

地震预警专题

# 用于地震预警系统中的快速 地震定位方法综述\*

黄媛 杨建思

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要** 详细介绍了国际上一些比较流行的、用于地震预警系统的快速定位方法, 以求为我国防震减灾事业探索新思路、新方法。

**关键词** 地震预警; 快速定位; P波; 卓越周期

**中图分类号** P315.75 **文献标识码** A

## 引言

“地震预警系统”通过大地震发生之后, 强破坏性地面运动到来之前的几秒到几十秒时间内发布预警信息, 可以在很大程度上降低地震破坏造成的人员伤亡和财产损失。目前, 美国、日本、墨西哥和我国台湾等地都已相继建立了非常实用的地震预警系统以及一些生命线地震紧急自动处置装置, 一些系统也已经受过地震考验, 并积累了许多成功经验。

地震预警系统由地震检测系统、通讯系统、中央处理控制系统和对用户的警报系统4个部分组成。每一部分的处理时间之和与地震波走时之差形成了最终的预警时间。本文主要讨论地震检测系统的核心环节“基于预警系统的快速地震定位算法”, 这是决定一个预警系统预警时间长短的关键性技术环节。

地震预警在理论上通常分为两大类, 分

别对应不同的定位算法。

(1) 异地震前预警系统(front-detection EWS): 即将地震计安置在“震源区”, 以此对更远距离的“震灾区”进行预警。Nakamura(1984)首次将该方法用于日本铁道部门。台湾和墨西哥 SAS(Seismic Alert System)的预警系统也是这种类型。“异地震前预警”通过S波确定震级, 这样虽然比较准确, 但却要等S波到达之后才能确定预警参数。例如, 台湾中央气象局采用该方法建立的系统, 平均需22 s, 震级误差为 $\pm 0.25$ 级, 可以为距震中70 km以外的地区提供预警信息<sup>[1]</sup>。

(2) 现地地震预警系统(onsite EWS): 通过P波初始阶段确定震源参数从而预报S波到达后更严重的地面破坏情况。UrE-DAS<sup>[2-3]</sup>和ElarmS<sup>[4]</sup>都采用的是P波到达后最初的2~4 s信息确定预警震级。其基本原理是, 在预警的目标区建立观测网, 利用P波比S波传播速度快的原理, 由P波的初期振动估计地震大小、震中位置, 并提出预警。

其中用于第一种预警系统的预警方法通

\* 收稿日期: 2006-11-29。

过 S 波测定震级后发布预警信息,这种方法比较可靠,但只能为距离地震计几十公里以外的城市和重大工程发布预警信息。例如,墨西哥市破坏性地震都发生在距离市区 300 km 以外的太平洋海岸隐没带上,这就为该城市提供了可成功预警的前提条件。而大多数地震多发城市并不具备这一条件,显然这种预警方式存在很大的局限性。

通常认为地震大小只有在 S 波最大振幅到达后才可确定,而 Erik<sup>[5]</sup>通过大量真实数据验证,地震震级完全可以通过 P 波前几秒时间窗内的信息估测。这为通过 P 波确定震级,发布预警信息的第 2 种预警方法提供了依据。本文主要针对目前国际上比较先进的用于“现地地震预警系统”的快速地震定位算法作以简单分析比较。

## 1 用于地震预警的快速地震定位方法

评价地震预警系统成败的一个重要标志是看其快速确定地震震级及震中位置(方位、距离)的能力。在破坏性震相到达之前,使用 P 波(即现地地震预警方式)确定这些参数是用于地震预警的一种最快的方式,但获得速度的同时付出的代价是相对较大的误差。

### 1.1 $M_{L10}$ 方法

由中国台湾省中央气象局开发的地震预警系统,在目前发展最为成熟。该系统采用虚拟子网方式及  $M_{L10}$  的地震大小估计方法<sup>[6]</sup>,可将地震参数确定时间缩短至 20 s 左右。

地震预警系统需要近实时地估算出地震位置和震级两个参数。通常地震位置在 P 波初至后第一个 10 s 时间窗内能够立即确定。但是震级的确定困难较大,因为在这个时间窗内,很可能没有记录到剪切波最大振幅,另外,破坏性地震震级通常出现饱和现象,无法计算  $M_L$  或  $M_S$  震级,为此必须计算矩震级  $M_W$ 。

Wu 等<sup>[6]</sup>提出  $M_{L10}$  方法,即通过 P 波前

10 s 时间窗确定地震大小。震级  $M_{L10}$  和  $M_L$  具有如下经验关系式:

$$M_L = 1.28 \times M_{L10} - 0.85 \pm 0.13 \quad (1)$$

通过  $M_{L10}$  震级测定方法,中国台湾地区中央气象局能够在震后约 30 s 内测定台网内发生的地震震中位置和震级,当然测定参数在一定允许误差范围内。

### 1.2 依靠 P 波卓越周期确定预警震级

美国南加州的地震预警系统(ElarmS)主要依靠 P 波前几秒的卓越周期估测震级<sup>[4]</sup>。

依据小地震是由于小断层滑动造成相对高频的能量散射,而大地震破裂规模大,散射能量频率较低的原理,测量 P 波到达后几秒内地震波的卓越周期可以估测地震震级。P 波到达后,通过速度型地震计记录可以实时、连续测量卓越周期,通过递归关系定义卓越周期关系式(2):

$$T_i^p = 2\pi \sqrt{X_i/D_i} \quad (2)$$

其中

$$X_i = \partial X_{i-1} + x_i^2 \quad (3)$$

$$D_i = \partial D_{i-1} + (dx/dt)_i^2 \quad (4)$$

$T_i^p$  是时间为  $i$  秒时的卓越周期,  $x_i$  是记录的地面运动速度值,  $X_i$  是平滑后地面运动速度平方值,  $D_i$  是平滑后地面速度导数的平方值,  $\partial$  是一个平滑常量。高频小震相对低频大震可在 P 波到达后较短的时间内确定震级。因此,震级越小的地震确定震级的速度越快。也就是说在 1 s 以后估计的震级最小,相应地在 2 s、3 s、4 s 以后估计出的震级依次增加。

使用关系式(5),测量小震级地震

$$m_i = 6.3 \log(T_{\max}^p) + 7.1 \quad (5)$$

Allen<sup>[7]</sup>试验证明该关系式测定震级平均绝对误差为 0.3。虽然可以分别使用 P 波到达后 1 s、2 s、3 s 的数据快速估测震级,但最佳的震级测定需要 4 s 数据,与大地震吻合较好的关系式(6):

$$m_h = 7.0 \log(T_{\max}^p) + 5.9 \quad (6)$$

平均绝对误差为 0.67。

ElarmS 同时使用  $m_l$  和  $m_h$  估测震级, 台站记录到地震事件后 1 s 开始通过  $T_{\max}^p$  估测震级, 2 s 后再次更新。当震级大于 4 级, 开始计算  $m_h$ , 最终震级采用所有记录台站  $m_l$  和  $m_h$  的平均值。测定  $T_{\max}^p$  的台站数越多, 估测的震级越准确。通过最近单台记录的  $T_{\max}^p$  估测的震级, 平均绝对误差为  $\pm 0.7$ , 如果使用了最近 10 个台站的数据, 平均绝对误差可以降低到  $\pm 0.35$ 。

通过这种方法, 当震中距为 30 km 时可提前 S 波 8 s 确定震级, 震中距为 60 km, 可提前 S 波 16 s 确定震级。

### 1.3 $\tau_c$ 方法

Kanamori<sup>[8]</sup> 在 Nakamura<sup>[2]</sup> 以及 Allen 和 Kanamori<sup>[4]</sup> 方法的基础上, 研制了一种更加快速的定位方法, 称  $\tau_c$  法。使用 P 波到达后前 3 s 信息确定震级。通过该方法可以进一步大幅度提高台湾地震预警系统的预警效率。

$\tau_c$  方法区别与传统定位方法的地方在于它依靠初始信号振动周期而非幅度估算地震大小。即利用前 3 s 的 P 波信号决定初始振动周期, 进而确定地震大小。Kanamori 通过研究发现, 当初始周期大于 2.1 s 时, 可能发生  $M_w > 6.5$  的地震, 而  $M_w > 5$  的破坏性地震(有一个地震例外), 全部具有  $\tau_c > 1$  s 的特性。采用此方法, 有可能将地震大小的判定时间缩短至 10 s 以内。

$\tau_c$  方法的目的在于提供一个预警域值, 假如  $\tau_c > 1$  s, 地震事件有可能为破坏性的; 假如大于 2 s, 事件肯定为强破坏性的。通过这一结论的应用极大地缩短了地震预警时间。同时将该域值信息与其他数据相结合(例如, 最初的速度和位移幅度)可能会给出更加准确的破坏趋势情况。

### 1.4 利用单台的 P 波确定预警震源参数

多数现有地震预警系统是通过地震台网确定地震震级和震源位置。许多早期预警系统依靠台网密度的增加来提高预警的准确

性, 但运行和维护一个高密度的地震台网用于预警需要大量的资金投入。

使用单台或者很少几个台站组成的小台网, 如果确定了很好的震级—周期对应关系也能够提供准确的震源信息用于预警, 并且可以大量削减开支。Allen 提出了一个非常新奇的方法, 该方法使用单台能够很好地确定预警参数, 即震级、震中距和后方位角。

使用公式(7)确定震中距

$$\log R = \alpha \log \left( \frac{1}{T_{\max}^p} \right) + \beta \log(A_p) + \gamma \quad (7)$$

其中  $R$  表示震中距,  $A_p$  表示 P 波振幅,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  是 3 个常量, 使用最小二乘法确定这 3 个常量值分别为: -0.51118、-0.18298、1.59766。这样利用观测值  $T_{\max}^p$  和  $A_p$ , 通过最佳拟合关系, 就可以确定一个事件中每个台站的  $R$ 。

后方位角的确定可以依靠 P 波粒子运动产生的偏振特性, 使用类似于 Nakamura<sup>[2]</sup> 的方法, 如下:

$$\theta_i = 180 + \tan^{-1} \left( \frac{R_i^{ZE}}{R_i^{ZN}} \right) \quad (8)$$

其中

$$R_i^{ZE} = \partial R_{i-1}^{ZE} + Z_i E_i \quad (9)$$

$$R_i^{ZN} = \partial R_{i-1}^{ZN} + Z_i N_i \quad (10)$$

$\theta_i$  为估算的后方位角,  $Z_i$ 、 $N_i$ 、 $E_i$  分别是  $i$  时刻记录的水平、南北、东西方向值,  $\partial$  为一个平滑常量。使用 P 波到时的第一个 0.5 s 计算后方位角, 这段时间里, 连续计算几个  $\theta_i$ , 最终结果取平均值。后方位角计算偏差非常大, 有的台站平均误差低到  $8.5^\circ$ , 有的台站高到  $100^\circ$ 。

确定震级主要依靠 P 波前几秒的信息。

Andrew<sup>[9]</sup> 证明了该方法的有效性, 在南加州 TriNet 台网约 25% 的台站能够使用单台方法估测震源参数, 发布有用的预警信息, 震级误差 0.3 级, 震中位置绝对误差  $\pm 15$  km, 后方位角平均误差  $\pm 20^\circ$ 。

依靠 P 波到达前几秒时间窗内的信息,

通过单台确定震源参数的方法打开了需要提供地震灾难预警却没有高密度地震台网地区预警的可能性。

日本 UrEDAS 系统的建设主要用于铁道部门发生地震时快速提供预警信息,使高速运行着的火车马上停止。该系统正是考虑到多台站系统的复杂性和网络系统的脆弱性,采用了单台、P 波信息快速估计地震参数的方案。通过实时监测单个观测点处的地面运动,在 P 波到达后的前 3 s 时间窗内,首先基于 P 波的卓越周期确定震级,然后再通过一个包含震中距参数的震级—振幅经验公式确定震中距,并发出第一次警报;在 S 波到达后确定更加精确的地震参数后再发出第二次警报。

### 1.5 单台快速确定地震震级及震源位置的新方法

Odaka 等<sup>[10]</sup>介绍了一种更加新奇的方法,该方法能够在很短时间通过单台快速估测震中位置及地震震级大小。

为了能够定量估计地震波形的差别,通过最小二乘法拟合简单公式

$$Bt \cdot \exp(-At) \quad (11)$$

使其符合地震波初始部分的波形包络,从而确定参数  $A$  和  $B$ 。实验证明  $\log B$  与  $\log \Delta$  成反比,而与震级大小无关。通过这个关系,在 P 波刚到达时便可通过参数  $B$  大致估计出震中距,然后很容易根据包含震中距参数的完全经验公式(12),在 P 波到达后一个很短的给定时间段内通过最大振幅估计震级大小。

$$M_{\text{est}} = a \log P_{\text{max}} + b \log B + c \quad (12)$$

Tsukada 等<sup>[11]</sup>将该方法实际应用于 JMA 数据,证明对于 4 级以上的地震,在 200 km 以内,  $\log B$  与震中距成反比,而与震级大小不相关,根据这一关系可以很快地大致估测出震中距。并且证明以上所获得的关于参数  $A$  和  $B$  的特征,同样适用于速度型地震计和加速度型地震计。

其中  $P_{\text{max}}$  表示最大振幅,  $\log B$  也可以改

换为其他关系式,例如  $\log(\log B)$  等。

另外,通过该关系式还能够很容易地将浅源小震以及深源地震与破坏性浅源大地震区别出来,因为试验证明这两种地震分别对应着取值非常小的参数“ $A$ ”。

## 2 讨论与结论

(1) 以上介绍的各种方法虽然基于不同的定位原理,但最终目的都是希望能够尽量缩短定位时间,提供相对准确的定位参数(震中位置和地震震级),并且也都通过了试验验证,甚至有些系统取得了非常成功的案例,这为我们建立地震预警系统提供了一定的理论基础。这些方法为我们建设预警系统提供了一种基本的思路。同时也真实地验证了在几十秒甚至几秒内实现地震预警的可能性。

(2) 与传统定位方法不同,预警系统对震中位置的精度要求相对较低,因此比较容易确定。一般在 P 波到达后的前 10 s 时间窗内使用传统地震定位方法通过单台、三分量记录很容易估测。

(3) 对于震级的确定是预警系统需要解决的难题,尤其是用于“现地地震预警系统”中震级的确定,仅仅依靠 P 波前几秒时间窗数据确定震级,以上介绍的  $M_{L10}$  法、 $\tau_c$  法等,都是基于经验关系的经验公式。在这里很难评价各方法的优劣。

(4) 这些方法虽然在不同地区,不同程度地获得过成功,但相对于传统地震定位,更主要是基于大量实验的统计结果,可移植性差,很难实现拿来主义。我们需要通过大量的实验工作加以验证、完善和修改,需要创新性地提出适合于我国监测系统的新方法。

## 3 结束语

对于发布地震预警信息,不单纯是依靠地震学,而是多学科技术的综合有机运用。它对计算机编程技术、现代通讯系统、自动

化控制系统、快速响应系统等同样具有非常严格的要求。另外,地震预警不仅仅是科学和技术问题,同时也是一个社会问题,在我们无法保证预警信息百分百准确无误发布的情况下,就要均衡考虑政府和人民的承受能力,并努力提高预警信息发布的准确度。

日本新干线、中国台湾地区以及墨西哥等预警系统的多次经验证明了地震预警对防震减灾具有不可否认的意义。随着地震监测

事业以及相关现代技术的发展,随着我国城市化进程的加速,在我国建设一个预警实验系统,进而建设一个现代化的预警系统,对于有效探索防震减灾新途径非常有利。

#### 4 致谢

感谢俞言祥研究员对本文的指导和帮助。

(作者电子邮箱,黄媛:yhuang@cea-igp.ac.cn)

#### 参考文献

- [1] Wu Y M, T L Teng. A virtual sub-network approach to earthquake early warning. *Bull Seism Soc Amer*, 2002, 92: 2008-2018, doi: 10.1785/0120010217
- [2] Nakamura Y. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS). *Proc. 9th of World Conference on Earthquake Engineering*, 1988, 7: 673-678, Aug 2 ~9, 1988, Tokyo-Kyoto, Japan
- [3] Nakamura Y. Earthquake alarm system for Japan railways. *Japanese Railway Engineering*, 1989, 109: 1-7
- [4] Allen R M, H Kanamori. The potential for earthquake early warning in Southern California. *Science*, 2003, 300: 786-789
- [5] Erik L O and R M Allen. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, 2005, 438(10): 212-215
- [6] Wu Y M, T C Shin and Y B Tsai. Quick and reliable determination of magnitude for seismic early warning. *Bull Seism Soc Am*, 1998, 88: 1254-1259
- [7] Allen R. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. *Bull Seism Soc Amer*, 1978, 68: 1521-1532
- [8] Kanamori H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33: 195 ~214, doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122626
- [9] Andrew B L and R M Allen. Single-Station earthquake characterization for early warning. *Bull Seism Soc Am*, 2005, 95(6): 2029-2039
- [10] Odaka T, K Ashiya, S Tsukada, et al. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record. *Bull Seism Soc Am*, 2003, 93: 526-532
- [11] Tsukada S, Odaka T. A new method of estimating epicentral distance and magnitude for early detection(2). Application of JMA data, 2003

## Summarization of the Quick Earthquake Location Method on Earthquake Early Warning Systems

Huang Yuan and Yang Jiansi

(Institute of Geophysics, CEA, Beijing 10081, China)

**Abstract** We introduced some quick location methods on Earthquake Early Warning Systems in detail, in order to explore a new way for our country's earthquake prevention and disaster mitigation.

**Key words** earthquake early warning; quick earthquake location; P wave; predominate period