

转换波反射系数近似公式的比较及分析

屈建余¹, 蔡伟涛¹, 李录明²

(1. 甘肃工业职业技术学院, 甘肃 天水 741025; 2. 成都理工大学 信息工程学院, 四川 成都 610000)

摘要: 多分量地震资料解释的首要问题就是多分量的标定和对比, 其中最关键的是转换波反射系数的求取及子波的选取, 然而 Zoeppritz 方程在数学表达上极其复杂, 在物理意义上也不直观, 因此很难得到直接的应用。为此, 在详细介绍五种近似公式的基础上, 利用六种模型分析了随入射角的变化各公式的适应性, 最后得出结论, Aki 和 Richard 的近似公式适应性普遍比较好。

关键词: 转换波; Zoeppritz 方程; 反射系数; 近似公式

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)04-0661-03

多分量地震勘探能够提供更加丰富的资料, 有效降低地震勘探的多解性, 为复杂油气藏的勘探提供了一个新的思路, 已经越来越引起重视^[1-2]。而多分量地震资料解释的首要问题, 就是多分量的标定和对比, 其中最关键的是转换波反射系数的求取及子波的选取^[3]。由于 Zoeppritz 方程在数学上极其复杂, 需要用一个矩阵去描述它们之间的关系, 很难直接分析介质的各个参数, 如纵、横波的速度, 速度差, 波阻抗差及密度等对振幅系数的影响, 同时所表达的物理意义也不直观, 因此很难得到直接的应用。为了克服反射系数在形式和计算上的困难, 许多学者对方程进行了简化。但是这些简化工作大多将纵波反射系数公式作为重点, 对转换波波反射系数公式简化近似的研究相对薄弱^[4-5]。为此笔者主要讨论一些重要的转换波反射系数近似公式并分析其应用前景。

1 转换波反射系数近似公式

1.1 近似公式一

在上、下层弹性参数变化不大的前提下, Aki 和 Richard 对 Zoeppritz 方程组进行了简化, 得到 P-SV 转换波反射系数近似公式(1)^[6]:

$$R_{ps}(\theta, \varphi) = -\frac{\alpha \tan \varphi}{2\beta} \left[\frac{\Delta \rho}{\rho} \left(1 - \frac{2\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta + \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) - \left(\frac{4\beta^2}{\alpha^2} \sin^2 \theta - \frac{4\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \frac{\Delta \beta}{\beta} \right], \quad (1)$$

式中, α 为纵波速度, β 为横波速度, $\Delta \beta$ 为横波速度差, θ 为纵波入射角, φ 为转换波反射角。

1.2 近似公式二

周竹生^[7]在 $1/\cos \varphi \approx 1 + 0.5 \sin^2 \varphi$ 的近似条件下将式(1)进行简化, 得式(2)

$$R_{ps} = S \sin \theta + C \sin^3 \theta, \quad (2)$$

式中, $S = -\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2\beta}{\alpha} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} - \frac{2\beta}{\alpha} \frac{\Delta \beta}{\beta}$,

$$C = \frac{\beta}{2\alpha} \left(1 + \frac{3\beta}{2\alpha} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{2\beta}{\alpha} \left(1 + \frac{2\beta}{\alpha} \right).$$

此公式与郑晓东^[8]近似公式一致。

1.3 近似公式三

甘永忠^[9]从 Zoeppritz 精确解出发, 在入射角小于临界角的前提下, 给出了高精度 P-SV 波反射系数

$$R_{ps} = \frac{\left[\frac{\Delta \rho}{2\rho} \sin \theta + \left(\frac{2\Delta \beta}{\beta} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \right] \sin \varphi \cos(\theta + \varphi)}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

式中, ρ 为密度, $\Delta \rho$ 为密度差, β 为横波速度, $\Delta \beta$ 为横波速度差, θ 为纵波入射角, φ 为转换波反射角。

1.4 近似公式四

令横波阻抗 $J = \beta \rho$, 得 $\frac{\Delta J}{J} = \frac{\Delta \beta}{\beta} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$, 则

$$R_{ps}(\theta, \varphi) = -\frac{\alpha \tan \varphi}{2\beta} \left[\left(1 + 2 \sin^2 \varphi - \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} - \left(4 \sin^2 \varphi - \frac{4\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right) \frac{\Delta J}{J} \right],$$

对 Gardner 关系式 $\rho \approx k\alpha^{1/4}$ 两边同时求微分得到

$$\Delta \rho / \rho = \Delta \alpha / (4\alpha)。$$

把上式写成 P 波阻抗的形式

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{5} \left(\frac{4\rho}{\rho} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = \frac{1}{5} \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = \frac{1}{5} \frac{\Delta I}{I}$$

代入上式可得近似式(4)

$$R_{ps}(\theta, \varphi) = C(\theta, \varphi) \frac{\Delta I}{I} + D(\theta, \varphi) \frac{\Delta J}{J}, \quad (4)$$

式中

$$C(\theta, \varphi) = -\frac{\alpha \tan \varphi}{10\beta} \left(1 + 2\sin^2 \varphi - \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right),$$

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\alpha \tan \varphi}{\beta} \left(2\sin^2 \varphi - \frac{2\beta}{\alpha} \cos \theta \cos \varphi \right),$$

其中, ΔJ 为横波阻抗差, ΔI 为纵波阻抗差。

1.5 近似公式五

Alejandro 等^[10]在 Aki 等^[6]近似的基础上进一步假设, 在小入射角的情况下, 得出

$$R_{ps}(\theta) = -2\sin \varphi \left[\left(\frac{\alpha}{4\beta} + \frac{1}{2} \right) \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta \beta}{\beta} \right], \quad (5)$$

此式仅适用于小角度, 且误差较大, 优点是形式简单。

2 转换波近似公式分析

为了对比分析各近似公式的精度和稳定性, 对 6 种不同的模型分别按以上 5 个近似公式进行了定量计算。模型一为 Ostrander 模型^[11], 模型二为 Goodway 模型^[12], 模型三为大纵横波波阻抗差模型, 模型四为小纵横波波阻抗差模型, 模型五为大纵波波阻抗差和小横波波阻抗差模型, 模型六为小纵波波阻抗差和大横波波阻抗差模型(表 1)。

图 1 给出了利用近似公式及 Zoeppritz 方程分别计算的 6 种模型的反射系数。从图 1 中可以看出: 随着入射角的增大, 5 种近似公式所算的转换波反射系数都与 Zoeppritz 方程有一定的偏差, 有的偏大, 有的偏小, 但相对误差的大小不同。

表 1 近似公式分析模型

层位	模型一			模型二			模型三			模型四			模型五			模型六		
	α	β	ρ	α	β	ρ	α	β	ρ	α	β	ρ	α	β	ρ	α	β	ρ
A	2438	1625	2.14	2857	1666	2.275	3500	1750	2.40	2898	1449	2.40	3200	1333	2.425	3500	2058	2.425
B	3048	1244	2.40	2898	1290	2.425	2438	1219	2.14	2800	1400	2.14	2400	1200	2.275	3300	1375	2.275
C	2438	1625	2.14	2857	1666	2.275												

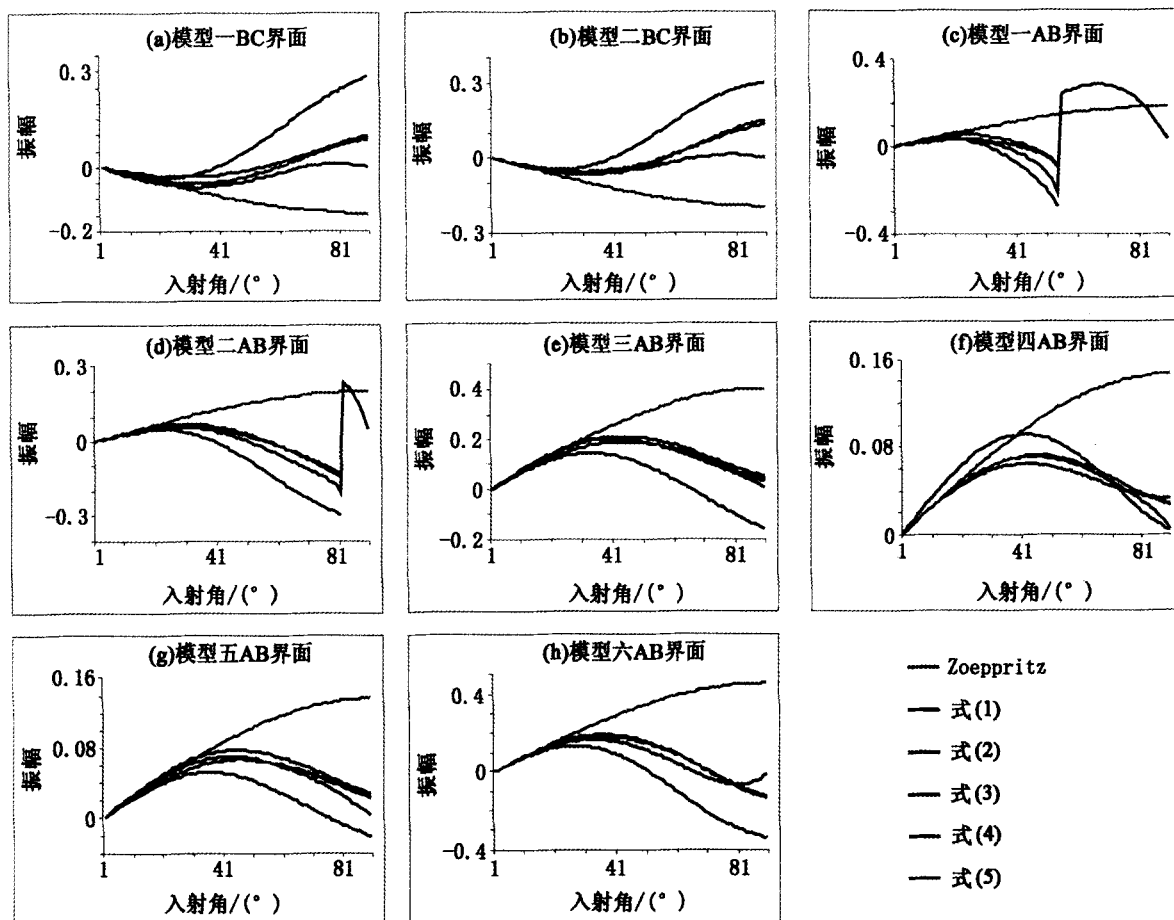


图 1 不同近似公式计算的 6 个模型的反射系数

将各个近似公式所算出来的转换波反射系数与由 Zoeppritz 方程计算的结果对应相减,再除以 Zoeppritz 方程计算的值,可得到相对误差(表 2)。从表 2 中可看出:式(1)的相对误差很小,最大误差不到 5%,可认为与 Zoeppritz 方程相等;其他近似公式的相对误差在小角度时最大值均不大于 10%。

表 2 模型六 AB 层的误差分析

$\theta/(^{\circ})$	式(1)相对误差	式(2)相对误差	式(3)相对误差	式(4)相对误差	式(5)相对误差
5	-0.03461	-0.04068	0.032126	-0.03861	-0.02816
10	-0.02877	-0.05336	0.038231	-0.03277	-0.00231
15	-0.01863	-0.0753	0.048862	-0.02265	0.043279
20	-0.00353	-0.10797	0.064653	-0.00459	0.112887
25	0.017646	-0.15387	0.086746	0.020487	0.213868
30	0.04668	-0.21737	0.116967	0.055326	0.358631

3 结论与建议

通过 6 种模型的比较可知,Aki 和 Richard 的近似公式[式(1)]具有很好的适应性,对于各种模型的计算精度都比较高,而且公式相对简单,能快速、较好地求得转换波的反射系数,为后面合成记录的制作提供可靠保障,具有很好的推广价值。

参考文献:

[1] 石玉梅,姚逢昌,曹宏.多波多分量天然气勘探技术的进展[J].勘探地球物理进展,2003,26(3):172-177.

[2] 徐丽萍,杨勤勇.多波多分量地震技术发展展望[J].勘探地球物理进展,2002,25(3):47-52.

[3] 陆基孟.地震勘探原理[M].东营:石油大学出版社,1993.

[4] 孙鹏远,孙建国,卢秀丽.P-SV波 AVO 分[J].石油地球物理勘探,2003,38(2):131-135.

[5] 孙鹏远,孙建国,卢秀丽.P-SV波 AVO 方法研究进展[J].地球物理学进展,2003,18(4):602-607.

[6] Aki K I,Riehards P G. Quantitative seismology[M]. San Francisco:W H Freeman and Co,1980:144-154.

[7] 周竹生.P-SV 和 SH 波的 AVO 分析[J].石油地球物理勘探,1993,28(4):430-438.

[8] 郑晓东.AVO 理论和方法的一些进展[J].石油地球物理勘探,1993,27(3):305-317.

[9] 甘永忠.用 P-SV 波叠加剖面合成横波层速度剖面[J].石油地球物理勘探,1995,30(1):56-61.

[10] Alejandro A V,Reinaldo J M. Stratigraphic inversion of poststack PS converted waves date[J]. Expand Abstracts of 70th Annual Internat SEG Mtg,2000:150-153.

[11] Ostrander W J. Plane-wave reflection coefficients for gas sands at nonnormal angles of incidence[J]. Geophysics,1984,49:1637-1648.

[12] Goodway B,Chen T,Downten J. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters[J]. Expanded Abstracts of 67th Annual Internet SEG Mtg,1997:183-186.

THE COMPARISON AND ANALYSIS OF SEVERAL APPROXIMATE REFLECTION COEFFICIENT FORMULAE OF P-S WAVE

QU Jian-yu¹, CAI Wei-tao¹, LI Lu-ming²

(1. Gansu Industry Polytechnic College,Tianshui 741025,China; 2. College of Information Engineering,Chengdu University of Technology,Chengdou 610000,China)

Abstract: The most important problem in interpreting multi-wave seismic data is multi-wave calibration and contrast, in which the extraction of the reflection coefficient and the selection of the wavelet are most critical. However, Zoeppritz equation is extremely complex and does not have intuitive physical meaning, and hence it is difficult for this equation to receive a direct application. This paper therefore makes a detailed description of five approximate formulae, based on analyzing the suitability of six models with the variation of the angle of incidence. It is concluded that the approximate formula Aki&Richard generally has better adaptability.

Key words: P-S wave;Zoeppritz equation;reflection coefficient;approximate equation

作者简介: 屈建余(1965-),男,本科,陕西蒲城人,工程师,主要从事地球物理勘查的教学与科研工作。