◇ 研究报告 ◇

# 多分量方位远探测声波测井的理论与应用\*

李 超<sup>1,2†</sup> 张 波<sup>3</sup> 许孝凯<sup>3</sup> 张晋言<sup>3</sup> 陈 浩<sup>1,2,4</sup> 何 晓<sup>1,2</sup> 王秀明<sup>1,2,4</sup>

(1 中国科学院声学研究所 声场声信息国家重点实验室 北京 100190)
 (2 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心 北京 100190)
 (3 中石化胜利石油工程有限公司测井公司 东营 257096)
 (4 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 远探测声波测井技术目前正成为复杂油气藏勘探开发的有力手段,而反射方位信息对于储层评价以及 工程措施都至关重要。利用集成了测量单偶极不同方位多分量波场功能的多分量远探测声波测井仪器,研究 了单偶极远探测联合识别反射方位的方法。由于仪器的影响,单极子不同方位反射波存在振幅差异,据此可以 快速判断反射界面方位,但是其准确性依赖于方位接收器个数。偶极 SH 反射波幅度反映了反射界面的走向 变化,但是存在180°的不确定性。结合单偶极远探测方法的优势,可以快速准确地识别出反射界面方位。理论 模拟和实际数据处理表明,两种方法的联合识别,提高了结果的可靠性。

关键词:声波测井;多分量;远探测;方位识别

中图法分类号: P631.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2020)02-0292-08 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.02.017

## Theory and application of multicomponent azimuthal remote exploration acoustic logging

LI Chao<sup>1,2</sup> ZHANG Bo<sup>3</sup> XU Xiaokai<sup>3</sup> ZHANG Jinyan<sup>3</sup> CHEN Hao<sup>1,2,4</sup>

HE Xiao<sup>1,2</sup> WANG Xiuming<sup>1,2,4</sup>

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

(2 Beijing Engineering and Technology Research Center for Deep Drilling Exploration and Measurement, Beijing 100190, China)

(3 Shengli Well Logging Company, SINOPEC, Dongying 257096, China)

(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Remote exploration acoustic logging technology is becoming a powerful tool for the exploration and development of complex reservoirs nowadays. The reflection azimuthal information is critical for reservoir evaluation and engineering measures. A multicomponent remote exploration acoustic logging tool which integrating the measurement of monopole and dipole wave field in different directions is used, and the joint azimuth identification methods based on them are studied. Due to the influence of the instrument, the amplitude of monopole reflections in different orientations is different, which could be used to quickly determine the approximate azimuth of interface. However, the accuracy depends on the number of azimuthal receivers.

作者简介:李超(1988-),男,陕西西安人,助理研究员,研究方向:声波测井的数值模拟与信号处理。

<sup>2019-07-12</sup> 收稿; 2019-11-28 定稿

<sup>\*</sup>国家自然科学基金项目(11774373, 11734017, 11574347, 91630309)

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者 E-mail: chaoli@mail.ioa.ac.cn

293

The amplitude of the dipole SH reflection reflects the strike of the interface. But a 180 degrees uncertainty still exists. Combining the advantages of monopole and dipole remote exploration methods, the azimuth of the interface can be identified quickly and accurately. Numerical simulation and field data processing results show that the joint method can improve the reliability of the results.

Keywords: Acoustic logging; Multicomponent; Remote exploration; Azimuth identification

## 0 引言

利用阵列声波测井中记录到的反射波来进行 井旁构造成像的远探测声波测井技术是近年来声 波测井领域的重要进展之一,它可以探测裂缝、溶 洞等储层在井外的扩展情况,以及水平井的储层 边界,还可以识别地震勘探无法探测到的小构造 等<sup>[1-2]</sup>,目前逐渐成为复杂油气藏勘探的有力手段。 随着测井仪器测量方式和数字信号处理技术的发 展,出现了利用具有方位接收器的阵列声波测井仪 器探测井外构造方位信息的技术<sup>[3-5]</sup>,以及利用正 交偶极声波测井仪测量的反射横波来进行反射体 方位识别的技术<sup>[2,6-7]</sup>,相对于传统的单极子探测 技术,这些新技术有更好的探测效果以及方位识别 能力<sup>[8-9]</sup>,而反射体方位信息对于储层评价以及工 程措施如压裂改造等至关重要。

目前,已有的单偶极远探测方位识别方法均各 有优势。单极子声源频率高,不同方位的接收器对 于反射方位敏感,可以根据波形幅度信息快速判断 方位,但是其探测深度较浅,方位分辨率受到方位接 收器个数的影响;而偶极远探测方法探测深度较大, SH反射横波幅度更大,更容易探测井外深部构造, 且对于构造走向较为敏感,但其存在180°的方位不 确定性<sup>[2]</sup>。本文通过将单偶极远探测识别方位的方 法相结合,利用多分量远探测仪器,集合两类方法的 优势,研究解决反射方位识别问题的方法。

#### 1 基本原理

#### 1.1 多分量远探测仪器探测原理

偶极横波多分量远探测仪器 (Victory multicomponent reflected shear wave imager, VMSI)<sup>[9]</sup> 同时包含了单极子声源, 仪器工作时单偶极声源依 次激发声波, 四个周向上相隔 90°的接收器记录不 同方位的四个分量波形, 如图1所示。单极子记录 *MX*1、*MX*2、*MY*1、*MY*2四个分量, 偶极子记录 *XX*1、*XX*2、*XY*1、*XY*2以及*YX*1、*YX*2、*YY*1、 YY2共8个分量,其中第一个字母代表声源,第二 个字母及数字代表接收器方位。则正交偶极的四分 量波形可由式(1)获得:

$$XX = XX1 - XX2,$$

$$XY = XY1 - XY2,$$

$$YX = YX1 - YX2,$$

$$YY = YY1 - YY2.$$
(1)



图1 多分量远探测仪器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of multicomponent remote exploration acoustic logging instrument

#### 1.2 方位识别方法

当反射体到井眼的距离远大于井径时,反射波 可以看作是平面波入射到井孔。以井外不同平面波 入射到井内被不同方位接收器所接收到的波形特 征为基础,来说明反射波方位的识别方法,如图2所 示。图2(a)显示了平面波入射井孔以及井内四个不 同方位接收器分布的示意图,采用二维有限差分进 行模拟,平面波声源为雷克子波,模拟纵波(单极子) 入射时声源主频为8 kHz,横波(偶极子)时声源主 频为4 kHz,模型参数如表1所示。井孔内有一居中 的仪器,井孔直径为0.22 m,仪器直径为0.1 m,井 外地层为硬地层(地层1)。 图2(b)显示了平面纵波入射时四个接收器接 收到的波形,由于频率较高,且质点振动方向与波 传播方向相同,仪器的存在使得不同接收器波形幅 度不同,靠近入射方向的一侧*X*1接收器幅度最强, *Y*1和*Y*2接收器首波幅度相等,*X*2首波最弱,因而

可以根据首波幅度大小快速判断来波方位,即反射 界面(体)方位,用公式可表示如下:

 $AZ_M =$ 

$$AZ \left[ \max(A_{MX1}, A_{MX2}, A_{MY1}, A_{MY2}) \right],$$
 (2)

其中,A表示振幅, $AZ_M$ 表示最大振幅接收器所在 方位,若有两个接收器振幅都大于其他两个且相等, 则取两个接收器方位的平均。由于方位接收器个数 的限制,方位分辨率只有45°(360°/2N,N为方位接 收器个数,本文N = 4)。这里方位分辨率指的是可 以分辨的两个方位间的最小角度,即两个目标在这 个角度内将不能区分。

图2(c)显示了平面SH横波入射时四个接收器 接收到的波形,可以类比偶极声源发射得到的接收 波形,由于频率较低,波形受仪器影响较小,而且SH 波入射后与纵波的特征完全不同。质点振动方向与 波传播方向垂直,当入射进圆形井孔时(这里波长 大于井孔尺寸),横波转换成井孔内纵波(接收波形 为井孔内声压),Y1和Y2接收器的位置与其传播方 向垂直,且该位置波传播方向与井孔边界有夹角, SH波可以转换成井内纵波,又在横波振动方向,所 以振幅最大,相位相反。而X1和X2接收器平行于 波传播方向,横波垂直入射井孔,所以振幅为0。这 些是由SH波的偏振特征所致,因而也可以反映方 位变化,即反射界面的走向<sup>[2]</sup>。将式(1)得到的四分 量数据进行旋转,可以获得SH波和SV波不同方位 的波场切片:

$$SH = XX \cos^{2} \theta - (XY + YX) \sin \theta \cos \theta$$
  
+  $YY \sin^{2} \theta$ ,  
$$SV = XX \sin^{2} \theta + (XY + YX) \sin \theta \cos \theta$$
  
+  $YY \cos^{2} \theta$ ,  
(3)

其中,角度θ为走向角,对于远场而言,一般SH 反射波的幅度大于SV波<sup>[2]</sup>,SH反射能量最大的 角度即为反射界面走向角度,即偶极源极化方向 和反射界面平行时,产生的SH波反射幅度最大。 然而由于偶极源的辐射特性,以上方法求得的 2020年3月

走向存在180°的不确定性,即无法区分在井外的 哪一侧。

表1 模型参数 Table 1 Model parameters

	纵波速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	横波速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )
井内流体	1500		1000
仪器	5860	3130	7850
地层1	5500	3000	2600
地层 2	1900	1000	2000





Fig. 2 Wavefield characteristics in the borehole for different incident plane waves

本文提出应用于上述多分量远探测仪器的单 极和偶极远探测相结合的方法来识别反射方位,一 方面单极反射幅度能较好地区分方位,但是其方位 分辨率低;另一方面,偶极SH反射能较精确地反演 界面走向,但是无法区分界面在井哪一侧,将两者相 结合,可以优势互补,快速判断界面方位。本文将以 识别临井方位为例,通过数值模拟及实际资料处理 来说明该方法的效果。

## 2 数值模拟实例

采用三维有限差分方法进行数值模拟来获取 单偶极远探测波形。模型的 xz 和 xy 剖面如图 3 所 示,两口相距 5 m 的井,一口为测量井,井中有仪器, 地层为软地层(见表 1 地层 2),另一口井在其 15°方 位(与 x 轴夹角)处,仪器结构如图 1 所示,单极子声 源主频为 10 kHz,偶极子声源主频为 3 kHz。两口 井直径均为 0.22 m,仪器直径为 0.1 m。

X方向的接收器在x轴放置,并且X1偏向有 井的一侧,参考方位为X1接收器方位(0°)。数值模 拟得到的源距相同的不同方位单极子波形见图4, 其中图4(a)表明单极子反射波有多种模式,在时间 上从前往后依次是P-P反射纵波、P-S和S-P转换 波以及S-S反射横波,并且不同方位波形幅度有差 异,不同方位最大反射波振幅归一化后的指向性图 见图4(b),可以明显看到方位在X1接收器一侧,但 由于分辨率的限制,无法获得准确的方位角。

模拟得到的偶极子四分量波形见图5。由于 X 源方向与临井的夹角较小,反射纵波、转换波和反 射横波均存在(图5(a)),这一点和单极子源反射波 场类似,而交叉分量反射波幅度很小,YY分量主要 成分为SH反射横波,其幅度最大(图5(d))。利用公 式(3)求得不同走向角度的SH反射波并求出其最 大幅度,结果见图6。可知最大幅度对应走向角度为 79°,这里的走向角度是与*x*轴方向(X1接收器方 向)的顺时针夹角,转换成模型中的逆时针方位即 为11°与191°,即偶极SH反射波所确定的方位存在 180°的不确定性,根据单极子的结果(图4(b)),可 以判断11°为临井的方位,这与其真实的方位角15° 误差很小,因而将单偶极子的反射波方位识别方法 联合起来可以消除不确定性,较准确地识别出反射 方位。





Fig. 3 Velocity model of a  $15^\circ$  well outside the borehole





Fig. 4 Monopole reflection and its maximal amplitude directivity



图 5 偶极子四分量反射波 Fig. 5 Dipole reflection of four components



(c) YX分量



Fig. 6 The maximum amplitude of SH reflection for different strike angles

## 3 实际资料处理

与数值模拟模型类似,多分量远探测仪器在胜利油田某一教学井中测量,来探测井外的另一口井,

两井相距约为5m,目标井方位约在测量井的西侧, 为一套管井,直径约0.14 m。测量井段为软地层, 地层参数与表1中地层2相近。测量得到的单极子 四分量波形反射波成像结果见图7(四个图形色标 值范围一致), 四个方位接收器都能探测到临井的 存在,140~160m井段可能由于地层衰减较大没 有测到反射信号。由于仪器上提时旋转,不同深度 不同接收器的反射波幅度大小存在不一致,根据公 式(2),将不同深度的反射波最大幅度以及方位信 息进行综合分析,可得图7(e)的结果,参考方位为 Y1接收器相对北极的方位。对于有较明显反射的 115~125 m 深度段和170~173 m 深度段, 可以看 出最大振幅方位角在250°~326°这一区间,位于 西侧,但是由于分辨率的限制,无法确定准确方位, 此外,由于噪声以及仪器本身旋转的影响,部分深度 段方位角出现较大误差,因此需要将多个深度点信 息结合起来进行综合分析。

(d) YY分量

偶极子四分量反射波成像结果及走向角分析 如图8所示。可见,反射主要集中在XX分量上, 说明走向在南北向(方位校正后XX指向南北向), 根据SH波最大幅度来进行进一步的走向角分析 (图8(e)),由图可知走向角集中在156°附近(方位在 66°和246°两个方向),尤其是深度170m附近的走 向角度比较稳定,结合反射波成像结果,此处的角度 应比较可靠。再根据图7单极子的结果,说明246° 的方位较为正确,即另一口井在正西稍偏南方向,这 也与实际相符。



Fig. 7 Monopole reflection imaging results for receivers in different directions



Fig. 8 Dipole reflection imaging results for different components

应用声学

为了进一步说明,图9和图10给出了SH反 射波在不同走向角度的剖面,可以看出,反射 在150°和165°时幅度较强,这也与图8的分析 一致。





Fig. 9 Dipole imaging results for SH reflection with different strike  $(0^{\circ}\sim75^{\circ})$ 





Fig. 10 Dipole imaging results for SH reflection with different strike  $(90^{\circ} \sim 165^{\circ})$ 

## 4 结论

多分量远探测声波测井方法集成了测量单偶 极不同方位多分量波场的功能。利用单极子不同方 位反射波的振幅差异,可以快速判断反射界面大致 方位,但是缺乏准确性;而偶极SH反射可以较准确 地识别走向(和方位垂直),但是存在180°的不确定 性,将两者结合,可以快速准确地识别出反射界面 方位,并且两种方法的联合识别,提高了结果的可 靠性。本文的研究为一定径向深度范围内的反射界 面方位识别问题提供了思路,即能识别远探测方位 的距离只受限于单极源的探测深度,对于较近反射 以及离井眼远近都有的反射(与井眼相交倾斜界面) 可以识别,但难以识别较远且与井眼不相交的反射 面,同时也为传统多极子阵列声波测井仪用于远探 测时的信号记录方式提供了指导。

**致谢** 感谢中国科学院声学研究所的贺洪斌高工 以及中国石化胜利石油工程公司测井公司晁永胜 高工为本项研究所提供的优质数据。

### 参考文献

- Esmersoy C, Chang C, Kane M, et al. Acoustic imaging of reservoir structure from a horizontal well[J]. The Leading Edge, 1998, 17(7): 940–946.
- [2] Tang X M, Patterson D J. Single-well S-wave imaging using multicomponent dipole acoustic-log data[J]. Geophysics, 2009, 74(6): WCA211–WCA223.

- [3] Li C, Yue W Z. High-resolution adaptive beamforming for borehole acoustic reflection imaging[J]. Geophysics, 2015, 80(6): D565–D574.
- [4] Che X H, Qiao W X, Ju X D, et al. Experimental study on the performance of an azimuthal acoustic receiver sonde for a downhole tool[J]. Geophysical Prospecting, 2017, 65(1): 158–169.
- [5] Gong H, Chen H, He X, et al. Modeling and inversions of acoustic reflection logging imaging using the combined monopole-dipole measurement mode[J]. Applied Geophysics, 2018, 15(3/4): 393–400.
- [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.
- [7] 苏远大,魏周拓,唐晓明.基于邻井反射的偶极横波远探测验 证方法 [J].应用声学,2014,33(1):29-34.
  Su Yuanda, Wei Zhoutuo, Tang Xiaoming. Validation method of dipole acoustic reflection imaging from the adjacent borehole reflection[J]. Journal of Applied Acoustics, 2014, 33(1): 29-34.
- [8] 余志军,鞠晓东,卢俊强,等.方位远探测声波测井仪接收声系实验研究 [J].应用声学,2017,36(1):88-94.
  Yu Zhijun, Ju Xiaodong, Lu Junqiang, et al. Experimental research on receiver sonde of azimuthal remote acoustic reflection imaging logging tool[J]. Journal of Applied Acoustics, 2017, 36(1): 88-94.
- [9] 张晋言,许孝凯,于其蛟,等. 多分量横波远探测成像测井仪 研制及应用 [J]. 应用声学, 2018, 37(2): 268-272.
  Zhang Jinyan, Xu Xiaokai, Yu Qijiao, et al. Development and application of victory multicomponent reflected shear wave imager[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(2): 268-272.