

一种震相拾取误差的自动判别和计算方法

刘 志, 王夫运, 杨 健

(中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002)

摘 要 本文给出了一个主要用于深地震测深数据的震相识别误差(不确定性)的判别和计算方法. 该方法集中讨论从记录截面拾取震相这一过程所引起的判别误差. 以震相前后一定时窗内的地震记录振幅的均方根之比为判别依据, 找出误差分布范围并给出走时误差与振幅比的分级相关函数. 由此, 当震相确定后, 计算程序将根据记录数据自动算出识别误差. 实践证明该方法不仅更加客观真实、方便快捷, 而且为今后震相提取工作的进一步科学规范打下了基础.

关键词 深地震测深, 震相, 误差, 振幅比

中图分类号 P631 文献标识码 A 文章编号 1004-2903(2007)03-0924-05

A method for automatically identifying and calculating the uncertainty in phase picking

LIU Zhi, Wang Fu-yun, Yang Jiang

(Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China)

Abstract We give a method for use as the data of deep seismic sounding which identifies and calculates the uncertainty automatically in phase picking. Our attention is concentrated on discussing the identifying uncertainty in the process of picking phase from recording section. It is based on the around ratio of root mean square of oscillation amplitudes of a phase in a certainty window of time, the distribution of uncertainty is found and the correlation function of uncertainty with ratio of amplitude are given. With this method, the programme can calculate the uncertainty automatically when the phases in the recorders are confirmed. Our tests bear out that this method is not only more impersonality, convenient and rapid but is making the work of phase picking more scientific and canonical.

Keywords deep seismic sounding, phase, uncertainty, ratio of amplitude

0 引 言

提取震相是地震研究的基础, 在某种意义上决定着地震研究结果的可靠性甚至结论的正确与否. 震相拾取的优劣可从两个方面考察, 即识别的正确性和拾取的准确性. 前者是指得到的震相是否反映了真实的地震波传播特征换句话说即是否真实可靠. 后者则是指得到的震相走时与真值的误差有多大, 或者说对于每一个记录所得各个震相的不确定性有多大. 在地震测深研究中对前者历来是十分重视的, 因为一个波组判断错误, 可能得出与实际地

壳结构相去甚远的错误结论. 而对于误差的判定则往往被忽略, 其原因主要是误差的大小一般情况下并不会从根本上影响结论的正确性, 更重要的是震相识别误差的确定又相对来说十分困难. 其困难性在于:

(1) 误差的组成非常复杂, 其中包括仪器响应, 时间服务系统, 野外施工等因素以及处理软件数值计算过程引起的误差和震相拾取过程的判别误差.

(2) 误差判定十分困难, 上述各类误差中除系统性的可以排除的误差外, 最后都累积到记录截面图中由识别者进行主观判断, 因此, 观测资料的整理,

收稿日期 2006-07-10; 修回日期 2006-08-20.

基金项目 地震科学基金(A07104)和国家自然科学基金重点项目(40334040)联合资助.

作者简介 刘志, 男, 1958年6月生, 高级工程师, 1982年毕业于云南大学地球物理专业, 现主要从事地震资料的处理、解释及地震观测技术和方法的研究工作.

记录截面的质量,成图和显示方式大小,及识别者的经验和习惯等都与识别误差密切相关。

(3) 误差判断的标准不统一,对同一个记录,同一个震相,不同的人识出的结果会有一些差异,这是由于没有客观统一的判定标准而造成的。

随着地震测深研究的深入,地震解释方法技术的不断进步,对资料的精度、可靠性和提供的信息量要求越来越高,震相识别误差也越来越不容忽视。人们也可以用各种去噪声方法处理地震数据以提高信噪比^[1],但由于噪声的来源是多方面的不可能通过资料处理来根本解决,因此识别误差是不可避免的。从人工源宽角反射/折射剖面的记录截面中可以看出,有震相十分清晰的^[2~6],也有震相不够清晰的^[7],尤其是有些 S 波资料,其信噪比是无法与 P 波相比的^[8]。但是,当震相一旦确定时,它们之间的记录质量差异就几乎被忽略了。通常处理中所给出的震相识别误差,是依据波组的主频,以主频的一个周期为参考^[9],再根据浅层或深层、初至或续至等不同震相的清晰程度,由识别者主观判定识别误差大小^[10]。其弊端在于:

(1) 结果的主观性太强,缺乏客观统一的判定标准。

(2) 只能一个波组给出一个平均误差。实际上从大多数记录截面中都可以看出^[2~6],比较清晰的震相其误差必定小于波组的一个主周期,而且同一个波组中不同记录的记录质量往往是不同的,有时甚至相差很大,因此平均误差显然是不合理的,起码丢掉了许多原始资料的质量信息。需要强调的是:我们这里讨论的误差,不是统计意义上的(如均方根误差等)误差,而是针对每一个记录的每一个走时衡量其辨识精度的一个参数。因此,其本身也是记录截面中所提供的重要信息,对资料的解释有重要的参考价值,尤其在反演解释的分辨矩阵^[11~12]中更是不可缺少的参数。1994 年 C. A. Zelt 等在用地震测深走时反演研究加拿大格伦维尔省东南地壳结构时,首先给出了以振幅比确定震相误差的特定数据判别标准^[13],并结合经验参数算出了走时识别误差(不确定性)。本文试图在已有研究和经验基础上,找出普遍适用的误差判别标准及切实可行的误差计算方法。

1 方法原理

为使问题的焦点更加突出,以下讨论的误差不考虑仪器、观测及计算等因素引起的可消除的误差,而集中讨论从记录截面提取震相这一过程所引起的

判别误差或称为“走时不确定性”,这也是误差讨论中最难以定论而经常被回避的问题。

我们认为振幅比是客观可行的判别误差依据。因为在记录截面中判断一组波组的出现,首先是根据振幅的变化来确定的,频率变化主要用于信噪比较低时的辅助识别或对波组性质的估计。但是,即使有了振幅比作为依据仍然存在许多问题。首先应确定的是判别标准,由于记录质量的优劣往往用信噪比来表示,而信噪比实际上就是振幅比,故此,我们下面的讨论将以震相前后的振幅作为震相判别依据。从震相识别的过程和常识,我们首先来确定识别误差的上限和下限。我们知道在正常能分辨的情况下,误差最大不会超过信号的一个周期,因此,我们通常根据主频给出的误差实际上仅仅是误差的上限,对信噪比低的记录来说,以此作为每一波组识别误差的平均估计值是合理的。对于那些信噪比高的记录,用误差上限作为识别误差显然是不合理的。当误差很小时,振幅比对误差的作用将会减弱,因为此时采样率大小,图形精度等因素将不容忽略。对于误差下限我们在下面还会作进一步的讨论。当确定了误差判别标准和上下限之后,我们就可以用振幅比构造一个阶梯函数以实现误差的自动判断分级和自动计算。

以识出的震相为中心,向前后取等间距时窗 W_{pre} 和 W_{aft} (以下称半窗口) 构成振幅比判别窗口 $W = W_{pre} + W_{aft}$ 。如采样间隔为 D , n 为样点数, $W_{pre} = W_{aft} = nD$ 。震相前后的均方根振幅为:

$$A_{pre} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i a_i^2}$$

$$i = -n, 0 \quad (\text{以震相处为零点}), \quad (1)$$

$$A_{aft} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i a_i^2}$$

$$i = 0, n \quad (a_i \text{ 为振幅值}), \quad (2)$$

则识别误差:

$$e = \alpha(r)nD, \quad r = \frac{A_{aft}}{A_{pre}}, \quad (3)$$

其中 $\alpha(r)$ 为一与 r 有关的系数。

窗口大小对误差估计有较大影响,不能随意选取。然而,在有关文献中都没有给出窗口选取的明确标准。如前所述,我们以波组主频周期为误差上限,同时根据经验,对于人工地震记录截面,当振幅比小于 1.5 倍时,震相不再清晰识别较为困难,因此,以波组主频的一个周期为截取半窗口,同时以振幅比的 1.5 倍对应误差上限。显然,当振幅比为 10 倍时,震相已经十分清晰,对于实际资料来说其记录质量已可视为

优秀的记录,故以此对应误差下限.考虑到屏幕或图形分辨以及噪声掩盖部分所造成的误差,参考 Zelt 的结论^[9],确定误差下限对应的 α 为 0.16.

根据以上分析,系数 $\alpha(r)$ 为阶梯函数,其确定取值见表 1.

表 1 误差函数表

Table 1 The function of uncertainty

r	α	e/ms
≥ 10	0.16	17.28
≥ 4	0.28	30.26
≥ 2	0.40	43.20
≥ 1.75	0.60	64.80
≥ 1.5	0.80	86.40
< 1.5	1.00	108.0

这里第三列表示当半窗口 $nD=108$ ms 时,所对应的识别误差.当取主频为 8Hz,半窗口为 $w=125$ ms 时,由上述系数确定的误差上限为 125 ms,下限为 20 ms,与 Zelt 所得经验值相同^[9].

2 应用实例

图 1 为一段实测人工地震测深剖面的记录截面,被检出的震相为 P_g . 首先对记录进行频谱分析确定其平均主频为 9.25 Hz,因此半窗口为 108 ms. 根据上述方法将震相参数及误差计算结果列表如下,见表 2.

表 2 实测记录截面走时数据及误差

Table 2 The data of recording section and uncertainty

序号	炮检距/km	走时/s	折合走时/s	振幅比	误差/s	测点号
1	-48.150	9.216	1.191	17.75	17.28	592
2	-46.861	8.908	1.098	98.48	17.28	594
3	-44.719	8.644	1.191	1.18	108.00	596
4	-41.959	8.140	1.147	211.99	17.28	598
5	-40.318	7.870	1.150	2567.63	17.28	600
6	-38.460	7.460	1.050	185.51	17.28	602
7	-36.091	7.010	0.995	31.65	17.28	604
8	-33.969	6.641	0.979	22.41	17.28	606
9	-32.236	6.320	0.947	1.34	108.00	608
10	-28.928	5.730	0.909	88.65	17.28	610
11	-25.821	5.159	0.856	1925.34	17.28	612
12	-22.934	4.501	0.679	1379.33	17.28	614
13	-19.946	4.080	0.756	1715.07	17.28	616
14	-17.195	3.590	0.724	5197.53	17.28	618
15	-15.252	3.212	0.670	412.59	17.28	620
16	-13.159	2.830	0.637	306.77	17.28	622
17	-11.042	2.379	0.539	10709.29	17.28	624
18	-8.460	1.903	0.493	32237.52	17.28	626
19	-4.349	1.022	0.297	68270.82	17.28	630
20	-3.318	0.795	0.242	385.57	17.28	632
21	2.625	0.632	0.195	948359.30	17.28	634
22	4.296	0.995	0.278	14716.45	17.28	636
23	6.644	1.535	0.428	105754.20	17.28	638
24	12.570	2.660	0.565	2240.62	17.28	640
25	14.993	3.103	0.604	792.45	17.28	642
26	18.442	3.800	0.726	2.33	43.20	644
27	21.217	4.330	0.794	7204.42	17.28	648
28	22.129	4.530	0.842	1706.30	17.28	650
29	23.996	4.885	0.886	33.22	17.28	652
30	26.401	5.532	1.132	87.50	17.28	654
31	28.905	5.916	1.098	31.25	17.28	656
32	31.780	6.418	1.121	267.29	17.28	658
33	33.350	6.690	1.132	4.67	30.24	660
34	38.297	7.462	1.079	6463.45	17.28	662
35	41.792	7.988	1.023	627.22	17.28	664
36	43.923	8.380	1.059	613.13	17.28	666
37	46.989	8.907	1.076	21.42	17.28	668

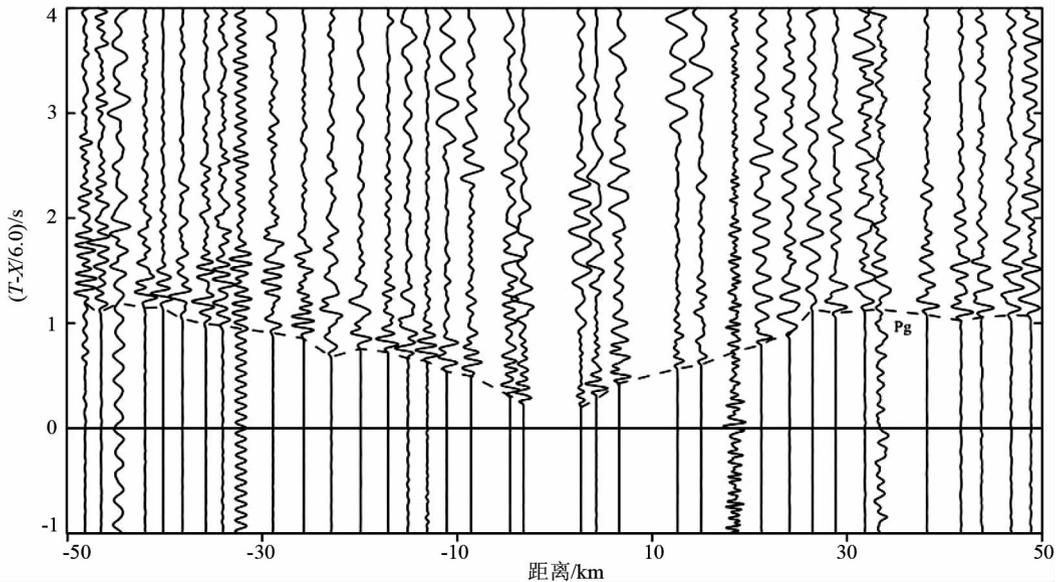


图1 实测人工地震测深剖面记录截面

Fig. 1 Recording section of deep seismic sounding

对照图和表可以看出,由于绝大部分震相十分清晰,振幅比大于 10,因此,误差取最小值 17.28 ms.如按照以往惯用的误差分析方法,所有记录的误差均为 108 ms,显然振幅比判断结果更贴近实际.而且,第 33(测点 660)号记录信噪比较低,26(测点 644)号记录次之,对比记录截面图,结果一目了然.特别是第 9 和 3(测点 608 和 596)号记录信噪比最差分别为 1.34 和 1.18,单道识别已较难分辨,但对比前后记录仍可确定震相位置,此时误差取上限 108 ms 应为合理.更重要的是这些判别结果都是在震相识别完成后自动得到的,效率非常高.

3 结论与讨论

根据上述分析可以得出以下结论和认识:

(1) 以振幅比作为误差判别标准,通过找出检出震相与振幅比的关系确定误差,是实现误差自动识别的核心.实践证明,这一方法在传统震相识别误差基础上提高了一大步,更为客观地反映了震相提取精度及记录截面中地震记录的优劣分布,同时还具有实用高效的特点.如能形成共识,则将最大限度地避免不同人不同习惯引起的系统误差,并为震相识别的科学规范打下坚实基础.

(2) 由于依据的是记录截面给出的相对振幅(可以滤波或不滤波),因此避免了绝对振幅的换算,与辨识者看到的结果相对应,且无需作多次识别统计平均计算,使该方法方便快捷便于推广应用.该方法不仅适用于人工源测深资料而且对天然地震测深

资料也有参考意义.

(3) 振幅比作为一个重要参数对地震数据处理有重要意义,它不仅与识别误差关系密切,而且可以作为反演界面的约束参数^[14]直接参与资料解释.然而,振幅比与误差的关系是一个值得进一步探讨的问题.尽管振幅比计算是精确的,但误差范围和分级的选取仍是基于已有经验和认识基础上的给定值,因此误差结果仍然包含不小的人为因素,而更为科学规范的误差标准和计算方法仍需进一步的努力和探索.

在测深领域许多资深的专家学者都亲自参与震相的识别,说明这一工作的极端重要性.笔者在此抛砖引玉,希望引起同行的广泛重视,在充分讨论基础上达成共识,使震相提取工作既更加科学规范,又切实可行,这无疑会给有关的进一步研究打下更加坚实的基础,同时也使珍贵的地震信息资源得以充分有效的利用.

参 考 文 献 (References):

- [1] 张军华 吕 宁 田连玉,等. 地震资料去噪方法技术综合评述[J]. 地球物理学进展,2006,21(2), 546~553.
- [2] Youxue W, Walter D M, Xuecheng Y, Robert G C. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh fault northwest China[J]. J. Geophys. Res., 2003,108; ESE 7.
- [3] 赵金仁 李松林 张先康,等. 青藏高原东北缘莫霍界面的三维空间构造特征[J], 地球物理学报, 2005, 48(1), 78~85.
- [4] 张中杰 白志明 王椿楠,等. 冈瓦纳和扬子型地块地壳结构:以滇西孟连-马龙宽角反射剖面为例[J]. 中国科学(D), 2005,

35(5): 387~392.

- [5] 赵金仁 张先康 张成科,等. 利用宽角反射/折射和深反射探测剖面揭示三河—平谷大震区深部结构特征[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 646~65.
- [6] 刘福田 徐佩芬 刘劲松,等. 大陆俯冲带的地壳速度结构-东大别山造山带深地震宽角反射/折射研究[J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 366~372.
- [7] 张先康 赵金仁 张成科,等. 帕米尔东北侧地壳结构研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 665~671.
- [8] 刘志,张先康,周雪松,等. 帕米尔东北侧地壳物性结构及其发震环境探讨[J]. 地震学报, 2003, 25(3): 242-249.
- [9] Tom P, Ray E W, Michael A F. Three-dimensional velocity structure of Siletzia and other accreted terranes in the Cascadia forearc of Washington[J]. J. Geophys. Res., 1999, 104: 18015~18039.
- [10] Robert H C, Wakter D M. Two-Dimensional velocity structure along the synclinal axis of the great valley, California [J]. Bull. Seism. Soc. Am. 1986, 76: 1305~1322.
- [11] 王夫运 张先康 杨卓欣. 用地震走时反演长白山天池火山地区的地壳二维结构[J]. 地震学报, 2002, 24(2): 144~152.
- [12] 刘志 张先康 王夫运,等. 用地震走时反演计算长白山天池火山区二维地壳泊松比[J]. 地震学报, 2005, 27(3): 324~331.
- [13] Zelt C A, Forsyth D A. Modeling wide-angle seismic data for crustal structure: Southeastern Grenville province [J]. J. Geophys. Res., 1994, 99: 11687~11704.
- [14] 白志明, 王椿镛. 云南遮放—宾川和孟连—马龙宽角地震剖面的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 257~26.

《地球物理学进展》2007 年征订启事

各期刊订户:

2007 年《地球物理学进展》由季刊改为双月刊,每年 6 期,每期定价不变,仍为 35 元,全年定价变为:210 元。特此通知。

订刊联系方式

(1) 本刊编辑部(邮局汇款与单位电汇均可)

汇款地址 100029 北京市 9825 信箱《地球物理学进展》编辑部

电话传真 010-62369620,010-62007696

联系人 刘少华,赵雷

电子邮件 shliu@cgs.org.cn, geophys@163.com

开户行 中国农业银行北京建德支行 账号 190901040000456

收款单位 中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学进展》款,同时写上您的姓名和联系地址)

(2) 天津全国非邮发联合证订服务部

邮编地址 300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号

电话传真 022-23973378,022-23962479

网 址 <http://www.LHZD.com>

E - mail LHZD@public.tpt.tj.cn