·处理技术·　文章编号:1000-7210(2016)05-0894-07

一种新的高精度广角反射动校正方法

刘　骁① 　高尔根*① 　丁　亮① 　何迎春② 　薛玉英② 　刘文静③

(①防灾科技学院地震科学系,河北三河 065201;②东方地球物理公司研究院地质研究中心,
河北涿州 072751;③东方地球物理公司石油物探职业教育学校,河北涿州 072751)

刘骁,高尔根,丁亮,何迎春,薛玉英,刘文静. 一种新的高精度广角反射动校正方法. 石油地球物理勘探,2016,51(5):894-900.

摘要　从水平多层介质的时距方程出发,采用参数方程求导的方法,求取时间 t 关于炮检距 x 在炮点附近的各阶导数,从而获得在炮点附近展开的六阶多项式方程;再通过对方程性态的分析,经过数学变换,给出大炮检距情况下的广角动校正量估算公式,并从理论上分析了六阶多项式和广角动校正公式的适用区间。数值计算和模拟结果表明:在炮检距与目的层深度之比大于 4 的情况下,本文提出的新动校正方程仍可以将旅行时相对误差控制在 1%的范围内,并能把不同层位近、远炮检距处的同相轴校正平直,是一种精度较高的广角反射动校正新方法。

关键词　广角反射　动校正　水平层状介质　分炮检距

中图分类号:P631　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2016.05.008

1　引言

近几十年发展起来的广角地震勘探技术有效解决了一些地下存在高速屏蔽层地区的深部地壳的地震成像问题。所谓广角地震,就是在常规地震勘探的基础上,增大炮检距使地震波入射角等于或大于临界角,而以广角入射到地下界面的地震波振幅特别大,波的能量也很强,可以穿透高速屏蔽层顶面和基底并向下继续传播,实现对深部构造的地震成像[1]。同时,利用广角地震反射可以有效避开近炮点上的各种干扰,提高地震资料品质。

随着炮检距的不断增大,近炮点处近似满足双曲关系的时距曲线[2]在广角、大炮检距条件下已非双曲关系,因此广角反射地震记录不能采用常规的动校正方法进行处理。前人对广角动校正方法已经做了许多研究工作,取得了一些进展,如:Taner 等[3]提出了水平层状介质泰勒展开四阶截断动校正公式,但当炮检距与目的层深度的比值较大时,该公式会有较大误差;为了减小截断误差的影响,Tsvankin 等[4]引入补偿系数得到了优化的四阶动校正方程;Castle[5]提出了平移双曲线动校正方法;Alkhalifah 等[6]对文献[4]提出的校正公式进行了改进,给出了针对四次项的优化算法,修正了无限大炮检距造成的影响;Sun 等[7]提出了泰勒展开六阶优化动校正公式,在六阶项上增加了一个经验系数来减小截断误差,计算精度有所改进;薛冈等[8]通过对大炮检距地震资料做动校正发现动校正高阶多项式的系数对动校正的效果有重要影响;胡中平[9]基于文献[4]的思路介绍了一种新的六阶优化方法,对六阶泰勒展开式在炮检距趋于无穷大时进行误差补偿,提高校正精度;刘洋[10]推导并给出了各向同性介质中动校正方程的分式展开表达式形式;夏洪瑞等[11,12]通过对文献[3]的四阶方程增加一个补偿因子和高阶截断方程误差均值的方法减小截断误差带来的影响,获得了一定的效果;钟伟[13]采用切比雪夫多项式对高阶泰勒展开截断动校正公式各项系数进行了拟合,得到了较好的计算效果;尤建军等[14]采用二维相似系数扫描法确定优化四阶、六阶动校正方程中高阶项的系数,一定程度上提高了大炮检

* 河北省三河市燕郊开发区防灾科技学院地震科学系,065201。Email:gaoergen@126.com
本文于 2015 年 9 月 12 日收到,最终修改稿于 2016 年 6 月 28 日收到。
本项研究受国家自然科学基金项目(41174043、40674071)和中央高校基本科研业务费项目(ZY20120101、ZY20150304)联合资助。

距地震资料动校正的精度;丁帆等[15]通过高阶项补偿系数的形式对常规的泰勒展开式进行切比雪夫截断优化,得到了较为理想的校正效果。

上述大炮检距广角反射动校正方程大多基于泰勒展开式及其优化形式,围绕着最大限度地减小泰勒展开式的截断误差进行讨论。本文从水平层状介质时距曲线的参数方程出发,推导了适合不同炮检距区间的动校正公式,在近炮点区间,由于走时曲线近似满足双曲规律,选择保留合适阶数的泰勒展开多项式进行校正;而在远炮检距处通过数学推导得出只含有炮检距、地层速度和双程垂直旅行时三个物理量来描述地震射线旅行时的动校正公式,使得广角大炮检距动校正有效避开了泰勒展开截断公式在远炮检距处造成的高阶截断误差影响,提高了广角反射动校正的精度。

2　方法原理

2.1　水平层状介质不同炮检距处的时距关系

对于多层水平层状各向同性介质,Slotnick[16]给出了用地层参数 v_i、h_i 和射线参数 p 表示的时距关系参数方程

$$t(p)=2\sum_{i=1}^{n}\frac{\dfrac{h_i}{v_i}}{\sqrt{1-p^2v_i^2}} \tag{1}$$

$$x(p)=2p\sum_{i=1}^{n}\frac{h_iv_i}{\sqrt{1-p^2v_i^2}} \tag{2}$$

式中:n 表示地层层数;v_i 和 h_i 分别表示第 i 层的厚度和层速度;p 为地震射线参数。

从参数方程出发,可求得反射波旅行时 t 和炮检距 x 关于射线参数 p 的各阶导数,再通过参数求导法则,求得 t 关于 x 的各阶导数,作为近炮点处时距关系多项式

$$t(x)=c_0+c_1x^2+c_2x^4+c_3x^6 \tag{3}$$

各项系数表达式(具体推导见附录 A)为

$$c_0=2\sum_{i=1}^{n}t_i$$

$$c_1=\frac{1}{4\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^2}$$

$$c_2=-\frac{\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^4}{64\left(\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^2\right)^4}$$

$$c_3=\frac{\left(\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^4\right)^2}{256\left(\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^2\right)^7}$$

式中 t_i 表示地震波在第 i 层的单程垂直旅行时。令 n 层水平层状介质中最大层速度为 $v_{\mathrm{m}}=\max\{v_i\}$,显然参数方程中的参数 p 是在$(0,1/v_{\mathrm{m}})$范围内变化。将参数方程改写为

$$s=t-2\sum_{\substack{i=1\\v_i\neq v_{\mathrm{m}}}}^{n}\frac{t_i}{\sqrt{1-p^2v_i^2}}=\frac{2t_{\mathrm{m}}}{\sqrt{1-p^2v_{\mathrm{m}}^2}} \tag{4}$$

$$y=x-2\sum_{\substack{i=1\\v_i\neq v_{\mathrm{m}}}}^{n}\frac{t_ipv_i^2}{\sqrt{1-p^2v_i^2}}=\frac{2t_{\mathrm{m}}pv_{\mathrm{m}}^2}{\sqrt{1-p^2v_{\mathrm{m}}^2}} \tag{5}$$

式中 t_{m} 为最大速度层(高速层)的单程垂直反射时间。

建立 s 和 y 之间的数学关系,并将其进行泰勒展开、参数代换、化简等一系列数学推导与变换,最终得到广角大炮检距处的时距关系估算公式(详细推导见附录 B)

$$t=\frac{x}{v_{\mathrm{m}}}+2t_{\mathrm{m}}^2\Bigg/\left[\frac{x}{v_{\mathrm{m}}}-2\sum_{\substack{i=1\\v_i\neq v_{\mathrm{m}}}}^{n}\frac{t_i\left(\dfrac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2}}\right]-2t_{\mathrm{m}}^4\Bigg/\left[\frac{x}{v_{\mathrm{m}}}-2\sum_{\substack{i=1\\v_i\neq v_{\mathrm{m}}}}^{n}\frac{t_i\left(\dfrac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2}}\right]^3+2\sum_{\substack{i=1\\v_i\neq v_{\mathrm{m}}}}^{n}t_i\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2} \tag{6}$$

式(6)为用各层的速度 v_i 和垂直反射旅行时 t_i 表示的大炮检距地震射线时距关系估算公式,在此,将六阶多项式(式(3))和式(6)合称为分炮检距广角反射动校正估算公式,简称分炮检距估算公式。

2.2　不同炮检距处时距方程的适用区间

上文分别给出了小、大炮检距处的时距关系表达式,但是还没有明确其适用的区间范围,通过对 s 和 y 之间函数关系的性态分析和数学手段,分别求得分炮检距时距关系表达式(式(3))和式(6)的适用区间范围临界点(详细推导见附录 C)为

$$x_{\mathrm{R1}}=2v_{\mathrm{m}}\left[\sqrt{2}\sum_{\substack{i=1\\v_i\neq v_{\mathrm{m}}}}^{n}\frac{t_i\left(\dfrac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2}{2\sqrt{1-\dfrac{\left(\dfrac{v_i}{v_{\mathrm{m}}}\right)^2}{2}}}+t_{\mathrm{m}}\right] \tag{7}$$

$$x_{R2}=2v_m\left[\sum_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_m}}^{n}\frac{t_i\left(\frac{v_i}{v_m}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_m}\right)^2}}+t_m\right] \tag{8}$$

因此，对于广角反射情况下的水平多层介质来说，为了获得较好的动校正效果，应该分成以下三部分进行校正：

(1)当在炮点附近，即 $x<x_{R1}$ 时，采用 x 的高阶方程式(3)进行校正；

(2)当炮检距很大时，考虑到 x_{R2} 是式(6)的边界点，此时公式(6)的误差也是最大的，为了减小误差，选取 $x>2x_{R2}-x_{R1}$ 作为式(6)的应用区间；

(3)而在$[x_{R1},2x_{R2}-x_{R1}]$区间内采用三次样条插值法进行拟合插值，以减小边界误差影响。

3 几种动校正公式的对比分析

Taner 等[3]提出的水平层状介质下泰勒展开四阶、六阶截断动校正方程分别为

$$t^2(x)=a_0+a_1x^2+a_2x^4 \tag{9}$$

$$t^2(x)=a_0+a_1x^2+a_2x^4+a_3x^6 \tag{10}$$

Tsvankin 等[4]对四阶截断方程进行了优化，加入了修正项进行补偿

$$t^2(x)=a_0+a_1x^2+\frac{a_2x^4}{1+C_1^*x^2} \tag{11}$$

胡中平[9]参照文献[4]的思路针对六阶截断公式提出了新的优化校正方程

$$t^2(x)=a_0+a_1x^2+a_2x^4+\frac{a_3x^6}{1+C_2^*x^4} \tag{12}$$

以上各式中

$$a_0=t_0^2$$

$$a_1=\frac{1}{\mu_1}$$

$$a_2=\frac{\mu_1^2-\mu_2}{4t_0^2\mu_1^4}$$

$$a_3=\frac{2\mu_2^2-\mu_1\mu_3-\mu_1^2\mu_2}{8t_0^4\mu_1^7}$$

$$C_1^*=\frac{a_2}{\frac{1}{v_{rms}^2}-a_1}$$

$$C_2^*=\frac{a_3}{\frac{1}{v_{rms}^2}-a_2}$$

$$\mu_j=\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^{2j}\Big/\sum_{i=1}^{n}t_i$$

其中：t_0 为 n 层水平介质垂直反射旅行时总和；v_{rms} 为 n 层的均方根速度。

为了比较本文推导的动校正方程以及上述各动校正公式的校正效果，对水平层状介质模型(表 1)，应用不同方法分别对模型进行计算，结果如图 1 和图 2 所示。

表 1 水平层状介质模型参数

层号	厚度/m	速度/(m·s^{-1})
1	500	2000
2	400	4500
3	800	6000
4	600	4500
5	400	3500

由图 1 可见：各校正方程对表 1 模型计算得到的旅行时曲线在炮检距与最大深度比小于 2 时与实际旅行时曲线的误差很小，随着炮检距增大，式(9)～式(12)计算的旅行时误差逐渐变大；当炮检距大于 10000m 时，经过系数补偿优化后的四阶、六阶动校正方程的走时曲线相对于四阶、六阶截断方程更趋于稳定，且六阶优化方程比四阶优化方程具有更高的精度。本文的分炮检距估算公式在大炮检距处与实际旅行时曲线的误差均小于上述各式，与实际旅行时曲线几乎重合。图 2 也表明，式(9)～式(12)

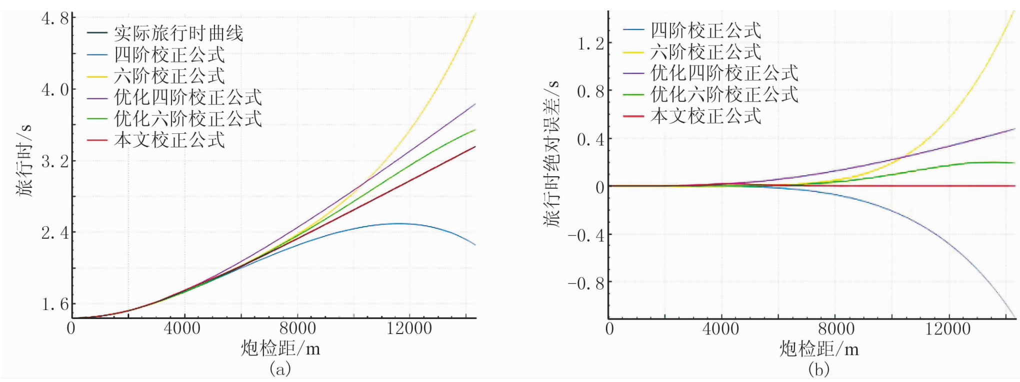

图 1 不同校正公式计算的旅行时曲线(a)和误差曲线(b)

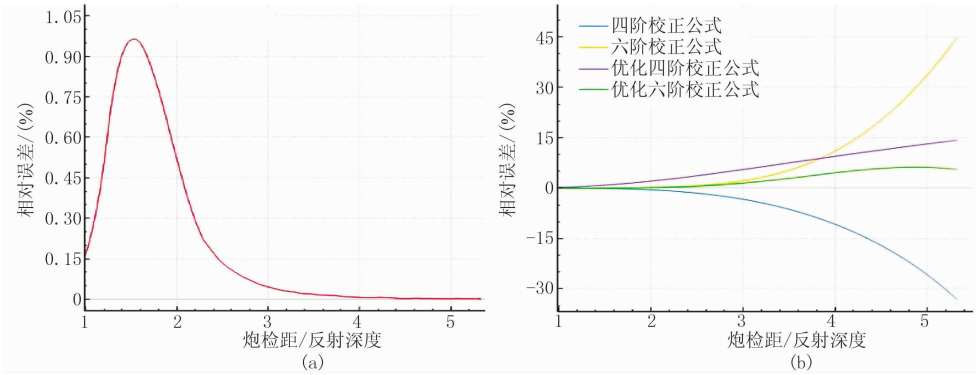

图 2　本文方法(a)与其他方法(b)计算的旅行时曲线的相对误差对比

校正方程的旅行时相对误差在炮检距与最大深度之比值超过 2.5 后逐渐变大，均超过了 5%，甚至更大。而本文方法的相对误差在小炮检距处和大炮检距处均较小，中段为采用插值形成的误差峰值，在整个炮检距范围内将旅行时相对误差控制在小于 1% 的范围内。因此，分炮检距动校正估算公式具有较高的校正精度。

4　正演模拟

为了进一步验证本文分炮检距动校正估算方法的校正效果，对表 1 所示的水平层状介质模型进行正演模拟，结果如图 3a 所示。不同方法的动校正处理结果如图 3b～图 3f 所示。

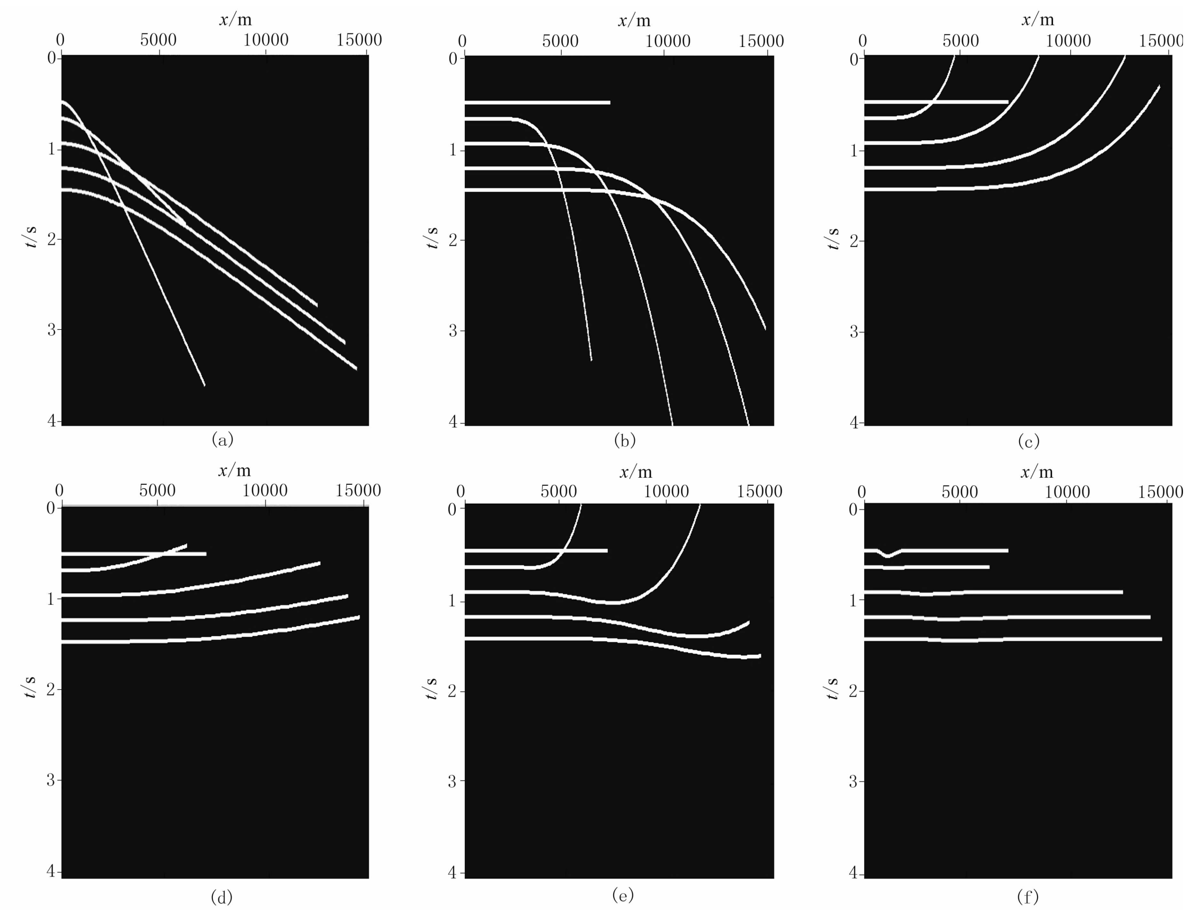

图 3　正演数据不同动校正方法的处理结果

(a)正演模拟记录；(b)四阶截断式校正结果；(c)六阶截断式校正结果；
(d)优化四阶式校正结果；(e)优化六阶式校正结果；(f)本文方法校正结果

从以上校正结果中可以看出，不同的动校正公式对模型第一层的校正效果均较好。随着炮检距与反射深度之比增加，四阶截断方程和六阶截断方程严重校正不足或校正过量，从第二层开始，六阶方程的校正效果要略好于四阶方程。六阶优化方程的校正精度也比四阶优化方程明显提高了许多，而且在收敛性和稳定性方面，优化方程要优于截断方程，但在炮检距与反射深度之比大于 4 时，六阶优化方程出现校正不足的失稳现象，这说明校正方程的阶数并不是越高越好。分炮检距估算公式相比于以上各式具有更高的校正精度，无论是在近炮点处还是远炮检距处，均能将模拟同相轴校正平直，尤其在炮检距超过 10000m 时，方程的校正精度依然很高，校正效果也很稳定，证明了本文提出的新动校正公式的有效性和稳定性。

5 结论

本文从水平层状介质下反射波时距曲线参数方程出发，通过理论推导，定量地给出了广角情况下反射波动校正的估算公式，并明确给出了公式的应用区间。同时也将该方程与传统的四阶、六阶截断方程以及四阶、六阶优化方程在含有高速层的速度模型上进行计算对比，通过对不同校正方程的时距曲线、旅行时误差、相对误差以及模拟正演记录的动校正计算结果比较分析可知：

(1)在炮检距与目的层深度比小于 2 的情况下，各校正公式的校正精度普遍较高，当炮检距与目标深度之比大于 2 时，虽然优化的四阶、六阶动校正方程比四阶、六阶截断方程校正效果有所提高也更趋于稳定，但这四个方程的走时误差均随炮检距的增大而不同程度增大。

(2)在炮检距与目的层深度之比大于 2 时，四阶、六阶截断公式和优化的四阶、六阶公式所计算的旅行时相对误差呈不同程度增大，本文推导得到的分炮检距动校正估算公式在整个近、远炮检距上均可将走时相对误差很好地控制在小于 1% 的范围内，精度较高。

(3)理论计算和正演模拟的结果表明，分炮检距动校正估算方程的走时曲线精度较高，与实际旅行时曲线几乎达到重合，在模拟记录上能够将不同炮检距处的模拟同相轴拉平至准确位置，尤其是远炮检距处，校正效果较为理想。

由于在分炮检距的两个动校正方程适用区间之间的炮检距范围内采用的是插值拟合的方法，因此带来了一定的误差影响，从本文方法的动校正结果(图 3f)可以看出，第一层的动校正明显受此影响，因而如何减小该段炮检距区间内的拟合误差是下一步需要进行的研究。

同时，本文的研究基于水平层状各向同性介质，但实际地下构造是异常复杂的各向异性介质，将本文的结果推广应用到各向异性介质，将对含有高速屏蔽层地区的广角地震勘探资料处理具有一定的应用价值。

参 考 文 献

[1] 曹文俊，李振春，王小六. 广角地震处理方法研究进展. 地球物理学进展，2004，19(2)：296-299.
Cao Wenjun，Li Zhenchun，Wang Xiaoliu. The progress of processing methods in wide angle reflection and refraction seismic. Progress in Geophysics，2004，19(2)：296-299.

[2] Dix C H. Seismic velocities from surface measurements. Geophysics，1955，20(1)：68-86.

[3] Taner M T，Koehler F. Velocity spectra digital computer derivation and application of velocity functions. Geophysics，1969，34(6)：859-881.

[4] Tsvankin I，Thomsen I. Nonhyperbolic reflection moveout in anisotropic media. Geophysics，1994，59(8)：1290-1304.

[5] Castle R. A theory of normal moveout. Geophysics，1994，59(6)：983-999.

[6] Alkhaliafh T，Tsvankin I. Velocity analysis for transversely isotropic media. Geophysics，1995，60(5)：1550-1566.

[7] Sun C W，Wang H W，Martinez R D. Optimized 6th order NMO correction for long-offset seismic data. SEG Technical Program Expanded Abstracts，2002，21：2313-2316.

[8] 薛冈，王良书，胡中平. 大炮检距地震资料动校正方法比较. 石油地球物理勘探，2003，38(2)：151-155.
Xue Gang，Wang Liangshu and Hu Zhongping. Comparison between normal moveout (NMO) methods for long-offset seismic data. OGP，2003，38(2)：151-155.

[9] 胡中平. 优化 6 次 NMO 校正方法研究. 石油地球物理勘探，2003，38(6)：603-607.
Hu Zhongping. Study of NMO correction method by optimized sixth-order term. OGP，2003，38(6)：603-607.

[10] 刘洋. 双曲时距方程对地震资料处理的影响. 石油地球物理勘探，2004，39(2)：133-138.

Liu Yang. Impact of hyperbolic time-distance equation on seismic data processing. OGP, 2004, 39(2): 133-138.

[11] 夏洪瑞，葛川庆，邹少峰．具有截断误差校正的广角反射 NMO 方法．石油物探，2005，44(2)：154-157.
Xia Hongrui, Ge Chuanqing and Zou Shaofeng. NMO method of wide angle reflection with truncation error correction. GPP, 2005, 44(2): 154-157.

[12] 夏洪瑞，葛川庆．误差均值法实现广角反射 NMO 校正．石油地球物理勘探，2005，40(4)：381-385.
Xia Hongrui and Ge Chuanqing. NMO correction of wide-angle reflection by mean errors value method. OGP, 2005, 40(4): 381-385.

[13] 钟伟．广角反射地震资料处理方法研究及地壳结构反演[学位论文]．吉林长春：吉林大学，2006.

[14] 尤建军，常旭，刘伊克．VTI 介质长偏移距非双曲动校正公式优化．地球物理学报，2006，49(6)：1770-1778.
You Jianjun, Chang Xu, Liu Yike. Optimization of nonhyperbolic moveout correction equation of long-offset seismic data in VTI media. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1770-1778.

[15] 丁帆，张金海，姚振兴．长偏移距地震资料的优化契比雪夫动校正方法．地球物理学进展，2011，26(3)：836-842.
Ding Fan, Zhang Jinhai, Yao Zhenxing. Optimized Chebyshev method for normal moveout of long-offset seismic data. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 836-842.

[16] Slotnick M M. Lessons in Seismic Computing. SEG George Banta Company, Menasha, 1959.

附录 A　近炮点处时距关系表达式系数推导

时距曲线参数方程式(1)和式(2)可以表示为

$$t(p)=2\sum_{i=1}^{n}\frac{t_i}{\sqrt{1-p^2v_i^2}} \tag{A-1}$$

$$x(p)=2\sum_{i=1}^{n}\frac{t_ipv_i^2}{\sqrt{1-p^2v_i^2}} \tag{A-2}$$

可求得反射波旅行时 t 和炮检距 x 关于射线参数 p 的各阶导数为

$$\begin{cases} t'\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}p}\Big|_{p=0}=0 \\ x'\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}p}\Big|_{p=0}=2\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^2 \end{cases} \tag{A-3}$$

$$\begin{cases} t''\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^2t}{\mathrm{d}p^2}\Big|_{p=0}=2\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^2 \\ x''\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}p^2}\Big|_{p=0}=0 \end{cases} \tag{A-4}$$

$$\begin{cases} t'''\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^3t}{\mathrm{d}p^3}\Big|_{p=0}=0 \\ x'''\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^3x}{\mathrm{d}p^3}\Big|_{p=0}=6\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^4 \end{cases} \tag{A-5}$$

$$\begin{cases} t^{(4)}\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^4t}{\mathrm{d}p^4}\Big|_{p=0}=18\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^4 \\ x^{(4)}\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^4x}{\mathrm{d}p^4}\Big|_{p=0}=0 \end{cases} \tag{A-6}$$

$$\begin{cases} t^{(5)}\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^5t}{\mathrm{d}p^5}\Big|_{p=0}=0 \\ x^{(5)}\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^5x}{\mathrm{d}p^5}\Big|_{p=0}=90\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^6 \end{cases} \tag{A-7}$$

$$\begin{cases} t^{(6)}\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^6t}{\mathrm{d}p^6}\Big|_{p=0}=450\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^6 \\ x^{(6)}\Big|_{p=0}=\dfrac{\mathrm{d}^6x}{\mathrm{d}p^6}\Big|_{p=0}=0 \end{cases} \tag{A-8}$$

再通过参数求导法则，求得 t 关于 x 的各阶导数为

$$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=0}=0 \tag{A-9}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2t}{\mathrm{d}x^2}\Big|_{x=0}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}t_iv_i^2 \tag{A-10}$$

$$\frac{\mathrm{d}^3t}{\mathrm{d}x^3}\Big|_{x=0}=0 \tag{A-11}$$

$$\frac{\mathrm{d}^4t}{\mathrm{d}x^4}\Big|_{x=0}=\frac{-3\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^4}{8\left(\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^2\right)^4} \tag{A-12}$$

$$\frac{\mathrm{d}^5t}{\mathrm{d}x^5}\Big|_{x=0}=0 \tag{A-13}$$

$$\frac{\mathrm{d}^6t}{\mathrm{d}x^6}\Big|_{x=0}=\frac{45\left(\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^4\right)^2}{16\left(\sum\limits_{i=1}^{n}t_iv_i^2\right)^7} \tag{A-14}$$

则由泰勒展开式系数公式即可求得近炮点处六阶多项式各项系数。

附录 B 大炮检距时距关系公式推导

由式(4)和式(5)可知，s 和 y 是关于 p 的参数方程，它们之间存在显式关系

$$s^2 = (2t_\mathrm{m})^2 + \frac{y^2}{v_\mathrm{m}} \tag{B-1}$$

上式可变换为

$$s = \frac{y}{v_\mathrm{m}}\sqrt{1+\left(\frac{2t_\mathrm{m}v_\mathrm{m}}{y}\right)^2} \tag{B-2}$$

当$\frac{y}{v_\mathrm{m}}>2t_\mathrm{m}$ 时，对式(B-2)进行泰勒展开，取其展开式的前三项，有

$$s = \frac{y}{v_\mathrm{m}} + \frac{2t_\mathrm{m}^2 v_\mathrm{m}}{y} - \frac{2t_\mathrm{m}^4 v_\mathrm{m}^3}{y^3} \tag{B-3}$$

将式(4)和式(5)代入式(B-3)中替换掉s和y，并且当 $p\rightarrow\frac{1}{v_\mathrm{m}}$时，整理可得大炮检距下时距关系表达式

$$t = \frac{x}{v_\mathrm{m}} + \frac{2t_\mathrm{m}^2}{\frac{x}{v_\mathrm{m}} - 2\sum\limits_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_\mathrm{m}}}^{n}\frac{t_i\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}}} - \frac{2t_\mathrm{m}^4}{\left[\frac{x}{v_\mathrm{m}} - 2\sum\limits_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_\mathrm{m}}}^{n}\frac{t_i\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}}\right]^3} + 2\sum_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_\mathrm{m}}}^{n} t_i\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2} \tag{B-4}$$

附录 C 不同炮检距处时距公式临界点划分

将附录 B 中式(B-2)在$\frac{y}{v_\mathrm{m}}>2t_\mathrm{m}$ 条件下进行泰勒展开，从而导出了远炮检距处的时距曲线公式，反之，则不能进行泰勒展开。由式(5)可知

$$\frac{y}{v_\mathrm{m}} = 2t_\mathrm{m}\times\frac{pv_\mathrm{m}}{\sqrt{1-p^2v_\mathrm{m}^2}} \tag{C-1}$$

要使$\frac{y}{v_\mathrm{m}}<2t_\mathrm{m}$ 成立，应该满足条件$\frac{pv_\mathrm{m}}{\sqrt{1-p^2v_\mathrm{m}^2}}<1$，即 $p<\frac{\sqrt{2}}{2v_\mathrm{m}}$。

将 $p<\frac{\sqrt{2}}{2v_\mathrm{m}}$代入式(5)，整理可得

$$x < 2v_\mathrm{m}\left[\sqrt{2}\sum_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_\mathrm{m}}}^{n}\frac{\frac{t_i\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}{2}}{\sqrt{1-\frac{\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}{2}}} + t_\mathrm{m}\right] \tag{C-2}$$

令 x_R1 等于上式小于号右侧的表达式，即 $x<x_\mathrm{R1}$，这样就得到了近炮点时距关系式(3)的适用区间，x_R1 为近炮点临界点。在远炮检距处，此时射线参数 p 满足 $p\rightarrow\frac{1}{v_\mathrm{m}}$。同样由式(5)可知

$$\frac{x}{v_\mathrm{m}} > 2\sum_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_\mathrm{m}}}^{n}\frac{t_i\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}} + 2t_\mathrm{m} \tag{C-3}$$

即

$$x > 2v_\mathrm{m}\left[\sum_{\substack{i=1\\ v_i\neq v_\mathrm{m}}}^{n}\frac{t_i\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{v_i}{v_\mathrm{m}}\right)^2}} + t_\mathrm{m}\right] \tag{C-4}$$

令 x_R2 等于上式大于号右侧的表达式，即 $x>x_\mathrm{R2}$，从而得到了大炮检距下时距关系式(式(6))的适用区间，x_R2 为远炮检距临界点。

（本文编辑：宜明理）

作 者 简 介

刘骁 硕士，1991 年生；2013 年毕业于防灾科技学院地震科学系地球物理学专业，获学士学位；2016 年毕业于防灾科技学院地质工程专业，获硕士学位；主要研究方向为地震勘探资料动校正处理方法及应用等。