◇ 研究报告 ◇

软地层随钻测井仪器偏心情况下低频四极子源 激发波场的数值分析*

闫向宏17 朱 琳2 闫世鹏1 方恒忠1 杨喜峰1

(1 中国石油大学(华东)理学院 青岛 266580)(2 中国石油大学胜利学院教务处 东营 257061)

摘要:为了探索测井仪器偏心对随钻低频四极子波场的影响,利用有限元法(多物理场耦合有限元软件包)对 软地层井孔中随钻仪器偏心情况下低频四极子声源激发的波场进行了数值模拟。通过对随钻四极子测井波形 的分析可知,当采用低频随钻四极子偏心声源激发时,测井波列中除传播速度与低速地层横波速度相当的地 层四极子波模式外,还存在一个幅度非常低、传播速度略高于井孔流体中声速的模式波,该模式被对应钻铤弯 曲波模式,且该模式波的幅度随着随钻四极子源偏离井孔中心距离的增大呈二次方规律增大,地层四极子模 式波幅度呈三次方规律增加。

Numerical analysis of the low frequency quadrupole acoustic field excited by eccentric quadrupole source with eccentric logging instrument in soft formation

YAN Xianghong¹ ZHU Lin² YAN Shipeng¹ FANG Hengzhong¹ YANG Xifeng¹

(1 College of Science in China University of Petroleum East China, Qingdao 266580, China)

(2 Academic Affair Office in Shengli College China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: In order to explore the influence of logging instrument eccentricity on low frequency quadrupole wave field while drilling, numerical calculation on the low frequency quadrupole acoustic field excited by eccentric quadrupole source with eccentric logging instrument in soft formation by using the finite element method is carried out. According to the analysis results for the waveform of the quadrupole logging while drilling, when using low frequency eccentric quadrupole source to excite the quadrupole acoustic field, there are two different wave patterns in the received waveforms. In addition to the quadrupole wave pattern which propagation speed equivalent to the shear wave velocity in soft formation, also there is another kind of wave pattern with a very low amplitude and higher propagation speed than the borehole fluid velocity in front of the quadrupole wave pattern, this wave pattern is called drill collar bend wave pattern, the amplitude of this wave patterns enlarges according to quadratic low with the increase of eccentric distance of quadrupole source and the formation quadrupole wave pattern increase according to cubic rule.

Keywords: Acoustic logging while drilling; Quadrupole while drilling; Circular borehole; Eccentric quadrupole source

²⁰²¹⁻⁰⁵⁻²⁰ 收稿; 2021-11-29 定稿

^{*}国家自然科学基金面上项目 (11774433)

作者简介:闫向宏(1966-),男,陕西蓝田人,博士,教授,博士生导师,研究方向:声波测井与声学换能器。

[†]通信作者 E-mail: yanxh@upc.edu.cn

0 引言

声波测井是获取地层纵波速度、横波速度和孔 隙度的重要手段^[1]。电缆测井中采用偶极横波测井 来测量低速地层的横波速度^[2-3]。对于随钻声波测 井(Logging while drilling, LWD)而言,因钻铤占据 了井孔中的大部分空间,并且声波测量设备都固定 在钻铤上,原有的偶极横波测井理论已不适用随钻 过程中低速地层横波速度的测量[4-5]。为解决这个 问题,国内外学者对随钻过程中低速地层横波速度 的测量进行了理论探究,提出了采用低频随钻四极 子波测量低速地层的横波速度[6-10]。考虑到随钻 声波测井仪器用于斜井或者水平井测量时, 随钻声 波测量仪器的偏心会对井孔中波场特性产生影响。 文献[11-12]利用有限差分法对含偏心点源随钻声 波声波测井偶极子波场及随钻偏心单极子源波场 进行了研究^[13];文献[14]给出了随钻单极子波场的 解析解,并对高速地层、低速地层的波场的频散特 性进行了深入讨论; 文献 [15] 讨论了水平井和大斜 度井中多极声波随钻测井的波场,并对低频四极子 波源偏心角度与接收波形相位角之间的关系进行 了分析。但上述文献对随钻低频四极子偏心声源激 发波场频散特性及各模式波幅度随偏心距离的变 化规律研究比较少,为此有必要对低频随钻四极子 偏心声源激发波场的特性进行研究,有助于进一步 丰富完善随钻四极子波场理论及地层横波速度测 量技术。

1 低频随钻四极子声源激发波场的有限 元模型

利用多物理场耦合有限元软件包Comsolmultiphysics构建软地层井孔中低频随钻四极子 源激发波场的有限元模型如图1所示。图1中T为 声波发射换能器,它由4个圆心角为90°的圆柱面 组成,发射单元分别记为(T+,T-),其中T+两个 单元、T_两个单元相对放置,并且T+两个单元与 T_{-} 两个单元施加反向激励信号, $R_{1} \sim R_{6}$ 为接收 换能器阵列,间距为0.1524 m,每组接收换能器 R; 由4个圆心角为90°的圆柱面组成接收单元,并按 照一定的运算规则输出换能器R_i的测井接收波 形。发射、接收换能器都安装在钻铤上,钻铤内半 径 $r_0 = 0.027$ m, 外半径 $r_1 = 0.089$ m, 井孔半径 $r_2 = 0.12$ m, 地层外半径 0.5 m, 地层外表面为吸收 边界。在发射换能器T上加载余弦高斯激励脉冲信 号,激励信号的主频为2000 Hz,其时域波形及归一 化频谱如图2所示。



Fig. 2 Excitation source waveforms in time domain and normalized frequency spectrum

2 低频随钻四极子源在软地层井孔中激发 波场的数值模拟

在有限元软件中按照图1所示建立数值计算模型,其中并孔介质的参数见表1。分别计算低频随钻四极子声源居中或者偏心时激发的声场,利用接收换能器阵列获取相应的测井波形,并利用时间慢度相关(Slowness time coherence, STC)法^[16]和频散慢度分析(Dispersion slowness analysis, DSA)法^[17-18]对测井波形进行处理,分析声场特性。

表1 井孔介质参数表

Table 1 Parameters of borehole mediums

参数	井孔流体	低速地层	钻铤
横波速度 $/(m \cdot s^{-1})$		1200	3130
纵波速度 $/(m \cdot s^{-1})$	1470	2500	5860
密度 $/(kg \cdot m^{-3})$	1000	2300	7850

2.1 低频随钻四极子声源在井孔中激发波场 的特性

圆形井孔中居中低频四极子声源激发波场的 时域阵列接收波形如图3(a)所示,对时域接收阵列 波形进行STC法和DSA法处理,得到如图3(b)所 示的 STC 图及图 3(c) 所示的频散曲线。从图 3(a) 中可以看出,当低频随钻四极子声源与井孔轴线完 全重合时,发射单元或者接收单元相对于井孔均处 于完全对称状态,低频随钻四极子声波测井的阵列 波形具有比较清晰的到时起点,且只存在一种模式 波。由 STC 图可得该模式波的慢度所对应的声波速 度为 1200 m/s。由文献 [6,9–10]可知,随钻四极子 声源低频时只激发地层模式的四极子波,且截止频 率附近以地层横波速度传播。从图 3(c)可知模式波 具有频散特性,其频散曲线在截止频率(约 2.5 kHz) 处该模式波传播速度约为 1200 m/s,与正演计算输 入的地层横波速度(1200 m/s)基本相同,由此可知 该模式波为地层四极子波。

2.2 低频随钻偏心四极子声源在井孔中激发波场的特性

为了表述及研究问题的方便,假设选取低频 随钻四极子声源中心沿*x*轴方向偏离井孔轴线(对 其他偏心方向可采用相同方法处理)位置分别为 xoff = 0.00 m、0.005 m、0.01 m、0.015 m和0.02 m, 分别计算圆形井孔中偏心四极子声源激发的声场, 研究声源偏心位置对低频随钻四极子声波测井时 域波形的幅度及波动模式的影响规律。



图3 圆形井孔四极子中心源随钻四极子声波测井阵列波形、STC图和软地层四极子波频散曲线

Fig. 3 The full wave calculating result of LWD quadrupole array reception waveform, STC, and dispersion figure of quadrupole wave pattern for soft formation of the source in center of circle borehole using FEM method

图4给出了低频随钻四极子声源在不同偏心位 置时激发波场中同一接收器输出的随钻四极子声 波阵列波形。从该阵列波形图中可以看出,随着四 极子声源偏离中心,中心声源原来仅有的一个波包 (对应地层四极子模式波)的前面出现了另外一个幅 度很小的波包,由此可推断出在圆形井孔中四极子 声源偏心时,可激发出两种波动模式。为此选择四 极子声源偏心 xoff = 0.01 m 时的随钻四极子声波 测井阵列波形进行 STC 及 DSA 处理,给出相应的 低频随钻声波测井阵列波形、STC图及频散曲线图 如图5所示。从STC图中也能明显看到存在两种不 同速度的波动模式,其中幅度大的为地层四极子模 式波,在其前方出现了一种速度约为1530 m/s的波 动模式(该波动模式记为W模式波,文中下同)。由 图5(c)可以看出,W模式波传播速度随频率升高而 增大,也是弱频散的,在激励源主频处其传播速度 为1527 m/s,结合文献[10]中低频随钻多极子波的 频散曲线可知,该W模式波为钻铤弯曲波。由图4 中波形可看出,随着低频随钻四极子声源偏心距离 的增加,钻铤弯曲模式波和地层四极子模式波的幅 度都增大了,并且钻铤弯曲模式波的出现使得地层

模式波的到时起点变得不太清晰,其主要原因是由 于组成发射换能器的4个单元及组成接收换能器的 4个单元与井孔轴线间处于完全不对称状态,导致 各个接收单元输出信号存在差异,从而使低频随钻 四极子声波测井阵列波形中存在了两种波动模式, 并且其波形幅度与偏心距离有关。图6为低频随钻



图4 圆形井孔中声源偏心不同距离时同一位置的 测井接收波形

Fig. 4 The reception waveform at same position for different eccentric distance in circle borehole



图 5 圆形井孔中声源偏心 0.01 m 时随钻四极子声波测井阵列波形、STC 图及 W 模式波频散曲线 Fig. 5 The full wave calculating result of LWD quadrupole array reception waveform, STC figure, and W wave pattern dispersion figure for the source off center 0.01 m of circle borehole using FEM method

四极子声源偏心位置与两种波动模式的幅度之间 关系曲线,其中图6(b)利用井孔中居中声源时的地 层四极子波幅度对偏心声源地层四极子模式波的 幅度进行了归一化处理。钻铤弯曲模式波幅度随着 偏心距离的增大呈现二次方规律增加,而地层四极 子模式波的幅度随着偏心距离的增大呈现三次方 规律增加,并且当偏心距离大约为井孔半径的15% 时,地层四极子模式波幅度达到极大值。



图6 声源偏心位置对圆形井孔中随钻四极子声波 测井波形幅度影响曲线

Fig. 6 Amplitude curve vary with the eccentric position for the W wave pattern and the formation quadrupole wave pattern

3 结论

(1)低频随钻四极子偏心声源在低速地层井孔 中会激发两种波动模式,一种是传播速度与低速地 层横波速度相当的地层模式波,另一种是传播速度 高于井孔流体声速的模式波(W模式波即钻铤弯曲 模式波);

(2) 在随钻四极子声波测井接收波形中,钻铤弯 曲模式波幅度很低且位于四极子模式波的前方,因 此会造成地层四极子模式波没有清晰的波至点,因 此必须探索更有效的低速地层横波速度提取方法;

(3)随着低频四极子偏心声源离开井孔中心距离的增大,钻铤弯曲模式波的幅度按照二次方规律增大,而地层四极子模式波的幅度按照三次方规律增加,当偏心距离大约是井孔半径的15%时,地层四极子波幅度达到极大值。

参考文献

 朱祖扬.随钻声波测井技术发展现状 [J]. 石油管材与仪器, 2015, 1(6): 6-9, 15.
 Zhu Zuyang. Development of acoustic logging while

drilling tool[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(6): 6–9, 15.

- [2] 仇海亮,夏宏泉,杨双定,等.基于偶极横波测井资料估算低 孔裂缝性地层渗透率 [J].国外测井技术, 2014, 14(1): 47-50.
- [3] 张峰,张海忠,陈颖杰,等. 偶极横波测井原理与应用[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(1): 64-66, 70.
- [4] Hsu C J, Sinha B K. Mandrel effects on the dipole flexural mode in a borehole[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(4): 2025–2039.
- [5] 张超,胡恒山. 偶极随钻声波测井声场响应中导波的分析 [C].
 2018年全国固体力学学术会议摘要集(下), 2018: 573.
- [6] Tang X M, Wang T, Patterson D. Multipole acoustic logging-while-drilling[C] //72nd Annual International Meeting. Salt Lake City, Utah: SEG, 364–367.
- [7] Wang T, Tang X M. Finite-difference modeling of elastic wave propagation: a nonsplitting perfectly matched layer approach[J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1749–1755.
- [8] 崔志文,王克协,刘金霞,等.多极源随钻声波测井的理论与数值研究 [C].中国地球物理学会第二十届年会论文集,2004: 128.
- [9] 唐晓明, 郑传汉. 定量测井声学 [M]. 赵晓敏, 译. 北京: 石油 工业出版社, 2004.
- [10] 苏远大,孙建孟,范宣仁,等.基于软地层随钻多极子声源传播特性的数值研究 [J]. 测井技术, 2006, 30(3): 205–207. Su Yuanda, Sun Jianmeng, Fan Yiren, et al. On numerical study of the LWD multipole source propagation characteristics in slow formation[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(3): 205–207.
- [11] 卫建清,何晓,李希强,等.含偏心点声源的随钻测井声场模 拟和地层各向异性反演研究 [J].地球物理学报,2019,62(4): 1554–1564.

Wei Jianqing, He Xiao, Li Xiqiang, et al. Simulation of acoustic LWD with an eccentric source and inversion of formation anisotropy[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(4): 1554–1564.

- [12] 王瑞甲, 乔文孝. 含偏心钻铤充液井孔中正交偶极子声波测井的数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(6): 2013–2023.
 Wang Ruijia, Qiao Wenxiao. Numerical study of cross-dipole acoustic logging in fluid-filled borehole with an eccentric drill collar[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6): 2013–2023.
- [13] Wei J, He X, Chen H, et al. Wavefield characteristics of unipole sonic LWD with eccentric tools[C]. 2018 SEG International Exposition and 88th annual Meeting, 2018: 734–738.
- [14] Ji Y, He X, Chen H, et al. Acoustic fields for monopole logging while drilling with an eccentric collar[J]. Geophysics, 2021, 86(2): D43–D63.
- [15] Wang H, Tao G, Fehler M C, et al. The wavefeld of a multipole acoustic logging-while-drilling tool in horizon-

tal and highly deviated wells[C]. SPWLA 56th Annual Logging Symposium, 2015.

- [16] Kimball C V, Marzetta T L. Semblance processing of borehole acoustic array data[J]. Geophysics, 1984, 49(3): 274–281.
- [17] 苏远大,乔文孝. 一种提取声波测井频散波相慢度的方法 [J]. 测井技术, 2003, 27(5): 364–368, 445.
 Su Yuanda, Qiao Wenxiao. A method to extract phase slowness of dispersive wave from sonic logging data[J].
 Well Logging Technology, 2003, 27(5): 364–368.
- [18] 孙志峰, 樊官民, 孟杰. 一种提取声波测井频散波相慢度的 适应函数方法 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2011, 41(4): 1239–1245.

Sun Zhifeng, Fan Guanmin, Meng Jie. A method of fitting function to extract phase slowness of dispersive wave from sonic logging data[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(4): 1239–1245.