)$ 的最小相位和最大相位部分, 且

$$H_{\min}(z) = \prod_{j=1}^{p_j} (1 - a_j z^{-1}), \quad |a_j| < 1 \quad (3)$$

$$H_{\max}(z) = \prod_{j=1}^{q_0} (1 - b_j z), \quad |b_j| < 1 \quad (4)$$

其中 p_i 和 q_0 分别代表系统最小相位和最大相位阶次。分别取 $H_{\min}(z)$ 和 $H_{\max}(z)$ 的 z 逆变换, 并令

$$h_{\min}(n) = z^{-1}(H_{\min}(z)) \quad (5)$$

$$h_{\max}(n) = z^{-1}(H_{\max}(z)) \quad (6)$$

式中 $h_{\min}(n)$ 的支撑区为 $[0, p_i]$, 而 $h_{\max}(n)$ 的支撑区为 $[-q_0, 0]$, 它们分别具有如下的递推关系:

$$h_{\min}(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ \sum_{i=0}^{\infty} \hat{h}_{\min}(i)h_{\min}(n-i), & n > 0 \end{cases} \quad (7a)$$

$$h_{\max}(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ \sum_{i=-\infty}^0 \hat{h}_{\max}(i)h_{\max}(n-i), & n < 0 \end{cases} \quad (7b)$$

其中 $\hat{h}_{\min}(n) = \{\dots, 0, \hat{h}(0), \hat{h}(1), \hat{h}(2), \dots\}$ 和 $\hat{h}_{\max}(n) = \{\dots, 0, \hat{h}(-2)\hat{h}(-1), \hat{h}(0), \dots\}$ 分别

是系统冲激响应最小相位部分 $h_{\min}(n)$ 和最大相位部分 $h_{\max}(n)$ 的倒谱。则系统的冲激响应为:

$$h(n) = h_{\min}(n) * h_{\max}(n) \quad (8)$$

即只要得到系统的最小相位分量 $h_{\min}(n)$ 和最大相位分量 $h_{\max}(n)$, 由 (8) 式可计算出系统冲激响应。

3.2 利用倒双谱确定冲激响应的倒谱 $\hat{h}(n)$ ^[12]

设系统输出序列 $y(n)$ 的双谱为

$$S_{3y}(z_1, z_2) = \gamma_{3e} H(z_1) H(z_2) H(z_1^{-1} z_2^{-1})$$

倒双谱为

$$\begin{aligned} s_y(k, l) &= Z^{-1}[\ln S_{3y}(z_1, z_2)] \\ &= Z^{-1}[\ln \gamma_{3e} + \ln H(z_1) \\ &\quad + \ln H(z_2) + \ln H(z_1^{-1} z_2^{-1})] \\ &= (\ln \gamma_{3e})\delta(k, l) + \hat{h}(k)\delta(l) \\ &\quad + \hat{h}(l)\delta(k) + \hat{h}(-k)\delta(-k) \end{aligned}$$

倒双谱-累计量方程可简化为:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{\infty} \{k\hat{h}(k)[c_{3y}(m-k, n) - c_{3y}(m+k, n+k)] \\ + k\hat{h}(-k)[c_{3y}(m-k, n-k) \\ - c_{3y}(m+k, n)]\} \\ = mc_{3y}(m, n) \end{aligned} \quad (9)$$

假定 $k\hat{h}(k) = 0$ ($k > p_i$) 和 $k\hat{h}(-k) = 0$ ($k > q_0$) 则 (9) 式可以进一步简化为:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{p_i} \{k\hat{h}(k)[c_{3y}(m-k, n) - c_{3y}(m+k, n+k)] \\ + \sum_{j=1}^{q_0} k\hat{h}(-j)[c_{3y}(m-j, n-j) \\ - c_{3y}(m+j, n)]\} \\ = mc_{3y}(m, n) \end{aligned} \quad (10)$$

对于足够大的 m 和 n 联立方程式 (10), 可求解出 p_i 个 $\hat{h}(k)$ 和 q_0 个 $\hat{h}(-k)$ 值, 利用这些值, 由 (7) 可重构出最小相位分量 $h_{\min}(n)$ 和最大

相位分量 $h_{max}(n)$, 根据 (8) 式可计算得到该系统的冲激响应 $h(n)$ 。

4 声学系统辨识结果分析与讨论

4.1 面积不同的角宽度窄槽型声学系统

发射接收探头保持源距不变且同步运动于模型井中不同位置时, 所构成的声学系统就不同, 测量得到的声波响应不同。图 2(a) 中所示为该模型井典型区域中得到的声波测井响应。波形 1 对应于 T/R 均在自由套管中, 波形 2 对应于 T/R 均在胶结良好区域中, 波形 3 对应于 T/R 在 90° 窄槽区域两侧, 波形 4 对应于 T/R 在 180° 窄槽区域两侧, 波形 5 对应于 T/R 在 360° 窄槽区域两侧。T/R 间胶结状况不同, 测井响应首波幅度不同, 首波到达时间也不同。自由套管区域对应的首波达到时间最早, 幅度最高, 而胶结良好区域对应的首波到

达时间最晚。

由图 2(a) 中各条声波测井响应计算出相应的声学系统的特性曲线 (冲激响应) 如图 2(b) 所示。

由图 2(b) 中的冲激响应曲线可以看出, 当发射接收探头处于模拟井中不同位置时, 所构成的声学系统不同, 由测量得到的声波测井响应计算出的声学系统的特性曲线 (冲激响应) 明显不同。当 T/R 同时处于自由套管区域时 (曲线 1), 声学系统特性曲线幅度最高, 并且曲线两端、中心处的起伏幅度最大; 当 T/R 同时处于水泥胶结良好区域时 (曲线 2), 声学系统特性曲线幅度最低, 曲线起伏幅度最小; 随着 T/R 间水泥胶结窄槽面积的增大 (曲线 3~5), 声学系统特性曲线幅度逐渐增大, 曲线两端、靠近中心处的起伏幅度也逐渐增加。图 3 所示为根据声波测井响应 (测量步长为 10mm) 计算出的面积不同角度窄槽型声学系统的特性曲线, 对应于实际模型, 在图中用虚线 (- · -) 表示发射和接收探头同时处于自由套管区域、90°、180° 和 360° 窄槽区域两侧, 虚线 (- -) 表示发射和接收探头同时处于水泥完全胶结的区域, 实线 (-) 表示发射和接收探头从窄槽区域向水泥完全胶结区域运动时的过渡区域。从瀑布图中可以明显反映出自由套管区域、180° 窄槽区域和 360° 窄槽区域, 但是 90° 窄槽区域的反映不太明显。由于窄槽长度小于源距且窄槽边缘对声

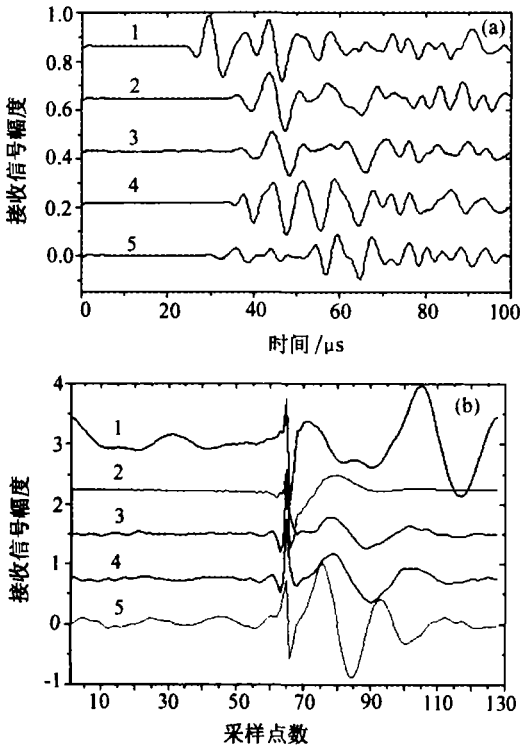


图 2 (a) 典型区域中的声波测井响应
(b) 典型区域中声学系统的特性曲线

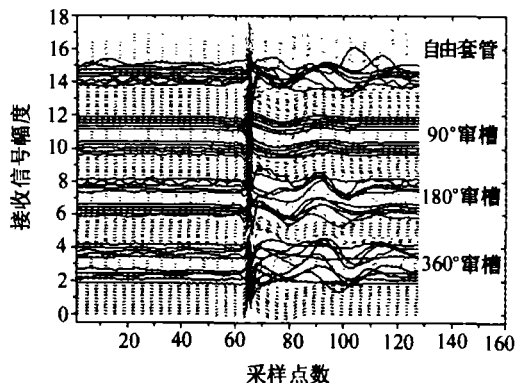


图 3 面积不同角度窄槽型声学系统的特性曲线

波的传播存在影响,所以在窄槽两侧的过渡区域中也出现了幅度比较大的曲线。

4.2 突变型和渐变型声学系统

为了验证所得结论,特此制作了突变窄槽型和渐变窄槽型两个微型井模拟套管井实际声波测井过程(步长为5mm)。对突变窄槽型模拟井由接收的57道测井响应计算得到相应声学系统的特性曲线如图4(a)所示,对渐变窄槽型模拟井接收到的59道波形计算出相应声学系统的冲激响应曲线如图4(b)所示。

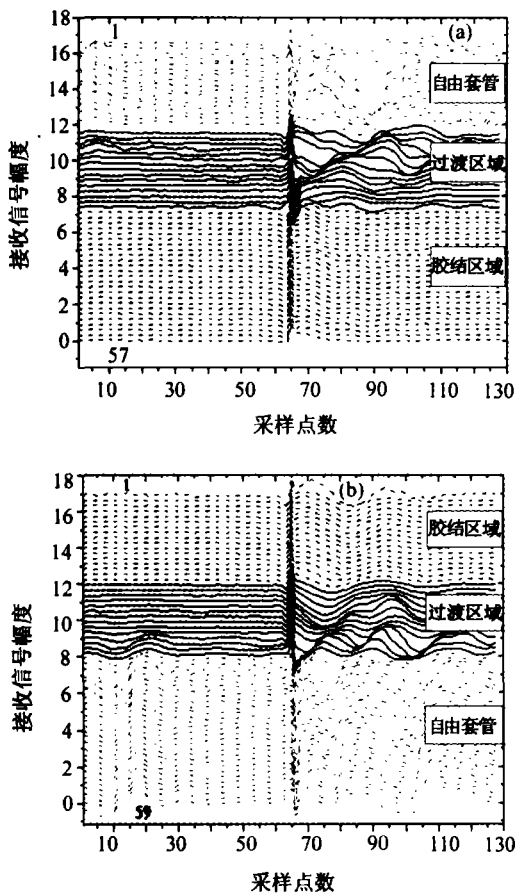


图4 (a) 突变窄槽型声学系统的特性曲线
(b) 渐变窄槽型声学系统的特性曲线

由图4(a)、(b)中的冲激响应曲线明显可以看出存在三个不同的区域,图中虚线(-·-)幅度比较大,曲线两端以及中心附近起伏较大,对

应于发射和接收探头同时处于自由套管区域,虚线(-·-)幅度比较低,曲线两端比较平坦,对应于发射和接收探头同时处于水泥完全胶结的区域,实线(-)的幅度、曲线两端以及中心处的起伏介于虚线(-·-)与虚线(--)之间,对应于发射和接收探头从自由套管向水泥完全胶结区域运动时的过渡区域。根据探头移动步长换算出图中所示三个区域的位置与实际符合较好。

综上所述,声波水泥胶结测井中发射探头、接收探头以及发射接收探头之间的介质构成的声学评价系统,在发射接收探头不变条件下,利用声波测井响应可以计算出整个声学评价系统的特性曲线(冲激响应曲线),从冲激响应曲线瀑布图中即可形象直观地判断出套管井水泥胶结状况,进而实现水泥胶结质量的评价工作,对丰富完善声波水泥胶结测井资料的解释工作具有重要参考价值。

致谢 感谢石油大学资源信息学院的李刚、车小花、陈雪莲在模型制作以及实验过程中给予的大力支持。

参 考 文 献

- 1 王琳,马平. 电力情报, 2001, (4):63~66.
- 2 余厚全. 测井技术, 2000, 24(6):410~414.
- 3 李国锋,刘莹. 应用声学, 1996, 15(5):41~44.
- 4 赵守国,孙义和,王素品. 生物物理学报, 2002, 18(4):434~439.
- 5 魏富胜,黎明. 地震学报, 2003, 25(1):47~54.
- 6 裴炳南,保铮,邢孟道. 电波科学学报, 2002, 17(2):103~106.
- 7 甄斌,吴奎宏,刘志敏等. 北京大学学报(自然科学版),2001, 37(3):371~378.
- 8 王炳和,张效民,相敬林等. 西北工业大学学报, 2000, 18(4):600~603.
- 9 陆文凯,李衍达. 石油地球物理勘探, 1998, 33(增刊1):129~133.
- 10 王慧儒,段瑞玲,吴森. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1):60~63.
- 11 唐斌,熊英. 仪器仪表学报, 2001, 22(3):261~264.
- 12 张贤达编. 时间序列分析-高阶统计量方法. 北京:清华大学出版社, 1996,161~195.