

◇ 研究报告 ◇

# 偶极随钻声波测井声压和径向位移响应的差异\*

陈 达 张 超 关 威<sup>†</sup> 胡恒山

(哈尔滨工业大学航天科学与力学系 哈尔滨 150001)

**摘要** 声波测井仪接收到的电信号通常是多个压电片响应的叠加,它主要是由声压还是径向位移响应转化而来,或是两种响应兼有目前未有定论。该文通过实轴积分法和复变函数法计算并对比分析随钻声波测井的声压和径向位移场,发现这两种响应特性有着显著的差异。首先,软地层的偶极随钻测井时,声压信号包含钻铤波和舒尔特波两个波群,而径向位移信号仅有钻铤波波群;其次,单极声源情况下,声压和径向位移信号的钻铤波能量分别集中在钻铤内、外壁,而偶极情况恰好相反,可见,钻铤按照单极情况的分析结果进行刻槽后,高频时的拖尾现象会影响偶极信号中舒尔特波对横波速度的反演。因此,阐明两类信号的差异对横波速度的反演和钻铤波的压制都具有重要意义。

**关键词** 随钻声波测井, 钻铤波, 声压, 径向位移, 软地层

**中图法分类号:** P631.4+13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2019)05-0801-06

**DOI:** 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.05.007

## Difference in pressure and radial displacement response of dipole acoustic logging while drilling

CHEN Da ZHANG Chao GUAN Wei HU Hengshan

(Department of Astronautics and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** The electrical signal received by acoustic logging instrument is usually the superposition of multiple piezoelectric responses, which is mainly converted from acoustic pressure or radial displacement response, or both responses have not been determined yet. In this paper, the acoustic pressure and radial displacement fields of LWD acoustic logging are calculated and analyzed by means of real axis integral method and complex variable function method. The results show that when in soft formation dipole logging while drilling the acoustic pressure signal consists of two wave groups, drill collar wave and Scholte wave, while the displacement signal consists of only collar wave group without apparent Scholte wave. On the other hand, in the case of monopole sound source, the drill collar wave energy of pressure and radial displacement signals is concentrated in the drill collar and the outer wall respectively, while in the case of dipole, it is just the opposite. Besides, when grooving according to the results of the monopole case, the phenomenon of tail dragging at high frequency will affect the inversion of shear wave by Scholte wave in the dipole source. So it is of great significance to clarify the properties of the two kinds of signals for shear wave inversion and drill collar wave suppression.

**Key words** Logging while drilling, Drill collar wave, Acoustic pressure signal, Displacement signal, Soft formation

2018-12-13 收稿; 2019-02-20 定稿

\*国家科技重大专项子课题项目 (2017ZX05019006-006), 国家自然科学基金项目 (41574112, 41874129, 11734017)

作者简介: 陈达 (1991-), 男, 黑龙江大庆人, 博士研究生, 研究方向: 孔隙介质弹性波、动电耦合波及声波测井。

<sup>†</sup>通讯作者 E-mail: guanw@hit.edu.cn

## 0 引言

随钻声波测井通过边钻边测的方式可实时地获得地层的纵横波速度,从而得到地层信息,其经济性和高效性使之近年来得到迅速发展。然而,由于钢制钻铤的存在,收到的携带地层信号的全波中总是夹杂着很强的钻铤波,从而无法准确提取纵横波速度<sup>[1]</sup>。为解决此问题,相关学者做了很多研究,Tang等<sup>[2]</sup>提出利用四极子随钻测井中螺旋波低频截止速度获得地层横波速度,苏远大等<sup>[3]</sup>采用在钻铤上周期性刻槽的方式削弱钻铤波,刘彬等<sup>[4]</sup>设计了一种周期性非轴对称通孔槽隔声体结构来衰减钻铤波,李希强等<sup>[5]</sup>利用随钻声波测井模式波获得横观各向同性地层的横波速度。最近,Wang等<sup>[6]</sup>和Hu等<sup>[7]</sup>利用偶极随钻测井中的舒尔特波间接获得地层横波速度。

目前,可将相关学者提出的解决“钻铤波问题”方案大致分成两类,一是避开钻铤波,通过其他模式波的信息间接得到横纵波;二是采用物理手段抑制钻铤波的传播,从而凸显地层波信号。然而,无论哪种方案,纵横波的获得均是要以接收器接收到的信号为研究基础。位于钻铤上的声波发射器利用压电换能器的压电效应,将电信号转化为声信号,声波携带地层信息传递到距发射器不远的接收器,再利用压电换能器将声信号转化为电信号。但接收器收到的电信号是由声压信号还是径向位移信号转化而成的目前还未有定论。做理论及模拟研究的相关学者往往关心的是声波在地层中的传播机理,而现场关心的是传递到地面的信号中是否包含地层信息,这就导致了极少数人关心接收器收到的是声压信号还是径向位移信号亦或是两类信号的叠加。但通过近期的研究发现,在偶极源随钻测井中,收到的两类信号存在显著的性质差异,具体表现在全波信号中包含的波群数目与钻铤波的能量分布,这关系到人们能否利用特有的模式波对地层信号进行反演<sup>[6-7]</sup>,以及采取刻槽手段削弱钻铤波时选用的刻

槽方式<sup>[8-9]</sup>。可见明确两类信号中的差异,才可据此有针对性地进行下一步工作。

## 1 计算模型

随钻声波测井的几何模型为如图1所示的径向柱面分层结构,从内到外分别为流体层、钻铤层、流体层、地层。其中流体层为钻井液,在本文用水替代;钻铤层为钢制钻铤;地层假设为各向同性弹性体。在钻铤外表面排列着发射器和接收器,分别用来发射和接收信号,在实际钻铤仪器中,发射器和接收器主要材质均为压电陶瓷。接收器能够感受压电陶瓷表面声压和径向位移的变化,利用压电陶瓷的压电效应产生电位差,接收到相应的电信号<sup>[10]</sup>。但是发射器(接收器)发射(接收)到的电信号是由声压信号还是径向位移信号引起的,或者是二者以某种权重叠加引发的,目前没有见到相关文献说明。因此,对于声压信号和径向位移信号的区别的讨论就显得至关重要。

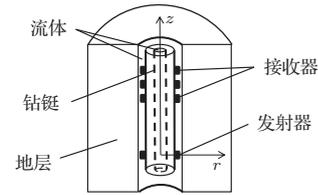


图1 随钻声波测井模型

Fig. 1 Model of acoustic logging while drilling

本文中随钻声波测井模型的声压响应和径向位移响应均是利用实轴积分法获得,前人推导过相关频率-波数域的解析表达式<sup>[11-12]</sup>,如式(1)~(6)所示。将声压响应和径向位移响应的频率-波数域解析表达式对轴向波数 $l$ 沿实轴进行无穷积分,再对角频率 $\omega$ 进行傅里叶变换,即可得到声压响应和径向位移响应的时-空间域解析表达式。

钻铤内流体层的声压表达式为

$$p_f^{\text{in}} = \rho_f \omega^2 A_n^{\text{in}} I_n(\eta_f r). \quad (1)$$

钻铤层的应力表达式为

$$\begin{aligned} \tau_{rr} = & A_n \mu \left[ \left( 2l^2 - k_s^2 + \frac{2n(n-1)}{r^2} \right) I_n(\eta_p r) - \frac{2\eta_p}{r} I_{n+1}(\eta_p r) \right] + B_n \mu \left[ \left( 2l^2 - k_s^2 + \frac{2n(n-1)}{r^2} \right) K_n(\eta_p r) \right. \\ & \left. + \frac{2\eta_p}{r} K_{n+1}(\eta_p r) \right] + 2\mu C_n \left[ \frac{n(n-1)}{r^2} I_n(\eta_s r) + \eta_s \frac{n}{r} I_{n+1}(\eta_s r) \right] \\ & + 2\mu D_n \left[ \frac{n(n-1)}{r^2} K_n(\eta_s r) - \eta_s \frac{n}{r} K_{n+1}(\eta_s r) \right] + 2\mu i l E_n \left[ \left( \frac{n(n-1)}{r^2} + \eta_s^2 \right) I_n(\eta_s r) - \frac{\eta_s}{r} I_{n+1}(\eta_s r) \right] \\ & + 2\mu i l F_n \left[ \left( \frac{n(n-1)}{r^2} + \eta_s^2 \right) K_n(\eta_s r) + \frac{\eta_s}{r} K_{n+1}(\eta_s r) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

钻铤外流体层的声压表达式为

$$p_f^{\text{out}} = \rho_f \omega^2 [A_n^{\text{out}} I_n(\eta_f r) + B_n^{\text{out}} K_n(\eta_f r)]. \quad (3)$$

钻铤内流体层的径向位移表达式为

$$u_r^{\text{in}} = A_n^{\text{in}} \left[ \frac{n}{r} I_n(\eta_f r) + \eta_f I_{n+1}(\eta_f r) \right]. \quad (4)$$

钻铤层的径向位移表达式为

$$\begin{aligned} u_r = & A_n \left[ \frac{n}{r} I_n(\eta_p r) + \eta_p I_{n+1}(\eta_p r) \right] \\ & + B_n \left[ \frac{n}{r} K_n(\eta_p r) - \eta_p K_{n+1}(\eta_p r) \right] \\ & + \frac{n}{r} C_n I_n(\eta_s r) + \frac{n}{r} D_n K_n(\eta_s r) \\ & + i l E_n \left[ \frac{n}{r} I_n(\eta_s r) + \eta_s I_{n+1}(\eta_s r) \right] \\ & + i l F_n \left[ \frac{n}{r} K_n(\eta_s r) - \eta_s K_{n+1}(\eta_s r) \right]. \quad (5) \end{aligned}$$

钻铤外流体层的径向位移表达式为

$$\begin{aligned} u_r^{\text{out}} = & A_n^{\text{out}} \left[ \frac{n}{r} I_n(\eta_f r) + \eta_f I_{n+1}(\eta_f r) \right] \\ & + B_n^{\text{out}} \left[ \frac{n}{r} K_n(\eta_f r) - \eta_f K_{n+1}(\eta_f r) \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

其中,  $A_n^{\text{in}}$  是与钻铤内流体有关的系数,  $A_n$ 、 $B_n$ 、 $C_n$ 、 $D_n$ 、 $E_n$ 、 $F_n$  是与钻铤有关的系数,  $A_n^{\text{out}}$ 、 $B_n^{\text{out}}$  是与钻铤外流体层有关的系数, 以上系数均可利用边界条件获得;  $\rho_f$  为流体密度;  $\omega$  为角频率;  $\mu$  为钻铤剪切模量;  $l$  为轴向波数;  $k_p$ 、 $k_s$ 、 $k_f$  分别为钻铤纵波、横波和流体纵波的波数;  $\eta_p = \sqrt{l^2 - k_p^2}$ 、 $\eta_s = \sqrt{l^2 - k_s^2}$ 、 $\eta_f = \sqrt{l^2 - k_f^2}$  分别为钻铤纵波、横波和流体纵波的径向波数;  $K_n(x)$ 、 $I_n(x)$  均为第  $n$  阶虚宗量贝塞尔函数,  $n$  表示声源类型, 对于单极声源  $n$  取 0, 对于偶极声源  $n$  取 1;  $r$  为接收器与声源间径向距离。

## 2 声压和径向位移信号的性质

利用第 1 节表达式, 可得到偶极随钻声波测井的声压和径向位移响应。井孔及地层的几何和力学参数如表 1 所示。本文采用的是软地层(地层横波速度小于井内流体速度)进行计算, 由于软地层中没有明显的折射横波波群, 在地层横波速度的测量上还有一定困难, 因此充分认识声压和径向位移信号的差别, 可以更好地进行地层参数的反演。

首先对各模式波的速度频散曲线进行分析。利用边界条件可以获得声场的特征函数, 其零点即为复波数平面内声场表达式的极点, 在不同频率下搜索复波数平面上特征函数的零点, 可获得声场表达式的

复极点。这些复极点的实部即对应着各模式波的速度频散曲线。

表 1 流体、钻铤和地层的力学与几何参数

Table 1 Borehole, drill collar and formation parameters

	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	纵波速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	横波速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	半径/m
钻铤内流体	1000	1470		0.027
金属钻铤	7800	5860	3131	0.090
钻铤外流体	1000	1470		0.117
软地层	2485	2590	1067	$+\infty$

图 2 中实线表示各模式波的相速度, 虚线表示各模式波的群速度。各个模式波的名称已经在对应曲线旁标出。其中 Scholte 表示偶极舒尔特波, 其在 3 kHz 以后频散很小, 速度略小于地层横波速度; Leaky 表示以地层纵波速度为低频极限的泄漏模式波, 其在复波数平面上的极点在纵波波数附近, 因此称为泄漏纵波; D1、D2、D3、D4 分别是 1 阶~4 阶钻铤波;  $V_p$  表示地层的纵波速度,  $V_f$  表示井内流体的声速,  $V_s$  表示地层的横波速度。由图 2 可以看出, 低频时只有 1 阶钻铤波模式, 但是高频时含有多阶钻铤波模式, 且高阶钻铤波含有艾里相, 其群速度会低至舒尔特波速度。

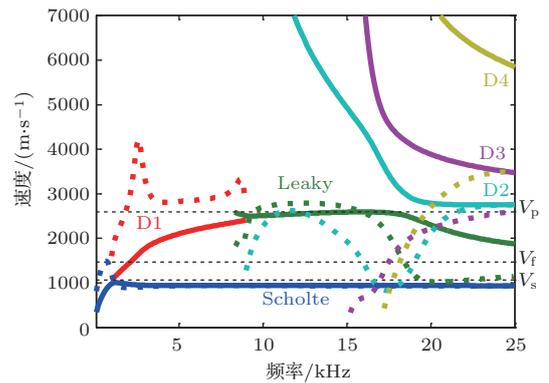


图 2 偶极 LWD 各模式波的速度频散曲线

Fig. 2 Phase and group velocity dispersion curves for dipole LWD in a slow formation

图 3 为偶极随钻声波测井的声压响应, 这是在钻铤外表面的接收器位置获得的流体声压, 接收器距离声源的轴向距离为 4.0 m, 激发声源的中心频率为 5 kHz, 带宽为 4 kHz。图 4 是偶极随钻声波测井的声压响应的时慢度相关图, 由排列在钻铤外

表面距声源轴向距离3.0 m到4.0 m的6个等距接收器获得,其中 $S_s$ 、 $S_f$ 、 $S_p$ 分别为地层横波慢度、井内流体慢度和地层纵波慢度。由图3可以看出全波中含有两个波群,第一个波群为钻铤波波群,钻铤波具有频散特性,在声源的激发频率范围内,钻铤波的速度略小于地层纵波速度。同时因为钻铤波的幅值远大于(约2~3个数量级)地层纵波幅值,所以钻铤波将地层纵波掩盖,从而在图4的时间慢度相关图中无法观测到纵波波群。图3中第二个波群是舒尔特波,它是沿着钻铤和钻铤外流体的交界面传播的导波,传播速度略小于地层横波速度,高频时速度趋于平面分层模型的舒尔特波速度,随着与交界面距离的增加,其振幅呈指数衰减。有学者证明此波对地层横波速度十分敏感,可以用来反演地层横波速度[6-7]。

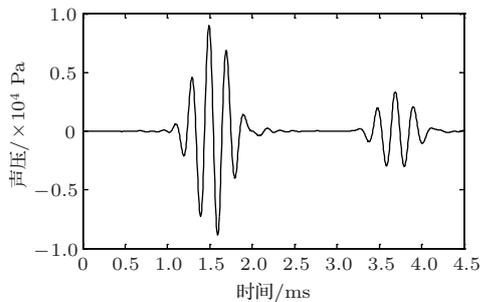


图3 轴向源距为4.0 m时偶极随钻声波测井的声压响应

Fig. 3 Acoustic pressure response of a dipole LWD acoustic log when  $z = 4.0$  m

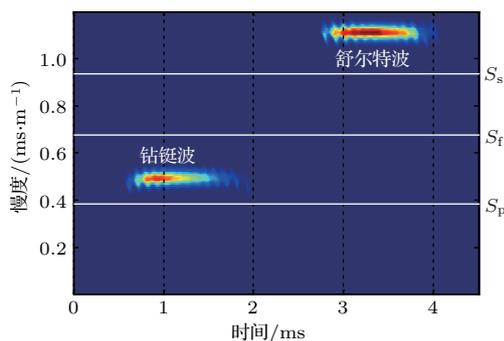


图4 偶极随钻声波测井的声压响应的时慢度图

Fig. 4 Slowness-time coherence diagram of acoustic pressure response in dipole LWD acoustic logging

图5为偶极随钻声波测井的径向位移响应,这是在钻铤外表面的接收器位置获得的流体径向位移,接收器距声源的轴向距离为4.0 m,激发声源的中心频率为5 kHz,带宽为4 kHz。图6是相应的时

间慢度相关图,由排列在钻铤外表面距声源轴向距离3.0 m到4.0 m的6个等距接收器获得,其中 $S_s$ 、 $S_f$ 、 $S_p$ 分别为地层横波慢度、井内流体慢度和地层纵波慢度。由图5可以看出全波中仅可见到一个明显波群,即钻铤波波群,性质与声压响应情况类似。将3.3 ms到4 ms间的信号放大100倍(见图5右上角的小图),可看到舒尔特波,但是相比于钻铤波,其振幅过小,因此在图6的时间慢度相关图中无法识别舒尔特波。值得注意的是,径向位移响应中舒尔特波的相对振幅过小,因此,当接收器接收到的是径向位移信号时,则无法利用舒尔特波对地层横波速度进行反演。

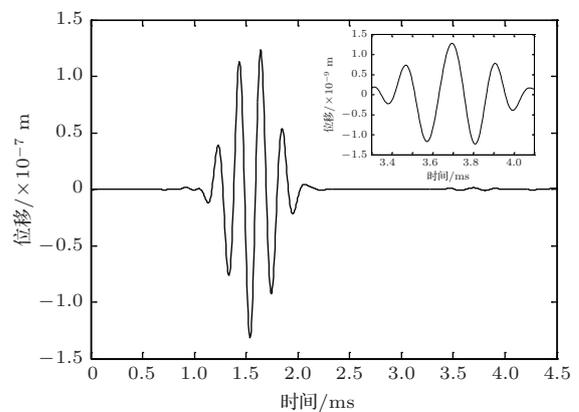


图5 轴向源距为4.0 m时偶极随钻声波测井的径向位移响应

Fig. 5 Acoustic displacement response of a dipole LWD acoustic log when  $z = 4.0$  m

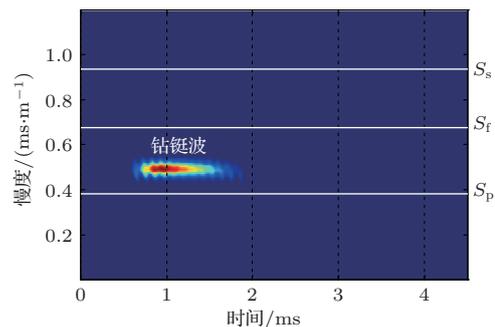


图6 偶极随钻声波测井的径向位移响应的时慢度图

Fig. 6 Slowness-time coherence diagram of acoustic displacement response in dipole LWD acoustic logging

### 3 两类信号中钻铤波的特性

为了计算两类信号中钻铤波的特性,在波数复平面中搜索得到钻铤波的极点,求得这些极点的留

数之和,再通过快速傅里叶变换,获得钻铤波的时域波形。分别计算在同一轴向位置( $z = 4.0\text{ m}$ )、不同径向位置处的钻铤波声压曲线,将所获得的曲线峰值分别提取出来并按径向位置连成线,即可获得图7表示的钻铤波声压(在钻铤上接收的为径向应力)信号的振幅随径向位置的变化曲线,图7(a)表示单极源情况,激发中心频率为10 kHz,带宽4 kHz;图7(b)表示偶极源情况,激发中心频率为5 kHz,带宽4 kHz。由图7(a)可以看出单极源的钻铤波声压振幅在钻铤内壁要大于钻铤外壁,即钻铤波能量主要集中在钻铤内壁,如采取对钻杆进行刻槽的方式削弱钻铤波,在钻铤内壁进行刻槽会有更好的效果。由图7(b)可以看出偶极源的钻铤波声压振幅在钻铤外壁要大于钻铤内壁,即钻铤波能量主要集中在钻铤外壁。通常测井仪器的源距范围在3~5 m,因此分别计算了源距为3.0 m、3.5 m、4.5 m和5.0 m时钻铤波幅度沿径向的分布曲线,结果均与源距为4.0 m时(图7)的分布规律一致。

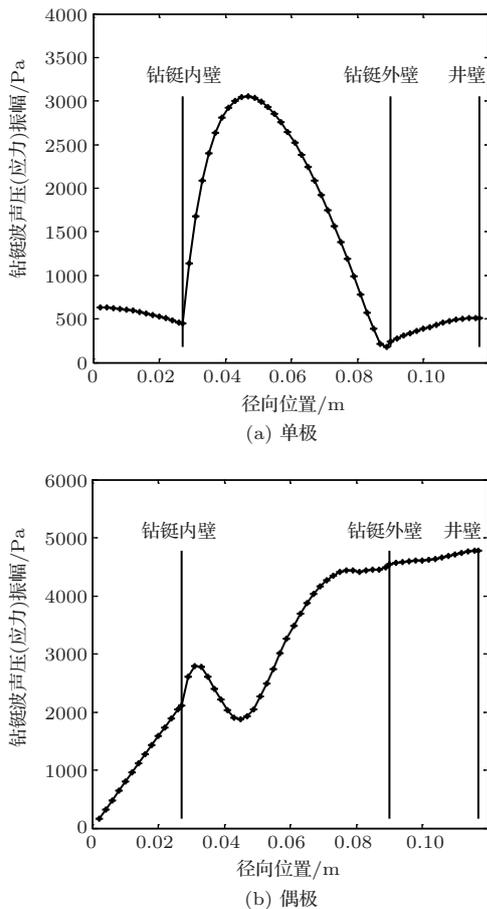


图7 钻铤波的声压(应力)振幅随径向位置的改变  
Fig. 7 The acoustic pressure (stress) amplitude of collar wave with different radial position

此外需要说明的是,用刻槽方式削弱钻铤波的原理是破坏钻铤的波导结构,使钻铤波经过各个凹槽时发生多次反射和折射,这就导致了钻铤波幅度被削弱的同时,钻铤波的持续时间也会被拉长,即含有较长的拖尾,这在高频时体现得尤为明显<sup>[9]</sup>。声波测井仪器通常会搭载单极子和偶极子两套仪器,以往的刻槽隔声主要是针对单极子设计的,若采用单极子适合的内刻槽方式进行刻槽,偶极子获得的数据将会受到影响。这是因为偶极钻铤波的能量集中在钻铤外壁,内刻槽对其振幅的削弱效果较小,同时,当激发频率较高时,拖尾现象会使得钻铤波与后至的舒尔特波叠加在一起,从而无法单独提取舒尔特波进行横波速度的反演。

图8表示同一轴向位置( $z = 4.0\text{ m}$ )的钻铤波径向位移信号的振幅随径向位置的变化曲线,图8(a)表示单极源情况,激发中心频率为10 kHz,带宽4 kHz;图8(b)表示偶极源情况,激发中心频率为5 kHz,带宽4 kHz。由图8(a)可以看出单极源的

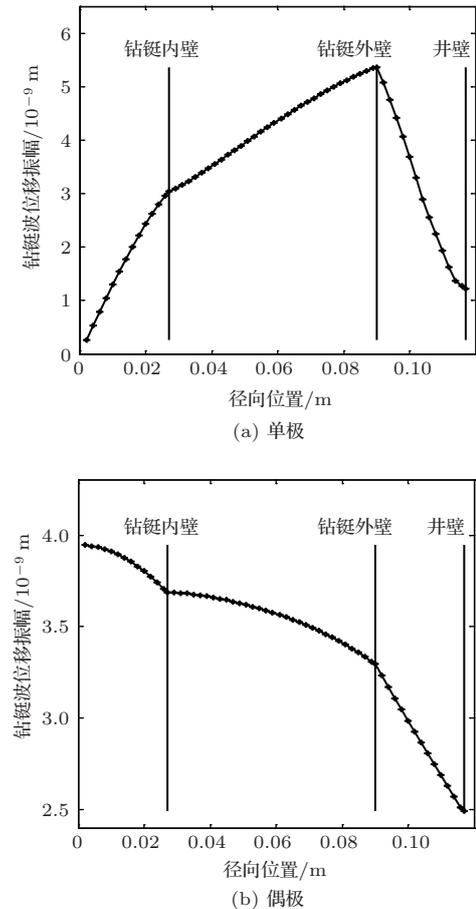


图8 钻铤波的径向位移振幅随径向位置的改变  
Fig. 8 The displacement amplitude of collar wave with different radial position

钻铤波径向位移振幅在钻铤内壁要小于钻铤外壁,即钻铤波能量主要集中在钻铤外壁,如采取对钻杆进行刻槽的方式削弱钻铤波,在钻铤外壁进行刻槽会有更好的效果。由图8(b)可以看出偶极源的钻铤波声压振幅在钻铤内壁要大于钻铤外壁,即钻铤波能量主要集中在钻铤内壁,如采取对钻杆进行刻槽的方式削弱钻铤波,在钻铤内壁进行刻槽会有更好的效果。这一结论与声压信号完全相反,可见钻杆的刻槽方式还需根据声源的类型和接收信号的类型进行讨论,否则会取得适得其反的效果。

#### 4 结论

本文采用解析法计算了软地层中偶极随钻声波测井的声压信号和径向位移信号,两类信号性质有很大差别。声压信号中有两个波群,其中后至的舒尔特波波群可以用于反演地层横波速度;而径向位移信号中只有一个钻铤波波群,未见明显的舒尔特波,很难反演地层横波速度。

分别对比了单极源和偶极源激发的声压信号和径向位移信号中钻铤波振幅沿径向分布的情况。单极源的声压信号的钻铤波能量集中在钻铤内壁,偶极源的声压信号的钻铤波能量集中在钻铤外壁;单极源的径向位移信号的钻铤波能量集中在钻铤外壁,偶极源的径向位移信号的钻铤波能量集中在钻铤内壁。此外,钻铤按照单极情况的分析结果进行刻槽后,高频时的拖尾现象会影响偶极信号中舒尔特波对横波速度的反演。因此对钻铤进行周期性刻槽而削弱钻铤波时,刻槽方式还需根据声源和接收信号的类型进行讨论,避免出现适得其反的效果。

该研究对随钻测井中地层横波的反演和钻铤波的抑制具有实际意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Wang Hua, Tao Guo, Zhang Xujian. Review on the development of sonic logging while drilling[J]. Journal of Logging Technology, 2009, 33(3): 197-203.
- [3] Tang X M, Dubinsky V, Wang T, et al. Shear-velocity measurement in the logging-while-drilling environment: modeling and field evaluations[C]. SPWLA 43rd Annual Logging Symposium, 2002, 6: 2-5.
- [4] 苏远大, 庄春喜, 唐晓明. 随钻声波测井钻铤模式波衰减规律研究与隔声体设计[J]. 地球物理学报, 2011, 54(9): 2419-2428.
- [5] Su Yuanda, Zhuang Chunxi, Tang Xiaoming. LWD acoustic color mode wave attenuation character and isolator design[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(9): 2419-2428.
- [6] 刘彬, 王芳, 陈德华, 等. 周期性非轴对称孔槽结构隔声性能数值模拟研究[J]. 应用声学, 2012, 31(5): 333-338.
- [7] Liu Bin, Wang Fang, Chen Dehua, et al. Numerical simulation on acoustic insulation performance of periodic nonaxisymmetry groove structure[J]. Applied Acoustics, 2012, 31(5): 333-338.
- [8] 李希强, 陈浩, 何晓, 等. 横向各向同性地层中随钻声波测井模式波分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3212-3222.
- [9] Li Xiqiang, Chen Hao, He Xiao, et al. Analyses on mode waves of acoustic logging while drilling in transversely isotropic formations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3212-3222.
- [10] Wang P, Bose S, Sinha B K, et al. Dipole shear anisotropy using logging-while-drilling sonic tools[C]. SPWLA 57th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts. June, 2016: 25-29.
- [11] Hu H S, Zhang C, Zheng X B. Inversion of formation shear speed from dipole Scholte wave during logging while drilling in slow formations[C]. ICU 6th, Proceedings of Meetings on Acoustics, 2017, 32: 032004.
- [12] Aron J, Chang S K, Dworak R, et al. Sonic compressional measurements while drilling[C]. SPWLA 35th Annual Logging Symposium. Tulsa, Oklahoma: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1994.
- [13] Yang Y F, Guan W, Hu H S. Numerical study of the collar wave characteristics and the effects of grooves in acoustic logging while drilling[J]. Geophysics, 2017, 209: 749-761.
- [14] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社 2003.
- [15] 崔志文. 多孔介质声学模型与多极源声电效应测井和多极随钻声测井的理论与数值研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [16] 郑晓波. 单极和偶极随钻声波测井理论模拟与分波传播特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.