第 28 卷 第 1 期
2006 年 1 月 (42～51)

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Vol. 28, No. 1
Jan., 2006

文章编号：0253-3782(2006)01-0042-10

流动地震台阵观测初至震相的自动检测*

王 继 陈九辉 刘启元 李顺成 郭 飚

(中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室)

摘要 震相到时的自动精确检测对实现海量波形数据自动处理有重要意义. 针对流动地震台阵观测，本文综合利用单台 Akaike 信息准则(AIC)和多台最小二乘互相关方法，发展了震相自动精确检测技术. 检测结果表明，在长短时平均比值方法(STA/LTA)检测地震事件的基础上，利用单台 AIC 方法，近震初至震相检测精度小于 0.3 s；利用多台最小二乘互相关方法，能够可靠地检测高信噪比地震的初至震相到时，当信噪比较低时，能够有效地避免初至震相的错误判别.

关键词 流动地震台阵 初至震相 震相自动检测 多道互相关

中图分类号：P315.63 **文献标识码**：A

引言

1984 年，美国地震学研究联合会(IRIS)提出了大陆岩石圈地震台阵研究计划(PASSCAL)(刘启元，1986). 此后，宽频带流动地震台阵观测在国际范围内迅速展开(刘启元，2000). 近年来，美国进一步提出了美国台阵计划(USArray)(Ekstrom *et al*，1998). 在国内，刘启元等(1993)曾利用自主开发研制的 GDS-1000 宽频带数字地震仪，建立了我国第一个试验性流动地震观测台阵. 现在，国内多个研究机构已相继建立了规模不同的流动地震台阵观测系统. 中国地震局即将建成由 600 台宽频带数字地震仪组成的巨型科学流动地震台阵(刘启元，吴建春，2003). 上述情况表明，流动地震台阵观测技术已逐步成为大陆岩石圈高分辨率地震成像研究中不可替代的重要手段.

流动地震台阵观测会产出大量宽频带波形记录. 例如，由 40 套数字地震仪组成的流动地震台阵，按照每秒 50 个采样点，24 位采样精度计算，连续记录一年的数据量可以达到 600 GB. 如何从大量的数字地震记录中尽可能快速、准确地提取地震信息，是我们面临的一个紧要课题.

P 波初动到时是许多地震学研究的基础数据. P 波初动到时的自动检测不仅可以大大提高流动地震观测数据的处理效率，而且对提高地震台网的快速响应能力也有重要意义.

一般来说，震相自动检测以地震事件自动识别的结果为基础. 目前，主要的震相自动检测方法有基于统计量的主成分分析法(Wagner，Owens，1996)，基于小波变换的主成分

* 国家自然科学基金重点项目(40234043)资助. 中国地震局地质研究所论著 2005B029.
2005-06-09 收到初稿，2005-09-14 收到修改稿，2005-10-24 决定采用.

分析法(Kanwaldip, Farid, 1997；刘希强，周蕙兰，2000)，基于多维小波变换的 AR 模型法(Zhang *et al*, 2003)和分形分维法(Boschetti *et al*, 1996；常旭，刘伊克，2002)等.

在前人工作的基础上，本文提出了一种利用单台 AR 模型进行震相初步检测，并进一步采用多台互相关方法进行震相精确检测的方法.

1　地震事件检测

地震事件自动检测的目的在于从大量地震数据中识别地震事件并提取地震记录，而这正是震相到时检测的基础. 通常采用的方法是长短时平均比方法(STA/LTA)(Stevenson, 1976). 若 S_{STA} 是短项平均值，S_{LTA} 是长项平均值，则有

$$R = \frac{S_{STA}}{S_{LTA}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} x(i)/N}{\sum_{j=1}^{M} y(j)/M} \tag{1}$$

其中，$x(i)(i = 1, \cdots, N)$ 表示短时间窗内数据，$y(j)(j = 1, \cdots, M)$ 表示长时间窗内数据，M 和 N 分别表示长、短时间窗内的样本数. 判断有无地震事件的判据是 R 值是否大于预先设定的阈值. $x(i)$ 和 $y(j)$ 的选取方式决定算法的特性，其中最直接的方法是把滤波处理后的振幅绝对值作为样本. Allen(1978) 提出了用特征函数作为输入参数的方法. 与其类似的还有 Baer 和 Kradolfer(1987) 提出的特征函数法. 除此之外，还有长短项谱比方法(沈萍等，2002) 和人工神经元网络方法(Wang, Teng, 1995；李慧婷等，2000).

2　AIC 到时检测

震相到时检测的自回归(AR)技术假设震相到时前后的地震记录是两个不同的稳态过程. 根据这个假设，Sleeman 和 Orild(1999)提出了自回归 Akaike 信息准则(Autoregressive Akaike information criteria, AR-AIC). 该方法将地震波形数据分成依据自回归过程确定的两个局部统计时段，这两个时段的划分以检测震相到时为界. 若 k 为两个时段的分界点，AR-AIC 的模型函数可表示为

$$AIC(k) = (k - P)\lg(\sigma^2_{1,\max}) - (L - P - k)\lg(\sigma^2_{2,\max}) + C_2 \tag{2}$$

其中，P 是 AR 过程的阶数，L 是地震记录的长度，$\sigma^2_{1,\max}$ 和 $\sigma^2_{2,\max}$ 分别是两个时段中 AR 过程的拟合误差，C_2 是一个常数. 为了实现 AR-AIC 震相检测，必须首先通过试错法，求出该函数中 AR 模型的阶数. 而 AR 模型的系数则可由 Yule-Walker 方程确定(Haykin, 1996).

区别于 AR-AIC 方法，Maeda(1985)建议可由地震波形数据直接计算 AIC 函数，而不需要求出 AR 系数. 对地震记录 $x(i)(i=1, \cdots, L)$来说，AIC 检测器定义为

$$AIC(k) = k \cdot \lg\{\mathrm{var}(x[1, k])\} - (L - k - 1) \cdot \lg\{(\mathrm{var}(x[k+1, L])\} \tag{3}$$

其中，k 的范围为数据窗口内所有的采样点. 震相到时对应于 AIC 函数的最小值. 这样，不需计算 AR 模型的阶数，就可直接计算 AIC 值. 显然，这是一种更加高效、实用的方法.

需要指出的是，AIC 检测器将其全局最小值定义为震相到时，所以应用 AIC 检测器检测震相到时需要在震相出现位置附近提供合适的时间窗. 本文将把地震事件检测算法获得的触发时间作为 AIC 检测器的震相到时的初始估计.

3 确定远震初至震相到时的多道互相关和最小二乘方法

受观测条件限制，流动台阵观测中难以保证所有台站观测条件良好. 由于地震记录的信噪比受台基影响很大，不同台站的震相检测到时难以达到相同的精度，有时甚至会造成震相的误判.

对于远震体波，根据等效震源假定(Langston，1979)，在同一地震不同台站记录的垂直分量上，P 波初至震相通常表现为时间上有一定延迟的相似波形. 因此，可以将同一地震的垂直分量进行偏移叠加. 叠加之后，不相关噪声将被压制，叠加震相的信噪比可得到较明显的改善，因而可以提高叠加震相到时估计的可靠性. 把叠加震相到时作为各台震相的初至到时估计，对准确检测各台的震相到时是非常有利的(VanDecar，1990).

互相关函数法是求取两个时间序列相对时间延迟的方法. 对任意可能的一对波形计算其互相关函数，估计延时，并定量估计其不确定性. 尽管如此，由互相关导出的时间延迟仍不可避免地存在误差. 为此，最小二乘意义下的最优化延迟时间可以作为其估计值.

在离散形式下，第 i 道和第 j 道之间互相关函数的截断估计为

$$\varphi_{ij}(\tau)=\frac{\delta t}{T}\sum_{k=1}^{T/\delta t}x_i(t_i+t_0+k\delta t+\tau)x_j(t_j+t_0+k\delta t) \tag{4}$$

其中，x_i 和 x_j 分别为第 i 和 j 道的离散数据，t_i 和 t_j 分别是第 i 和 j 道的 P 波到时估计，τ 为两道之间相对于到时估计的相对延时，T 是窗口长度，k 为采样点，t_0 是检测震相在窗口内的相对时延，δt 为采样间隔.

根据互相关函数 $\varphi_{ij}(\tau)$ 最大值的位置 $\tau_{ij}^{\max}$，进一步得到第 i 道与第 j 道之间基于互相关的相对延迟时间

$$\Delta t_{ij}=t_i-t_j+\tau_{ij}^{\max} \tag{5}$$

由于台站之间的波形不可能完全一致，且由于噪声的干扰，由互相关导出的相对延时可能不完全自恰(例如，$\Delta t_{12}+\Delta t_{23}\neq\Delta t_{13}$). 为此，对于 n 个台站的情况，需要建立一个 $n(n-1)/2$ 的超定方程组

$$t_i-t_j=\Delta t_{ij}\qquad i=1,2,\cdots,n-1;\ j=i+1,\cdots,n \tag{6}$$

同时增加限定方程

$$\sum_{i=1}^{n}t_i=0 \tag{7}$$

限定方程(7)的作用在于强制最优化相对到时的均值 t_i 必须为零. 增加零均值的限制是使这个系统非奇异且允许解析计算有最小二乘解.

超定方程(6)可以进一步表示为 $\boldsymbol{At}=\Delta\boldsymbol{t}$，其中解向量 $\boldsymbol{t}$ 代表每一道波形的最优化相对到时，$\boldsymbol{A}$ 是 $[n(n-1)/2+1]\times n$ 个系数的稀疏矩阵，$\Delta\boldsymbol{t}$ 是长度为 $n(n-1)/2+1$ 的相对延迟时间向量，它可由互相关计算得出.

方程(6)的最小二乘解为 $\boldsymbol{t}^{\mathrm{est}}=(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{t}$. 由于 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}=n\boldsymbol{I}$($\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵)，因此 $(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})^{-1}=(1/n)\boldsymbol{I}$，并有 $\boldsymbol{t}^{\mathrm{est}}=(1/n)\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{t}$. 其解析解可表示为

$$t_i^{\mathrm{est}}=\frac{1}{n}\left(-\sum_{j=1}^{i-1}\Delta t_{ji}+\sum_{j=i+1}^{n}\Delta t_{ij}\right) \tag{8}$$

各道叠加后的记录为

$$x_{\mathrm{sum}}(k\delta t)=\sum_{j=1}^{n}x_j(t_{\mathrm{ref}}-t_{\mathrm{ref}}^{\mathrm{est}}+t_j^{\mathrm{est}}+k\delta t) \tag{9}$$

其中，下标 ref 指任意参考台站.

4　震相自动检测实例

为了检验本文提出的震相自动检测方法及其特性，我们利用中国地震局地质研究所台阵地震学实验室 2003—2004 年横跨天山造山带布设的宽频带流动地震台阵的观测资料，对本文给出的算法进行了实际检验. 天山造山带宽频带流动地震台阵的台站分布情况见图 1. 所用的地震事件资料均由 STA/LTA 事件检测算法自动提取，并以触发时间作为进一步单台震相检测的初始值. 为了突出地震信号，在震相检测之前，数据都用 3 Hz 低通滤波器进行了滤波.

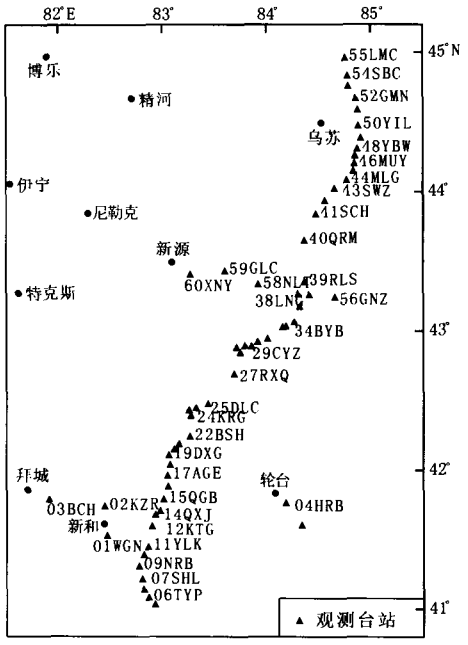

图 1　天山流动地震观测台阵分布图

4.1　单台 AIC 自动震相检测

单台震相到时自动检测算法采用公式(3)，AIC 检测器的时间窗口以触发时间为中心，前后各取 2.5 s. 图 2 为一个远震波形及相应 AIC 曲线. 由图 2 可见，人工判读的到时与自动检测到时一致. 图 2 表明，对于初至明显的地震波形，AIC 值的最小值可以准确对应初至震相到时.

震相到时检测误差 $\Delta t_i^{\mathrm{AIC}}$ 可以定义为

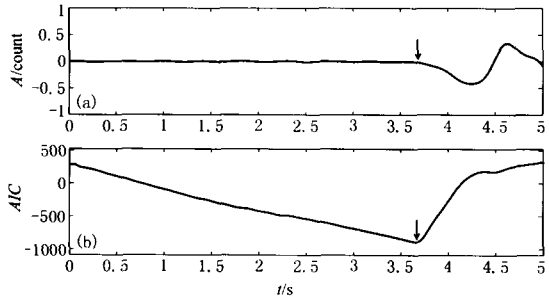

图 2　AIC 自动震相到时检测

(a) 滤波之后的地震波形，箭头指向人工判读的到时；(b) AIC 变化曲线，箭头指向曲线的最低点，对应震相的到时

$$\Delta t_i^{\mathrm{AIC}}=t_i^{\mathrm{AIC}}-t_i^{\mathrm{ref}} \tag{10}$$

其中，t_i^{AIC} 为 AIC 检测器自动检测的到时，t_i^{ref} 为人工判读的到时. 表 1 给出了对 2003 年 7 月 13 日至 9 月 17 日天山流动台阵 38LNG 台记录的 229 个各种类型地震事件，利用 AIC 自动检测方法得到的初至震相到时的结果及其与人工判读到时的比较.

表 1 给出的结果表明，在单台 AIC 检测器给出的结果中，78% 以上的初至震相检测误差小于 1 s，且 P 波初动越清晰，其检测误差越小. 当震相清晰且时间窗选取得当时，AIC 检测器可以准确判断 P 波初动到时；当 P 波初动不够清晰时，AIC 函数将会有多个局部极小值，其中最小值仍然对应震相到时；当地震记录信噪比较低时，AIC 函数的最小值不能确保震相检测的准确性，有时甚至会误判初动震相；时间窗太小则

不能包括初始震相，时间窗太大，则给计算带来更多的干扰，所以时间窗应尽量选择合适.

表 1 AIC 自动震相检测及其与人工判读结果的比较

SNR*	总数 N	Δt_i^{AIC}/s						$\frac{\sum\|\Delta t_i^{AIC}\|<1.0}{N}$
		<-1.0	$-1.0\sim-0.5$	$-0.5\sim0$	$0\sim0.5$	$0.5\sim1.0$	>1.0	
$\geqslant5$	46	1	0	0	41	3	1	95%
$\geqslant3$	79	2	0	5	57	12	3	94%
$\geqslant2$	123	6	1	6	83	20	7	89%
$\geqslant1$	229	12	7	12	110	50	38	78%

* 信噪比 SNR 由触发时间前后 2.5 s 的地震波形计算得到.

4.2 近震多台初至震相的自动检测

图 3 是多台近震 AIC 自动震相检测实例. 表 2 是该近震的 AIC 自动震相检测与人工判读结果的比较. 其误差在 0.3 s 以上有 3 个，占总数 22 个的 14%；误差 0.3 s 以内的有 19 个，占 86%.

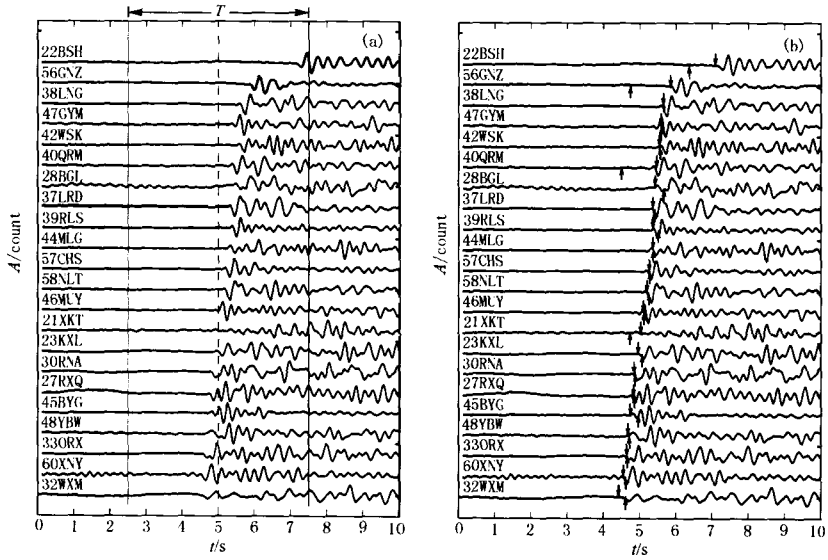

图 3 近震多台 AIC 自动震相检测实例

(a) 滤波之后的地震波形图，左边字符为台站编码，中间虚线是事件检测到时，$T=5$ s 是震相检测窗口；

(b) AIC 检测结果，向上的箭头指示检测到时，向下的箭头指示人工判读的到时

表 2 近震多台 AIC 自动震相检测及其与人工判读结果的比较

	Δt_i^{AIC}/s					$\sum\|\Delta t_i^{AIC}\|<0.3$
	$-2.0\sim-1.5$	$-1.5\sim-1.0$	$-1.0\sim-0.3$	$-0.3\sim0$	$0\sim0.3$	
事件数	1	1	1	1	18	19
百分比	5%	5%	5%	5%	80%	86%

4.3 远震多台初至震相的自动检测

对于地震台阵记录的远震信号，可以进一步利用多台互相关方法，避免初动震相判别错误.

表 3 给出了用于测试远震多台互相关到时检测的两个典型地震的参数. 地震记录来源于天山流动台阵观测的结果.

图 4 给出了地震 No. 1 的初至到时检测结果. 该地震记录的台站数为 32 个，地震记录初至清晰，信噪比较高. 当计算互相关的窗口时间 $T=8$ s，到时与互相关起始时间的差 t_0

表 3　用于到时检测测试的地震参数

序号	年-月-日	时:分:秒	φ_N/(°)	λ_E/(°)	M_W	深度/km	震中距/(°)
1	2003-07-27	06:25:31	47.151	139.248	6.8	470.3	40
2	2003-08-21	04:02:09	29.053	59.773	5.9	20.2	24

注：震中距指地震震中至 38LNG 台的距离.

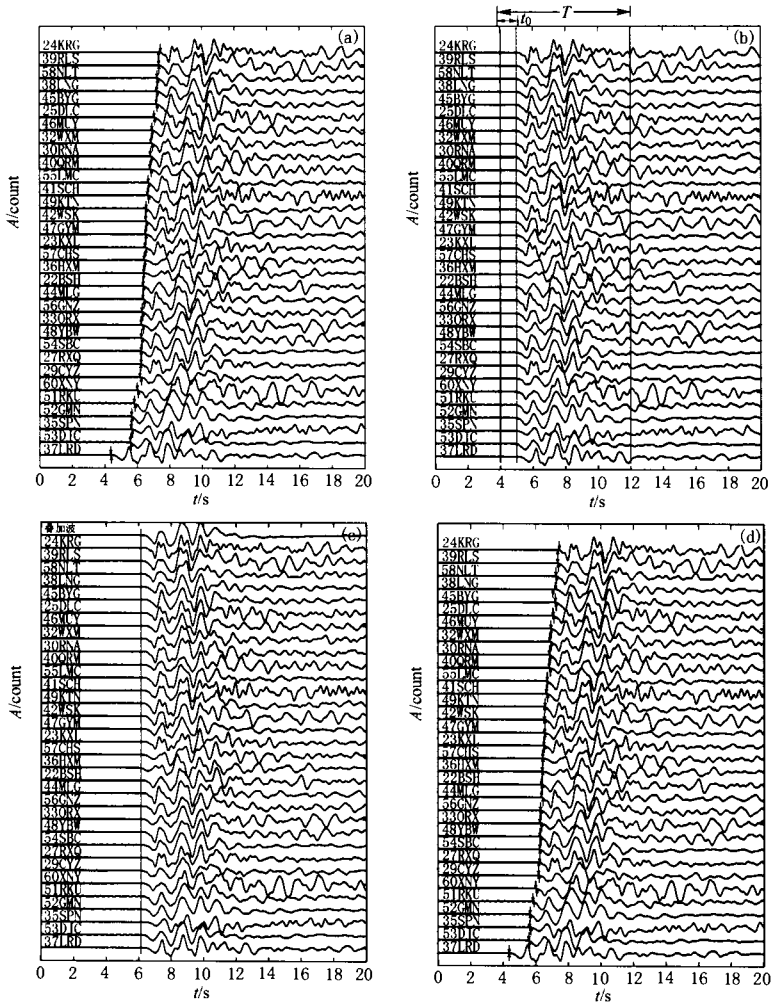

图 4　多台远震互相关方法震相自动检测的实例(地震 No. 1，滤波后的地震波形，左边字符为台站代码)

(a) 计算震相检测窗口为 5 s 时的检测结果，向下的箭头是人工判读的到时，向上的箭头是初始自动检测的到时；(b) 中间虚线是初始自动检测的到时，$T=8$ s 是计算互相关的时间窗口，$t_0=1$ s 是到时与互相关的起始时间；(c) 多台互相关后的结果，中间实线是叠加波的 AIC 检测到时；(d) 检测窗口缩小为 2 s 的检测结果，向下的箭头是人工判读的到时，向上的箭头是最终自动检测的到时

表 4 远震多台 AIC 自动震相检测与人工判读结果的比较(地震 No. 1)

	Δt_i^{AIC}/s					$\sum\|\Delta t_i^{AIC}\|<0.1$
	−0.1～−0.06	−0.06～0	0～0.06	0.06～0.1	>0.1	
单台检测个数	1	2	17	11	1	31
比重	3%	6%	53%	35%	3%	97%
互相关检测个数	3	3	20	5	1	31
比重	9%	9%	63%	16%	3%	97%

为 1 s 时，获得了最佳获果. 表 4 的结果表明，对于初动清晰的地震记录，单台 AIC 检测和多台互相关检测都可以精确地获取初至震相到时. 地震 No. 1 检测误差小于 0.1 s 的事件数为 31 个，达到 97%.

地震 No. 2 初至震相信噪比较低，而且由于部分台站噪声较大，经滤波处理后初至震相仍然难以识别，给人工检测初至震相带来一定困难. 这里，当计算互相关的窗口时间 T 为 12 s 时，获得了最佳效果. 图 5 给出了该地震初至震相的一系列检测结果. 图 5a 中先对单台作 AIC 自动检测. 这个结果我们称初始检测到时. 大多数初始检测到时与人工判读到时的误差较小，只有 38LNG、27RXQ、30RNA、29CYZ、53DJC 这 5 个台的误差较大. 图 5b 将各台以初始检测到时为时间起点，偏移到同一起始时间后，可以看出各台波形的最大振幅没有对应一致，说明初始检测误差较大. 以这个偏移结果为基准，取一个 12 s 的检测窗，作为各台互相关计算的窗口. 图 5c 是计算最小二乘互相关后的结果. 从图中可以看出，各台波形对应得非常好，尤其在 12.5 s 最大振幅处对应得非常一致. 各台波形相似性也很好. 由各台记录的波形数据可以根据公式(9)在经过延迟时间偏移叠加，叠加出清晰的初至震相，AIC 可准确地检测出叠加波的初至震相到时. 这个到时可以作为各台的初至到时. 图 5d 是最终检测结果与人工判读的结果的比较. 由图中可以看出，由叠加波求出的初至到时不仅纠正了 38LNG、29CYZ 和 53DJC 3 个台初始检测的误差，而且纠正了 27RXQ、30RNA、37LRD 和 23KXL 4 个台人工判读的误差. 显然，互相关方法在很大程度上避免并纠正了单台检测的错误和人工判读的随意性.

以上结果表明，对于初至清晰的地震记录，无论使用单台 AIC 方法，还是使用多台的互相关方法，都可以保证很高的检测精确度和可靠性；对于初至不清晰的低信噪比地震，使用多台最小二乘互相关方法可以有效地提高检测的准确性和稳定性.

5 讨论与结论

根据本文给出的结果，我们可以得到以下结论：

1) 为了适应海量数据处理，进一步发展观测数据的自动处理系统是十分必要的. 它不仅有利于提高工作效率，同时可以减少数据处理中人为的不确定性因素. 本文给出的方法可以有效地实现上述目标.

2)为了突出地震信号，在单台 AIC 方法和最小二乘互相关方法用于震相检测之前，对波形记录都需要进行滤波. 单台 AIC 方法的时间窗口取 5 s 时会得到最佳效果，互相关的时间窗口取 8～12 s 时比较合适. 如果小于这个数值，时间窗口不能包括初至震相的主要能量，无法保证波形的相似性. 通过选取合适的时间窗口，由计算出的最大相关系数得到的相对偏移时间不会受窗口长度影响.

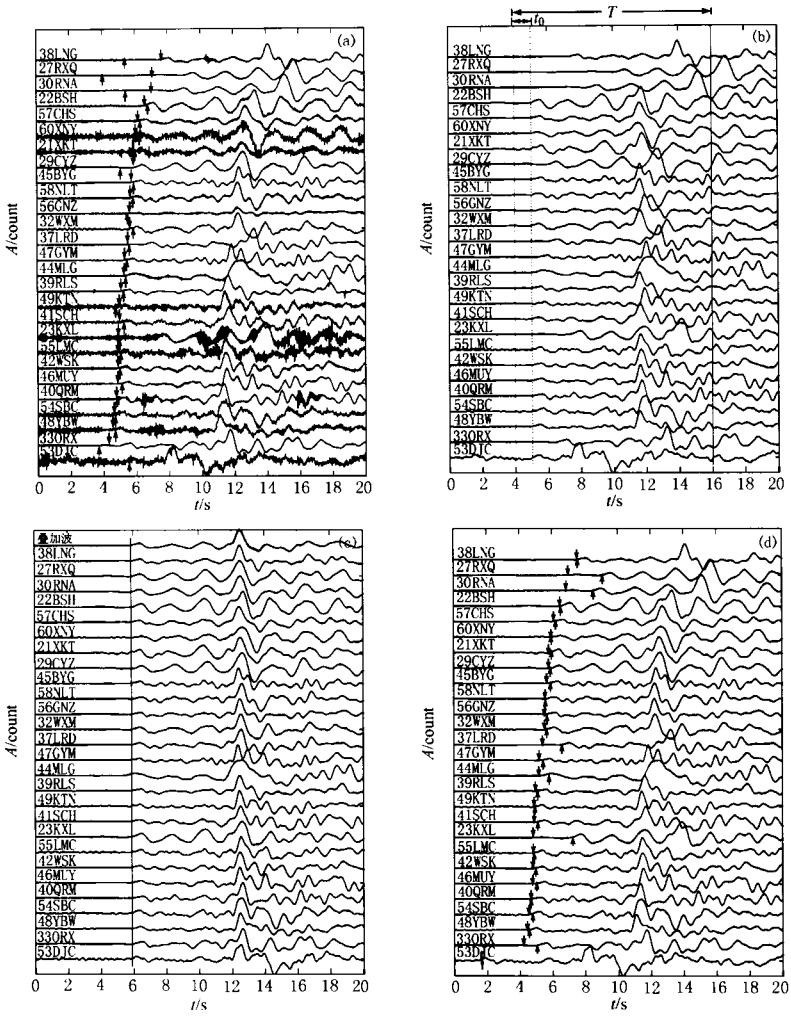

图 5　远震多台互相关方法震相自动检测的实例(地震 No. 2，除(a)是原始波形，其余均为滤波后的地震波形，左边字符为台站代码)

(a) 计算震相检测窗口为 5 s 时的检测结果，向下的箭头是人工判读的到时，向上的箭头是单台初始 AIC 自动检测的到时；(b) 中间虚线为初始自动检测的到时，$T=12$ s 是计算互相关的时间窗口，$t_0=1$ s 是初始到时与互相关的起始时间；(c) 多台互相关后的结果，中间实线是叠加波的 AIC 自动检测的到时；(d) 向下的箭头是人工判读的到时，向上的箭头是叠加波的到时，同时也作为每个台初至震相的到时

3) 单台 AIC 方法能够可靠地自动检测地震波初至到时，近震震相初至相对于人工判读误差小于 0.3 s. 受多种噪声和干扰因素的影响，仅靠单台的震相检测难以对所有记录获取满意的结果. 对于地震台阵记录的远震，利用多台相关处理技术可以明显地提高震相检测的可靠性和精度. 本文给出的实例表明，利用最小二乘互相关方法能够可靠地检测高信噪比地震的初至震相到时. 对于台站信噪比较低的情况，最小二乘互相关方法可以有效避免单台人工到时检测对初至震相的错误判别.

需要指出的是，震相自动检测是国内外测震学尚未完全解决的问题. 实现地震信号的

全自动检测，进一步提高震相，特别是续至波震相检测的可靠性和准确性，仍是今后努力的方向.

参 考 文 献

常旭，刘伊克. 2002. 地震记录的广义分维及其应用[J]. 地球物理学报，**45**(6)：839～846

李慧婷，黄文晖，陈贵美. 2000. 应用人工神经网络方法识别近震与远震[J]. 华南地震，**20**(4)：71～75

刘启元. 1986. 美国大陆岩石圈的地震台阵研究计划[J]. 地震地质译丛，**8**(6)：21～24

刘启元. 2000. 高分辨率地震成像研究——21 世纪地震学发展的一个重要趋势[J]. 国际地震动态，(4)：9～11

刘启元，李志明，沈立人，等. 1993. GDS-1000 宽频带通用流动数字地震观测系统[J]. 地球物理学报，**36**(5)：600～608

刘启元，吴建春. 2003. 论地震数值预报——关于我国地震预报研究发展战略的思考[J]. 地学前缘，**10**(特刊)：217～224

刘希强，周蕙兰. 2000. 用于三分量记录震相识别的小波变换方法[J]. 地震学报，**22**(2)：125～131

沈萍，郑治真，刘希强，等. 2002. 小震的综合识别研究[J]. 地震学报，**24**(2)：169～175

Allen R V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **68**(5): 1 521～1 533

Baer M, Kradolfer U. 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(4): 1 437～1 445

Boschetti F, Dentith M D, List R D A. 1996. Fractal-based algorithm for detecting first arrivals on seismic traces[J]. *Geophysics*, **61**(4): 1 095～1 102

Ekstrom G, Humphreys G, Levander A. 1998. USArray—Probing the continent[J]. *IRIS Newsletter*, **16**(2): 2～6

Haykin S. 1996. *Adaptive Filter Theory*[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1～989

Kanwaldip A S, Farid U D. 1997. Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**(6): 1 598～1 612

Langston C A. 1979. Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves[J]. *J Geophys Res*, **84**(B9): 4 749～4 762

Maeda N. 1985. A method for reading and checking phase times in autoprocessing system of seismic wave data[J]. *Zisin = Jishin*, **38**: 617～643

Sleeman R, Orild V E. 1999. Robust automatic P-phase picking: An on-line implementation in the analysis of broad-band seismogram recording[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **113**: 265～275

Stevenson R. 1976. Microearthquakes at Flathead Lake, Montana: A study using automatic earthquake processing[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **66**: 61～79

VanDecar J C. 1990. Determination of teleseismic relative phase arrival times using multi-channel cross-correlation and least squares[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **80**(1): 150～169

Wagner G S, Owens T J. 1996. Signal detection using multi-channel seismic data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**(1A): 221～231

Wang J, Teng T L. 1995. Artificial neural network-based seismic detector[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**(1): 308～319

Zhang H J, Thurber C, Rowe C. 2003. Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **93**(5): 1 904～1 912

AUTOMATIC ONSET PHASE PICKING FOR PORTABLE SEISMIC ARRAY OBSERVATION

Wang Ji Chen Jiuhui Liu Qiyuan Li Shuncheng Guo Biao

(*State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: Automatic phase picking is a critical procedure for seismic data processing, especially for a huge amount of seismic data recorded by a large-scale portable seismic array. In this study is presented a new method used for automatic accurate onset phase picking based on the property of dense seismic array observations. In our method, the Akaike's information criterion (AIC) for the single channel observation and the least-squares cross-correlation for the multi-channel observation are combined together. The tests by the seismic array observation data after triggering with the short-term average/long-term average (STA/LTA) technique show that the phase picking error is less than 0.3 s for local events by using the single channel AIC algorithm. In terms of multi-channel least-squares cross-correlation technique, the clear teleseismic P onset can be detected reliably. Even for the teleseismic records with high noise level, our algorithm is also able to effectually avoid manual misdetections.

Key words: portable seismic array observation; onset phase; automatic phase picking; multi-channel cross correlation