◇ 研究报告 ◇

井孔中多极源在分层介质中的声场模拟方法*

邓 英1,2,4† 陈 浩1,2,4 于其蛟3

(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 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中石化胜利石油工程有限公司测井公司 东营 257061)

(4 北京市海洋深部钻探测量工程技术研究中心 北京 100190)

摘要 水平分层地层是常见的地质模型,为了解声波在其中的传播规律,需要对该模型进行数值模拟,通常采用时域有限差分方法。然而对于地下数百米井段,如何提高计算效率,是必须考虑的问题。本文提出了一种可以动态获取计算区域的方法,保证在模拟结果可靠的情况下计算区域最小,并通过算例验证该方法的有效性。 当发射器位于接收器下方,并且距离仪器下方最近的分层边界超过 2.0 m时,位于仪器下方的所有分层介质可 以在计算中忽略不计。对于位于阵列接收器上方的分层边界也同样采用类似的策略。本文利用该方法模拟了 多层介质中单偶极声波测井响应,从中提取的纵横波速度与介质参数一致。

关键词 分层介质,声场模拟,井孔,多极子声源,优化

中图分类号: O429 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)06-0555-04 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.012

Simulations of multipole acoustic waves in a borehole surrounded by layered media

DENG Ying^{1,2,4} CHEN Hao^{1,2,4} YU Qijiao³

(1 State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Well Logging Company of Shengli Petroleum Engineering Co., LTD, SINOPEC, Dongying 257061, China)

(4 Beijing Engineering Research Center for Offshore Drilling Exploration and Measurement, Beijing 100190, China)

Abstract Horizontal layered formation is a common geological model, to obtain the response of acoustic logging in this media, we need to use the numerical simulation such as finite difference time domain. However, it is necessary to consider the strategy to solve the simulation of the sound field of the hundreds of meters underground, how to improve the calculation speed has to be considered. In this paper, we propose a simulation method for dynamic computing region, and give the optimization scheme of the region selection, and the effectiveness of the method is verified by numerical examples. It is shown that when the source is more than 2.0 m above from the nearest bed boundary, all layers beneath the logging tool can usually be ignored in the computation. The layers above the last receiver should be treated similarly. Two numerical examples, for monopole and dipole logging respectively, are presented to validate the developed program.

Key words Layered medium, Acoustical simulation, Borehole, Multipole source, Optimization

²⁰¹⁶⁻⁰⁸⁻²⁴ 收稿; 2017-08-27 定稿

^{*}国家自然科学基金项目 (11574347, 11374322)

作者简介:邓英(1980-),女,山西襄汾人,博士研究生,研究方向:信号与信息处理。

[†]通讯作者 E-mail: dengying@mail.ioa.ac.cn

1 引言

水平分层地层是最常见的地质结构。为了改进 用于现场勘探的声波测井资料处理方法,有必要研 究水平多层介质模型中的井孔声场。对于这类非均 匀地层井孔模型,弹性波动方程没有解析解,井孔声 场也无法通过如实轴积分等方法模拟,只能使用数 值算法进行模拟。时域有限差分法是进行波场数值 模拟的有力方法。Stephen等^[1]最早提出了应用于 单极源(即对称声源)井孔声场计算的二维有限差 分算法,他们模拟了含冲刷井段(径向非均匀模型) 的声波测井响应。Randall等^[2]进一步发展用于多 极源声波测井的数值模拟方法,并模拟了更为复杂 情况下的声波响应,包括非均匀井径、地层水平分 层、轴线非均匀等模型。Wang和Tang^[3]则提出了 弹性波方程有限差分算法的非分裂完全匹配层,提 高了吸收边界的效果以及有限差分的计算效率,他 们还模拟了横向各向同性地层中的四极子随钻声 波测井的声场。这些基于模型轴对称假设的二维时 域有限差分,可以极大地提高声波测井声场响应模 拟的效率。

然而对于井下数百米甚至数千米长井段的井 孔声场模拟,因计算区域太大,即使采用二维轴对称 算法也难以连续模拟各深度的声波测井响应。在计 算中通常只能截断某一部分作为计算区域。如何在 连续多层介质中最大化地减小计算区域,提高计算 速度和节省内存,并且不影响数值模拟的结果,是我 们必须考虑的问题。本文将着重考察这个问题,给 出计算区域选取的优化方案,并通过算例验证其有 效性和正确性。

2 计算模型和计算方法

为考察多层地层中界面与声源/接收器的距离 对测井响应的影响,我们采用了如图1的分层介质 模型,并假设无限长充液井孔垂直贯穿水平分层介 质。建立柱坐标系(r,θ,z),并以井轴为对称轴。

在图1的三层介质模型中,从上至下分别是地 层1、地层2和地层3,我们假设仪器分布在位于中 间的地层2中,其中下方的声源与地层3边界距离 为L₂₃,上方最远端接收器与地层1距离为L₁₂。本 文将通过算例分析这些边界距离对测井全波响应 的影响大小。其中井孔在图中没有显示出来,图中 圆圈表示声源,三角形表示距离声源最远端的接 收器。



图1 三层介质模型示意图



2.1 波动方程及其有限差分

对于地层,弹性波运动方程和本构方程用速度 分量V和应力分量 ~ 可表达为

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{V}}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = C \left(\nabla V + V \nabla \right),$$
 (2)

式(1)~(2)中*t*表示时间,*C*表示弹性系数矩阵,对 于对称轴与*z*轴一致的横向各向同性介质,它可 表示为

$$\boldsymbol{C} = \begin{pmatrix} C_{11} \ C_{12} \ C_{13} \ 0 \ 0 \ 0 \\ C_{12} \ C_{11} \ C_{13} \ 0 \ 0 \ 0 \\ C_{13} \ C_{13} \ C_{33} \ 0 \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ C_{44} \ 0 \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ C_{44} \ 0 \\ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ C_{66} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

其中 $C_{12} = C_{11} - 2C_{66}, C_{11}, C_{33}, C_{13}, C_{44}$ 和 C_{66} 是独立的弹性系数;而当 $C_{11} = C_{33} = \lambda + 2\mu$, $C_{13} = \lambda, C_{44} = C_{66} = \mu$ 时,横向各向同性退化为 各向同性。为了解上述的偏微分方程,本文采用二 维时域有限差分算法进行数值模拟^[3-4]。

2.2 数值模拟和算例分析

在数值模拟算例中,我们将考察地层分界面与 换能器距离对接收响应的影响。如果反射波与直达 波无重叠、或者到时在接收时间窗之外,则可以认 为边界对测井响应模拟结果的影响可忽略。此时在 模拟中,可将含分层界面一端用均匀介质代替,从而 缩小计算区域,提高模拟效率。 表1列出数值模拟中的介质参数,假设井孔半 径为0.1 m,单极源中心频率为8 kHz,偶极源中心 频率为3 kHz。

表1 数值模拟中的介质参数

Table 1Media parameters in numericalsimulation

介质	密度 (kg/m ³)	纵波速度 (m/s)	横波速度 (m/s)
井内流体	1000	1500	
地层2	2000	2200	1400
地层3	2400	4500	2800

图2和图3分别是分层和均匀介质中单极源、 偶极源声波测井响应结果比较,其中红色曲线代表 分层介质,黑色曲线代表均匀介质。当声源离下边 界距离L₂₃为0.5 m时,不论是单极还是偶极源,测 井响应中反射波和直达波重叠在一起无法分开,因 而在测井曲线的采样时窗(通常是 < 5 ms)内,分层 介质和均匀介质的波场模拟结果具有很大的差别。因而此时介质下层边界在模拟中不可忽略,在有限差分计算时,计算区域应包含下层边界,以确保计算的准确性。下层边界不断增大时,反射波与直达波逐渐分开。当L₂₃为2.0 m时,反射波完全与直达波分离,并且在0~5 ms时窗内,分层介质与均匀介质的响应完全一致,此时在数值正演计算中可以忽略下层边界的存在,即将计算区域的下截断边界设为声源位置即可,从而减小计算区域范围,节省计算内存、提高速度。

对于上层边界与最远端接收器的距离关系,根 据声学互易原理,也可以采用相同的策略确定计算 区域上边界的位置。综上所述,为了提高数值模拟 时的处理速度并节省内存,需要优化截取计算区域 的范围。所有的分层介质都可以归为图1模型,只 需考虑下层边界与发射器的距离、以及上层边界与 最远端接收器的位置关系。根据上文的数值模拟和



图2 分层介质与均匀介质单极源响应比较

Fig. 2 Comparison of monopole source response of layered medium and homogeneous medium





Fig. 3 Comparison of dipole source response of layered medium and homogeneous medium

讨论结果,计算区域上、下边界的截取共可以分为以下几种情况:如果 L₁₂或 L₂₃ 大于 2.0 m,相应的上或下层边界可以完全忽略不计,从而可将最远端接收器或声源位置设为计算区域截断边界;如果 L₁₂ 或 L₂₃ 小于 2.0 m,则将上或下边界所在位置作为计算区域截断边界。这样,计算区域的范围可以实现最小化,如图4所示。





Fig. 4 The selection strategy of the boundary in the simulation area



图5 连续模拟的水平多层地层测井响应纵、横波速 度提取结果

Fig. 5 Velocity of primary wave and shear wave in the horizontal multilayer formation

最后,本文采用这种计算区域优化策略,实现 了对井下各深度点测井曲线的连续模拟。假设计算 模型为层厚度只有3.0 m的多层介质,采用上文提 到的边界选取方法,本文数值模拟了每个深度的声 波测井响应,对模拟得到的波列曲线利用时间-慢度 相似相关法^[5]进行速度提取,结果与模型的输入速 度参数一致。图5是连续模拟的水平多层地层测井 响应纵、横波速度提取结果,图中黑色表示纵波速 度,红色表示横波速度,其中图5(a)为单极源的对 比情况,图5(b)为偶极源的对比情况,从图5中可以 看出根据模拟结果所提取的速度与模型速度基本 一致。在局部层模拟值速度和实际模型速度稍有偏 差,引起这一偏差的原因主要有两方面,一是模型的 分层较薄,二是层间速度变化较大。这证实了计算 区域选取方法的可行性。

3 讨论及结论

在模拟多层地层中的声波测井响应时,采用适 当的优化方案选取最小的数值计算区域,是提高仿 真速度、节省计算内存的有效方法。本文研究结果 表明:当声源或最远端接收器距离最近的地层边界 大于2.0 m时,相应的地层边界在数值模拟时可忽 略不计,此时可以声源或最远端接收器的轴向位置 作为计算区域的边界;否则,如果地层边界距离声 源或最远端接收器小于2.0 m,计算区域应包含该 边界。数值模拟结果表明,采用这种计算区域选取 策略,可以满足测井曲线模拟和速度提取精度的需 求。本文将在今后的工作当中采用这种计算区域优 化策略对各向异性分层模型进行多极源井孔声场 的数值模拟和分析。

参考文献

- STEPHEN R A, CARDO-CACAS F, CHENG C H. Finite-difference synthetic acoustic logs[J]. Geophysics, 1985, 50(10): 1588–1609.
- [2] RANDALL C J, SCHEIBNER D J, WU P T. Multiple borehole acoustic waveforms: Synthetic logs with beds and borehole washout[J]. Geophysics, 1991, 56(11): 1757–1769.
- [3] WANG T, TANG X. Finite difference modeling of elastic wave propagation: A non-splitting perfectly matched layer approach[J]. Geophysics, 2003, 68(5): 1749–1755.
- [4] HE X, HU H, GUAN W. Fast and slow flexural waves in a deviated borehole in homogeneous and layered anisotropic formations[J]. Geophys. J. Int., 2010, 181(1): 417–426.
- [5] KIMBALL C, MARZETTA T L. Semblance processing of borehole acoustic array data[J]. Geophysics, 1986, 49(3): 274–281.