

文章编号: 1671-8585(2010)01-0016-05

Gassmann 模型机理分析及其应用

李 燕, 刘浩杰, 王玉梅

(中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257061)

摘要: 岩石物理理论模型是地震岩石物理研究的基础。分析了 Gassmann 模型的机理, 探讨了该模型的适用性和关键参数。在此基础上, 提出了基于 Gassmann 模型正反演相结合的横波速度曲线优化估算方法, 通过对 Gassmann 模型的解析和转换推导, 分析了横波计算误差的影响因素, 研究了孔隙流体区分的敏感属性参数优选方法。研究结果为利用地震资料进行储层表征和流体预测提供了实用技术系列和指导方法。

关键词: 机理分析; Gassmann 模型; 横波速度; 敏感属性参数

中图分类号: P631.9

文献标识码: A

岩石物理性质及其变化如何反映在地震属性上的研究是用地震及测井资料进行储层研究和油气检测的理论基础。从目前国内外研究的现状看^[1,2], 岩石物理研究当前的难点主要在于岩石物理模型建立及适用性研究。一方面, 基于地震波在岩石中传播的规律, 建立尽可能确切的岩石物理性质各因素间相互联系的理论模型, 是岩石物理研究的基础; 另一方面, 要明确不可能得到一种普遍的理论模型或者经验公式。因此具体应用时, 必须了解各自的适用范围、假设条件和关键参数, 即对其机理进行研究, 简单的外推可能导致错误的结果。

经过几十年的发展, 专家们根据不同的假设条件, 提出了不同的岩石物理理论模型^[3]。Gassmann 建立了反映速度和孔隙度以及孔隙流体模量相互关系的 Gassmann 方程^[4], 成为岩石物理理论模型建立的里程碑。在此基础上所建立的流体饱和和多孔介质理论、气体包裹体模型、喷射流模型、BISQ 模型等^[3], 极大地丰富了饱和岩石介质的弹性波传播理论。不同的理论模型有其不同的适用条件、应用重点、考虑因素及关键参数。而且, 很多理论模型并不是孤立的, 而是相互联系的, 在相同的假设条件及制约因素下基本等价, 复杂假设条件下的理论模型可以转换为简单条件下的模型。其中, Gassmann 模型是最经典和最基础的模型, 在实践中得到了广泛应用。

本文从 Gassmann 模型的原理出发, 分析了其适应性和关键参数, 研究了其在横波估算和孔隙流体参数识别方面的应用。

1 Gassmann 模型机理分析

假设: ①岩石(固体和骨架)宏观上是均匀的;

②所有的孔隙是相互连通的; ③孔隙中填充的流体(液体、气体和混合物)无摩擦效应; ④岩石-流体组成的系统是封闭的; ⑤孔隙流体和固体间不相互作用。基于这些条件, Gassmann 导出了流体饱和和多孔介质的弹性模量与岩石骨架模量、孔隙及流体模量之间的关系, 其数学表达式为

$$\frac{K_e}{K_e - K_s} = \frac{K_d}{K_d - K_s} + \frac{K_f}{\varphi(K_f - K_s)} \quad (1)$$

$$\mu_e = \mu_d \quad (2)$$

式中: K_f, K_s, K_d, K_e 分别为有效流体、固体矿物、干骨架及流体饱和介质的体积模量; μ_e, μ_d 分别为饱和介质和干骨架的剪切模量; ρ_e, ρ_d, ρ_f 分别为饱和介质、干骨架及流体的体密度; φ 为孔隙度。

根据弹性模量和速度、密度之间的关系

$$\rho v_p^2 = K_e + \frac{4}{3}\mu_e \quad (3)$$

$$\rho v_s^2 = \mu_e \quad (4)$$

$$\rho_e = (1 - \varphi)\rho_d + \varphi\rho_f \quad (5)$$

可以推导出计算纵横波速度的方程

$$v_p^2 = \frac{1}{\rho_e} \left[K_d + \frac{4}{3}\mu_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right)^2}{\left(1 - \varphi - \frac{K_b}{K_s}\right)\frac{1}{K_s} + \frac{\varphi}{K_f}} \right] \quad (6)$$

$$v_s^2 = \frac{\mu_d}{\rho_e} \quad (7)$$

Gassmann 方程与 Biot 理论^[5]的低频形式是一致的, 一般也统称为 Biot-Gassmann 理论。该模

收稿日期: 2009-06-05; 改回日期: 2009-08-04。

第一作者简介: 李燕(1973—), 女, 工程师, 1998年毕业于江汉石油学院应用地球物理专业, 长期从事测井、岩石物理、地震反演等方面工作。

基金项目: 国家“863”计划项目(2007AA060504)资助。

型虽然简单直接,但却反映了多孔岩石介质总的等效弹性模量与岩石矿物等效弹性模量、骨架等效弹性模量、流体等效弹性模量、孔隙度等参数之间的有机联系,而且容易转换和推导,因此在横波估算和流体识别等方面得到了广泛应用。

基于 Gassmann 模型的原理,应用该模型时要把握以下几点:

1) Gassmann 方程可以用来计算从一种流体饱和状态到另外一种流体饱和状态的地震速度或者模量。但该方程比较适合于低频条件,此时孔隙所受的压力在整个孔隙空间达到平衡。这种低频局限性表明,该理论能够更好地适合于低频常规地震条件(小于 100 Hz),对于测井数据频率(约等于 10^4 Hz)和实验室超声测量状态下(约等于 10^6 Hz),应用效果则受到一定影响(取决于岩石类型和流体的粘滞性)。

2) 干岩石并非气饱和状态下岩石。干岩石或者干骨架模量是指孔隙压力保持不变而围压变化所导致的体积模量的应变(此时,孔隙流体通过流动或流出而保持常压,孔隙流体体积模量为零),相当于岩石充满空气时在常温和常压条件下的状态;气饱和状态相当于储层高孔隙压力状态(此时,气体具有不可忽略的体积模量)。

3) 干岩石骨架的弹性模量是指微湿或者潮湿状态条件下的岩石模量,并非极端干岩条件下的模量。极端干岩条件测量时,破坏了作用在孔隙表面的表面张力(当给极端干岩加入少量百分比的流体时,骨架的体积模量将显著降低)。

4) 对于混合矿物,可以利用 V-R-H 模型得到等效模量;对于混合流体,可以利用 Wood 模型得到等效模量;对于部分饱和岩石,在足够低频条件下,孔隙流体的有效模量可以利用等应力条件下流体和气体状态决定。

5) 对于泥质充填岩石,不同类别的岩石,泥岩的作用不同^[6]。对于胶结岩石,泥岩作为组成岩石骨架的矿物成分;对于弱胶结或者悬浮状态下岩石,应把泥岩当作充满孔隙的一种流体,即孔隙流体为泥岩。

2 横波速度估算

2.1 方法原理

横波速度是进行叠前地震弹性反演和属性处理的基础资料,但绝大多数井缺少横波测井速度资料,因此,需要利用岩石物理理论和测井资料估算

横波速度曲线^[7,8]。

岩石横波速度的估计涉及到岩石物理理论模型的正演模拟和反演计算两个方面。岩石物理参数的正演模拟实质上就是岩石有效弹性模量的预测,它是在已知岩石骨架性质和流体性质的条件下计算岩石的等效弹性模量,进而预测纵、横波参数以及泊松比;反演计算则是岩石物理参数正演计算的逆过程,是在已知介质纵横波速度或者等效弹性模量和流体性质的条件下,估计岩石的骨架性质。一旦获得了岩石骨架参数,就可通过正演计算,预测不同流体性质、饱和度下岩石的有效弹性模量。其中,通过岩石物理参数的反演估算岩石的骨架性质,是横波速度估算的关键。

利用 Gassmann 模型预测岩石的横波速度时,已知岩石的纵波速度 v_p 和孔隙度 φ ,除了给出流体的密度 ρ_f 、体积模量 K_f ,还需给出固体矿物的密度 ρ_d 、体积模量 K_s 、干骨架的体积模量 K_d 和剪切模量 μ_d 等相关参数。这些参数通常可由测井资料和实验室测量获得,其中的干骨架模量需要利用 Gassmann 模型进行反演计算。

初始干岩石体积模量 $K_{d0} = (1-y)K_s$,可以通过解方程求得。其中, y 为由方程(式(6)和式(7))导出的一元二次方程 $ay^2 + by + c = 0$ 的根

$$y = \frac{-b + (b^2 - 4ac)^{\frac{1}{2}}}{2a} \quad (8)$$

式中:

$$a = S - 1;$$

$$b = \varphi S \left(\frac{K_s}{K_f} - 1 \right) - S + \frac{M}{K_s};$$

$$c = -\varphi \left(S - \frac{M}{K_s} \right) \left(\frac{K_s}{K_f} - 1 \right);$$

$$S = \frac{3(1-\sigma)}{1+\sigma};$$

$$M = v_p^2 \rho_c;$$

σ 为干岩石泊松比;其他参数同上。

图 1 为岩石物理理论模型正反演横波计算方法的整个实现流程。首先在已知纵波速度的条件下,利用 Greenberg-Castagna 公式计算初始横波速度,然后通过 Gassmann 方程的反演,计算岩石骨架的弹性模量,进而结合已知的岩石矿物性质、流体性质和孔隙度,通过 Gassmann 方程的正演,计算原流体状态条件下岩石的纵横波速度。如果计算得到的纵波速度与初始纵波速度的误差在极限范围内,则计算得到的横波速度即为原流体状态条件下的值;如果两者误差大于一定范围,则需要利用求得的纵波速度、横波速度作为初始值,重新

估算岩石骨架的弹性模量。通过正演模拟和反演计算的多次迭代,来得到一定误差范围内的横波速度和弹性模量。

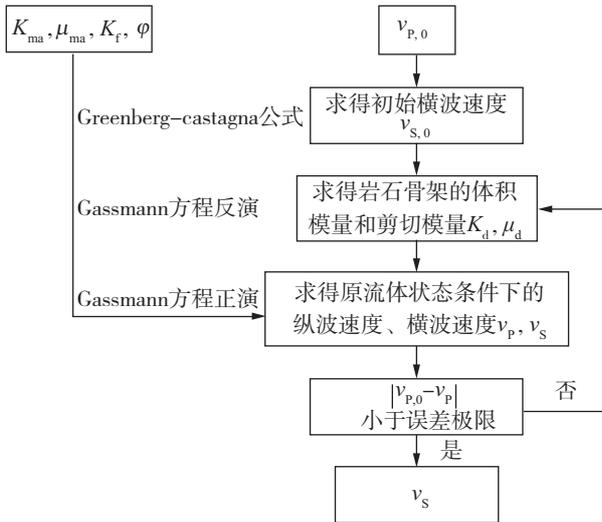


图 1 横波计算流程示意

2.2 横波速度计算影响因素分析

通过对 Gassmann 模型的转换,可以分析不同参数对横波计算结果的影响。Gassmann 模型可写成

$$K_e = K_d + \frac{K_s \left(1 - \frac{K_d}{K_s}\right)^2}{\left(1 - \varphi - \frac{K_d}{K_s}\right) + \varphi \frac{K_s}{K_f}} \quad (9)$$

式(9)中,第二项的分母由 $1 - \varphi - K_d/K_s$ 和 $\varphi \cdot (K_s/K_f)$ 构成,通常情况下,后者远远大于前者,因此忽略前者后,可以得到线性化的结果

$$K_e = K_d + G(K_s, K_d, \varphi) K_f \quad (10)$$

式中, $G(K_s, K_d, \varphi) = (1 - K_d/K_s)^2 / \varphi$ 。式(10)等号后第一项是岩石骨架影响,第二项是孔隙中流体的影响。对式(10)进行全微分,可进一步分析单个参数的影响

$$\begin{aligned} \Delta K_e = & 2(1 - K_r) K_r K_f / (\varphi K_s) \Delta K_s + \\ & [1 - 2(1 - K_r) K_f / (\varphi K_s)] \Delta K_d - \\ & (1 - K_r)^2 K_f / \varphi^2 \Delta \varphi + (1 - K_r)^2 / \varphi^2 \Delta K_f \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $K_r = \frac{K_d}{K_s}$ 。通过上式可以解析地分析不同参数对横波计算结果的影响。

根据式(11)计算了横波计算误差随不同参数误差的变化,计算使用的准确参数值如表 1 所示。图 2 显示了不同参数值相对误差在 15%以内变化时,用 Gassmann 模型计算所产生的相对误差。图

中黑线、蓝线、红线和绿线分别是计算误差随固体矿物颗粒体积模量 K_s 、岩石干骨架体积模量 K_d 、孔隙度 φ 和流体体积模量 K_f 等参数误差的变化曲线。从图中可以看到,Gassmann 模型计算结果受孔隙度 φ 影响最大(孔隙度相对误差 15%时,计算结果误差接近 8%),其次是流体参数的影响(计算结果误差接近 8%),第三是岩石干骨架体积模量的影响(计算结果误差接近 6%),第四是固体矿物颗粒体积模量的影响(计算结果误差在 2%以内)。其中,孔隙度误差的影响与其他参数的影响是相反的。这表明,在利用 Gassmann 模型估算横波速度时,首先需要保证孔隙度的正确性。

表 1 岩石的基本参数值

| 参数名 | K_s | μ_s | K_d |
|-----|-----------|-----------|----------|
| 参数值 | 52.20 GPa | 7.96 GPa | 5.96 GPa |
| 参数名 | μ_d | φ | K_f |
| 参数值 | 0.27GPa | 0.14 | 1.00 GPa |

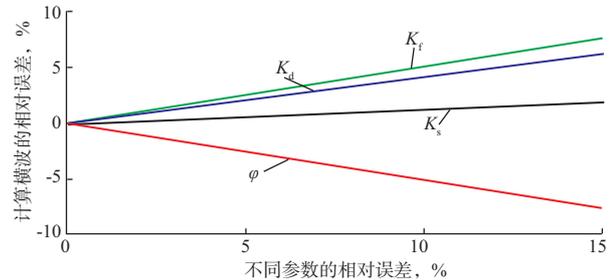


图 2 Gassmann 模型计算误差随模型参数误差的变化

需要说明的是,以上只是通过 Gassmann 模型的解析推导,对横波计算所受影响因素的定性分析,并不能绝对地定量外延。一方面,由于岩石骨架体积模量是由反演计算所得,矿物体积模量是实验室测量结果,流体体积模量和孔隙度是利用测井曲线计算所得,其参数误差存在很大的不确定性,因而无法在实际处理中具体分析横波计算所受的影响因素大小;另一方面,计算横波的参数是相互影响、相互关联的,如流体体积模量与孔隙度、干岩石骨架体积模量与孔隙度等,一个参数的改变必定会导致另一参数性质的变化,所以这种单一因素改变条件下误差影响因素的分析不能直接外延到实际横波计算的情况;第三,由于横波影响作用与其他参数是相反的,且横波计算是受所有参数误差的综合作用,所以实际横波计算有可能由于这种中和作用,使横波计算的误差变小。尽管如此,基于 Gassmann 模型的解析推导能够定性量化研究

不同参数对横波计算结果的影响,表明了 Gassmann 模型潜在的重要应用价值。

2.3 实际计算结果分析

垦 71-检 41 井是密闭取心井,有孔隙度、渗透率、矿物成分以及含油气不同情况下的纵横波速度、密度等参数,为横波速度估算的可靠性分析提供了验证数据。图 3 为该井一深度段的横波计算结果,显示了反演优化计算的横波曲线、纵波曲线和测井横波曲线、纵波曲线的对比(黑色为实测曲

线,红色为计算曲线)。总体上看,估计的横波曲线与实测的横波曲线吻合较好,两者的变化趋势非常一致(相对误差平均为 5%),优化所得的纵波速度与实测纵波速度几乎完全一致,这表明了所建立横波估算方法的可靠性。从图中也可以看出,在孔隙度较大的砂岩储层(如 1 020 m 处),横波计算的误差偏大,即优化所得的纵波速度与实测纵波速度也有一定误差,这与误差分析中孔隙度对横波估算影响较大的结论是一致的。

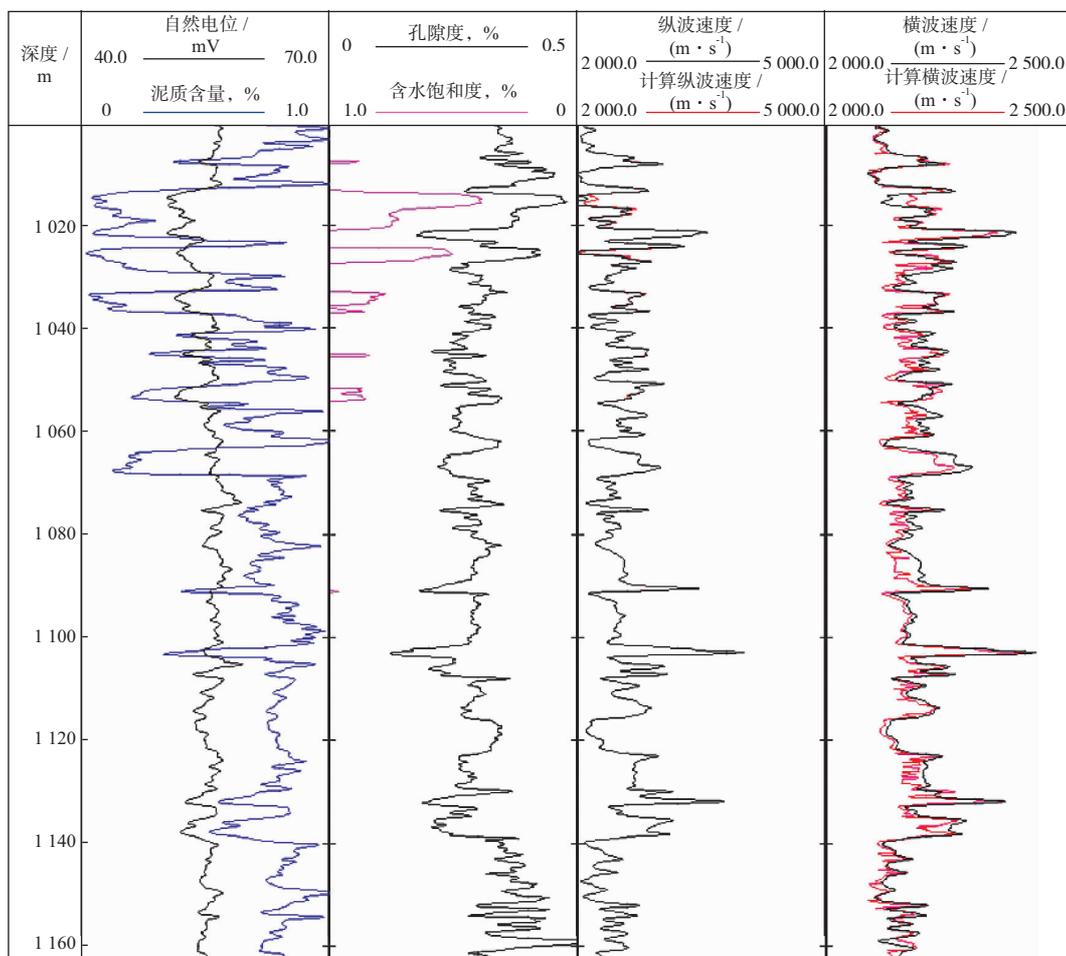


图 3 垦 71 区块检 41 井横波估算结果

3 孔隙流体敏感属性参数优选

岩石弹性性质不仅与骨架性质、孔隙结构及其变化有关,还与孔隙中充填流体及其性质有关。这是利用地震资料进行储层预测或碳氢直接检测的物理依据。基于 Gassmann 模型,可以计算多孔岩石介质从一种流体饱和状态到另一种流体饱和状态下等效弹性模量或者速度的变化,因此,可以用于孔隙流体的敏感属性参数优选。

Gassmann 方程可以进一步写成如下形式:

$$\begin{aligned}
 K_c &= K_d + \beta^2 M \\
 \mu_c &= \mu_d \\
 \beta &= 1 - \frac{K_d}{K_s} \\
 M &= \frac{\beta - \varphi}{K_s} + \frac{\varphi}{K_f} \quad (12)
 \end{aligned}$$

纵波、横波速度可用式(6)和式(7)计算。从中可以看出,流体的加入对模量及速度的影响主要反映在 $\beta^2 M$ 项,这一项是直接反映孔隙流体特征的参数,

可以通过对阻抗的组合计算直接得到该项的值,如

$$Z_p = v_p \cdot \rho_e$$

$$Z_s = v_s \cdot \rho_e$$

$$Z_p^2 - c \cdot Z_s^2 =$$

$$\rho_e \cdot \left(K_d + \frac{4}{3} \mu_d + \beta^2 M - c \cdot \mu_d \right) \quad (13)$$

定义 $c = (v_p/v_s)^2$ 时,

$$K_{\text{dry}} + \frac{4}{3} \mu_{\text{dry}} = c \cdot \mu_{\text{dry}}$$

此时 $Z_p^2 - c \cdot Z_s^2$ 能够直接反映出 $\beta^2 M$ 的值。文献[9]详细描述了利用新提出的参数组合对孔隙流体敏感属性参数的优选过程,表明了该参数的有效性和适用性。

4 结论

在对 Gassmann 模型的机理进行分析的基础上,本文研究了横波曲线的估算,用解析方法分析了影响横波估算的因素,并通过 Gassmann 模型的转换推导,分析了孔隙流体油水区分的敏感属性参数优选方法,得到的结论如下:

1) 岩石物理理论模型是地震资料进行孔隙流体状态识别的基础。必须通过对各个模型机理分析,对其适用条件、影响因素和关键参数的性质进行把握,才能更好地在实践中加以应用。

2) 利用 Gassmann 模型建立了正反演相结合的横波速度计算方法,并通过对其解析推导,定性分析了不同参数误差对横波计算结果的影响,表明横波估算受孔隙度影响最大,流体参数误差和岩石

干骨架体积模量影响较小(其中,孔隙度误差的影响与其他参数的影响作用是相反的)。

3) Gassmann 模型作为岩石物理最基础的理论模型,可以通过对其不同形式的转换推导,研究地震响应及属性参数之间的相互关系,为储层评价及流体预测提供实用技术系列和重要的基础性认识。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhijing. Fundamentals of seismic rock physics [J]. *Geophysics*, 2001, 66(2): 398~412
- 2 马中高. 成岩作用和岩石结构对砂岩弹性速度的影响 [J]. *石油学报*, 2008, 29(1): 58~63
- 3 Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. *Rock physics handbook* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 340
- 4 Gassmann F. Elastic waves through a packing of spheres [J]. *Geophysics*, 1951, 16(4): 673~685
- 5 Biot M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid [J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1956, 28(2): 168~191
- 6 Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. *Geophysics*, 1986, 51(11): 2 093~2 107
- 7 郭栋, 印兴耀, 吴国忱. 横波速度计算方法与应用 [J]. *石油地球物理勘探*, 2007, 42(5): 535~538
- 8 王玉梅, 苗永康, 孟宪军. 岩石物理横波速度曲线计算技术 [J]. *油气地质与采收率*, 2006, 13(4): 58~61
- 9 邓继新, 王尚旭, 李生杰, 等. 砂岩储层地震属性参数对孔隙流体的敏感性评价 [J]. *石油学报*, 2006, 27(6): 55~59

(编辑: 顾石庆)