

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202105007

## 地震预警技术的应用与展望\*

王 俊, 刘红桂, 周昱辰

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

**摘要:** 简要回顾了地震预警的发展历程,介绍了地震预警的基本原理和地震位置、预警震级及预测烈度等关键参数的主要测定方法。作为一种能够有效减轻地震灾害的手段,世界上多个国家和地区相继开始建设各自的地震预警系统,以系统建设与应用实效为切入点,介绍了世界主要地震预警系统和我国的相关进展情况;并基于目前地震预警面临的主要挑战,从传感器、信号处理算法及组网模式等方面,展望了未来地震预警系统新的、有潜在变革性的技术和方法。

**关键词:** 地震预警系统; 预警盲区; 光纤观测; 微电子机械系统; 机器学习算法

**中图分类号:** P315   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)04-0874-09

### Application and Prospect of Earthquake Early Warning Technology

WANG Jun, LIU Honggui, ZHOU Yuchen

(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** This paper briefly reviews the development process of earthquake early warning and introduces the basic principles of earthquake early warning as well as the main determination methods for key parameters such as earthquake location, early warning magnitude and predicted intensity. As an effective means to mitigate earthquake disasters, earthquake early warning systems have been set up in many countries and regions of the world. Taking the system construction and application effectiveness as the breakthrough point, this paper introduces the main earthquake early warning systems in the world and the related progress in China. And then, based on the main challenges faced by the earthquake early warning, new and potentially innovative technologies and methods for future earthquake early warning system are prospected from the aspects of sensors, signal processing algorithms and networking modes.

**Keywords:** earthquake early warning systems; the blind zone; optical fiber observation technology; microelectro-mechanical system; machine learning algorithm

### 引 言

地震预警是指快速检测和表征地震并发布地

震动警报或警告,以便采取紧急处置或逃生措施。与地震预测不同,地震预警信息是在地震发生后才发布,当地震预警发布时,已经产生了可供检测的地震动。用户从接收到预估地震动信息与实际地

\* 收稿日期:2021-05-07;修回日期:2021-08-06

基金项目:中国地震局科技星火计划攻关项目(XH19014)资助

作者简介:王俊(1982—),男,高级工程师。主要从事数字地震监测技术研究。E-mail:wangjun1099@qq.com

通讯作者:刘红桂(1966—),男,研究员。主要从事地震波及地震预报方法等研究。E-mail:hgliu88@163.com

震动到达之间的时间差,称为可用的预警时间。由于用户与地震震中之间的距离不同,于是,潜在的预警时间可从几秒钟到几分钟不等。这一概念的提出最早可以追溯到电子通信技术出现的19世纪,在1868年美国海沃德断层地震后,J. D. Cooper<sup>[1]</sup>就设想可以事先在距离旧金山市区100 km外的Hayward地区布设地震观测台站,一旦发生地震,立即就可以从这些观测仪器中获得地震的方位和规模,并同时利用地震动传播速度远小于电磁波传播速度的特性,在破坏性地震波尚未到达市区之前及时敲响议政大厦上的警钟,便于人们采取相应的紧急逃生避险措施,以达到减少人员伤亡和减轻地震灾害损失的目的。

地震预警概念虽然很简单,但实现起来却十分困难。需要考虑的问题众多,例如,怎样检测地震?如何表征地震(震级或其它度量)以及有震感或有破坏的地点预测?完成任务的速度和准确性如何?如何在速度和准确性之间权衡?谁需要警报信息及需要什么样的预警信息?误报和漏报怎么办?等,特别是缺少必要观测设备和传输手段,Cooper的构想一直未能真正实现。直到20世纪90年代,随着地震观测技术、地震观测仪器、计算机技术、数据传输方式和处理方法等多种技术的发展,以及公众对于地震安全需求的日益增长等多方面因素的综合影响下,这一设想才逐渐变为现实。作为一种能够有效减轻地震灾害的新手段,地震预警越来越受重视,世界上多个国家和地区相继开始建设各自的地震预警系统,取得了明显的减灾效果。

## 1 地震预警

### 1.1 地震预警模式

地震预警一般可分为异地预警、现地(原地)预警以及混合预警三种模式<sup>[2-3]</sup>。

异地预警是指在距预警目标区一定距离外的潜在震源区布设高密度的观测台站,当观测到地震动后向其它地区发布警报信息。其原理是利用近震源台站的记录信息(P波)确定地震基本参数,估计预警目标区地震动,并发出警报。例如,影响墨西哥的地震大都发生于格雷罗海岸附近,于1991年建成的SAS(Seismic Alert System)系统就是利用布设在格雷罗海岸的12个地震观测台站对地震的强度进行实时监测,该系统可为320 km外的墨西哥

城提供约60 s的预警时间。为了保证地震预警信息的可靠性,采用异地预警模式时,一般都要等到足够数量的台站触发并能相互验证时才发布相关信息,因此异地预警模式也被称为组网模式。

现地(原地)预警是指在预警目标区布设台站,其主要方式为直接采用P波阈值方式,即当地震波幅值超过一定阈值时就发布地震警报。因此,原地地震预警模式不论在任何地区都能有效增加预警时间,减小预警盲区范围,同时有可能为震中附近地区提供少量的应急反应时间。现地预警模式仅依靠少数触发台站的信息,现地预警模式也称为单台模式。

随着台站密度的逐步增加,通信技术发展及实时地震学研究的深入,前面两种预警模式的限制目前已经逐步淡化,更多的是采用本地和异地混合的预警方式。混合模式既可以发挥本地预警和异地预警的各自优势,又能充分利用现有的台网资源。

### 1.2 地震预警定位算法

地震预警作为一种以秒计的减灾技术,时效性是决定成败的关键。由于地震初期可用的信息十分有限,一般仅能使用震中附近少数几个触发台站的信息;另一方面,地震预警需要近实时持续的定位方法,传统地震定位方法难以满足要求。自20世纪80年代以来,国内外学者基于地震P波初期数据(数秒以内)做了大量研究,提出了多种实用化的近实时定位方法。如K.R. Anderson<sup>[4]</sup>提出,根据台站到顺序来进行实时地震定位,该算法首次将图形学中的Voronoi图划分理论引入到地震预警定位中;Y. Nakamura<sup>[5-6]</sup>提出,通过地震记录中垂直和水平分量的相关关系求取地震波的入射方位角,并根据P波幅值的经验衰减关系获取震中距的方式进行地震定位。T. Odaka<sup>[7]</sup>基于垂直向P波前3 s的初始信息,提出采用指数函数拟合震中距一包络振幅之间关系来定位的方法,即 $Bt \cdot \exp(-At)$ 拟合方法;P. Rydelek<sup>[8]</sup>发展了一种双子台定位方法,认为如果有两个台的P波到时,依据到时差,可以把震中限制在双曲线的一支上,进而应用第三台及其余台的P波尚未到达信息,把震中限制在双曲线的一段上。S.Horiuchi等<sup>[9]</sup>在Rydelek双曲线方法的基础上,综合应用先触发台站到时信息和未触发台站的位置,来约束定位结果的方法,也称为“着未着”方法。该方法是目前地震预警领域中应用较为广泛

的方法,其核心思想是根据各台站的实际到与理论到时的残差加权平方和最小来实现快速地震定位。基本原理为,定义 $T^{\text{now}}$ 为前两台触发后的任意时刻,在 $T^{\text{now}}$ 时刻未触发的台站满足下式:

$$T^{\text{now}} - T_i^{\text{delay}} - T_{hi}(\varphi, \lambda, h, t) < 0 \quad (1)$$

式中, $T_{hi}(\varphi, \lambda, h, t)$ 为台站理论到时,根据震源信息 $(\varphi, \lambda, h, t)$ ,在均匀波速结构下给出的值; $T_i^{\text{delay}}$ 表示数据传输延迟。

如图1所示,在均匀波速情况下,虚线圆为 $T^{\text{now}}$ 时刻地震波的传播范围,黑色双曲线是根据已触发的前两台A、B确定的震中位置所在的双曲线,灰色闭合椭圆是根据未触发台站信息缩小的震中区域。可利用 $T^{\text{now}}$ 时刻实际到与理论到时的残差平方和最小,进一步确定震源位置。

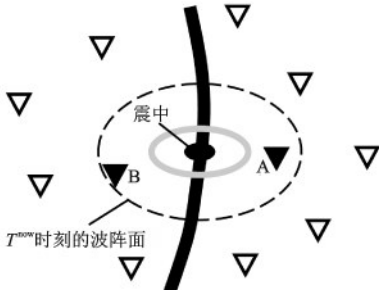


图1 “着未着”法示意

Fig.1 Diagram of the “trigger/non-trigger” location algorithm

在 $T^{\text{now}}$ 时刻,对已触发台站和未触发台站计算到时残差,其中已触发台站的残差表示为:

$$R_{pj} = T_j^p - T_{hj}(\varphi, \lambda, h, t) \quad (2)$$

未触发台站的残差表示为:

$$R_{ni} = \begin{cases} T^{\text{now}} - T_i^{\text{delay}} - T_{hi}(\varphi, \lambda, h, t); T_{hi} + T_i^{\text{delay}} - T^{\text{now}} < \epsilon_0 \\ -\epsilon(\Delta, h); T_{hi} + T_i^{\text{delay}} - T^{\text{now}} \geq \epsilon_0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\epsilon(\Delta, h) = \begin{cases} a|h - h_0| + b\Delta + \epsilon_0; N_p = 2, 3 \\ \epsilon_0; N_p \geq 4 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\epsilon_0$ 为未触发台站在 $T^{\text{now}}$ 时刻的触发等待时间; $N_p$ 为已触发台站数;当 $N_p \geq 4$ , $(\varphi, \lambda, h, t)$ 4个参数为已知, $\epsilon(\Delta, h)$ 为常数 $\epsilon_0$ 。

当首台触发时,则以首台正下方某一深度(如50 km)为中心点,建立 $3 \times 3 \times 3$ 三维网格进行迭代搜索,由下式:

$$\rho^2 = \sum_j W_{pj} R_{pj}^2 + \sum_i W_{mi} R_{mi}^2 \quad (5)$$

求得残差平方和 $\rho^2$ ,其中 $W_{pj} = 20W_{mi}$ , $\rho^2$ 最小的网格点为此时的最优震源位置解。

然而,在实际的地震预警过程中,通常需要根据台站的密度、几何分布情况来选择合适定位方法。马强等<sup>[2]</sup>将预警定位划分为6种情形,综合运用Voronoi图划分、“着未着”、偏振震中方位角等技术对预警定位结果进行实际验证,发现定位结果依赖于震相到时及到时顺序,引起偏差的主要原因是由震相自动检拾产生的误差所致。

### 1.3 地震预警震级算法

地震预警震级同样主要是基于P波初始部分的信息来测定,也同样发展了多种方法。马强等<sup>[2]</sup>将它们按与周期(频率)、幅值(强度)的依赖程度进行归类。其中三种应用较为普遍,也是我国国家地震烈度速报与预警系统中采用的方法:

#### (1) $\tau_p^{\text{max}}$ 方法

$\tau_p^{\text{max}}$ 方法是Y. Nakamura<sup>[10-11]</sup>提出的一种基于实时速度记录计算地震卓越周期的算法,认为P波段初始信息的卓越周期可以反应地震的大小,垂直分量卓越周期的最大值 $\tau_p^{\text{max}}$ 与震级大致成比例关系,计算公式为:

$$\tau_i^p = 2\pi \sqrt{X_i/D_i} \quad (6)$$

式中, $X_i = \alpha X_{i-1} + x_i^2$ ;  $D_i = \alpha D_{i-1} + (dx/dt)_i^2$ ;  $\tau_i^p$ 为时间*i*秒时测定的卓越周期; $x_i$ 为*i*时刻的地面运动速度; $X_i$ 为平滑地面运动速度的平方; $D_i$ 为平滑地面运动速度导数的平方; $\alpha$ 为平滑参数(采样率为100 Hz时取值为0.99)。

$\tau_p^{\text{max}}$ 的准确性和稳定性不仅与采样率相关,还与处理过程密切相关<sup>[12]</sup>。Y.M. Wu等<sup>[12]</sup>建议,当震级小于5.0级时,高频截至频率为10 Hz;当震级大于5.0级时,截至频率为3 Hz。在美国ElarmS预警系统中,应用P波2~4 s的卓越周期来进行预警,计算公式为:

$$m_i = 6.3 \log(\tau_p^{\text{max}}) + 7.1; 3.0 < M < 5.0 \quad (7)$$

$$m_h = 7.0 \log(\tau_p^{\text{max}}) + 5.9; M > 4.5 \quad (8)$$

不过,该方法在实际应用中,发现从单个台站记录信息中获得的离散性较大,通常需要多台计算结果的算术平均才能获得较为稳定的结果。

#### (2) $\tau_c$ 方法

针对 $\tau_p^{\text{max}}$ 方法存在的局限性,Y.M. Wu等<sup>[12]</sup>进行了改进:

$$\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{t_0} u^2(t) dt}{\int_0^{t_0} \dot{u}^2(t) dt}} \quad (9)$$

式中,  $\tau_c$  的单位为 s;  $u(t)$  为高通滤波后(截止频率为 0.075 Hz)垂直分向的地震动位移值;  $\dot{u}(t)$  为从  $u(t)$  微分获取到的速度量;  $t_0$  为记录时间(通常为 3 s)。

震级估算的公式形式表达为:

$$M = A \times \log \tau + B \quad (10)$$

式中,  $\tau$  可代表  $\tau_p^{\max}$  或  $\tau_c$ ,  $A$ 、 $B$  为拟合获取到的常数, Y.M.Wu 等<sup>[13]</sup> 指出不同地区的记录提取的  $\tau_c$  值差异性很小, 利用台湾地区、南加州以及日本等地区资料获得的  $A \approx 3.373$ ,  $B \approx 5.787 \pm 0.412$ 。

### (3) $P_d$ 方法

研究表明, 在 P 波后 3 s 时间窗内, 低通滤波后的位移幅值与地震动速度峰值  $PGV$  之间存在良好的线性关系, 可以用来预估地震震级。  $P_d$  也可以和  $\tau_c$  参数相结合, 作为是否是破坏性地震的判别条件。  
 $\log(PGV_{\text{est}}) = 0.920 \log_{10}(P_d) + 1.642 \pm \sigma_{PGV_{\text{est}}}$  (11)  
 式中,  $P_d$  单位为 cm,  $P_d = \max[|d(t_i)|]$ , 进而根据下式来估计震级:

$$\log(P) = A + B \times M + C \times \log(R) \quad (12)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为根据先验数据预设的系数。

但 P.L.Huang<sup>[14]</sup> 研究结果显示, 对于小于 6 级的地震而言, 测定结果的  $M_{\text{MA}}$  结果之间的离散较大, 各个台站场地条件对结果的影响也不容忽略。

除上述三种方法外, 还发展了基于贝叶斯条件概率分布理论的预警震级估算方法、应用人工神经网络的多频带、多参数地震预警震级持续确定方法等。

## 1.4 地震动预测

获取地震的位置、震级等基本参数后, 准确给出预警目标区即将到达的地震动参数对于地震预警的实效至关重要。通常的做法是, 使用点源算法, 基于适当的地震动预测方程(GMPE), 将地震基本参数信息转化为用户所需的地震动信息。该算法的优点是速度快, 能最早提供预警信息, 因此能提供最长的预警时间。在我国有两种实现方式:

### (1) 基于烈度衰减关系

根据预警定位结果中的震中位置, 从数据库中获取该地区先验烈度衰减关系参数, 烈度衰减关系式如下式所示:

$$I = A + B \times M + C \times \log(R + D) \quad (13)$$

式中,  $M$  为震级;  $R$  为震中距, km;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为待获取的烈度衰减关系参数。

### (2) 基于 P 波波列参数

根据近台 P 波列特征参数, 一般通过下述公式首先转换成  $PGV$ , 然后再转换成预测烈度:

$$\log(PGV) = A \times \log(Px) + B \quad (14)$$

式中,  $Px$  为近台 P 波列特征参数(如  $P_d$ 、 $P_v$  或  $P_a$ );  $A$ 、 $B$  为依据所采用的不同 P 波列特征参数预先设定的系统灵敏度。

在实测过程中, 采用点源算法预测 7 级左右的地震通常会饱和。主要原因有两个: 首先, 超过 7 级的地震震源破裂不再适合使用点源来描述, 而且根据震源时间函数的前几秒信息, 也很难或不可能从波形记录中区分出 7 级地震或 8 级地震。其次, 对于沿断层延伸数百公里的破裂, 用户所期望的震动强度取决于震级和离断层破裂的距离, 而破裂的横向尺度不是点源信息所能提供的。采用有限断层算法可以很好地解决点源饱和问题, 它可以估计破裂的有限尺度。通过降低或消除震级饱和和局限, 它们通常会改进震级估计结果。虽然有限断层算法相对点源算法较慢, 但它们能预测更强烈震动和覆盖更大范围, 对于最大地震可以在人们感到震动前完成。

此外, 也有学者利用强震动观测结果正向预测其他地点的震动; 该方法不易受到地震检测、多台站地震波至关联、震中位置不确定性和震级不确定性等挑战问题的影响, 特别适用在余震序列和震群期间或对于巨大地震(M9)的预警。其缺点是地震动预测的精度随着预警时间的增加而降低, 10 s 以上的正向预测准确性可能不太高, 没有用处。

## 2 地震预警系统的建设应用情况

地震预警系统从技术上可大致分为观测系统、数据分析处理系统、决策及信息发布等子系统。近几十年来, 随着地震观测仪器和可用于发布警报的通信技术及设备的进步, 世界上多个国家和地区相继建设了地震预警系统(表 1)<sup>[15]</sup>。本节将简要介绍全球范围内已建成并投入运行的主要地震预警系统及我国的建设进展。

### 2.1 国外主要地震预警系统

1985 年墨西哥城 8.1 级地震后, 科学家们通过

表 1 全球地震预警系统现状<sup>[15]</sup>

Table 1 Status of earthquake early warning systems in different regions of the globe<sup>[15]</sup>

对象	各国/地区应用
公共警报发布:向所有公众成员发布警报	墨西哥:多个州
	日本:全国范围
	韩国:全国范围
	中国台湾:全地区
有限警报发布:向选定用户发布警报	印度:Roorkee 地区
	罗马尼亚:区域性
	土耳其:伊斯坦布尔
	美国:西海岸地区
系统建设:预警系统实时测试和发展中	智利:全国范围
	中国:几个地区
	哥斯达黎加:区域性
	萨尔瓦多:区域性
	以色列:全国范围
	意大利:Irpinia 地区
	尼加拉瓜:区域性
瑞士:全国范围	
全球:MyShake 智能手机	

模拟发现,从沿海岸地震台站检测到地震至墨西哥城感到震动存在超过 1 min 的时间间隔。之后,墨西哥政府开始建设地震预警系统,并于 1991 年投入运行,目前已覆盖多个州和城市<sup>[16-17]</sup>。该系统通过部署在学校和政府办公室的数千个专用无线电接收器发布警报,在墨西哥城,大多数居民都能听到。该系统当检测到两个地震台站的有效地震动时,就会在可能遭受震动的城市内发布警报。以墨西哥城为例,发布警报的阈值是海岸南面 300 km 远的 2 个台站检测到 5 级以上地震。使用较少的数据即可快速发出警报,目前只需要 3 s P 波数据。同时,还有两个独立的私营部门地震预警系统也在运行,分别是 Sky Alert 和 Grillo,各自运行自己的监测台网,并主要通过智能手机应用程序和专用联网设备来播送警报。

日本气象厅(JMA)的公共预警系统,在 1995 年神户 6.9 级地震后观测台站的密度得以大幅提高,系统于 2007 年开始发布地震预警信息<sup>[18]</sup>,该系统基于 P 波到时进行地震定位、由 P 波前几秒数据进行震级估计。2011 年日本东北 9 级大地震,系统向受影响最严重的仙台地区发布了警报,该区预期的地震动超过发布公共警报的阈值-JMA 烈度 5L(5 度弱,相当于 MMI VII)。然而,这次特大地震在更广

区域产生了显著震动,远超出地震预警算法预测的震动范围,震级估算在 8.1 级处饱和,也没有产出破裂断层面有限尺度的有关信息。此外,在强烈余震序列中,系统错误地将来自不同地点、同时发生的地震波至进行了关联。此外,日本新干线高速铁路中还建设了 UrEDAS 系统,采用沿铁路线布设台站触发后的 P 波信息对地震的震级和震中位置快速进行判定和预警。

美国西海岸地区的公共地震预警系统“ShakeAlert”目前正在分阶段实施。由美国地质调查局和加州大学伯克利分校、加州理工学院等机构合作运行<sup>[19]</sup>。地震台网的传感器数量在未来几年将达到 1 500 个<sup>[20]</sup>。该系统采用经过广泛测试的多种方法<sup>[21]</sup>,并使用 EPIC 单个点源算法和有限断层检测器(FinDer)线源算法<sup>[22]</sup>,点源算法主要基于 ElarmS-3<sup>[23]</sup>。结合大地测量数据,改进大型破裂的震级和有限尺度估计结果的多种算法也正在进行测试。2018 年分阶段推出了部分公共服务,包括停止列车运行、为部分学校报警以及自动的供水管理等。2019 年初,洛杉矶市向公众提供了 ShakeAlert-LA 应用程序,目的是在洛杉矶县发布警报。

此外,智利、瑞士、哥斯达黎加、萨尔瓦多和尼加拉瓜等也一直在建设地震预警网,系统采用虚拟地震学家(VS)、ElarmS 和 FinDer 等算法<sup>[24-25]</sup>。

## 2.2 我国的建设进展情况

我国的国家地震烈度速报与预警系统是由中国地震局主导建设,“国家地震烈度速报与预警工程”于 2018 年正式实施,预计 2023 年将全面完成,将在全国范围内建设超过 1.5 万个观测站点(图 2)。工程竣工后,将在华北、南北地震带、东南沿海、新疆天山中段以及拉萨周边地区等重点地区形成秒级地震预警能力,在全国范围内形成分钟级地震烈度速报能力。目前,正在按照“全国一张网、一套处理系统、一套处理结果以及一套发布平台、多级信息服务”的技术架构开展建设。根据预测地震烈度的不同,将地震预警等级由强到弱分为四级,并采用红、橙、黄、蓝等四种颜色分别表示(表 2),红色表示 I 级预警,橙色表示 II 级预警,黄色表示 III 级预警,蓝色表示 IV 级预警。在地震预警信息发布过程中,根据各省实际情况,综合当地建(构)筑物抗震设防能力、地震活动性、社会对地震预警的接收程度以及地方法律法规等因素,确定本省地震预警信

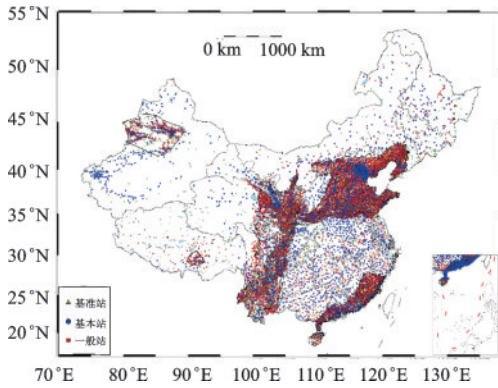


图2 我国国家地震烈度速报与预警工程建设站点示意  
Fig.2 Station distribution of national earthquake intensity quick report and early warning project in China

表2 我国地震预警等级与预测地震烈度的关系

Table 2 Relationship between earthquake early warning level and predicted earthquake intensity in China

地震预警等级	等级颜色	预测地震烈度
I级	红色	7度及以上
II级	橙色	5度、6度
III级	黄色	3度、4度
IV级	蓝色	3度以下

注:《国家地震烈度速报与预警工程项目——预警信息发布 第1部分 信息规程》,2021

息的发布条件和阈值。发布渠道包括:专用信息终端、应急广播、广播电视、网络平台以及新媒体等。目前,在云南、四川、京津冀等地区已基本具备地震预警服务能力。与此同时,我国多个省份也在当地政府的支持下,在国家预警工程的基础上开展地震预警系统建设,如江苏省规划将在全省范围内建设超过1500站点的高密度综合观测网(图3)。

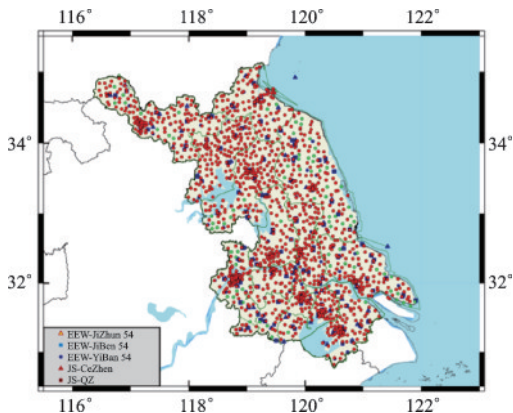


图3 江苏省地震烈度速报与预警观测站点  
Fig.3 Station distribution of earthquake intensity quick report and early warning project in Jiangsu

此外,在中国台湾地区现在有三套地震预警系统。一是台湾气象局使用区域地震台网检测地震并使用基于P波的点源方法来发布警报<sup>[26]</sup>。该系统产出预警警报信息一般需要15s左右,通过手机可以接收到警报。二是台湾大学开发的预警系统,使用低成本的微电子机械系统(MEMS)传感器,可为震中附近地区提供更快速的现地预警。它使用P波位移阈值来发布警报,传感器布设在大约600栋建筑物内,大部分是学校,现在安装的是P-alert设备<sup>[27]</sup>。台湾地震工程研究中心也开发了一种现地方法,它也使用几秒P波数据来预测即将到来的峰值震动,但它使用六个提取的特征参数和一个支持向量机模型来决定何时发出预警,观测设备目前主要安装在学校<sup>[28]</sup>。

### 3 地震预警技术展望

最近十年来地震预警系统在实际建设方面取得了很大进展,但从第一个运行的系统<sup>[29-30]</sup>起至今,在传感器和算法方面,大部分预警系统很大程度上仍然没有较大变化。

在传感器方面,光纤观测有很大的发展前景。目前,最大的进展是日本的S-net网络<sup>[31]</sup>,它包括覆盖日本海沟的800多km的光纤电缆,有150个节点或观测点,间距大约为30km。每个节点都包含绝对压力、强震动、宽带和短周期传感器。不过,实时电缆观测网的成本远远高于陆地上的同类观测网。布设和维护此类基础设施的技术仍在不断发展。海底是一个充满挑战的环境,电缆和观测节点都需要被埋设或制成拖网,以保护它们不受捕鱼活动的影响。此外,有许多噪声源,如底流和内波,可能使数据难以使用,特别是长周期段数据<sup>[32]</sup>。研究表明,对噪音可以进行修正和解释<sup>[33]</sup>,实时海底数据有可能得到可靠的应用。随着研究的深入,实时海底数据不仅有利于基础科学方面探索应用,而且对离岸网络的灾害应用同样具有内在价值,因此,它们很可能在未来几十年继续发展,并提供更好、更及时的地震预警应用,特别是对最大地震。

微电子机械系统(MEMS)在地震预警方面的应用也越来越普及。在陆地上,地震的检测和表征与首次警报发布之间的延迟,很大程度上与传感器网络的密度有直接关系<sup>[34-35]</sup>,一般来说,台网密度越稀疏,预警盲区就越大。由于专业级地震仪器很昂

贵,很大程度上制约了大多数网络的加密。一种有潜力的方法是用低成本加速度计来补充传统的传感器网络。微电子机械系统(MEMS)的噪声特性和灵敏度适合于本地监测<sup>[36-37]</sup>。MEMS加速度计的成本比传统惯性地震仪少很多,最适合用来增加网络密度。

在低成本传感领域,最令人兴奋的发展或许来自于将手机用作地震仪的潜力。如今,大多数智能手机都搭载了一个三分量的MEMS加速度计,其性能足以检测局部至区域距离内的中等和大震级地震。事实上,如果手机处于静止状态,内置传感器足以观测到P波,可适用于地震预警。Q. Kong等<sup>[38]</sup>演示证明了实时收集和分析手机数据的能力,同时在电池消耗或处理器使用方面对用户手机的影响也极小。Q. Kong等<sup>[38]</sup>表明,使用神经网络方法将人类信号与手机记录的地震信号进行可靠地分离是可能的。Q. Kong等<sup>[39]</sup>进一步演示了如何将数据用于地震预警。在相关工作中,S.E. Minson等<sup>[40]</sup>通过大震的模拟研究,表明现代智能手机中的GPS芯片也可以用于地震预警。因为全球有超过20亿的智能手机用户,利用手机进行预警有着令人兴奋的前景。

总的来说,地震预警系统仍然依赖于传统的惯性地震计。不过,其它地球物理传感器同样具有潜力。A.J. Barbour等<sup>[41]</sup>的研究表明,应变计可以在非常宽的频率范围内测量弹性动应变,可以用于震源的快速表征,他们还发现对在陆地上应变计仪器记录到的应变可能是未来海上观测网首选的大地测量参数之一。J.P. Montagner等<sup>[42]</sup>发现在日本东北部9级地震期间,Kamioka超导重力仪检测到了P波波至之前的重力信号;在破裂过程中,断层滑动使地壳内的质量进行重新分布,像震源辐射弹性波一样,会出现重力扰动,M. Vallée等<sup>[43]</sup>提出了这种瞬态弹性重力信号的理论公式。对于日本东北部9级大地震,M. Vallée等<sup>[43]</sup>研究表明,在P波波至之前的假设重力扰动确实可以在宽频地震仪上观测到。这些研究成果令人鼓舞,重力扰动以光速传播,使用这种测量结果的系统在运行上将大大加快速度,因为它消除了P波从震源传播到台站的时间延迟。然而,即使对于日本东北部9级地震,扰动也是非常小(约 $1 \text{ nm/s}^2$ ),因此,只有巨大地震才会产生可以用现有宽频传感器测量到的重力扰动信号。

此外,机器学习算法能快速地区分各种环境信

号,并从这些不同数据中正确识别出重大地震的初至。T. Perol等<sup>[44]</sup>已证明卷积神经网络(convolutional neural network, CNN, 通常被称作深度学习)算法可以用于地震检测和定位。Z.E. Ross等<sup>[45]</sup>使用CNN算法已经可以识别连续数据中的P波、S波和非地震信号。可以预见,当下一次地震发生时,机器学习算法就有可能预测出当前波场的趋势。

未来的地震预警系统必然会在现有基础上继续演变,但可能会有很大不同。系统可能将是两栖的和跨海岸线的。多种多样的地球物理观测手段将会出现,不仅包括高频GPS,还可能包括应变计和海底压力或声学传感器。专业级传感器将会形成一个骨干网络,并以主要断层线周围等关键区域的MEMS加速度计和城市环境中的数百万手机为补充。

## 4 结 语

地震预警可以通过多种通信渠道以最小的延迟和简单易懂的消息传播给用户,在建立了自动接收与处置装置后将能确保关键基础设施、生命线和运输系统的安全,大大降低震后火灾等次生灾害的诱发风险。一个现代的地震预警系统将会提高社会韧性,能使社会以远快于没有预警情形的速度恢复到震前状态。可以预见,地震预警的收益将会超过一次重要地震的直接损失。

然而,地震预警当前仍面临一些主要技术挑战,例如,如何有效缩小地震预警盲区,基于大震初期的数据实时反演破裂过程,如何准确判定破裂方向和破裂方式,以及预估震级的可靠性等。在解决这些挑战的过程中,势必会催生出新的技术方法,从而引领新的观测网的布设,为地震预警及震源机理的进一步研究与开发提供数据支持,而政府、公众对地震预警的关注又将极大地推动了地震预警信息的应用与普及,地震预警前景广阔。

## 参考文献:

- [1] Cooper J D. Letter to editor. San Francisco Daily Evening Bulletin, Nov.3, 1868.
- [2] 马强. 地震预警技术研究及应用[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2008.  
Ma Q. Study and application on earthquake early warning [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics,

- China Earthquake Administration, 2008. (in Chinese)
- [3] 张红才. 地震预警系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
Zhang H C. Study of key technologies in earthquake early warning system [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [4] Anderson K R. Epicentral location using arrival time order [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1981, 71(2):541-545.
- [5] Nakamura Y. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS) [C] // Proceedings of 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto, Japan: Association of Earthquake. Disaster Pervasion, 1988; No.13-2-12
- [6] Nakamura Y. Earthquake alarm system for japan railways [J]. *Japanese Railway Engineering*, 1989, 109(109):1-7.
- [7] Odaka T. A new method of quickly estimating epicentral distance and magnitude from a single seismic record [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(1):526-532.
- [8] Rydelek P. Real-time seismic warning with a two-station subarray [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(4):1546-1550.
- [9] Horiuchi S, Negishi H, Abe K, et al. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(2):708-718.
- [10] Nakamura Y. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS) [C] // Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto, Japan: Association of Earthquake. Disaster Pervasion. 1988: 673-78.
- [11] Nakamura Y. Real-time information systems for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC [J]. *Railway Technical Research Institute Quarterly Reports*, 1996, 37(1):112-126.
- [12] Wu Y M, Kanamori H. Experiment on an onsite early warning method for the taiwan early warning system [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(1):347-353.
- [13] Wu Y M, Kanamori H, Allen R M, et al. Determination of earthquake early warning parameters,  $\tau_c$  and  $P_d$  [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 170(2): 711-717.
- [14] Huang P L. Application of  $\tau_c * P_d$  in earthquake early warning [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 1403-1410.
- [15] Allen R M, Melgar D. Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47(1):361-388.
- [16] Cuéllar A, Espinosa-Aranda J M, Suarez R, et al. The Mexican seismic alert system (SASMEX): its alert signals, broadcast results and performance during the M 7.4 Punta Maldonado earthquake of March 20th, 2012. In *Early Warning for Geological Disasters* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2014:71-87.
- [17] Cuéllar A, Suarez G, Espinosa-Aranda J. A fast earthquake early warning algorithm based on the first 3 s of the P-wave coda [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108:2068-2079.
- [18] Hoshiya M, Aoki S. Numerical shake prediction for earthquake early warning: data assimilation, realtime shake mapping, and simulation of wave propagation [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105:1324-2038.
- [19] Kohler M, Cochran E, Given D, et al. Earthquake early warning ShakeAlert system: West Coast wide production prototype [J]. *Seismological Research Letters*, 2017, 89(1):99-107.
- [20] Given D D, Cochran E S, Heaton T, et al. Technical implementation plan for the ShakeAlert production system—an earthquake early warning system for the West Coast of the United States [R]. USA: US Geological Survey, 2014.
- [21] Cochran E S, Kohler M D, Given D D, et al. Earthquake early warning ShakeAlert system: testing and certification platform [J]. *Seismological Research Letters*, 2017, 89(1):108-117.
- [22] Böse M, Felizardo C, Heaton T H. Finite-fault rupture detector (FinDer): going real-time in Californian ShakeAlert warning system [J]. *Seismological Research Letters*, 2015, 86(6):1692-1704.
- [23] Chung A I, Henson I, Allen R M. Optimizing earthquake early warning performance: ElarmS-3. [J]. *Seismological Research Letters*, 2019, 90(2A):727-743.
- [24] Cua G, Heaton T. The virtual seismologist (VS) method: a Bayesian approach to earthquake early warning. in *earthquake early warning systems* [M]. Berlin: Springer, 2007: 85-132.
- [25] Nof R N, Allen R M. Implementing the ElarmS earthquake early warning algorithm on the Israeli Seismic Network [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106:2332-2344.

- [26] Wu Y M, Hsiao N C, Chin T L, et al. Earthquake early warning system in Taiwan. In *Encyclopedia of Earthquake Engineering*[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [27] Wu Y M, Mittal H, Huang T C, et al. Performance of a low-cost earthquake early warning system (P-alert) and shake map production during the 2018 Mw 6.4 Hualien, Taiwan, earthquake [J]. *Seismological Research Letters*, 2018, 90(1):19-29.
- [28] Hsu T Y, Lin P Y, Wang H H, et al. Comparing the performance of the NEEWS earthquake early warning system against the CWB system during the 6 February 2018 Mw 6.2 Hualien earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45:6001-6007.
- [29] Nakamura Y. On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)[C]// *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo-Kyoto, Japan: Association of Earthquake. Disaster Pervasion. 1988:673-678.
- [30] Espinosa-Aranda J M, Jimenez A, Ibarrola G, et al. Mexico City seismic alert system [J]. *Seismological Research Letters*, 1995, 66:42-52.
- [31] Kanazawa T, Uehira K, Mochizuki M, et al. S-NET project, cabled observation network for earthquakes and tsunamis [C]// *Proceedings of the 9th Conference in the SubOptic Series*. Dubai: [s.n.], 2016:18-21.
- [32] Webb S C. Broadband seismology and noise under the ocean [J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(1):105-142.
- [33] Bell S W, Forsyth D W, Ruan Y. Removing noise from the vertical component records of ocean-bottom seismometers: results from year one of the Cascadia Initiative [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2014, 105(1):300-313.
- [34] Kuyuk H S, Allen R M. Optimal seismic network density for earthquake early warning: a case study from California [J]. *Seismological Research Letters*, 2013, 84(6):946-954.
- [35] Ruhl C J, Melgar D, Grapenthin R, et al. The value of real-time GNSS to earthquake early warning. *Geophys [J]. Research Letters*, 2017, 44(16):8311-8319.
- [36] Evans J R, Allen R M, Chung A I, et al. Performance of several low-cost accelerometers. *Seismol [J]. Research Letters*, 2014, 85(1):147-158.
- [37] Saunders J K, Goldberg D E, Haase J S, et al. Seismogeodesy using GPS and lowcost MEMS accelerometers: perspectives for earthquake early warning and rapid response [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2016, 106:2469-2489.
- [38] Kong Q, Allen R M, Schreier L, et al. MyShake: a smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond [J]. *Science Advances*, 2016, 2(2): e1501055.
- [39] Kong Q, Allen R M, Schreier L. MyShake: initial observations from a global smartphone seismic network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18):9588-9594.
- [40] Minson S E, Brooks B A, Glennie C L, et al. Crowdsourced earthquake early warning [J]. *Science Advances*, 2015, 1(3): e1500036.
- [41] Barbour A J, Crowell B W. Dynamic strains for earthquake source characterization [J]. *Seismological Research Letters*, 2017, 88(2A):354-370.
- [42] Montagner J P, Juhel K, Barsuglia M, et al. Prompt gravity signal induced by the 2011 Tohoku-Oki earthquake [J]. *Nature Communication*, 2016, 7:13349.
- [43] Vallée M, Ampuero J P, Juhel K, et al. Observations and modeling of the elastogravity signals preceding direct seismic waves [J]. *Science*, 2017, 358(6367): 1164-1168.
- [44] Perol T, Gharbi M, Denolle M. Convolutional neural network for earthquake detection and location [J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): e1700578.
- [45] Ross Z E, Meier M A, Hauksson E, et al. Generalized seismic phase detection with deep learning [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2018, 108: 2894-2901.

(本文责编:池营营)