

刘福平,王安玲,李瑞忠等.全反射 SH 地震波的 Goos-Hänchen 效应动校正时差.地球物理学报,2009,52(8):2128~2134, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.022

Liu F P, Wang A L, Li R Z, et al. The influence on normal moveout of total reflected SH-wave by Goos-Hänchen effect at an interface of strata. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(8):2128~2134, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.022

全反射 SH 地震波的 Goos-Hänchen 效应动校正时差

刘福平^{1,2},王安玲¹,李瑞忠³,陈辉国²,杨长春²

1 北京印刷学院,北京 102600

2 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

3 中国石油化工集团公司经济技术研究院,北京 100029

摘 要 利用 SH 地震波(偏振化方向垂直入射面的横波)在地层界面反射系数的附加相角导出了 SH 波 Goos-Hänchen 效应所引起的横向偏移和横向偏移渡越时间,给出了 Goos-Hänchen 效应正常时差公式,讨论了 Goos-Hänchen 效应对反射 SH 波正常时差的影响,绘出了横向偏移、横向偏移渡越时间、Goos-Hänchen 效应正常时差及 Goos-Hänchen 效应正常时差校正量曲线.数值算例表明:对掠入射波或入射角在临界角附近的入射波,SH 反射波的横向偏移、横向偏移渡越时间非常大,Goos-Hänchen 效应对正常时差会产生较大的测量误差,在其他角度的入射波,横向偏移(横向偏移渡越时间)与波长(周期)为同一个数量级.横向偏移效应对 SH 反射波的传播走时影响是不可忽略的,因此在实际的地震资料处理中应进行横向偏移效应误差校正.

关键词 Goos-Hänchen 效应,SH 地震波,横向偏移,正常时差,横向偏移渡越时间

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.08.022

中图分类号 P631

收稿日期 2008-10-06,2009-08-11 收修定稿

The influence on normal moveout of total reflected SH-wave by Goos-Hänchen effect at an interface of strata

LIU Fu-Ping^{1,2}, WANG An-Ling¹, LI Rui-Zhong³,
CHEN Hui-Guo², YANG Chang-Chun²

1 *Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China*

2 *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

3 *Economics & Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100029, China*

Abstract Using the phase shift of reflection coefficient of SH seismic wave at the interface of strata, we derived the lateral shift and group time delay of total reflected SH seismic wave, given formulae of normal moveout of Goos-Hänchen effect, discussed the influence of Goos-Hänchen effect on normal moveout of SH-wave, and drawn the curves of lateral shift, group time delay, normal moveout of Goos-Hänchen effect and error of normal moveout caused by Goos-Hänchen effect with respect to the angle of incidence. The results show that for glancing wave or angle of incidence being near the critical angle, the lateral shift and group time delay are very large. A large error can be caused by Goos-Hänchen effect; In other angle of incidence the lateral shift (group time delay) is the same order of magnitude as the wavelength (period); So Goos-Hänchen

基金项目 国家自然科学基金(10705049);北京市自然科学基金(1083011);北京市属市管高等学校人才强教计划项目资助。

作者简介 刘福平,男,1960年生,教授,1994年于石油大学勘探系获硕士学位,2002年于中国科学院地质与地球物理研究所获博士学位,2004年于中国科学院地质与地球物理研究所博士后出站,主要从事电磁波、地震波传播理论、数值计算及油藏数值模拟方面的研究和教学工作. E-mail: fupingliu@bigc.edu.cn 或 fupingliu60@sina.com.cn

effect can bring about large influence on the travel time of SH-wave. The error correction of Goos-Hänchen effect should be made before seismic data processing.

Keywords Goos-Hänchen effect, SH-wave, Lateral shift, Normal moveout, Group time delay of Goos-Hänchen effect

1 引 言

全反射光波波束中心(图 1)在反射界面的入射点(C点)和出射点(D点)之间存在一定的位移 Δx (称为横向偏移),这一现象首先被 Goos 和 Hänchen 用实验证实^[1](后被称为 Goos-Hänchen 效应^[1~8],图 1 中, n_1, n_2 为介质折射率, θ_i 为入射角). 此后曾一度成为光学研究的热点, Lotsch^[1] 对全反射波束的 Goos-Hänchen 效应进行了全面的综述. 这一概念并被迅速引入到了光学以外的其他物理学分支, 如等离子体物理、量子力学等^[1], 认为斜入射波的横向偏移现象是波(包括声波、光波等)所具有的共同特性之一, 目前已扩展到研究反射粒子及电磁波在导电界面反射的横向偏移问题^[8~11], 近几年的研究还发现全反射光(电磁波)存在负横向偏移现象^[3~5]. 然而在地震勘探的理论研究与资料处理中目前均未考虑波的横向偏移问题^[12~22], 事实上横向偏移大小在大多数情况下与波长为同一个数量级, 在某些特殊入射角附近波的横向偏移非常大^[9~11]. 由于波的衰减与频率有关, 为了减小地震波的衰减, 低频波在地震勘探中有广泛的应用, 然而频率越低, 波的 Goos-Hänchen 效应就越严重, 同时横向偏移还具有积累效应, 利用多次反射波的测量结果会带来更大误差, 因此波的 Goos-Hänchen 效应对地学参数的测量及地震勘探会有较大的影响. 我们利用 SH 地震波在地层界面反射系数附加相角研究了 SH 波在反射界面的 Goos-Hänchen 效应, 给出了 Goos-Hänchen 效应正常时差公式, 还绘出了横向偏移渡越时间及 Goos-Hänchen 效应正常时差误差

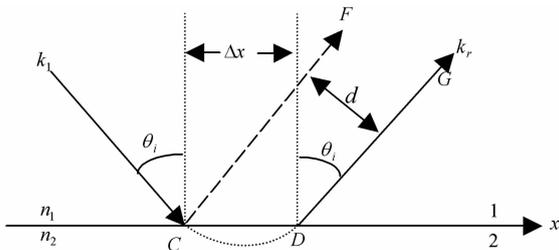


图 1 全反射光波横向偏移

Fig. 1 Lateral shift of total reflected light

等曲线. 算例表明:对掠入射波或入射角在临界角附近的入射波, Goos-Hänchen 效应对正常时差造成了不可忽略的误差, 对 SH 波的反射波传播走时会有较大的影响, 因此在实际的地震资料处理中应进行横向偏移效应误差校正.

2 SH 波在两个介质分界面的反射和透射系数

如图 2, SH 波当入射到两介质界面上时其反射和透射系数分别为

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{\mu_1 \cos \beta_1 - \mu_2 \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right) \cos \beta_t}{\mu_1 \cos \beta_1 + \mu_2 \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right) \cos \beta_t}, \quad (1)$$

$$\frac{B_3}{B_1} = \frac{2\mu_2 \cos \beta_1}{\mu_1 \cos \beta_1 + \mu_2 \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right) \cos \beta_t} \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (2)$$

其中 B_1, B_2, B_3 分别为 SH 波入射波、反射波、折射波的振幅, β_1, β_t 分别是 SH 波入射角和折射角, V_{s1}, V_{s2} 分别为入射波和折射波在介质 1, 2 中 SH 波的传播速度, μ_1, μ_2 分别为介质 1, 2 的拉梅系数, ρ_1, ρ_2 分别为介质 1, 2 的密度. 因 $\mu_1 = V_{s1}^2 \rho_1, \mu_2 = V_{s2}^2 \rho_2$, 所以(1)式可写为

$$\begin{aligned} \frac{B_2}{B_1} &= \frac{V_{s1}^2 \rho_1 \cos \beta_1 - V_{s2}^2 \rho_2 \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right) \cos \beta_t}{V_{s1}^2 \rho_1 \cos \beta_1 + V_{s2}^2 \rho_2 \left(\frac{V_{s1}}{V_{s2}}\right) \cos \beta_t} \\ &= \frac{V_{s1} \cos \beta_1 - V_{s2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cos \beta_t}{V_{s1} \cos \beta_1 + V_{s2} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \cos \beta_t}. \end{aligned} \quad (3)$$

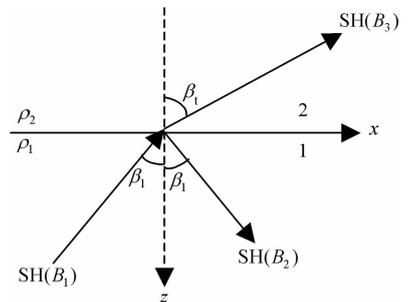


图 2 SH 波在地层界面上的反射

Fig. 2 Reflection of SH wave on an interface of strata

由斯奈尔定律得 $\frac{V_{s1}}{\sin \beta_1} = \frac{V_{s2}}{\sin \beta_t}$, 当 $V_{s2} > V_{s1}$ 时,

$\beta_t > \beta_1$, 若取 $\beta_t = 90^\circ$, 则 $\sin\beta_{tc} = \frac{V_{s1}}{V_{s2}}$, $\beta_{tc} = \arcsin \frac{V_{s1}}{V_{s2}}$.

当 $\beta_t > \beta_{tc}$ 时, β_t 变为复角, $\frac{B_2}{B_1}$ 变为复数. 则有 $\sin\beta_t = \frac{V_{s2}}{V_{s1}} \sin\beta_1$, $\cos\beta_t = j\sqrt{\left(\frac{V_{s2}}{V_{s1}} \sin\beta_1\right)^2 - 1}$, j 为单位虚数, 则

$$\begin{aligned} R_s &= \frac{B_2}{B_1} = \frac{V_{s1} \cos\beta_1 - V_{s2} (\rho_2/\rho_1) j \sqrt{\left(\frac{V_{s2}}{V_{s1}} \sin\beta_1\right)^2 - 1}}{V_{s1} \cos\beta_1 + V_{s2} (\rho_2/\rho_1) j \sqrt{\left(\frac{V_{s2}}{V_{s1}} \sin\beta_1\right)^2 - 1}} \\ &= \frac{\cos\beta_1 - n(\rho_2/\rho_1) j \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}}{\cos\beta_1 + n(\rho_2/\rho_1) j \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} \\ &= e^{-j2\theta} = e^{-j\delta_s}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\theta = \arctan \frac{n(\rho_2/\rho_1) \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}}{\cos\beta_1}$, $\delta_s = 2\theta$,

$n = \frac{V_{s2}}{V_{s1}}$, 所以

$$\frac{\partial \sin\beta_1}{\partial k_x} = \frac{V_{s1}}{\omega}, \quad \frac{\partial \cos\beta_1}{\partial k_x} = -\frac{(V_{s1}/\omega)^2 k_x}{\sqrt{1 - (k_x V_{s1}/\omega)^2}} = -\frac{(V_{s1}/\omega) \sin\beta_1}{\cos\beta_1} = -\frac{V_{s1}}{\omega} \tan\beta_1.$$

令 $m = \frac{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}}{\cos\beta_1}$, 则

$$\begin{aligned} \frac{\partial m}{\partial k_x} &= \frac{\frac{\partial}{\partial k_x} (\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}) \cos\beta_1 - \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1} \frac{\partial \cos\beta_1}{\partial k_x}}{\cos^2\beta_1} \\ &= \frac{\cos\beta_1 \frac{n^2 \sin\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} \frac{\partial \sin\beta_1}{\partial k_x} - \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1} \left(-\frac{V_{s1}}{\omega} \tan\beta_1\right)}{\cos^2\beta_1} \\ &= \frac{1}{\cos^2\beta_1} \left[\frac{\left(\frac{n^2 V_{s1}}{\omega}\right) \sin\beta_1 \cos\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} + \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1} \left(\frac{V_{s1}}{\omega} \tan\beta_1\right) \right] \\ &= \frac{V_{s1}}{\omega \cos^2\beta_1} \frac{n^2 \sin\beta_1 \cos\beta_1 + (n^2 \sin^2\beta_1 - 1) \tan\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_s &= \frac{\partial \delta_s}{\partial k_x} = \frac{2}{1 + \left(\frac{nm\rho_2}{\rho_1}\right)^2} \frac{n\rho_2}{\rho_1} \frac{\partial m}{\partial k_x} \\ &= \frac{2}{1 + \left(\frac{nm\rho_2}{\rho_1}\right)^2} \frac{n\rho_2 V_{s1}}{\rho_1 \omega \cos^2\beta_1} \frac{n^2 \sin\beta_1 \cos\beta_1 + (n^2 \sin^2\beta_1 - 1) \tan\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} \\ &= \frac{2n\rho_2 V_{s1}}{\omega \rho_1 \cos^2\beta_1} \frac{n^2 \sin\beta_1 \cos\beta_1 + (n^2 \sin^2\beta_1 - 1) \tan\beta_1}{\left[1 + \left(\frac{nm\rho_2}{\rho_1}\right)^2\right] \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= B_1 R_s e^{i(k_x r - \omega t)} = B_1 e^{j\delta_s} e^{i(k'_x x + k'_z z - \omega t)} \\ &= B_e e^{i(k'_x x + k'_z z - \omega t + \delta_s)}. \end{aligned} \quad (5)$$

3 反射 SH 波在两介质分界面反射的 Goos-Hänchen 横向偏移

由(5)式知, 因介质界面对声波 (SH 波) 的反射产生了相角 δ_s , 则可认为是由于在 x 方向移动了 x_s 而产生, 所以

$$x_s = \frac{\partial \delta_s}{\partial k_x} = \frac{\partial \delta_s}{\partial k_x},$$

其中, $k_x = \frac{\omega}{V_{s1}} \sin\beta_1 = k'_x$. 将 $\sin\beta_1$ 和 $\cos\beta_1$ 用 k_x 和 ω 表示, 则有

$$\sin\beta_1 = \frac{k_x V_{s1}}{\omega}, \quad \cos\beta_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{k_x V_{s1}}{\omega}\right)^2}.$$

因此有

4 SH 波在反射界面的渡越时间

为导出 SH 波在反射界面反射的渡越时间, 首先将 $\sin\beta_1$ 和 $\cos\beta_1$ 用 k_x 和 ω 表示并对 ω 求导得

$$\begin{aligned} \sin\beta_1 &= \frac{k_x V_{s1}}{\omega}, \quad \frac{\partial \sin\beta_1}{\partial \omega} = -\frac{k_x V_{s1}}{\omega^2} = -\frac{1}{\omega} \sin\beta_1, \\ \frac{\partial \cos\beta_1}{\partial \omega} &= \frac{\partial}{\partial \omega} \sqrt{1 - \left(\frac{k_x V_{s1}}{\omega}\right)^2} = \frac{\left(\frac{k_x V_{s1}}{\omega}\right)^2}{\omega \sqrt{1 - \left(\frac{k_x V_{s1}}{\omega}\right)^2}} = \frac{\sin\beta_1}{\omega} \tan\beta_1, \\ \frac{\partial m}{\partial \omega} &= \frac{\frac{\partial}{\partial \omega} (\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}) \cos\beta_1 - \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1} \frac{\partial \cos\beta_1}{\partial \omega}}{\cos^2 \beta_1} \\ &= \frac{1}{\cos^2 \beta_1} \left[\cos\beta_1 \frac{n^2 \sin\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} \frac{\partial \sin\beta_1}{\partial \omega} - \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1} \left(\frac{\sin\beta_1}{\omega} \tan\beta_1 \right) \right] \\ &= -\frac{\sin\beta_1}{\omega \cos^2 \beta_1} \left[\frac{n^2 \sin\beta_1 \cos\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} + \tan\beta_1 \sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1} \right]. \end{aligned}$$

因介质界面对声波的反射产生了 x 方向横向偏移 x_s , 由(5)式知, 波传播 x_s 所需要的时间(称为渡越时间)为

$$\begin{aligned} t_s &= -\frac{\partial \delta_s}{\partial \omega} = \frac{-2}{1 + \left(\frac{nm\rho_2}{\rho_1}\right)^2} \frac{n\rho_2}{\rho_1} \frac{\partial m}{\partial \omega} \\ &= \frac{-2}{1 + \left(\frac{nm\rho_2}{\rho_1}\right)^2} \frac{n\rho_2}{\rho_1} \left[-\frac{\sin\beta_1}{\omega \cos^2 \beta_1} \left(\frac{n^2 \sin\beta_1 \cos\beta_1}{\sqrt{n^2 \sin^2 \beta_1 - 1}} + \tan\beta_1 \sqrt{n^2 \sin^2 \beta_1 - 1} \right) \right] \\ &= \frac{2 \sin\beta_1}{1 + \left(\frac{nm\rho_2}{\rho_1}\right)^2} \frac{n\rho_2}{\omega \rho_1 \cos^2 \beta_1} \left[\frac{n^2 \sin\beta_1 \cos\beta_1}{\sqrt{(n \sin\beta_1)^2 - 1}} + \tan\beta_1 \sqrt{n^2 \sin^2 \beta_1 - 1} \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

5 Goos-Hänchen 效应对 SH 波正常时差的影响

5.1 Goos-Hänchen 效应动校正量

在地球物理勘探资料处理中要进行动校正处理, 这要用到反射波的正常时差. 下面针对正常时差计算模型(图 3), 考虑反射波横向偏移效应后, 分析和讨论横向偏移效应对地震波测量所产生的误差. 在 O 点激发, S 点接收, O 与 S 的距离为 x , 则地震波由 O 发射经界面 R 点反射后被 S 接收的时距曲

线方程为^[11] $t_1 = \frac{1}{V_{s1}} \sqrt{4h^2 + x^2}$. 考虑横向偏移效应后, 则由波源发射的波, 沿 O—C—D—S 传播到接收点 R 的时距曲线方程为 $t_2 = \frac{2h}{V_{s1} \cos\beta} + t_s$, t_2 是考虑横向偏移效应后的结果, 比 t_1 更符合地震波传播的实际, 应有更高的准确度.

反射波正常时差(在水平界面条件下, 各观测点相对于爆炸点纯粹是由于炮检距不同而引起的反射波走时差^[11])为

$$\Delta t_s = \frac{1}{V_{s1}} \sqrt{4h^2 + x^2} - t_0, \quad (8)$$

其中 $t_0 = \frac{2h}{V_{s1}}$ 为自激自收走时(零炮检距走时). 考虑横向偏移效应后反射波正常时差应修正为

$$\Delta t_{sg} = \frac{2h}{V_{s1} \cos\beta} + t_s - t_0. \quad (9)$$

如果将上两式相减则有

$$\begin{aligned} \Delta \tau_s &= \Delta t_s - \Delta t_{sg} \\ &= \frac{1}{V_{s1}} \sqrt{4h^2 + x^2} - \frac{2h}{V_{s1} \cos\beta} - t_s. \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式为计和不计横向偏移效应对地震波测量所产生的 Goos-Hänchen 效应时差动校正量, 可用于地震波测量的横向偏移效应误差分析和地震波动校正的 Goos-Hänchen 效应误差校正. 在利用该式

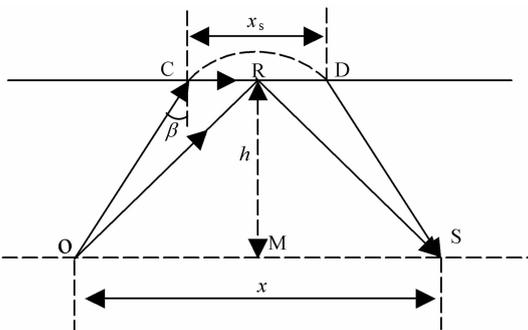


图 3 地震波传播路径

Fig. 3 Propagation path of SH seismic wave

计算时应采用下面的约束条件:

$$x = 2h \tan \beta + x_s. \quad (11)$$

由发射天线发射的地震波只有满足约束条件的反射波,才能被接收天线接收到(反射波波束能量的中心过接收点 R),约束条件方程是关于入射角 β 的非线性方程,可通过数值方法求解.

5.2 数值算例

为研究 Goos-Hänchen 效应对地震波传播走时所造成的影响,下面分别计算了 Goos-Hänchen 效应正常时差及所产生的误差. 由于 SH 波只有发生全反射时才存在 Goos-Hänchen 效应(横向偏移),所以作为算例其模型参数的选择依据应在反射界面满足全反射条件,为使算例既反映 Goos-Hänchen 效应的一般特性又具有一定的实际意义,分别选择反射界面两侧介质的参数差别较大的砂岩和致密砂岩界面及差别较小的原油饱和砂岩与盐水饱和砂岩反射界面,为简化模型设只存在两层介质. 对于致密砂岩和砂岩交界,设上层为砂岩,下层为致密砂岩. 为实现计算,基于文献[12,23,24]几方面的综合

考虑(因没有现成可用的计算参数),我们取 $V_{s1} = 2500$ m/s(当砂岩孔隙度较小时 SH 波的速度是可以达到这一数值的,见文献[23],307 页), $\frac{V_{s2}}{V_{s1}} = 1.3$, $\frac{\rho_2}{\rho_1} = 1.1$,致密砂岩的密度大于砂岩的密度,但差别并不大^[12,24](算例考虑低孔隙砂岩),波源频率为 $f = 50$ Hz,反射界面深度 $h = 800$ m. 对于存在油水反射界面的计算参数来自文献[25]:原油饱和砂岩 $V_{s1} = 1044.5$ m/s, $\rho_1 = 2100$ kg/m³,盐水饱和砂岩 $V_{s2} = 1098$ m/s, $\rho_2 = 2080$ kg/m³,孔隙度均为 34.5%,原油饱和砂岩与盐水饱和砂岩界面深度 $h = 1219$ m(油层厚度取 19 m),波源频率也为 $f = 50$ Hz.

当反射界面为致密砂岩和砂岩的交界面时,反射波横向偏移横向偏移时间随入射角变化曲线见图 4,在临界角附近和当入射角大于 80° 时横向偏移和横向偏移时间随入射角有较大的变化,在其他入射角横向偏移(横向偏移时间)与波长(周期)在同一个数量级.

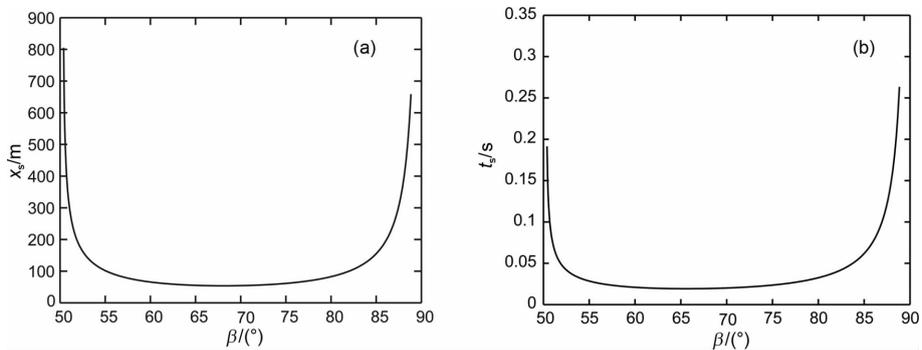


图 4 反射波横向偏移(a)和横向偏移时间(b)

Fig. 4 (a) Lateral shift and (b) group time delay of reflected SH seismic wave

图 5a 给出了致密砂岩与砂岩反射界面 Goos-Hänchen 效应正常时差和 SH 波正常时差,图中曲线 Δt_{sg} 为考虑 Goos-Hänchen 效应所得到的 SH 波正常时差曲线,包含了 Goos-Hänchen 效应对波传播走时的影响, Δt_s 为没有考虑 Goos-Hänchen 效应的 SH 波正常时差曲线. 两曲线在大于临界角一定的人射角范围内有较大的差值. 为给出这一差值更直观的图像,利用(10)式计算了反射 SH 波 Goos-Hänchen 效应正常时差所引起的测量误差[见图 6a, Goos-Hänchen 效应动校正量] $\Delta \tau_s$, 该图说明在临界角附近反射 SH 波 Goos-Hänchen 效应对反射波正常时差造成了不可忽略的误差. 图 5b、6b 分别为原油饱和砂岩与盐水饱和砂岩反射界面计算的结

果,各符号意义同图 5a、6a. 比较图 5、图 6 这两个图的图 a 与图 b 会发现,除临界角和数值的大小外曲线变化的规律是一致的,不同的全反射界面具有相同的 Goos-Hänchen 效应变化特征,但变化的范围存在较大的差别,这在应用中应予以注意.

6 结论

本文利用反射波相角导出了反射 SH 偏振地震波在反射界面的横向偏移和横向偏移渡越时间,给出了 Goos-Hänchen 效应正常时差计算公式,讨论了 Goos-Hänchen 效应对 SH 波正常时差所造成的影响. 算例发现:对掠入射波或入射角在临界角附近

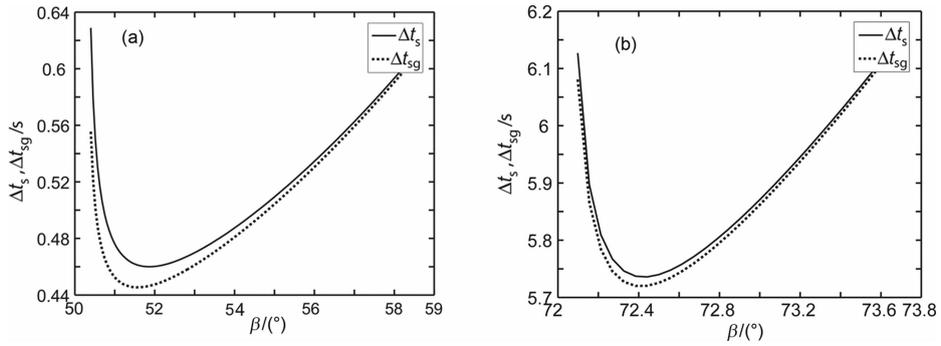


图 5 Goos-Hänchen 效应正常时差和正常时差曲线

(a) 致密砂岩与砂岩反射界面;(b) 原油饱和和砂岩与盐水饱和和砂岩反射界面。

Fig. 5 Normal moveout and Goos-Hänchen normal moveout of SH seismic wave

(a) The reflected interface between the sandstone and high-density sandstone;(b) The reflected interface between the saturated oil sandstone and the saturated salt-water sandstone.

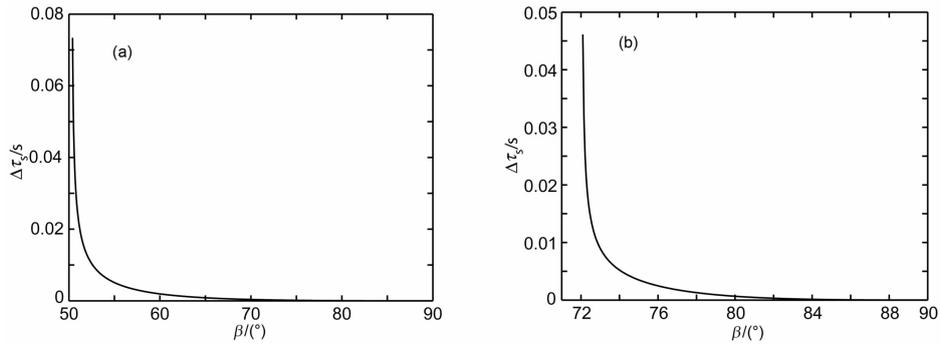


图 6 Goos-Hänchen 效应动校正量

(a) 致密砂岩与砂岩反射界面;(b) 原油饱和和砂岩与盐水饱和和砂岩反射界面。

Fig. 6 Normal moveout of Goos-Hänchen effect of SH seismic wave

(a) The reflected interface between the sandstone and high-density sandstone;(b) The reflected interface between the saturated oil sandstone and the saturated salt-water sandstone.

的入射波, Goos-Hänchen 效应对正常时差会产生较大的测量误差, 在其他角度的入射波横向偏移(横向偏移渡越时间)与波长(周期)为同一个数量级. 本文还给出了考虑和不考虑 Goos-Hänchen 效应所得出的反射波正常时差的差值, 即 Goos-Hänchen 效应动校正量, 为实现 Goos-Hänchen 效应动校正提供了理论依据.

在地震勘探中由于广角反射地震记录的信噪比较高, 可以获得质量较高的地震剖面^[21], 因此目前广角反射问题已逐渐得到重视和应用研究^[20,21]. 实际上只要存在全反射就必然存在波的横向偏移问题, 所以在地震资料处理中对广角反射波应做 Goos-Hänchen 效应误差校正(Goos-Hänchen 效应对正常时差造成了不可忽略的误差), 本文的研究可用于 SH 地震波横向偏移效应误差分析和 SH 地震波(动校正)的 Goos-Hänchen 效应误差校正, 这是本文研究的一个重要的应用方向. 另外在声波测井

中考虑的主要是滑行波, 但实际上是存在广角反射波(全反射波)的, 所以在横波测井分析与解释中也将具有应用前景. 目前在地震资料数据处理及声波测井中还均未考虑 Goos-Hänchen 效应的影响, 现有的处理软件尚不具备 Goos-Hänchen 效应校正功能, 本文研究了 SH 波的 Goos-Hänchen 效应, 但还尚未涉及转换波的问题, 不能用于分析存在转换波时 Goos-Hänchen 效应的校正和计算, 这是今后需要进一步解决的问题之一.

参考文献(References)

- [1] Lotsch H K V. Beam Displacement at Total Reflection; The Goos-Hänchen Effect (I, II, III, IV). *Optik*, 1970, **32**: 116~137, 189~204, 299~319, 553~569
- [2] Lai H M, Chan S W. Large and negative Goos-Hänchen shift near the Brewster dip on reflection from weakly absorbing media. *Optics Letters*, 2002, **27**: 680~682
- [3] Lakhtakia A. On plane wave remittances and Goos-Hänchen

- shifts of planar slabs with negative real permittivity and permeability. *Electromagnetics*, 2003, **23**(1): 71~75
- [4] Resch K J, Lundeen J S, Steinberg A M. Total reflection cannot occur with a negative delay time. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2001, **37**(6): 794~799
- [5] Ziolkowski R W. Pulsed and CW Gaussian beam interactions with double negative metamaterial. *The International Electronic Journal of Optics*, 2003, **11**:662~681
- [6] Lin Y Z, Zhan J H, Tseng S M. A new method of analyzing the light transmission in leaky and absorbing planar wave guides. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, **9**(9): 1241~1243
- [7] Chauvat D, Emile O, Bretenaker F, et al. Direct measurement of the Wigner delay associated with the Goos-Hänchen effect. *Physical Review Letters*, 2000, **80**: 71~74
- [8] Ignatovich V K. Neutron from condensed matter, the Goos-Hänchen effect and coherence. *Physical Letters A*, 2004, **322**(1):36~46
- [9] 刘福平,张红梅,杨长春等. 电场垂直入射面的非均匀电磁波在导电媒质界面的类全反射横向偏移. 地球物理学报, 2005, **48**(4):924~931
Liu F P, Zhang H M, Yang C C, et al. The lateral shift of quasi total reflection of inhomogeneous electromagnetic wave when the electric field is perpendicular to the incident plane. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(4):924~931
- [10] 刘福平,李瑞忠,杨长春等. 非均匀 P-偏振电磁波在导电界面的类全反射横向偏移. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 556~566
Liu F P, Li R Z, Yang C C, et al. The lateral shift of quasi total reflection of inhomogeneous P-electromagnetic wave on the interface of conductive media. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2):556~566
- [11] Liu F P, Wang A L, Chen Q, et al. The research progress on lateral shift of reflected electromagnetic wave at the interface of two conductive media. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(7):961~968
- [12] 陆基孟. 地震勘探原理(上,下). 山东东营:石油大学出版社, 1993, 上:20~30, 下:123~194, 267
Lu J M. Seismic Exploration Principle (the First and Second Volumes) (in Chinese). Shandong Dongying: China University of Petroleum Press, 1993. the First Volume: 20~30, the Second Volume: 123~194, 267
- [13] 杜世通. 地震波动力学. 山东东营:石油大学出版社, 1996. 136~182
Du S T. Seismic Wave Mechanics (in Chinese). Shandong Dongying: China University of Petroleum Press, 1996. 136~182
- [14] 杨 锴, 马在田. 输出道成像方式的共反射面元叠加方法 II——理论. 地球物理学报, 2006, **49**(2): 546~553
Yang K, Ma Z T. Common reflection surface stack by an output imaging scheme. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 546~553
- [15] 吴庆举,李永华,张瑞青等. 接收函数的克希霍夫 2D 偏移方法. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 540~545
Wu Q J, Li Y H, Zhang R Q, et al. 2D Kirchhoff migration for receiver function. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 540~545
- [16] 刘礼农,崔凤林,张剑锋. 三维复杂构造中地震波模拟的单程波方法. 地球物理学报, 2004, **47**(3): 514~520
Liu L N, Cui F L, Zhang J F. Seismic modeling with one-way wave equation in 3D complex structures. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(3): 514~520
- [17] Zhang J F, Wapenaar K. Wave field extrapolation and pre-stack depth migration in an elastic inhomogeneous media. *Geophysical Prospecting*, 2002, **50**(3):629~643
- [18] 马在田. P-SV 反射波的倾角时差校正(DMO)方法研究. 地球物理学报, 1996, **39**(2):243~250
Ma Z T. DMO for P-SV converted reflection. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, **39**(2):243~250
- [19] 李景叶,陈小宏,郝振江等. 多波时移地震 AVO 反演研究. 地球物理学报, 2005, **48**(4): 902~908
Li J Y, Chen X H, Hao Z J, et al. A study on multiple time-lapse seismic AVO inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(4): 902~908
- [20] 胡中平,管路平,顾连兴等. 高速屏蔽层下广角地震波场分析及成像方法. 地球物理学报, 2004, **47**(1): 88~94
Hu Z P, Guan L P, Gu L X, et al. Wide angle seismic wave field analysis and imaging method below the high velocity shield layers. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**(1): 88~94
- [21] 李怀胜. 广角反射在塔中地区的应用. 石油物探, 2005, **44**(3): 292~295
Li H S. The application of wide-angle reflection method in central Tarim basin. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 2005, **44**(3):292~295
- [22] Shou H, Liu H, Gao J H. AVO inversion based on common shot migration. *Applied Geophysics*, 2006, **3**(2):99~104
- [23] 楚泽涵,高 杰,黄隆基等. 地球物理测井方法与原理(上). 北京:石油工业出版社, 2007. 234~242, 307
Chu Z H, Gao J, Huang L J, et al. Method and Principle of Geophysical Logging (First Volume) (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2007. 234~242, 307
- [24] Fred J H 著. 地震振幅解释. 孙夕平,赵良武译,北京:石油工业出版社, 2006. 18~39
Fred J H. Seismic Amplitude Interpretation (in Chinese). Sun X P, Zhao L W Trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006. 18~39
- [25] 谭廷栋. 天然气勘探中的测井技术. 北京:石油工业出版社, 1994. 176~183
Tan T D. Logging Technology in Gas Prospecting (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. 176~183