

复杂介质中地震多次反射波快速正演模拟

顾汉明¹, 王 纬², 陈国俊²

(1. 中国地质大学地球物理系, 湖北武汉 430074; 2. 中原油田勘探局勘探开发研究院, 河南濮阳 457001)

摘要: 多次波的压制方法研究及多次波对一次波振幅随炮检距变化(AVO)影响的分析, 需要实用的多次波正演模拟方法. 提出了适用复杂层状介质的多次波射线码的计算方法, 使得多次波的射线追踪易于快速实现. 同时, 提出了减少多次波计算量的量板表法及插值法. 模型的多次波计算结果表明, 多次波振幅的计算精度高, 计算速度快, 对文中设计的模型, 振幅的最大相对误差为 1.8%, 而计算时间减少了 0.6 倍.

关键词: 多次反射波; AVO; 快速正演模拟.

中图分类号: P631.4 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)05-0541-04

作者简介: 顾汉明(1963—), 男, 副教授, 2000年毕业于中国地质大学(武汉)研究生院, 获博士学位, 主要从事复杂介质中地震波场正演和岩性反演方法的研究.

含煤地层、海底与海水面、高速与低速岩层交互沉积形成强波阻抗界面, 地震波在该地层中传播时会产生全程或层间多次反射波, 它们与一次反射波相互干涉, 造成一次反射波解释的困难, 而且使煤地层下方岩层反射波的信息变弱. 因此, 在资料处理时, 需要基于工区多次波特点的分析, 提供合适的处理参数压制多次波^[1,2]; 在资料解释时, 需要研究多次波对一次波振幅随炮检距变化(AVO)影响的^[3], 而这些工作需要实用的多次波正演模拟方法^[4]. 该方法必须能够计算复杂介质中按指定射线路径传播的旅行时及振幅, 传播的射线路径可以由人工给定, 也可以依据多次波类型由计算机自动给定, 计算效率要高. Covey 等^[5]提出了水平层状介质条件下射线法多次波正演模拟算法, Hron 等^[6]给出了水平层状介质中具有相同旅行时不同传播路径的多次波组数计算公式, 基于此, 在研究多次波运动学特征时, 可以仅计算某一炮检距下按其中之一的多次波射线路径传播的波. 该方法未考虑振幅的计算, 为此, Hron^[7]又将上述多次波按相同旅行时和相同振幅划分许多类, 从而某一炮检距下具有某一旅行时的所有可能的有限反射次数的多次波的计算, 可以化简为具有该旅行时的一部分多次波振幅的计算.

实际介质并非是水平层状介质, 不同射线路径不满足相同旅行时的条件, 而且, 多次波类型虽然多, 但从多次波能量来考虑, 也只有几种对一次反射波影响较大的全程和微屈多次波. 为此, 本文基于 Hron 等^[6,7]的射线数计算的思想, 提出了适用任意层状介质的多次波射线码的计算方法, 使得多次波的射线追踪易于快速实现. 同时, 提出了减少多次波计算量的量板表法及插值法. 模型的多次波计算结果表明, 多次波振幅的计算精度高, 计算速度快, 对文中设计的模型, 振幅的最大相对误差为 1.8%, 而计算时间减少了 0.6 倍.

1 方法原理

1.1 多次反射波射线类型的确定

多次反射波射线路径可由各层中射线段数确定, Hron 等^[6,7]给出了水平层状介质中具有相同射线段数(相同旅行时)不同的多次波传播路径的组数 N_k 计算公式:

$$N_k(n_1, \dots, n_j) = \prod_{j=1}^{J-1} C_{n_j+n_{j+1}-1}^{n_j}, \quad J \geq 2. \quad (1)$$

式中, J 为地层总层数, n_j 为第 j 层中射线段数之半,

$$C_{n_j+n_{j+1}-1}^{n_j} = \frac{(n_j+n_{j+1}-1)!}{n_{j+1}!(n_j-1)!}, \quad j=1, \dots, J-1. \quad (2)$$

在任意层状介质中, 式(1)中不存在相同旅行时

概念,仅表示具有 $2n_j$ 个射线段数的多次反射波传播路径组数. 由于多次反射波能量不仅取决于多次波在某层中传播的射线段数,还取决于多次波在该层内的反射次数,而反射系数通常小于 0.2,多次波每反射一次,其能量就减少将近 10^2 个数量级,故由(1)式给定的组数中,仅有一部分反射次数较小的多次反射波能量影响到一次反射波.

设多次波在介质中总的最大反射次数为 M ,第 j 层中上行波入射至第 j 层顶界面时,反射次数为 μ_j ,第 j 层中下行波入射至第 j 层底界面时,反射次数为 m_j . 并约定如果一次上行波不再向下反射,则将不会产生任何多次波;如果一次上行波向下反射产生一次多次波后不再向下反射,则将有一次多次波. 则有,

$$\sum_{i=1}^J (\mu_i + m_i) = M, \quad (3)$$

且有

$$\sum_{i=1}^{j-1} (\mu_i - m_i) + \mu_j \geq m_j, \quad j \neq J; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{j-1} (\mu_i - m_i) + \mu_j + 1 = m_j, \quad 0 \leq \mu_j, m_j < M, \quad j \neq J, \quad (5)$$

$$0 \leq \mu_j < M, \quad 0 < m_j \leq M.$$

所有满足式(3)的解 $\{\mu_1, \dots, \mu_J; m_1, \dots, m_J\}$ 的个数组成了多次反射波射线类型组数. 对于某一组解,同一类型的多次反射波具有不同射线路径的个数为

$$N_d(\mu_1, \dots, \mu_J; m_1, \dots, m_J) = \prod_{j=1}^{J-1} C_{m_j}^{\mu_j} C_{m_j + \mu_j - 1}^{\mu_j - 1}, \quad J \geq 2. \quad (6)$$

式中,

$$n_j = \sum_{i=1}^{j-1} (\mu_i - m_i) + \mu_j + 1. \quad (7)$$

1.2 多次反射波射线路径的确定

利用式(3)和(6)可以由计算机自动地计算多次反射波射线码来控制多次波射线所走的路径. 并约定射线码的数字表示射线所在的层号,层号自上而下编号;两层之间的界面号由该界面下方层号表示,地面为 1;整个射线从震源到接收点用一数字序列表示射线依次经过的层. 为此,本文在实际模型的多次波正演模拟中定义 3 种方式来控制多次波射线所走的路径.

(1)给定两层之间的多次波反射最大次数 K ,

考虑所有可能的多次波(全程和微屈多次波). 则对于目的层上的反射波的射线而言,多次波总的最大反射次数(M_{\max})为 $2K+1$,最小反射次数(M_{\min})为 3,则所有多次波射线数是满足式(3)及条件 $M_{\min} \leq M \leq M_{\max}$,并由(6)式计算出结果. 例如两层模型中,若多次波反射最大次数(K)为 3,则 $M_{\max} = 7, M_{\min} = 3$,从而可以计算出表 1 所示的某一炮检距下各层多次波反射次数、射线类型数、介质中多次波射线总数,表中还示出了各类射线路径示意图.

表 1 多次波反射次数及射线路径

Table 1 Numbers of multiples reflected and sketches of their ray paths

M	射线类型	μ_1	m_1	μ_2	m_2	射线数	射线总数	多次反射波射线路径示意图
3	1	1	0	0	2	1	4	
	2	1	1	0	1	2		
	3	0	0	1	2	1		
5	4	1	0	1	3	2	7	
	5	2	1	0	2	3		
	6	2	0	0	3	1		
	7	0	0	2	3	1		
7	8	1	1	2	3	2	29	
	9	1	0	2	4	3		
	10	2	1	1	3	6		
	11	2	2	1	2	3		
	12	2	0	1	4	3		
	13	3	1	0	3	4		
	14	3	2	0	2	6		
	15	3	0	0	4	1		
	16	0	0	3	4	1		

(2)人工给定两层之间的层号,并且该两层之间的多次反射次数也由人工给定. 即(L_1, L_2, K),其中 L_1 为上行波反射的界面序号, L_2 为下行波反射的界面序号, K 为某层底界面上多次波最大反射次数,则多次反射波射线路径的确定可在式(3)、(6)中加入约束条件

$$\mu_j = 0, \quad j \neq L_1;$$

$$m_j = 0, \quad j \neq L_2 - 1, J.$$

进行求解. 例如定义了(1,3,1),当前目的层界面序号为 5,则求解得到 $\mu_1 = 1, m_1 = 0, \mu_2 = 0, m_2 = 1, \mu_3 = 0, m_3 = 0, \mu_4 = 0, m_4 = 1$,射线数为 2. 从而射线经过的界面号组成的射线码分别为(1,2,3,2,1,2,3,4,5,4,3,2,1)及(1,2,3,4,5,4,3,2,1,2,3,2,1). 该方式定义的多次波类型可由人工依据强波阻抗界

面的序号定义,计算量可以控制,计算的结果可以进行针对性地分析.

(3)人工给定两层之间的多次波反射最大次数,仅考虑目的层反射界面号上的所有可能的多次波,则多次反射波射线路径的确定方法与第 2 种确定方法相同,仅仅这里令 $L_2 = J, L_1 = 1, 2, \dots, J - 1$ 即可. 该方式定义的多次波类型由程序自动给定,计算量取决于总层数.

1.3 多次反射波射线振幅的计算

地震波以某一入射角入射到界面上时,波发生反射和透射,其能量分配满足 Zoeppritz 方程^[8],根据该方程可以得到反射系数和透射系数的解析表达式. 由于表达式中有三角函数及平方根计算,每当多次波射线在界面上反射或透射一次都要计算其反射系数和透射系数,造成计算量很大. 故本文提出两种方法减少多次波计算量:其一是量板法,计算出每一个界面上一系列入射角对应的反射系数和透射系数形成量板. 即对每一个界面,入射角从零度开始,以某一增量递增,分别计算某一入射角入射到该界面上的反射系数和透射系数,直至最大入射角为止;对所有界面依次计算,从而得到界面序号、入射角、反射系数和透射系数量板表. 如要计算某一条射线振幅时,可按该射线在各个界面上的入射角的大小进行查表和插值求得;其二是插值法,考虑到多次波类型的特点,某一炮检距下每一组内多次波的入射角及在某层内传播的路径相近,从而仅计算每一组内的入射角最小及最大对应的两条多次波的射线振幅,该组内其他多次波射线的振幅依据入射角的大小插值得得.

2 模型的多次波计算结果分析

模型来自某盆地地震资料解释获得的地质剖面的浅层 5 个不等倾角的倾斜地层,各层弹性参数见表 2. 为了分析第 3、4 两层中多次波传播的振幅特点,利用上述方法,基于射线追踪技术,可以计算出表 1 中各类多次波的振幅 (A_2) 与一次反射波振幅 (A_1) 之比随炮检距变化的曲线(图 1),图中振幅之比已用分贝表示,即 $20\lg(A_2/A_1)$. 计算时采用单边放炮,接收道数 96 道,道间距 25 m,偏移距 0 m. 从图 1 可看出,同一类型的多次波振幅随炮检距增大而减少,随着反射次数的增大而迅速递减;相同反射次数的多次波的振幅相近,处于相同的数量级. 因

表 2 模型各层弹性参数
Table 2 Elastic parameters of model

层号	炮点法线深度/m	纵波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	横波速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
1	130	2 320	1 340	1.60
2	200	2 770	1 600	1.67
3	150	1 836	1 060	1.50
4	240	2 930	1 690	1.70
5	半空间	3 400	1 960	1.76

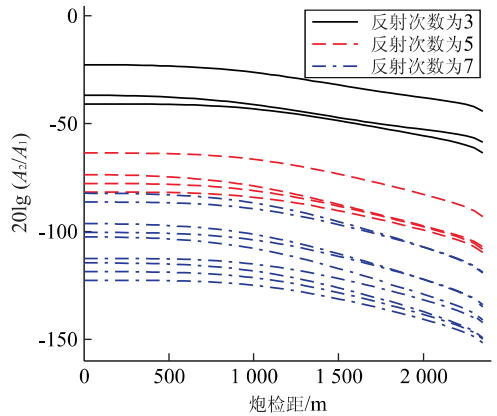


图 1 各类多次波的振幅与一次反射波振幅之比随炮检距变化的曲线

Fig. 1 Curves of ratio AVO of multiples to primary wave

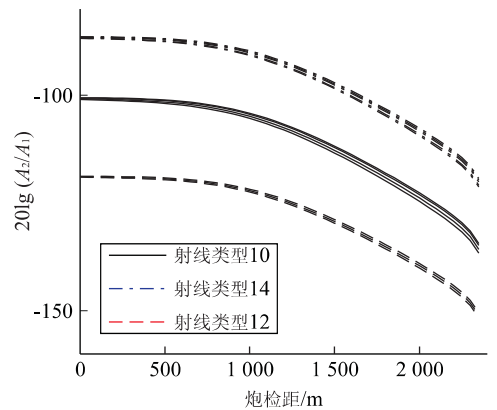


图 2 射线路径不同的同一类型多次波振幅与一次反射波振幅之比随炮检距变化的曲线

Fig. 2 Curves of ratio AVO of identical multiples with different ray paths to primary wave

而,地层中仅仅反射次数较低的多次波对一次波的影响较大. 从同一类型不同射线路径对应的多次波振幅与一次反射波的振幅之比随炮检距变化的计算结果(图 2)可看出它们的振幅近似相等,对于本文所设计的模型,其最大相对误差为 1.8%,其差异随

着地层倾角的增大及偏移距的增大而缓慢增大,故在地层倾角较小时,同一类型的多次波仅计算其中之一的某条射线传播的振幅即可;而在地层倾角较大时,同一类型的多次波的振幅可以采用插值法计算.对文中设计的模型,计算时间减少了 0.6 倍.

3 结论

本文提出的多次波射线码的计算方法适用任意层状介质,使得多次波的射线追踪易于快速实现.同时,提出的多次波振幅计算的量板表法及插值法,不仅计算精度高,而且计算速度快.对文中设计的模型,振幅的最大相对误差为 1.8%,而计算时间减少了 0.6 倍.

本文工作及成文过程中,得到了王家映教授的悉心指导,特此深表感谢.

参考文献:

- [1] Ross W S. Multiple suppression; beyond 2-D. Part I; theory [M]. Dallas: Society of Exploration Geophysicists, 1997. 1387—1390.
- [2] Ross W S. Multiple suppression; beyond 2-D. Part II;

- application to subsalt multiples [M]. Dallas: Society of Exploration Geophysicists, 1997. 1391—1394.
- [3] Cheng S, Hron F, Daley P F. Determination of shear wave velocities and densities from P-wave amplitudes in VSP data; Canadian [J]. Journal of Exploration Geophysics, 1992, 28: 19—29.
- [4] Gwitton A, Cambois G. Prestack elimination of complex multiples; a gulf of Mexico subsalt example [M]. New Orleans: Society of Exploration Geophysicists, 1998. 1310—1313.
- [5] Covey J D, Hron F, Peacock K L. On the role of partial ray expansion in the computation of ray synthetic seismograms for layered structures [J]. Geophysical Prospecting, 1989, 37: 907—923.
- [6] Hron F, Nechtschein S. Extension of asymptotic ray theory to linear viscoelastic media [M]. Denver: Society of Exploration Geophysicists, 1996. 1727—1729.
- [7] Hron F. Efficient computation of the amplitude-distance curves for multiples and converted phases in horizontally layered media [M]. New Orleans: Society of Exploration Geophysicists, 1998. 1727—1729.
- [8] Aki K, Richards P G. Quantitative seismology, theory and methods [M]. San Francisco: Freeman W H & Co, 1980.

FAST SYNTHETIC SEISMOGRAMS FOR MULTIPLES IN ANY COMPLEX STRATIFIED MEDIA

Gu Hanming¹, Wang Wei², Chen Guojun²

(1. Department of Geophysics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Research Institute of Exploration & Development, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, Puyang 457001, China)

Abstract: The research of multiple suppression and analysis of influence of multiple amplitude upon primary amplitude-via-offset (AVO) need an effective multiple-modeling method. Thus, a new method has been developed that can automatically calculate multiple ray codes in any complex stratified media, making multiple ray trace fast. Meanwhile, an approach to the computation of multiple amplitude by methods of seeking table and interpolation are discussed. The modeling result shows that the method is of high precision and fast-speed in multiple amplitude calculation. The maximum relative error of amplitude is 1.8% and the spent time by using the method has decreased by 0.4 times one by using accurate ray tracing in the designed model.

Key words: seismic multiples; amplitude-via-offset; fast synthetic seismograms.