

数字化台网的近震震相自动识别

朱元清, 佟玉霞, 于海英, 宋俊高

(上海市地震局, 上海 200062)

摘要:首次提出了数字化台网对于近震震相自动识别的“波形变化值增长”算法和“无后续震相”判据.前者根据波形变化值来描述近震波形的变化,用该值的增长捕捉地震波振幅或频率的突变;后者在识别到初动后考察后续波形的变化情况,如果没有其它震相,初动识别无效.该判据使算法在初动震相振幅过小识别不清时,不会误将后续振幅较大的震相识别为初动震相.该方法经实例检验表明精度符合地震速报的要求,并编制了相应的程序.

关键词:震相自动识别; 波形变化值增长; 地震波形; 近震

中图分类号: P315.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0005-08

0 引言

在从模拟地震台网向数字化地震台网、地震台阵发展的过程中,地震震相的自动识别成为一项重要课题.所谓震相自动识别,就是当地震波到达记录系统时,实时地震数据处理系统能够将各个台站地震波形的各个震相的到时自动识别出来.其准确程度直接关系到数字化地震台网、台阵的智能化,它的成熟和完善必将对地震应急和快速响应起到重要作用.

对这一问题国内外已有不少地震工作者进行了多方面的研究,也取得了一定进展,但仍然是世界地震观测领域中尚未根本解决的难题.本文从地震波形的基本特征出发,对近震 P 波震相和 S 波震相的自动识别作进一步研究.

1 震相自动识别的理论基础

地震发生后,各台站记录中地震波形的初动振幅和频率总是明显地高于脉动,后续震相的振幅或频率比前一个震相同样有大幅度的变化.这就是震相最普遍也是最显著的特征^[1].

一般定义震中距小于 1 000 km 的地震为近震,其波形具有以下特点:

- (1) 震中距小于 100 km 的地方震, P 波的周期约为 0.05 ~ 0.2 s, S 波的周期约为 0.1 ~ 0.5 s, S 波的振幅明显地大于 P 波的振幅.
- (2) 震中距大于 100 km 小于 160 km 时,初动震相仍然是 P 波,它的周期约为 0.1 ~ 1 s, S 波的周期约为 0.5 ~ 2 s, S 波的振幅明显地大于 P 波的振幅.
- (3) 震中距大于 160 km 时, P_n 、 S_n 超前于 P、S. P_n 波成为初动震相,周期为 0.5 ~ 3 s; S_n 波周期为 2 ~ 5 s. 震相序列为 P_n 、P、 S_n 、S, 后续震相在振幅上明显大于 P_n 震相.

1.1 算法基础

根据地震波的性质和数字化地震记录,我们设计如下的算法:

(1) 在给定采样率后,由数字地震计拾取的地震连续信号经过间隔采样形成数字地震波形数据,它相当于一种低通滤波。

设如图 1 是一段数字化地震波形, a, b, c, d, e, f 是相邻的 6 个采样点, $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ 为各采样点在纵轴上的对应点, $a_2, b_2, c_2, d_2, e_2, f_2$ 是各点在横轴上的对应点. 若采样率给定, 相邻两点间的时间差必然是一个确定值, 则 $(a_1 - b_1)$ 、 $(b_1 - c_1)$ 、 $(c_1 - d_1)$ 、 $(d_1 - e_1)$ 和 $(e_1 - f_1)$ 分别表示相邻两点采样值的变化. 若设以上 n 个点的采样值依次为 S_1, S_2, \dots, S_n , 则定义波形变化值 sig , 用 sig 来描述波形的变化:

$$sig = \sum_{i=1}^{n-1} |S_{i+1} - S_i|$$

在整个波形序列中每 n 个点计算一次波形变化值(上一次计算时的第 n 点为下一次计算的第 1 点). 将数据记录的三分量都以波形变化值的方法处理, 并合成为一个数列. 在程序系统中, n 取值为 5, 是根据上海地震台网系统的采样率 50 点/秒确定的, 不同的观测系统可作适当调整, 也可相对于不同地区的近震波形特征进行调整。

(2) 以新波形为输入, 进行震相 P 的自动识别, 同时进行震相 S 的不精确识别。

首先计算背景波形变化值. 在干扰背景稳定的期间内取定一个足够长的时间段(至少一分钟), 共有 m 个波形变化值, 也就是有 $m \times n + 1$ 个采样点, 则有:

$$Backsig = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (sig)_i$$

n 为计算波形变化值时所用的采样点的数目. 在本软件系统中, 对于震相 P 的识别, n 取值为 4, 而震相 S 的识别中, n 取值为 10.

在实际应用中, 统计背景波形变化值和地震观测数据传输是同步的, 观测数据每增加 5 个采样点, 统计 $Backsig$ 的求和中就增加一个 sig 值, n 同时加 1. 这样可以使背景波形变化值随着干扰背景在稳定区间内的微小变化而进行调整。

为了有效剔除偶然干扰信号, 得到准确的台站背景波形变化值, 在计算中应给定 m 个分隔点把 sig 值划分为 $m + 1$ 个区间. m 值根据台站干扰背景的变化情况确定, 如果干扰背景有周期性强弱变化, 则 m 值可取大一些, 取 5、6 或更大; 如果干扰背景非常稳定, 则 m 可取小一些, 取 3 或 4. 分隔点的值与数字采集器的位数和干扰背景有关, 确定准则是必须使干扰背景稳定的波形中 90% 以上的波形变化值落在同一个区间内. 这样即使出现变化非常大的偶然干扰也不会影响到背景期波形变化值的稳定。

统计背景波形变化值时, 对背景波形中 sig 值在出现次数最多的区间内求均值。

确定了背景波形变化值以后, 对后续波形设计震相 P 检测窗, 窗长为 L_1 . 当检测窗中未检测到震相 P 时, 检测窗向后滑动, 把第一个进入窗中的 sig 值放入背景期参与统计背景波形变化值, 波形中的下一个 sig 值进入窗中进行震相 P 的检测. 定义震相 P 检测数 num_1 和 num_2 . 若: n_1 为检测窗中 $sig > 2 \times Backsig$ 的数量; n_2 为检测窗中 $sig > 4 \times Backsig$ 的数量. 当 n_1 和 n_2 满足条件: $n_1 > num_1, n_2 > num_2$ 时, 判定检测窗中的第一个采样点为初动。

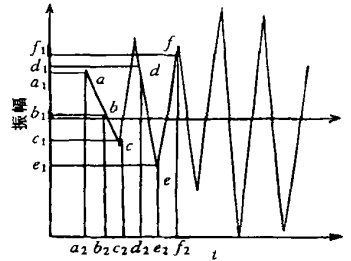


图 1 波形变化值示意图

Fig. 1 Sketch of waveform variation value.

震相 P 检测窗随波形数据的输入连续检测, 如果没有检测到震相 P 即未发生地震时连续统计背景波形变化值。

检测到震相 P 后, 进行震相 S 的初步识别. 从震相 P 的判定点起, 连续将波形采入震相 S 检测窗, 并且在未检测到震相 S 时连续统计震相 P 波形变化值:

$$P_{sig} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sig)_i$$

其中 n 为从初动判定点起到 S 震相判定点间波形变化值的数量. 定义震相 S 检测数 num -s, 若: num -s 为震相 S 检测窗中 $sig > \text{thar}_p \times P_{sig}$ 的数量. 当 num -s 满足条件: num -s 大于一定数目 S_{value} 时, 判定检测窗中的震相 S. S_{value} 可根据不同的观测系统而确定, 在本系统中定为 5.

此外, 设定震相 P 判定点之后的 T 时间内 (T 视具体情况而定) 波形变化值满足: $sig < 4 \times P_{sig}$ 时, 则判定无后续震相, 即算法判定的震相 P 点不是 P 波震相而是 S 波震相. 撤消震相 P 的判定, 放弃此台站的波形数据. 这个判据条件的提出主要考虑在实际的应用中, 如果地震的震级较小或震中距较大, 当地震波到达台站时, P 波震相的振幅可能很小, 或淹没在脉动中, 而后续的 S 波震相因振幅较大而震相明显.

(3) 以震相 P 的自动识别结果与震相 S 的初定结果为基础, 进行震相 S 的精确识别.

震相 S 的水平分量占优势, 而震相 P 的垂直分量占优势, 本软件利用了震相的这个特征. 将数据记录的三分量都以波形变化值方法处理, 三分量的合成减去垂直分量得到新波形, 以新波列、震相 P 的自动识别结果与震相 S 的初定结果为输入, 对震相 S 进行自动识别.

1.2 方法检验

为了定量地检验程序的准确性和误差范围, 利用不同振幅或不同频率的正弦波的组合, 模拟地震波的波形变化, 据此考察其对波形变化的敏感程度.

(1) 增大后续波振幅

为考察程序对振幅突变的判别能力, 改变后续波振幅进行测试. 输入实验波形(图 2): 后续波 1 振幅分别是前段波振幅的 5 倍、3 倍、2 倍和 1.8 倍, 前段波共 1 000 个采样点, 前面一根线为算法判别到波形的突变, 判定点都非常准确地在第 1 001 点上, 即后续波 1 的始点; 后续波 2 振幅分别是后续波 1 振幅的 4 倍、3.3 倍、4 倍和 2.2 倍, 前段波和后续波 1 共 1 500 个采样点, 后面一根线为算法判别到波形的突变, 判定点都非常准确地在第 1 501 点上, 即后续波 2 的始点.

(2) 改变后续波频率

为考察程序对频率突变的判别能力, 改变后续波频率进行测试(图 3). 后续波 1 的频率分别是前段波的 4 倍、2 倍和 1.6 倍, 前段波也有 1 000 个采样点, 测试结果显示算法在 1 001 点处测试到波形的突变; 后续波 2 的频率是后续波 1 的 $1/\sqrt{3}$ 倍(此设定基于 P 波与 S 波的频率特点)及 0.5 倍, 其振幅基于 P 波与 S 波振幅特点也有所改变, 前段波和后续波 1 共 1 500 个采样点, 测试结果显示算法在 1 501 点处测试到波形的突变.

根据以上测试结果得到, 本软件系统对于振幅变化 2 倍以上和频率变化 2 倍以上的波形变化, 都能非常准确地判定波形的突变. 在实际应用中, 我们要求该方法能识别出振幅变化大于 2 倍或频率变化大于 2 倍的震相, 并可识别出频率变化接近 $1/\sqrt{3}$ 的震相 P 和震相 S.

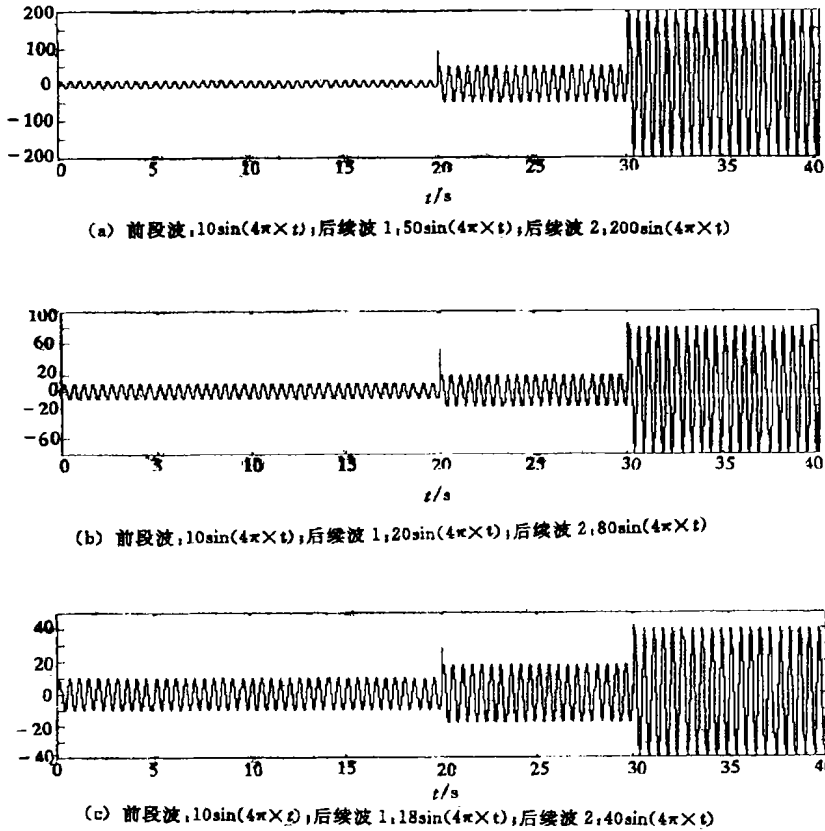


图 2 改变后续波的振幅

Fig. 2 The amplitude variation of subsequent wave.

2 震相自动识别的应用

为了在实践中确定近震震相自动识别的应用效果,对上海数字地震台网的部分数字化地震记录进行检测。

图 4 为 1999 年 7 月 3 日长江口以东海中 $M_L 3.6$ 地震震相的自动识别结果。

图 5 为 1999 年 9 月 11 日安徽铜陵北 $M_L 3.3$ 地震震相的自动识别结果。

图 6 为 1999 年 9 月 16 日长江口以东海中 $M_L 3.3$ 地震震相的自动识别结果。

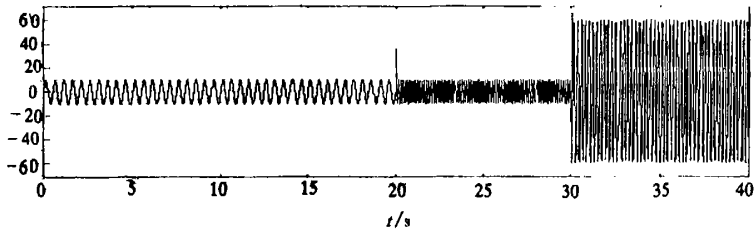
图 7 为 1999 年 10 月 31 日江苏靖江南通间 $M_L 2.0$ 级地震震相的自动识别结果。

从震相自动识别软件对以上地震的测试结果可以看出,所有的震相 P 都稳定的落在震相 P 与脉动的分界处,震相的识别结果也很理想,其识别的近震震相基本准确,检测质量符合精度要求。

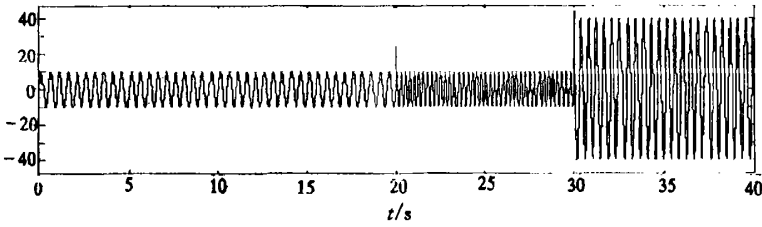
3 震相自动识别与人工识别的对比

为了解自动识别的近震震相与人工确定近震震相的差别,本文对上述 4 个地震数据资料进行人工识别,其结果对比列于表 1。

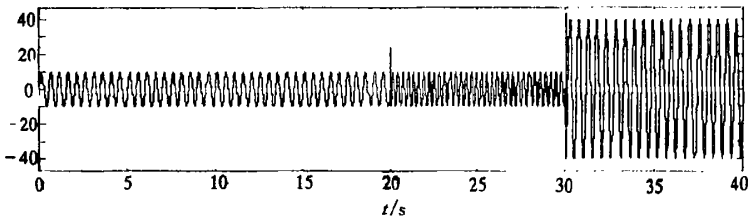
根据以上结果可以得出,算法所识别的初动震相在质量上基本满足地震定位的要求,识别结果和人工识别结果相差很小.震相 P 的平均差值在 0.35 s,震相 S 的平均差值为 0.69 s,震



(a) 前段波: $10\sin(4\pi \times t)$; 后续波 1, $10\sin(16\pi \times t)$; 后续波 2, 频率为 $\frac{8}{\sqrt{3}}$ Hz



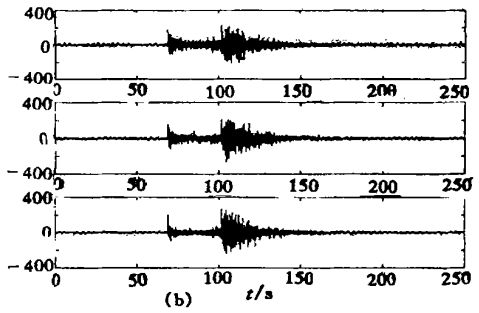
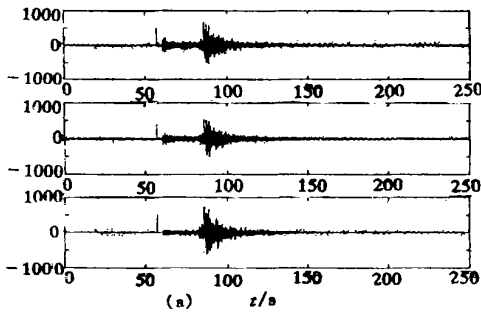
(b) 前段波: $10\sin(4\pi \times t)$; 后续波 1, $10\sin(8\pi \times t)$; 后续波 2, 频率为 $\frac{4}{\sqrt{3}}$ Hz



(c) 前段波: $10\sin(4\pi \times t)$; 后续波 1, $10\sin(6.4\pi \times t)$; 后续波 2, 频率为 1.6 Hz

图 3 改变后续波的频率

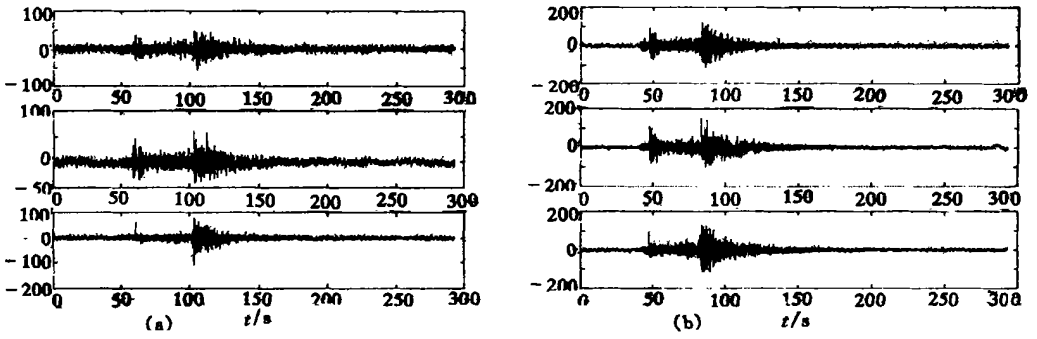
Fig. 3 The frequency variation of subsequent wave.



(a) 余山地震台的三分向记录; (b) 天平山地震台的三分向记录

图 4 1999 年 7 月 3 日长江口以东海中 $M_L 3.6$ 地震震相的自动识别

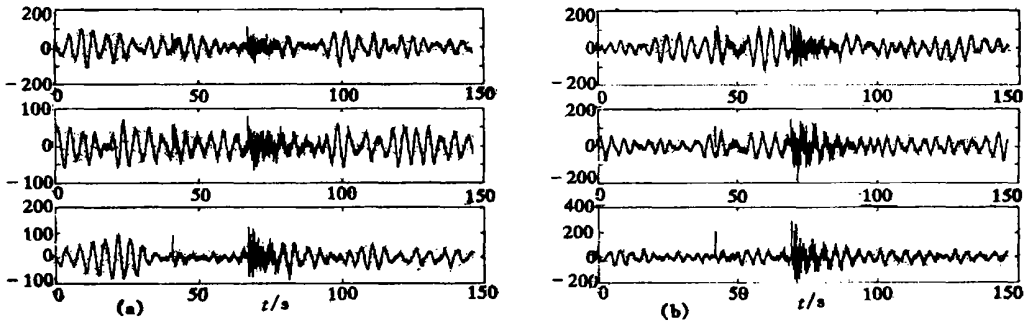
Fig. 4 The automatic recognition of seismic phases of the $M_L 3.6$ earthquake in the east sea area of Changjiang River estuary on July 3, 1999.



(a) 余山地震台三分向记录; (b) 天平山地震台三分向记录

图5 1999年9月11日安徽铜陵北 $M_L 3.3$ 级地震震相的自动识别

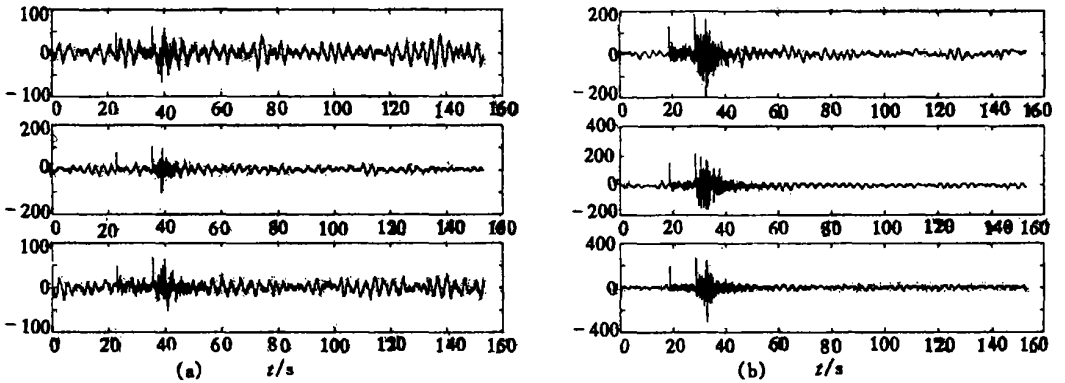
Fig. 5 The automatic recognition of seismic phases of the $M_L 3.3$ earthquake in the northern of Tongling, Anhui province on Sep. 11, 1999.



(a) 余山地震台的三分向记录; (b) 秦皇山的地震台三分向记录

图6 1999年9月16日长江口以东海中 $M_L 3.3$ 地震震相的自动识别

Fig. 6 The automatic recognition of seismic phases of the $M_L 3.3$ earthquake in the east sea area of Changjiang River estuary on Sep. 16, 1999.



(a) 余山地震台的三分向记录; (b) 天平山地震台的三分向记录

图7 1999年10月31日江苏靖江南通间 $M_L 2.0$ 级地震震相的自动识别

Fig. 7 The automatic recognition of seismic phases of the $M_L 2.0$ earthquake between Jingjiang and Nantong, Jiangsu province on Oct. 31, 1999.

相S的自动识别在质量上完全满足地震定位要求.分析原始波形,可发现所选台站数据中震相P的起始点均不清晰,将最不清晰的波形数据筛选掉,则震相P的自动识别在质量上满足地震定位要求.

表1 自动识别震相与人工识别震相对比表

地震参数	台站名称	震相 P(单位: s)			震相 S(单位: s)		
		人工识别	自动识别	差值	人工识别	自动识别	差值
1999-07-03 08: 16: 30.4 长江口以东海中 M_L 3.6	佘山	08: 17: 06. 2	08: 17: 06. 34	0. 14	08: 17: 35. 0	08: 17: 34. 82	0. 18
	天平山	08: 17: 18. 0	08: 17: 17. 72	0. 28	08: 17: 50. 8	08: 17: 51. 46	0. 66
1999-09-11 15: 23: 31. 5 安徽铜陵北 M_L 3. 3	佘山	15: 24: 23. 8	15: 24: 23. 18	0. 62	15: 25: 07. 4	15: 25: 06. 42	0. 98
	天平山	15: 24: 12. 2	15: 24: 12. 62	0. 42	15: 24: 48. 3	15: 25: 47. 7	0. 80
1999-09-16 17: 26: 19. 4 长江口以东海中 M_L 3. 2	佘山	17: 26: 59. 8	17: 27: 00. 44	0. 64	17: 27: 25. 6	17: 27: 24. 62	0. 98
	秦皇山	17: 27: 01. 0	17: 27: 01. 52	0. 52	17: 27: 21. 0	17: 27: 19. 92	1. 08
1999-10-31 17: 10: 23. 5 江苏靖江南通间 M_L 2. 0	佘山	17: 10: 44. 0	17: 10: 44. 14	0. 14	17: 10: 57. 0	17: 10: 57. 76	0. 76
	天平山	17: 10: 39. 8	17: 10: 39. 86	0. 06	17: 10: 49. 6	17: 10: 49. 52	0. 08

4 结语

与模拟地震观测相比

[2],

(1)

S震相误判为P震相,

(2)

“P由于振幅小而淹没在脉动中,S容易被误判为P震相”

(3)

[]

[1] . [M]. : , 1995.

[2] . [M]. : , 1998.

AUTOMATIC RECOGNITION OF SEISMIC PHASES OF REGIONAL EARTHQUAKE

ZHU Yuan-qing, TONG Yu-xia, YU Hai-ying, SONG Jun-gao
(*Seismological Bureau of Shanghai, Shanghai 200062, China*)

Abstract: In order to recognize the seismic phases of a regional earthquake automatically, the algorithm of increasing waveform variation value and the criterion of no-subsequent-phase are put forward firstly. The former is to describe the waveform variation of a regional earthquake from its waveform variation value, for capturing the sudden variations of amplitude or frequency of seismic wave by using increase of its value. The latter is used to observe the variations of subsequent waveforms after determining the onset. If there are no other phases in the subsequent waveform, the recognition of onset is invalid. Using this criterion, it will not recognize subsequent phases with bigger amplitudes as the onset phase when the amplitude of the onset phase is too small to be recognized clearly. It shows by the example tests that the accuracy of the method meets the need of the prompt report of earthquake. The relevant programs are compiled.

Key words: Automatic recognition of seismic phase; Increasing waveform variation value; Seismic waveform; Regional earthquake