

· 测井技术应用 ·

应用低频斯通利波频散特性 反演软地层横波速度

马建海*^① 孙建孟^① 徐小蓉^② 闫萍^①

(^①中国石油大学(华东)地球资源与信息学院,山东东营 257061;

^②中国石油集团测井有限公司青海事业部,甘肃敦煌 736202)

马建海,孙建孟,徐小蓉,闫萍. 应用低频斯通利波频散特性反演软地层横波速度. 石油地球物理勘探, 2010, 45(4): 592~596

摘要 求取软地层横波速度是提高声波测井工程质量的重要因素。本文首先基于简化的 Biot-Rosenbaum 模型,对低频斯通利波频散特性的敏感性进行了分析。在软地层情况下,斯通利波对地层横波速度较为敏感,当利用偶极声源测不到横波时,可利用斯通利波反演地层横波速度。此外还分析了在软地层情况下仪器对斯通利波频散曲线的影响,指出利用斯通利波反演地层横波速度应考虑仪器的影响。文中给出利用斯通利波反演横波速度的方法及流程。应用实例表明,用低频斯通利波频散特性反演软地层横波速度的方法是有效的。

关键词 软地层 斯通利波 频散特性 反演 横波速度

1 引言

在涉及油田勘探开发地震数据处理及解释中均须知道测井横波速度,比如叠前弹性阻抗反演、AVO及AVA反演等都需要用已知井的横波信息进行约束。目前求取准确的横波速度主要依赖于测井资料。近年来,多极子阵列声波测井技术^[1]的问世与使用,使人们能够从声全波资料中更为有效地提取地层横波速度。理论上利用偶极声源可以测量任意地层的横波速度^[2]。但在地层横波速度小于井内泥浆软地层的纵波声速时,由于受井况变化、测井的操作过程(主频选取等)以及高温、高压下仪器的稳定性等因素影响,偶极声源不能保证全井段均能测量到横波速度。也就是说,完全依靠偶极声源资料提取地层横波速度也不现实。但是,偶极声源资料中的低频单极斯通利波相对稳定,且对地层横波速度非常敏感,因此,在偶极声波测井中测不到横波时,可利用斯通利波反演地层横波速度^[3]。

本文基于简化的孔隙介质 Biot-Rosenbaum 模

型^[4],对软、硬地层情况下斯通利波频散曲线及敏感性进行分析,考虑测井仪器对斯通利波的影响,利用最小二乘法,由井孔斯通利波理论的频散曲线和从现场资料提取的频散曲线反演地层横波速度,与偶极声波测量的横波速度进行对比,结果基本一致。

2 基于简化 Biot-Rosenbaum 模型斯通利波频散特性敏感性分析

从孔隙介质 Biot-Rosenbaum 模型的理论推导可看出,由于孔隙岩石的弹性参数与流体流动有关的参数相互耦合,导致求解繁琐,特别是反演计算效率低。但是,将模型中的流体流动和弹性效应分开考虑,反演效率会大大提高。

通过对 Biot-Rosenbaum 模型的简化^[4],即可得到孔隙地层的斯通利波波数计算公式

$$k = \sqrt{k_c^2 + \frac{2i\alpha_{pf}\omega\kappa R}{\eta(R^2 - r^2)}} \sqrt{-i\omega/D + k_c^2} \frac{J_1(x)}{J_0(x)} \quad (1)$$

其中

$$D = \kappa K_f / \phi\eta(1 + A)$$

* 甘肃省敦煌市中国石油青海油田公司勘探事业部,736202

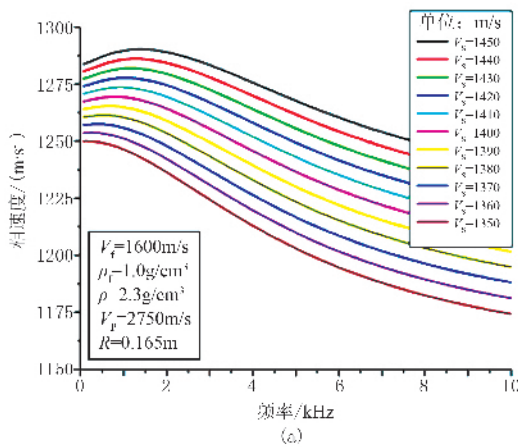
本文于2009年8月25日收到,第一次修改稿于同年12月24日收到,最终修改稿于2010年6月10日收到。

$$A = \frac{K_f}{\phi K} \left[(1-a)(a-\phi) + a^2 \left(1 + \frac{4\mu}{3K} \right)^{-1} \right]$$

$$a = 1 - K/K_s$$

式中: R 为井孔半径; r 为仪器半径; η 为孔隙流体的黏滞系数; ρ_{pf} 为泥浆密度; κ 为渗透率; k_e 为等效地层的斯通利波波数; $J_0(x) = J_0(R\sqrt{-i\omega/D+k_e^2})$, $J_1(x) = J_1(R\sqrt{-i\omega/D+k_e^2})$ 分别为零阶和1阶虚宗量贝赛尔函数; ϕ 是孔隙度; K 和 μ 分别是岩石骨架的体变模量及剪切模量; K_s 为岩石颗粒的体变模量; K_f 是孔隙流体的体变模量。

据文献[5]的研究表明,低频段简化的 Biot-Rosenbaum 模型是完备 Biot 模型的一种极好近似。



因此在本文的反演过程中,利用简化模型计算斯通利波的频散曲线可以提高反演效率。

基于 Biot-Rosenbaum 简化模型数值模拟表明,斯通利波的频散特性主要受地层参数、井径和泥浆等参数的影响。图 1 分别给出软、硬地层斯通利波频散曲线随地层横波速度变化的情况。从图中可以看出,在其他条件不变的情况下,井孔中斯通利波的频散曲线对地层的横波速度非常敏感。

图 2 给出软地层纵、横波速度 V_p 、 V_s 、泥浆声速 V_f 、地层泥浆密度比 ρ/ρ_f 、井径 R 、地层孔隙度 ϕ 和渗透率 κ 等参数对斯通利波频散特性的敏感性曲线。从图中可看出,软地层的横波速度对斯通利波

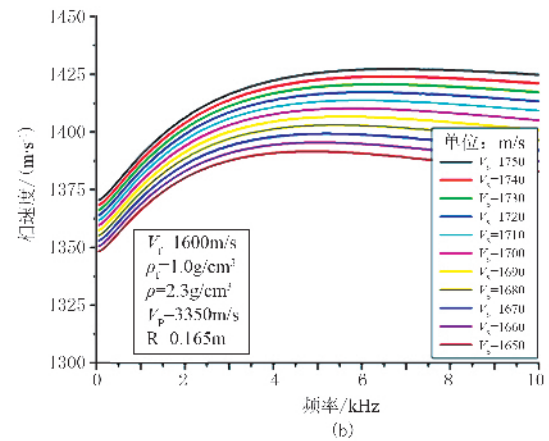


图 1 软、硬地层斯通利波频散曲线与地层横波速度的关系

(a)软地层; (b)硬地层

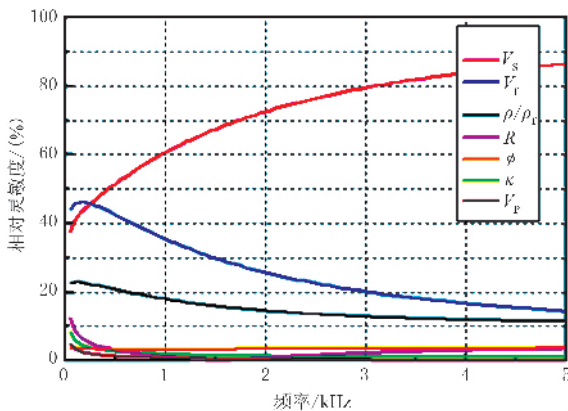


图 2 软地层斯通利波敏感性分析曲线

的频散特性影响最大,接近 70%~80%;泥浆声速和密度比次之,分别接近 20%~40%和 10%~20%;其他参数的影响均小于 5%。因此对斯通利波频散曲线的敏感性分析,可为在软地层情况利用斯通利波反演地层横波速度奠定基础。

3 测井仪器对斯通利波影响

低频斯通利波是一种沿着井壁液体和固体界面传播的导波,测井仪器的存在占据了井内流体的空间,势必对斯通利波的传播产生影响。本文利用文献[4]提出的模拟测井仪器的简化模型,讨论测井仪器对斯通利波的传播以及反演问题中的影响。

图 3a 给出软地层情况有仪器存在和没有仪器存在的斯通利波频散曲线。图中黑线是没有仪器情况的斯通利波相速度频散曲线,红线是有仪器存在情况的斯通利波相速度频散曲线。从图中可看出,测井仪器的存在可以大大减小斯通利波的传播速度,并改变其频散曲线的特征。图 3b 给出有、无仪器存在时地层横波速度、井内流体速度、密度比和井径等参数对斯通利波频散特性的敏感曲线,图中黑线是没有仪器存在时的敏感曲线,红线是有仪

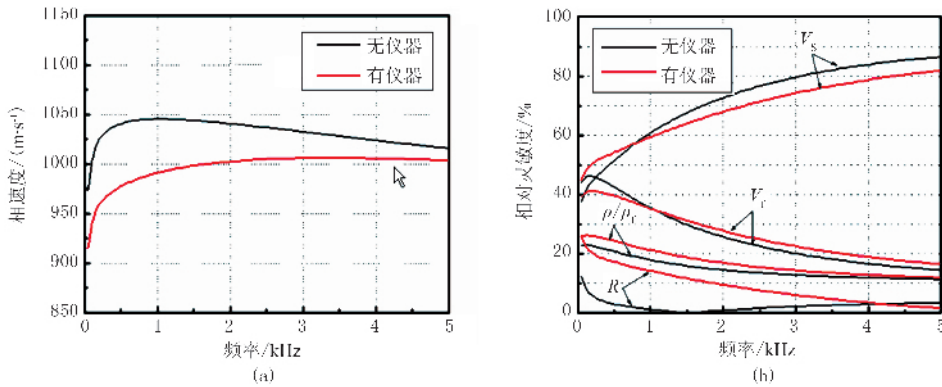


图3 软地层条件下仪器对斯通利波频散曲线的影响(a)及其敏感性分析对比(b)

器存在时的敏感曲线。从图中可看出,仪器的存在也改变了地层参数、泥浆参数等对斯通利波的敏感性,尤其是井径对斯通利波的敏感程度改变较大。但是测井仪器的存在对我们最关心的地层横波速度的敏感性影响不大,在低频时(小于1kHz)地层横波速度的敏感性略有增加,高频时敏感性略有降低。

因此,综合考虑测井仪器对斯通利波传播速度和地层横波速度敏感性的影响,分析实际斯通利波的测井数据时必须考虑仪器影响,利用斯通利波频散特性反映地层横波速度时要进行仪器标定,仪器标定方法参考文献[5]。

4 反演方法及流程

以孔隙介质模型为基础,利用最小二乘法由井孔斯通利波理论的频散曲线和从现场资料提取的频散曲线反演地层横波速度。具体方法如下:

(1) 计算斯通利波的频谱,并确定斯通利波主频;

(2) 用连续相位谱法^[5]等从现场阵列斯通利波资料中提取斯通利波模式的相速度频散曲线;

(3) 在斯通利波主频附近,调整地层横波速度,再利用最小二乘法使理论和提取的斯通利波频散曲线差异最小,进而反演出地层横波速度。

图4为斯通利波反演横波速度流程图。图5给出软地层(横波速度由1150m/s以10m/s为步长增加1250m/s)的斯通利波频散理论曲线以及从理论合成波形提取的斯通利波频散曲线,小圈为提取的斯通利波相速度频散曲线,实线为理论计算的结果。从图中可看出,横波速度为1200m/s时的理论频散

曲线在1.5~3.0kHz频率范围内与提取的频散曲线吻合很好。

图6给出软地层不同频段的理论与提取频散曲线的差异,横坐标为地层横波速度,纵坐标为频散曲线的差异。从图中可看出,当两曲线的差异接近0时为反演所求的地层横波速度。在软地层情况时,利用该方法反演的地层横波速度与理论计算选用的地层横波速度非常吻合。

图7给出从现场斯通利波提取的频散曲线(小圈)、没考虑仪器情况利用反演的横波速度计算的斯通利波频散曲线(黑线)和考虑仪器存在用反演的横波速度计算的频散曲线(红线)。从图中可看出,考虑仪器存在情况,利用反演的地层横波速度计算的频散曲线与提取的结果吻合较好,斯通利波反演的横波速度与偶极资料测量的横波速度也非常接近。

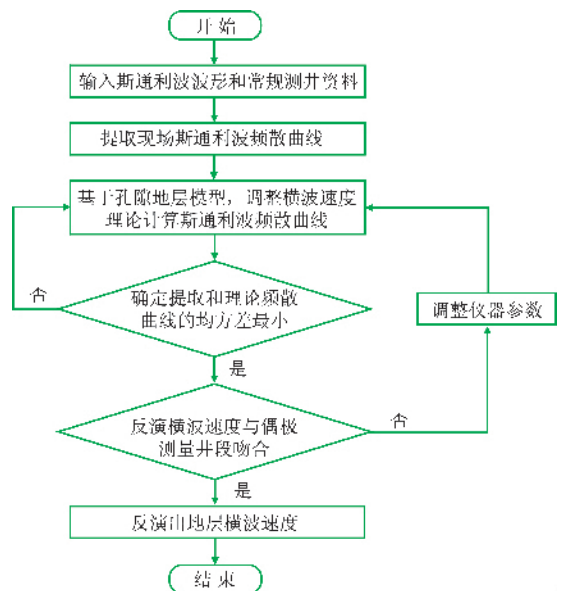


图4 斯通利波反演横波速度流程

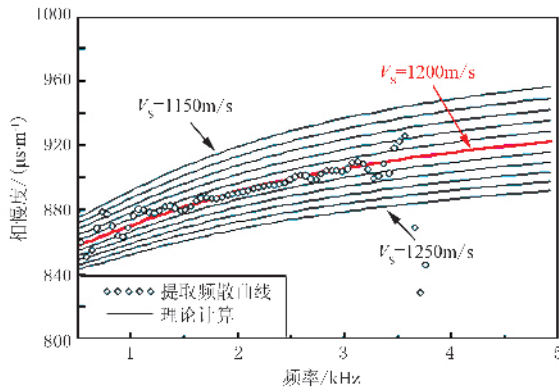


图 5 软地层斯通利波频散曲线和理论计算与提取频散曲线的差异

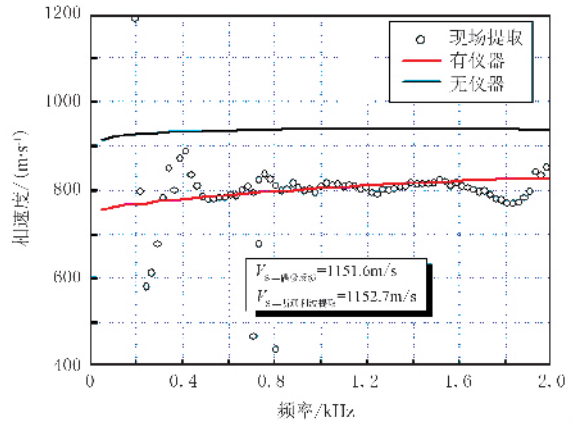


图 7 现场软地层斯通利波提取的频散曲线和反演横波速度理论计算的频散曲线

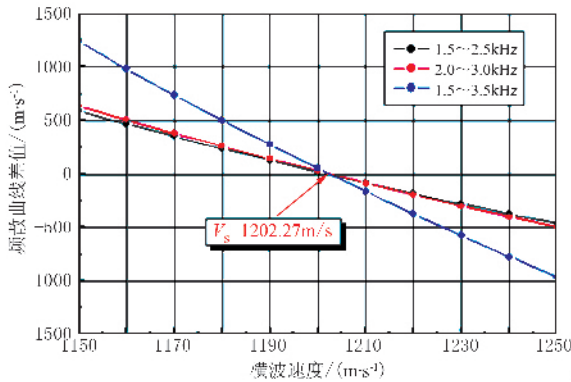


图 6 软地层不同频段理论与提取频散曲线的差异

5 处理实例及分析

图 8 给出 DSI 在某软地层井段测量的斯通利波反演横波速度的处理结果。图中第 1 道为自然伽马和井径曲线;第 2 道为单极低频模式斯通利波波形;第 3 道为利用慢度—时间相关法(STC)得到的斯通利波相关系数平面和斯通利波时差;第 4 道为偶极波形;第 5 道为利用慢度—时间相关法(STC)得到的弯曲波相关系数平面和横波时差;第 6 道为纵波

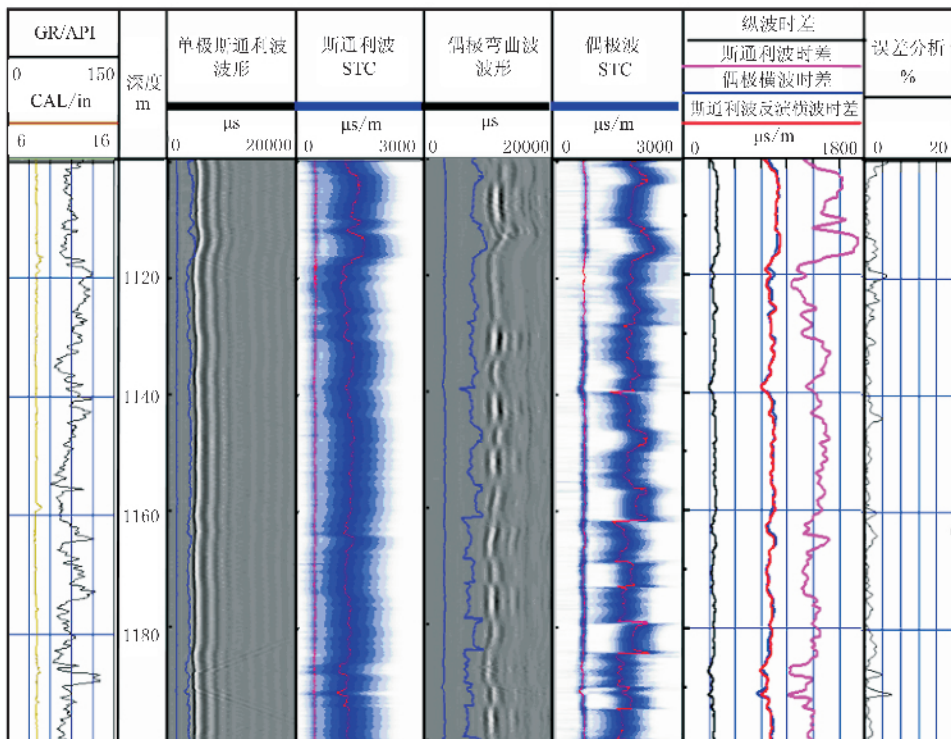


图 8 软地层现场斯通利波反演横波速度的处理实例

时差(黑线)、斯通利波时差(粉线)、偶极测量的横波时差(蓝线)和斯通利波反演的横波时差,可以看出反演的横波时差与测量的横波时差吻合很好;第7道为横波的误差分析曲线,可以看出反演结果与测量结果的误差在3%以下。处理结果充分表明,利用斯通利波反演地层横波速度的结果相对比较可靠,尤其是在软地层情况下反演结果与实测结果的

误差更小,这与理论的敏感性分析结论相吻合。

图9给出另一段软地层(2000~2200m)现场斯通利波反演横波速度的处理实例,利用偶极提取的横波时差在整个井段出现错误,而利用斯通利波反演的结果更合理,进一步证明了用低频斯通利波频散特性反演软地层横波速度优于偶极提取横波时差。

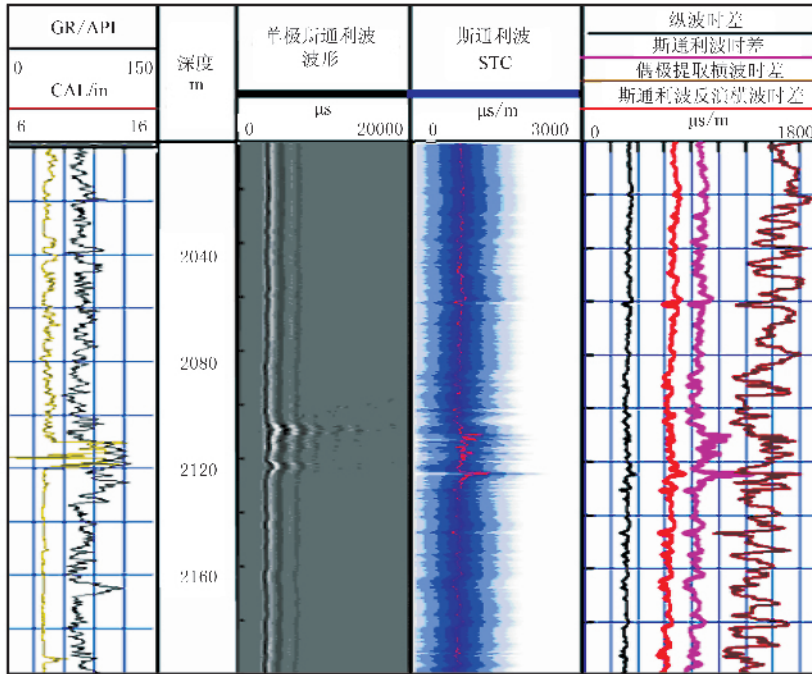


图9 软地层现场斯通利波反演横波速度的处理实例

6 结论

(1)在低频区,简化的 Biot-Rosenbaum 模型是完备 Biot 模型的一个极好近似,在反演过程中利用简化模型计算斯通利波的频散曲线可以提高反演效率。

(2)在软地层情况下,单极斯通利波速度对地层横波速度最为敏感,而在偶极声波测不到横波时,可利用频散的斯通利波反演地层横波速度。

(3)井孔斯通利波的传播受测井仪器的影响比较严重,在利用斯通利波反演地层横波速度时必须考虑仪器的影响。

(4)以孔隙介质模型为基础,利用最小二乘法由井孔斯通利波理论的频散曲线和从现场资料提取的频散曲线反演地层横波速度,结果可靠,尤其是在软地层情况反演结果与实测结果的误差更小。

参考文献

- [1] 原宏壮. 多极子声波测井. 测井与射孔, 2001, 2: 28~33
- [2] Chen S T, Willen D E. Shear wave logging in slow formation. *SPWLA Trans 25th Ann Logging Sympos*, 1984
- [3] Tang X M, Reiter E C and Burns D R. A dispersive-wave processing technique for estimating formation shear velocity from dipole and Stoneley waveforms. *Geophysics*, 1995, 60(1): 19~28
- [4] Tang X M, Cheng C H, Toksoz M N. Dynamic permeability and borehole Stoneley waves: A simplified Biot-Rosenbaum model. *J Acoust Soc Am*, 1991, 90: 1632~1646
- [5] 伍先运, 余仕成, 王克协. 利用斯通利波速度反演地层横波速度的方法与应用研究. 地球物理学报, 1995, 38(增刊1): 216~223
- [6] 苏远大, 乔文孝. 一种提取声波测井频散波相慢度的方法. 测井技术, 2003, 27(5): 364~368

(本文编辑:冯杏芝)