



全球地震早期预警研究综述

赵冰^{1,2}, 刘希强²

(1. 中国科技大学, 安徽 合肥 230026; 2. 山东省地震局, 山东 济南 250014)

摘要:近年来地震预警技术在国际上得到迅速的发展, 并有成功预警且收到减灾实效的先例。本文系统介绍了地震早期预警的方法, 包括波前探测、P 波应用、现地预警和区域预警; 介绍了地震早期预警系统在墨西哥、日本、土耳其、中国台湾和罗马尼亚等国家和地区的应用情况。还对地震预警中目前存在的问题和挑战以及远景进行了分析。

关键词: 地震; 早期预警; 方法; 应用; 现状; 远景

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2011)04-0392-11

An Overview of Earthquake Early Warning Researche around the World

ZHAO Bing^{1,2}, LIU Xi-qiang²

(1. University of Science and Tecnology of China, Hefei 230026, China;

2. Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China)

Abstract: In recent years, the “earthquake early warning” (EEW) technology has been developed rapidly around the world, some cases show that EEW has successfully provided seismic early warning information and got earthquake disaster mitigation effectiveness. In this paper, the approaches of the EEW, including front wave detection, using the P wave, onsite warning and regional warning are introduced, and the applications of EEW in Mexico, Japan, Turkey, China Taiwan, Romania and other countries and region areas are introduced also. Some problems and challenge in the earthquake early warning, as well as its perspective are analyzed.

Key words: Earthquake; Early warning; Approaches; Application; Status; Perspectives

0 引言

“地震早期预警”(EEW)是用于描述实时地震的信息系统,该系统能够快速检测地震破裂所产生的能量大小且估计稍后将在当地或异地发生地面震动情况,在强地面震动到来之前发出预警信息,预警时间范围从几秒钟到一分钟多不等,其长短取决于预警目标与地震震中的距离。

自从我们进入通讯时代以来,人们就提出了地震预警这个概念,但发展观测系统和方法仅有 20 年的时间^[1]。特别是在过去的 5 年里,伴随着地震台网的扩建、EEW 方法改进、人们对防震减灾意识的

增强以及社区减灾的需求,EEW 得到了迅猛的发展。

本文在 Allen^[2]关于对全球各种地震早期预警系统总结的基础上,综述地震早期预警系统的研究现状、存在的主要问题和未来发展趋势。

1 地震早期预警系统方法概述

1.1 波前探测

所有 EEW 系统必须首先检测到灾害性地震的发生,然后发出有用的预警信息。当灾害性地震发

收稿日期:2010-07-14

基金项目:山东省科学技术发展计划(2009GG10008000);山东省地震局博士基金

作者简介:赵冰(1983—),女(汉族),山东无棣人,公务员,在读硕士研究生,研究方向为地震学,主要从事地震监测管理工作。

生的时候,最简单的方法是探测对地面建筑物的破坏情况。因此,EEW系统的首要方法是探测某点位强地面震动强度并提前发出关于地震震级大小的警告,这种方法称为波前探测。波前探测概念首先是在旧金山海湾东部的海沃德断层发生1868年旧金山地震之后提出来的。铺设的电波电缆可用于快速传递即将到来的强地面震动的信息,使用听起来熟悉的有特色的钟声传递预警信息。波前探测系统从未有成功实践过,但它提出了在地震预警接收方和震源之间设置传感器的观念。

在20世纪60年代后期,日本在铁路沿线部署地震仪,当地面震动强度超过一定的临界值时将自动切断列车电源。应用“报警地震仪”的方法只有当地面震动开始之后才能提供预警。通过在近海和铁路轨道之间的日本东海岸部署地震仪可以得到更多地地震预警时间。预警系统充分利用网络和波前探测技术,来实现地震位置的探测和异地预警。

当震源位于人口密集区域之外时,波前探测能够提供重要的可达几十秒的预警时间。应用波前探测方法,墨西哥市研制成功了地震警报系统(SAS),仪器沿着距离板块俯冲带较近的海岸线布设,可对远在320 km外的墨西哥市发出预警。1991年SAS系统第一次向墨西哥市民发布了地震预警的信息,预警时间提前了约60 s^[1]。罗马尼亚的布加勒斯特也使用了相同的地震警报系统,布设在东南部喀尔巴阡山脉的弗朗恰区的地震仪检测到了地震的发生,并向距离约160 km以外布加勒斯特城市提供了约25 s的地震预警时间^[3]。伊斯坦布尔同样使用波前探测系统,根据布设在马尔马拉海北岸的观测仪器中的两个或三个台站记录的加速度是否超过阈值决定是否发出预警信息^[4]。

1.2 P波应用

监测有强地面震动记录再发出预警的方法会在震中附近地区产生一个预警盲区。假定峰值地面震动的运动速度约为4 km/s,则每增加1 s的时间预警盲区的半径将增加4 km。利用P波来确定地震是否会产生破坏将会提供有效的预警时间。由于地面最强烈的震动通常发生在S波到来之时或以后,因此利用P波可有效增加预警时间,并且可缩小预警盲区的范围和确定地震震中位置。

人们已经发展了应用P波来估计地震灾害的各种观测参数,其中的许多方法用来估计地震震级大小,以此来估计地面震动的强度。有些方法用来直接估计地面震动强度,叫做现地预警。

最早利用P波前几秒数据进行地震预警的参数之一是卓越周期法。该参数可用来标度地震的大小,而与震中距关系不明显。Nakamura方法是先从一个连续卓越周期时间序列中得到最大卓越周期 τ_{pmax} ,然后得到其与震级的关系^[5]。这种方法的优点是可以在1 s内初步快速估计地震震级大小,如果 τ_{pmax} 继续增加的话震级也会增大。通常情况下利用P波前3、4 s的数据可确定震级大小。虽然 τ_{pmax} 方法已经在美国西部、日本和台湾地区成功地得到实验^[6-9],但关于利用卓越周期测量震级的稳定性问题也已受到人们的关注^[10]。 τ_{pmax} 方法目前在加州^[11]、中国台湾地区^[12]和伊斯坦布尔^[13]地震实时监测系统中使用。Kanamori^[14]通过分析周期成分的变化提出了和 τ_{pmax} 稍微不同的 τ_c 方法: τ_c 方法要求一个固定时间窗,一般选择P波前3 s数据,通过计算有效周期确定震级大小。 τ_c 值与震级之间显示出与 τ_{pmax} 方法类似的关系,在美国加州和中国台湾地区已经进行过检验^[15-16]。 τ_{pmax} 和 τ_c 方法都旨在得到P波周期信号的相同属性特征。业已表明,同时应用两种方法具有优点^[17]。目前, τ_c 方法应用在加州^[18]、中国台湾地区^[12]、日本、中国和太平洋夏威夷预警中心的实时监测系统中。

P波振幅也是一个非常有用的用于估计地震灾害、提供地震震中距信息的参数。研究表明,P波最初几秒钟典型的是3秒钟的峰值位移、速度和加速度可以标度震级^[19-21]和地面运动强度^[3,15]。通过记录速度的积分或记录加速度的双重积分得到的峰值位移 P_d 通常被认为是估计震级最好的参数。研究发现峰值速度对估计震级也非常有效。目前在加州^[11,18]、中国台湾地区^[12]、伊斯坦布尔^[13]、日本、中国、夏威夷的太平洋预警中心和意大利南部坎帕尼亚地区^[22]的实时系统监测中都普遍使用峰值位移 P_d 来估计震级和地面运动强度。

日本利用连续地震波形的振幅变化来估计地震的大小,所利用P波的秒数没有限定,在S波到达之前连续监测P波位移(三分向矢量和)最大振幅的变化。当S波到达之后,根据S波位移的最大振幅来标度震级^[23]。根据P波前2 s数据,应用包络斜率方法估计震中距^[24]。

类似的包络函数被用来描述地震波形。每一秒钟计算一次峰值加速度、速度和位移,将其作为输入的数据。虚拟地震学家系统除了应用这些数据的变化来判断地震事件是否触发以外,还通过这些峰值的组合来估计地震震级大小^[25]。人们在应用峰值

加速度、速度和位移计算地震震级的同时,也在研究地震震级与周期的依赖关系。因此,以峰值和周期变化来估计震级的方法具有相似性。以神经网络为基础的 PreSEIS 系统利用递增的绝对速度^[26]或者其他包络参数^[27]来估计地震震源和地面震动参数。目前,虚拟地震学家系统和 PreSEIS 系统运行在加利福尼亚州和瑞士^[27-28]。

地震图记录的累积能量也是可以使用的参数。在墨西哥,通过先前的地震统计得到了累积能量及其增长速率与震级大小的关系^[1]。

人们在使用 P 波前几秒钟数据来估计地震震级大小中最关心的问题之一是大地震的震级饱和问题。如果我们使用 P 波最初 4 s 的数据,且 $M_{6.5}$ 地震的持续时间是 4 s 的话,如何用 P 波参数辨识出是 $M_{6.5}$ 地震还是 $M_{7.5}$ 地震?有明确的证据表明,利用最初几秒的 P 波数据来估计震级确实存在当震级大于 7 级地震后震级饱和的问题^[8-9,19,29]。为了尽量避免这些问题,人们采用更长的 P 波窗数据或者利用 S 波数据来校正估计的震级^[30-31]。但当使用 P 波的频率参数来估计震级时,我们发现很少出现震级饱和现象^[9,14,32-33]。尽管人们对这一看法存在争议^[34-35],并且难以有一个合理的物理解释。即使当 $M_{6.5}$ 或更大地震发生后存在震级饱和现象,这已足以作为我们发布预警的理由了。不管如何,我们应该发展一套描述大地震($M > 7$)有限破裂过程的系统,从而提高系统的可靠性^[30,35-36]。

1.3 现地预警

现场或单台预警的原理是通过探测某点位地震能量的大小发布该点位强地面震动的信息,也就是说,根据 P 波的变化来估计地面峰值加速度、速度或烈度。应用前文所提到的 P 波参数来实施现地预警是可能的。最简单的方法是寻求 P 波振幅与峰值地面震动之间的标度关系^[19]。然而,一些小地震可能具有非常大的振幅和高的频率成分,因此综合考虑记录的振幅及其频率成分信息是最佳的选择方法。如果 P 波记录具有大的振幅且频率成分较低的话,那就应该发布预警。

UrEDAS 是第一代地震早期预警系统和现地预警系统产品。UrEDAS 使用 P 波前 3 秒数据来估计震源参数,用卓越周期来估计地震大小,用 P 波振幅和震级估计震中距离,用质点运动方向估计地震方位角和震源深度。地震三要素可以通过单台三分向记录精确估计。基于预设标准,点源模型可以应用到现地预警当中。UrEDAS 应用相同的原理,

仅用 P 波前 1 s 的数据来快速发布预警信息^[37]。UrEDAS 系统继续应用于日本铁路沿线^[37-38]上,一个名为 FREQL 的移动平台为应急反应小组使用^[39]。

$\tau_c - P_d$ 方法是另一种现地预警的方法,该方法综合考虑了上述两种 P 波参数^[15-16,19,21,40]。当某台站有 P 波记录的时候,用 τ_c 估计震级大小, P_d 估计峰值速度(PGV)。仔细选择合适的 τ_c 和 P_d 组合,以及通过对台站修正,当发生强地震的时候系统可以发出正确的警报信息^[41]。这种方法目前正在加利福尼亚州^[41]、中国台湾^[12]、日本、中国和太平洋夏威夷预警中心使用。

1.4 区域预警

区域地震预警是基于地震台网的台站记录综合考虑上述部分或所有参数来进行的。以往地震台网的设计是波形数据流先传回台网中心,在台网中心再对数据进行处理,从而探测和报告地震的有关情况。EEW 发展遵循这一思路,在台网中心安装新的处理系统,生成预警信息,向用户发出预警。在台网中心仍然设置现场处理程序以提供最快的警告信息,即仍然设置基于单台 P 波预警的方法。此外,台网中心还综合分析多台记录给出预警信息。区域预警会给出更加准确的关于震中及其地面震动影响区分布情况,降低地震震级估计的不确定性。

一旦通讯网络应用在既收集地震数据,又向用户提供预警信息之中,波前探测也为增加预警时间提供了一种技术思路。距离震中较近的台站用于检测地震事件和对灾害进行评估,通过网络为远程用户提供预警信息。在发生大地震($M > 6.5$)后,这种方法可为可能遭受破坏的地区提供数十秒的预警时间。但同时在震中周围会有一个预警的盲区,原因是数据在传输到台网中心、处理数据和发送预警信息的过程中都需要时间。真正意义上的现地预警技术应该是现场观测的地震仪安装在用户的位置并在该点提供预警信息,这样去除了数据传输产生的延迟,但同时增加了地震预警的错报率和漏报率。

以下介绍一些区域预警系统。

(1) 墨西哥

墨西哥有两套预警系统,一套是为墨西哥城和格雷罗提供预警的 SAS 系统,另一套为瓦哈卡提供预警服务的 SASO 系统。SAS 预警观测系统由 12 个强震观测台站组成,沿位于俯冲带上方的格雷罗海岸布设,为距离约 320 km 的北部墨西哥市提供预警^[1,42]。该系统通过求取每一个台站从 P 波开始

窗长为2倍的S-P到时差的地震波能量和以及测量能量增长的速率来确定震级标度关系。根据经验关系确定地震是否是 $M \geq 6$ 的强震还是 $6 > M \geq 5$ 的中强震。当两个或更多台站报告有强震发生的时候,系统就会向“公众”发出一条预警信息;当有两个或更多的台站报告有中等地震发生的时候,系统则会发出“预防性”警告信息。尽管该系统等待S波到达之后才发出预警,但由于到墨西哥城的距离比较远,仍有约60 s的预警时间可用。墨西哥市比通常距离的地面震动要强烈一些,因为城市建在盆地沉积上,场地放大倍数达100~500^[42]。

SASO 预警观测系统由分布在瓦哈卡的36个地震观测台站组成。与相邻的格雷俯冲带相比较,瓦哈卡俯冲带的地震分布更加广泛。由于地震距人口聚居区的距离较近,这就要求使用更短时间窗内的数据。经验关系式使用两个时间窗口内测量的参数。在P波到达之后和S波到达之前这段时间里,测量得到卓越周期、峰值加速度和能量。当S波到时与P波到时差大于3 s时,测量得到P波前3 s的卓越周期。这些参数用于判断地震是强震还是中强地震。和SAS系统一样,确认后发出公共警报或预防性警报。

(2) 日本

日本气象厅结合报警地震仪和以网络为基础的分析技术完成了预警系统研制^[30]。该观测系统使用了分布在日本本土的约1 000台套地震仪,包括日本气象厅的200台套和日本地球科学与防灾研究所的800台套组成^[44-45]。当单台记录到超过100 cm/s²的地面震动时即会触发警报(警报地震仪方法)。此外也应用台网警报方法,基于单台和多台P波探测可确定震源:首先,应用单台P波估计地震位置,P波初动的斜率估计震中距离,通过拟合质点的椭圆运动来确定地震方位角^[24];其次,当一个或多个台站记录到P波的时候,基于其它台站未有观测到P波信号这一事实确定地震一定发生的区域范围^[45]。发生地震的区域范围的质心作为震中。震源深度固定为10 km。一旦三个或以上台站触发的时候,根据观测到的初至波到时,根据最小误差原理网格法搜索最佳的地震位置^[22]。用P波振幅和地震大小之间的标度关系估计震级大小,修正震中距。随着振幅的增加,通过连续监测三分向波形的矢量和的变化来估计震级。一旦S波到达即启用新的振幅与震级标度关系。给定震中位置和震级,通过基岩区峰值速度的分布和场地响应将峰值速度转

换为JMA烈度,从而得到地面运动强度^[23]。震后震动图本质上用的是相同的方法。该系统给出了烈度的估计及其每个县区震动持续的时间^[31]。

(3) ElarmS

ElarmS 地震早期预警系统(<http://www.ElarmS.org>)是目前正在加州范围内地震实时观测中运行的一套系统^[11]。该系统修改后用于对发生在日本的地震进行离线检测^[9]。该套系统单独处理和分析P波触发、 P_d 、 τ_{pmax} 、信噪比值和每秒的峰值振幅。这些参数不断地被输入到与地震实时监测有关的程序中,基于观测到时进行地震定位,应用 P_d 和 τ_{pmax} 关系估计地震震级,应用衰减关系和场地响应校正预测地面震动的空间分布。系统提供预测的强地面震动分布的“警报图”每秒更新一次^[8]。约400个点位的600套仪器记录实时传输到加州。目前该系统仅将预警信息提供给研究小组的成员。

(4) 虚拟地震学家系统

虚拟地震学家系统正在加州进行实时检验,应用数据来自加州400个点位的600套仪器记录^[28]。在瑞士,该方法使用每一秒的峰值加速度、速度和位移来探测地震事件,进行地震定位,估计震级大小。该系统使用了贝叶斯方法来预测最可能的震级,应用已有的信息,如地震活动和古登堡-里克特关系来划定地震危险区范围^[25]。但目前该部分内容还未有整合到实时检测系统中。虚拟地震学家系统也采用先进技术手段避免了地震事件的虚报现象。目前该系统仅将预警信息提供给研究小组的成员。

(5) Presto

Presto 是通过循序渐进的办法来进行地震早期预警,该套系统运行在位于意大利南部的伊尔皮尼亚台网(ISNet)中,实时监测的台站有28个^[47]。该系统利用触发台站的P波到时以及未有触发台站的信息来判断地震所发生的空间范围^[48],利用P波和S波的低频振幅估计震级大小^[22]。地震早期预警的不确定因素很大程度上来自模型,表现在峰值地面加速度与地面运动关系的不确定性,这种不确定性不是由于快速的估计震级和地震位置引起的^[49]。利用大地震资料的研究表明,地震运动有限破裂源的特征对地面运动的预测具有显著影响^[30]。

(6) PreSEIS

PreSEIS是一种神经网络方法预警系统,它应用一个或多个台站触发的P波到时及其振幅来确定震中、估计震级、预测烈度并且对地震破裂过程进行预测^[26]。为了训练和检验神经网络,分别应用有

限尺度破裂面源合成理论地震图^[26]和发生在伊斯坦布尔和南加州地区的地震台站实际记录的包络函数^[27]对 PreSEIS 方法进行了试验研究。

(7) SOSEWIN

该系统是一个自组织的地震早期预警信息网络系统,由 2008 年 6 月安装在伊斯坦布尔的阿塔科伊区的 20 个台站组成,目前正在进行实时测试^[13]。该系统不同于上述预警系统的地方在于它没有网络数据处理中心。取而代之的是在台站即时处理分析,通过无线通讯与邻近台站建立联系。判断有地震事件发生后,通过安装在台站上的软件计算到达时间、峰值幅度、卓越周期等参数,同时与周围邻近台站分享这些信息,根据单个台站的探测、多个相邻台站或多个参量的组合发出预警信息。目前该系统检测的重点集中在通信、运行的可靠性和地震事件的触发方面。原则上讲,上述方法中任何一种方法都可以应用到这样一个自组织无线网络中。

(8) 形变观测台网

到目前为止,许多地震早期预警系统使用的都是地震观测台网。在上文已经谈到,基于 P 波方法快速准确大地震($M > 7$)的能力面临着挑战。而高采样率的全球定位系统观测网络正在兴起并且能够提供实时的形变信息,对于大地震事件形变观测台网能够对准厘米级形变量变化提供实时和准确结果。

Crowell^[50]等提出了一种利用形变观测台网来进行预警系统的模型,目前应用在南加州。来自实时观测的 GPS 数据汇集到斯克里普斯中心轨道和固定台阵中心,并做瞬时定位处理^[51]。然后用三角测量方法确定整个观测网络中应变的主要分量。当观测应变超过预定值时,系统触发并通过邮件发布预警。GPS 数据也可以用来估计地震的地点,并且 Crowell^[50]等提出了用来估计震级的标度关系。

2 地震早期预警系统的应用

有根据表明,有五个国家和地区拥有能够为一个或多个用户提供预警信息的预警系统。除了墨西哥和日本拥有通过多种通信信道提供给公众预警信息的预警系统外,中国台湾、土耳其和罗马尼亚也拥有为一个或多个用户提供信息的地震预警系统。

2.1 墨西哥

墨西哥城的 SAS 系统是在 1985 年 9 月 19 日 M8.1 地震以后发展起来的,这次地震造成了 10 000 人死亡和 30 000 受伤。1991 年 8 月该系统开始向

25 所学校和地铁提供地震预警服务;1993 年 5 月 SAS 系统准确地对一次 M6.0 地震发布了预警;1993 年 8 月该系统开始向墨西哥城内的居民提供预警信息,成为世界上首个面向公众的可行的地震预警系统^[1]。该系统通过分布在墨西哥城内的 58 个公共调幅和调频广播电台、6 个电视频道以及位于托卢卡地区(距离墨西哥城以西 50 km)的 3 个无线电广播电台和一个电视台发布强震预警信息。此外,有超过 250 个的用户通过专门的无线电链路接收预警信息,主要是小学、中学、大学、紧急和安全机构、政府大楼、民间保护组织以及地铁系统。SAS 预警公告也通过电子邮件和 SAS 网站向 1 800 多个用户进行发布^[42]。

从 1991 年 10 月至 2009 年 3 月,SAS 系统发布了 13 个公众预警和 52 个预防性警告。公众预警和预防警告震级范围分别是从 4.8 到 7.3 和 4.1 到 7.3 级。Suárez 等^[43]对 SAS 系统的运行进行了评估,认为虽然 SAS 系统能够探测到灾害性地震的发生并能提供预警,但震级估计的准确性并不能保证公共预警和预防性警告的合理性差别。SAS 系统漏报了 6.3 级和 6.7 级两次地震,1993 年 11 月 16 日虚报了一次地震,当这次公共预警信息发布出去的时候根本就没有地震发生。比较成功的例子是 1995 年 9 月 14 日 7.3 级地震,这次地震发生之时被 SAS 探测到,在 S 波到达之前的 72 s 就发出了公共预警,地铁在 S 波到达前 50 s 停下,学校做出了疏散人员的应急响应^[1,52]。

较晚发展起来的 SASO 地震预警系统于 2003 年开始向瓦哈卡民众提供预警。自那时起 SASO 系统已发布了 3 次公共预警和 5 次预防性警告,还有 2 次漏报。由于滥用资金,SASO 系统未能维持继续的运行。没有足够的教育和宣传工作经费也被视为系统运行中存在的一个严重的问题,该问题是可能导致系统停止运行,地震预警对居民的影响力降低的主要原因^[42]。也有人担心该系统没有更多的用户,只有在墨西哥城的 76 所学校的 5 500 名学生可能使用该系统。这不是因为系统运行质量或对地震的检测能力不佳。在一项调查中显示,90%的使用者认为该系统提供了好的或非常好的服务。相反,事实是从来没有一个像 SAS 系统那样关于地震之后如何支持关键机构、关键设施和生命线做出应急响应的战略,这是被视为整体战略实施上失败的原因^[43]。

2.2 日本

20世纪60年代日本铁路开始使用警报地震计,在1982年开始使用波前探测地震早期预警系统,目的是地震发生时关闭新干线列车的动力系统。现地UrEDAS系统于1992年在新干线铁路上安装使用,1995年神户大地震后该系统得到进一步推广。神户大地震进一步促进了UrEDAS预警速度的改进,1998年改进后的UrEDAS开始应用在铁路和地铁系统中。该系统在2004年日本新潟中越M6.6破坏性地震中发挥了作用,当时正在震中区运行中的火车有四列,其中有一列火车出轨。P波到达列车出轨的地段的时刻是在发震时刻2.9 s之后,紧接着1 s之后发布了预警,采取了关闭电源和列车制动的措施。火车司机也看到了UrEDAS发出的预警信息和之后1 s火车自动制动的过程。发出预警之后2.5 s S波到达,3.5 s之后强烈的震动开始^[37]。在发生列车出轨的时候,只有一节车厢留在铁轨上。

1995年日本神户地震的发生进一步推动了日本地震预警系统的发展。地震后在全国范围内建立了系列地震台网,保证了全国范围内的台站均匀分布。这些台站包括约800个高灵敏度地震观测台站(Hi-net),其中约650个属井下强震动仪(KIK-net);另外安装完成了约1 000个地表强震动观测仪(K-net)和约70个宽带地震观测仪(F-net)^[53]。1993年北海道地震之后,为了提供更加快速和准确的海啸预警和地震预警信息,日本气象厅最近已经完成了全国范围内地震传感器的升级改造,包括约200个强地面运动观测仪。随着各类观测台网的建成,2004年2月日本气象厅开始对地震早期预警系统进行试验。2005年8月16日日本宫城县外海发生7.2级地震期间,该系统在探测到第一个P波到时的4.5 s之后发布了预警,此时是S波到达仙台市之前的16 s^[44]。日本气象厅自2006年8月开始向部分用户提供预警信息,2007年10月后开始向公众提供预警信息。

在向部分用户提供预警信息的时间段里(2006年8月到2007年10月),日本气象厅组织举办了公共教育培训活动,内容包括地震预警的目的、局限性以及应该采取的正确措施等,同时散发传单,在电视上播出视频短信息,张贴海报,举办研讨会,将信息发布在日本气象厅网站上(<http://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew.html>)。

日本现在的地震公共预警系统由约800个Hi-net和200个JMA强震动台站组成,台站平均间

隔20 km。当以日本气象厅标度的烈度超过5度弱时(梅尔卡利烈度表对应约Ⅶ~Ⅷ)就发布预警。从2007年10月至2009年3月,共发布了11个公共预警,这些预警地震的烈度都是5度弱或更高。有两次地震漏报,预测烈度为4度,不到5度弱。有3次地震虚报,其实际烈度为4度,但预测烈度为5度弱。期间发生的最大地震是2008年6月14日M7.2地震,在第一个台站P波触发报警后4.5 s向公众发出了预警,18 s后进行了校正。一些托儿所,幼儿园,学校,家庭、多处办事场所和一个工厂具体报道了所采取的保护措施。预警信息应用于自动电梯和工厂的控制系统,并且对要落地的飞机发出空中盘旋的指令。该系统还对2008年9月11日日本近海发生的M7.1地震进行了预警,表明该系统对发生在陆地和近海的地震都是有效的^[31]。目前还没有在地震发生期间发生恐慌和车祸的报道。

日本气象局发布的公共预警信息通过各种渠道向公众传送,要求日本广播公司收到预警信息后及时通过9个广播电台和电视台传送。此外,122(共127个)个电视台和59个调幅/调频广播电台(共100个)播出了2008年9月的地震预警信息。综合防灾预警系统也向市政当局发出预警。截止到2009年3月,226个市(共1 851个)有预警接收系统,102个市使用公共扩音系统宣布地震早期预警消息。两个移动电话公司免费向他们的用户提供警告,其中三分之一的公司正在扩大其容量。据估计,2 100万人目前可以通过手机收到预警信息^[30]。

除了发布这些公共预警信息外,广泛的用户把收到的警告信息合并到自动控制和相应系统中。日本气象厅并没有提供具体地点的警告信息,但是一些私人服务商经日本气象厅授权后可以提供地震发生具体地点的信息。2008年12月发生的地震就是这样,被授权的服务商有54个,他们向204个中的52个铁路运营商(其中有些还拥有自己的地震早期预警系统)、工厂、建筑工地、公寓、学校、商场和医院等提供信息服务^[31]。2009年4月第二届地震早期预警国际研讨会在日本京都举行,会上提供了一些有关的具体实例。

(1) 将日本气象厅预警信息简单译本转换成某个位置预测的烈度,结合当地地震计所提供的另外的现地预警信息给出具体预警时间。具体的一个例子是“家庭地震计”^[54],它把日本气象厅提供的图像信息转化为一个位置的预警信息,其中也包括基于P波探测的用于现地预警的MEMS传感器。该装

置安装在墙上,接上交流电源并和互联网/以太网连接,发布并发出声响警告信息以及秒倒计时,目前大概有 650 台家庭地震仪部署在全日本,其中约 500 台安装在学校。

(2) 一种家庭式地震仪被安装在学校中,其报警系统与学校播音系统相连接。平时对学生实施定期演练,演习表明学生可以在预警后 5 s 内躲到课桌下。有些大学也正在安装地震早期预警,例如在东京大学工学院目前所有教室都正在安装预警系统。

(3) 在 2003 年发生的两次地震中,由于地震引起火灾导致宫城县冲电气半导体公司设备损坏和生产能力丧失,遭受了 1 500 万美元的经济损失。经过这次惨痛的教训,该公司花费了 60 万美元进行地下室墙体加固,并安装了自动地震早期预警报警系统,一旦地震发生时可以及时关闭灾害性化学系统并将灵敏仪器移到安全位置。系统安装后所发生的两次地震中,损失减少到 20 万美元,而打烊的天数分别由前两次的 17 和 13 天减少到 4.5 天和 3.5 天。

(4) 工程与建筑公司还可利用预警系统增强地震发生过程中的建筑施工安全性能,保护建筑工人人身安全。鹿岛建设公司在其设备和设施中使用预警系统,在办公楼里电梯安装运行在距楼梯最近的地方,灯光打开,百叶窗打开,注意警报已经作为个人得到保护的措施。在建筑工地工人要远离危险区域。清水建设公司也向其办事处及建筑工地提供预警,此外还向客户提供地震早期预警的各种服务,目前使用清水地震早期预警服务的用户拓展到了银行、酒店以及半导体制造商等。

2.3 土耳其伊斯坦布尔市,中国台湾和罗马尼亚布加勒斯特市

1999 年,在位于土耳其马尔马拉海东部的北安纳托利亚断层发生了两次 $M7$ 以上地震,地震活动有向伊斯坦布尔发展的趋势。为此,已开始在伊斯坦布尔实施设计和安装 EEW 系统。最初安装的两个专用 EEW 系统设备仍在用:一个安装在伊塞克高层办公楼中,另一个安装在安然特拉克亚发电厂。面向全市的 EEW 系统由布设在沿马尔马拉海北岸的 10 台强震仪组成,作为伊斯坦布尔大地震快速反应和预警系统有机组成部分^[55]。目前,预警系统触发报警是基于预先设定的两个到三个台站同时超过指定阈值来实现的^[4]。该系统现已开始运行,预计在 2010 年开始为一些工业用户提供预警服务。

该系统将为正在博斯普鲁斯海峡马尔马拉进行管隧道施工的建筑商提供预警服务,一旦发生地震将采取制动措施防止列车进入隧道;该系统还将为伊斯坦布尔天然气配电网提供预警服务,一旦发生地震将关闭阀门。土耳其还计划在靠近断层的地方布设海底地震仪,以增加强震预警时间。

1986 年 11 月 15 日台湾花莲近海发生 $M7.8$ 地震,由于盆地的放大效应,距离 120 km 以外的台北遭到了严重的破坏。自从那时台湾开始发展 EEW 系统,2001 年第一个 EEW 系统开始在台湾运行,并继续沿用至今。该系统由布设在岛内的约 100 个加速度计组成,应用虚拟子网方法来探测和定位地震并基于 P 波和 S 波能量估计震级大小^[56]。平均而言,该系统能在地震发生以后 20 s 发布预警,此时对应于 S 波波前传播离开震中 70 km。应用 P_d, τ_c 和 τ_{pmax} 关系进行预警的第二套系统正在试验中,该系统使得预警盲区得到减小。预警信息还未有向社会发布,因为还没有对公共进行过系统化培训。但是目前预警系统正在试验过程中,期间可向铁路、捷运公司、灾害防御机构和医院提供预警服务^[12]。

布加勒斯特的 EEW 系统用于实时监测东南部喀尔巴阡的弗朗恰区的大地震集中活动。上世纪的四个大震($M6.9 \sim 7.7$)全部发生在距离布加勒斯特 160 km 的同一区域内。由 3 个地震台组成的网络用来监测弗朗恰震中区的地震和向布加勒斯特发送预警信息,预警时间达 20~25 s^[3,57]。目前该系统为霍里亚胡卢贝伊国家物理和核工程研究所提供预警服务,以保证那里的核能源得到安置。此外该系统还有计划地向更多用户提供预警服务^[58]。

3 国内地震预警研究进展

我国是世界上遭受地震灾害最严重的国家之一,政府对防震减灾事业极为关注。我国的地震专家对地震预警技术和预警系统的应用也进行了深入的思考和构想^[59-62],进行了如地震信号瞬时参数实时计算方法^[63]、基于地震预警的台阵布局^[64]等大量的基础性研究。目前在一些地区和某些部门已经建立了地震预警系统。刘林、阎贵平等在对京沪高速铁路及沿线区域地震危险性调查的基础上,对铁路地震预警系统的构成、监测设备的设置方案以及报警模式等关键问题进行了研究,给出了机械式地震仪的预警水平,并提出了适用于 P 波检测的 $M-R$ 判别标准^[59,62];中国广东大亚湾核电站在 1994 年建立了用于地震报警的地震仪表系统^[60];辽宁省地

震局利用数字化观测技术、GIS 技术等高新技术,为中国石油天然气股份有限公司大连分公司建立了大型石化企业地震预警系统,该系统与地震应急系统相连,于 2001 年 10 月投入试运行^[61-62]。2009 年 6 月由金星研究员主持的“地震预警与烈度速报系统的研究与示范应用”项目通过可行性论证,标志着我国地震预警进入以实用化为目的大范围实验阶段。

自 1961 年初首次在新丰江大坝上获得地震动速度记录,我国作为地震预警研究基础的强震动观测已有近 50 年的历史。从 1962 年 3 月新丰江水库地震后创建我国强震动观测台网的第一个台站,到 2008 年强震动台网中心正式成立(挂靠在中国地震局工程力学研究所信息技术与材料研究室),再到目前的近 2 000 个自由场台站、超过 50 个结构台阵、1 个国家台网中心、3 个区域台网中心。通过“十五”、“十一五”期间的地震台网建设,我国的数字观测台网更加密集,覆盖面更广,几乎所有省地震局都开展了强震动观测,仅汶川地震就获得了近 3 万条观测记录。这些设备为地震预警提供了良好的硬件基础^[65]。

由于地震预警的过程相当复杂,强震动数据的实时处理与地震三要素的快速确定、地震动场的生成、基于地震动参数的震害快速评估、应急决策与自动控制、地震预警系统的集成等科学和技术问题仍需进一步研究解决^[66]。同时,由于我国国土面积大,台站数量仍相对较少(2 台/万平方公里),90% 国土面积存在较大监测空白区,地震动数据获取能力低;我国结构台阵数量有限,对大多数种类工程结构缺乏监测,缺乏液化台阵、土-结相互作用台阵等,地震动观测对象仍不够丰富;由于观测数据回收不及时,处理时间长,多数地区台网不满足地震预警和烈度速报要求,直接服务于行业中心工作的范围有限;由于有价值记录积累有限,尚不能满足日常工作 and 科研需要,社会影响和科学贡献待提高。此外,地震预警能否真正实施,与公众的地震知识普及程度有很大关系^[67]。总之,我国的地震预警才刚刚起步。

4 远景、误解和挑战

最近五年里,世界各地的 EEW 系统方法和应用研究得到迅速发展。早在 2003 年之前,关于 EEW 的稿件数量每年为 0 至 2 篇之间;之后这个数字一直在稳步增加,到 2008 年每年都超过了 15 篇。这表明地震学和工程学界对 EEW 表现出越来越大

的兴趣,但同时也导致 EEW 系统应用出现了一些复杂性。

EEW 的实施已经取得了重大进展。10 年前能够使用 EEW 系统提供预警的只有在日本铁路系统使用的 UrEDAS 和墨西哥城的使用 SAS 预警系统。今天日本已经在全国范围内使用 EEW 系统^[31],墨西哥的预警服务范围也得到了进一步扩大^[42];中国台湾、伊斯坦布尔和布加勒斯特具有了向一个或者多个用户提供预警服务的能力^[4,12,58]。EEW 系统正在意大利、瑞士、中国、夏威夷、加利福尼亚等各类地震台网中进行实时试验。在加州,实时测试已经证明了强地面震动之前灾害信息是可以提前预测的^[11,18,28]。

2005 年第一届关于早期地震预警的国际研讨会在加州理工学院举行,会议的重点讨论的议题是发展 EEW 系统是否科学可行。2009 年 4 月第二次国际研讨会在日本京都大学举行,会议上人们认为发展 EEW 系统是可行的。EEW 合乎科学,技术上可以实现,不仅可以用波前探测方法为墨西哥城提供预警,也可以为距离震中非常近的人群集中区提供预警服务,像日本陆上发生的地震。现在的问题是:这些信息有多大使用价值,应如何应用?

对 EEW 系统的一个常见的误解是预警很可能会引起慌乱。社会学家在通过长期研究这些问题后发现并不像许多地震学家所想的那样,即预警会引起慌乱^[68]。日本和墨西哥的经验发现没引发恐慌,也没有造成交通意外和公开践踏事件。EEW 实施过程确实需要进行广泛的公众教育活动,如在日本进行的那样^[31]。在墨西哥和台湾缺乏必要的教育经费是需要重视的问题^[12,42-43]。

EEW 实施过程中人们普遍关心的另一个问题是,该系统每十年仅使用一次甚至更少。1992 年日本铁路沿线安装了 UrEDAS 系统,但直到 2004 年才成功地进行过一次启动自动刹车的应急响应^[37]。没有任何理由解释为什么不能提供更小地震或更多地震的预警服务,这些预警信息仍然能够为一些用户提供有价值的信息,也为 EEW 系统提供测试的机会。以适当的方式使用警报信息可以提醒人们注意地震灾害,增加一次学习教育的机会,使防震减灾意识得到普遍加强。

EEW 系统完善所面临的最重要的科学挑战是如何实时获取和描述地震有限破裂过程图像。目前的 EEW 系统的运行都是基于震源的有限破裂做出分析和判断的。已有大量学术文章涉及对利用 P

波参数估计大震($M > 7$)会出现震级饱和问题的讨论^[9,20,29,32-35]。大震震级估计的不确定性可能不是导致地震震动预测不确定性的主要来源。对于中强地震,很显然不确定性最大来源在于地面运动预测方程的不确定性,而不在于由 EEW 系统快速得到的地震大小和位置^[9,49]。对于大地震来讲,即使具有精确的地震震级大小的估计,断层破裂的方向和破裂尺度对强地面运动具有很大的影响。EEW 系统仍然需要进一步完善,根据有限源探测方法提高探测的精确性和预警时间^[69-70]。利用地震学方法来实时探测地震运动有限破裂源的特征研究正在进行中^[30,36,71]。实时大地测量可以准确地提供厘米级水平变化数据,这对大地震事件的测量可提供约束条件^[50]。同时使用地震和大地测量数据,结合它们互补的约束条件,结合断层模型和破裂物理学进行研究的工作还有很多。

EEW 系统的应用都是针对重大破坏性地震的。在地震多发地区面临的挑战是要在大地震发生之前安装这样的系统而不是在发生地震之后才建立一个系统。为此,在尚未经历大地震的社区扩大 EEW 的服务和教育范围是很有必要的,在这方面有很多成功的范例。在意大利,ISNet 已经安装完毕,目前正在针对一个潜在的地震危险区进行 EEW 系统测试。在加州,正在制定一部有关在一条新的高速铁路附近部署 EEW 系统规章,这可能是加州和美国实施公共预警战略迈出的第一步。

[参考文献]

- [1] Espinosa-Aranda J M, A Jimenez, G Ibarrola, et al. Mexico City Seismic Alert System[J]. *Seismological Research Letters*, 1995, 66: 42-52.
- [2] Allen R M, P Gasparini, O Kamigaichi, et al. The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80 (5): 682-693.
- [3] Böse M, C Ionescu, F Wenzel. Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revisited scaling relations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L07302.
- [4] Alcik H, O Ozel, N Apaydin, et al. A study on warning algorithms for Istanbul earthquake early warning system[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B05, doi: 10. 1029/2008GL036659.
- [5] Allen R M, H Kanamori. The potential for earthquake early warning in southern California[J]. *Science*, 2003, 300: 786-789.
- [6] Lockman A, R M Allen. Magnitude-period scaling relations for Japan and the Pacific Northwest: Implications for earthquake early warning[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97: 140-150.
- [7] Tsang L, R M Allen, G Wurman. Magnitude scaling relations from P waves in southern California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L19304.
- [8] Wurman G, R M Allen, P Lombard. Toward earthquake early warning in northern California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: B08311, doi: 10. 1029/2006JB004830.
- [9] Brown H, R M Allen, V F Grasso. Testing ElarmS in Japan[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80 (5): 727-739.
- [10] Wolfe C J. On the properties of predominant period estimators for earthquake early warning[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96: 1961-1965.
- [11] Allen R M, H Brown, M Hellweg, et al. Real-time earthquake detection and hazard assessment by ElarmS across California[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B08, doi: 10. 1029/2008GL036766.
- [12] Hsiao N-C, Y-M Wu, T-C Shin, et al. Development of earthquake early warning system in Taiwan[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B02.
- [13] Fleming K, M Picozzi, C Milkereit, et al. The Self-organizing Seismic Early Warning Information Network (SO-SEWIN) [J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80 (5): 755-771.
- [14] Kanamori H. Real-time seismology and earthquake damage mitigation[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33: 195-214.
- [15] Wu Y-M, H Kanamori. Experiment on an onsite early warning method for the Taiwan early warning system[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95: 347-353.
- [16] Wu Y-M, H Kanamori, R M Allen, et al. Experiment using the tau-c and Pd method for earthquake early warning in southern California[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 170: 711-717.
- [17] Shieh J T, Y-M Wu, R M Allen. A comparison of tau-c and tau-p-max for magnitude estimation in earthquake early warning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L20301.
- [18] Böse M, E Hauksson, K Solanki, et al. Real-time testing of the on-site warning algorithm in southern California and its performance during the July 29, 2008 M_w 5. 4 Chino Hills earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B03, doi: 10. 1029/2008GL036366.
- [19] Wu Y-M, H Kanamori. Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the beginning of P waves[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95: 1181-1185.
- [20] Zollo A, M Lancieri, S Nielsen. Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L23312.
- [21] Wu Y-M, H Kanamori. Development of an earthquake early warning system using real-time strong motion signals[J].

- Sensors, 2008, 8; 1-9.
- [22] Lancieri M, A Zollo. A Bayesian approach to the realtime estimation of magnitude from the early P and S wave displacement peaks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B12302, doi:10.1029/2007JB005386.
- [23] Kamigaichi O. JMA earthquake early warning[J]. *Journal of the Japan Association for Earthquake Engineering*, 2004, 4: 134-137.
- [24] Odaka T, K Ashiya, S Tsukada, et al. 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: 526-532.
- [25] Cua G, T Heaton. The Virtual Seismologist (VS) method; A Bayesian approach to earthquake early warning [A] // P Gasparini, G Manfredi, J Zschau, edit. *Earthquake Early Warning Systems*[G]. Berlin and Heidelberg; Springer, 2007; 97-132.
- [26] Böse M, F Wenzel, M Erdik. PreSEIS; A neural network-based approach to earthquake early warning for finite faults [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98: 366-382.
- [27] Köhler N, G Cua, F Wenzel, et al. Rapid source parameter estimations of southern California earthquakes using PreSEIS [J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 748-754.
- [28] Cua G, M Fischer, T Heaton, et al. Real-time performance of the Virtual Seismologist earthquake early warning algorithm in southern California[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 740-747.
- [29] Murphy S, S Nielsen. Estimating earthquake magnitude with early arrivals: A test using dynamic and kinematic models [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99: 1-23.
- [30] Zollo A, G Iannaccone, M Lancieri, et al. Earthquake early warning system in southern Italy: Methodologies and performance evaluation [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B07.
- [31] Kamigaichi O, M Saito, K Doi, et al. Earthquake early warning in Japan; Warning the general public and future prospects[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80 (5): 717-726.
- [32] Olson E, R M Allen. The deterministic nature of earthquake rupture[J]. *Nature*, 2005, 438: 212-215.
- [33] Lewis M A, Y Ben-Zion. Examination of scaling between earthquake magnitude and proposed early signals in P waveforms from very near source stations in a South African gold mine [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: B09305.
- [34] Rydelek P, S Horiuchi. Is earthquake rupture deterministic? [J]. *Nature*, 2006, 442; 5-6.
- [35] Yamada T, S Ide. Limitation of the predominant-period estimator for earthquake early warning and the initial rupture of earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98: 2739-2745.
- [36] Yamada M, T Heaton, J Beck. Real-time estimation of fault rupture extent using near-source versus far-source classification[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97: 1890-1910.
- [37] Nakamura Y, J Saita. UrEDAS, the earthquake warning system; Today and tomorrow [A] // P Gasparini, G Manfredi, J Zschau, edit. *Earthquake Early Warning Systems*[G]. Berlin and Heidelberg; Springer, 2007; 249-282.
- [38] Nakamura Y. Real-time information systems for hazards mitigation [A] // *Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*[G]. 1996; 2134.
- [39] Nakamura Y, J Saita. FREQL and AcCo for a quick response to earthquakes [A] // P Gasparini, G Manfredi, J Zschau, edit. *Earthquake Early Warning Systems*[G]. Berlin and Heidelberg; Springer, 2007; 307-324.
- [40] Wu Y-M, H Kanamori. Exploring the feasibility of onsite earthquake early warning using close-in records of the 2007 Noto Hanto earthquake[J]. *Earth, Planets, and Space*, 2008, 60: 155-160.
- [41] Böse M, E Hauksson, K Solanki, et al. A new trigger criterion for improved real-time performance of on-site early warning in southern California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, 99: 897-905.
- [42] Espinosa-Aranda J M, A Cuellar, A Garcia, et al. Evolution of the Mexican Seismic Alert System (SASMEX)[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 694-706.
- [43] Suárez G, D Novelo, E Mansilla. Performance evaluation of the seismic alert system (SAS) in Mexico City: A seismological and a social perspective[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 707-714.
- [44] Hoshiba M, O Kamigaichi, M Saito, et al. Earthquake early warning starts nationwide in Japan[J]. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2008, 89: 73-80.
- [45] Nakamura H, S Horiuchi, C Wu, et al. Evaluation of the real-time earthquake information system in Japan[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B01.
- [46] Horiuchi S, H Negishi, K Abe, et al. An automatic processing system for broadcasting earthquake alarms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95: 708-718.
- [47] Weber E, G Iannaccone, A Zollo, et al. Development and testing of an advanced monitoring infrastructure (ISNET) for seismic early warning applications in the Campania region of southern Italy [A] // P Gasparini, G Manfredi, J Zschau, edit. *Earthquake Early Warning Systems*[G]. Berlin and Heidelberg; Springer, 2007; 325-341.
- [48] Satriano C, A Lomax, A Zollo. Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98: 1482-1494.
- [49] Iervolino I, M Giorgio, C Galasso, et al. Uncertainty in early warning predictions of engineering ground motion parameters: What really matters? [J]. *Geophysical Research Letters*

- ters, 2009, 36: L00B06.
- [50] Crowell B W, Y Bock, M B Squibb. Demonstration of earthquake early warning using total displacement waveforms from real-time GPS networks[J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(5): 772-782.
- [51] Bock Y, R Nikolaidis, P J De Jonge, et al. Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 28233-28253.
- [52] Goltz J D, P J Flores. Real-time earthquake early warning and public policy: A report on Mexico City's Sistema de Alerta Sísmica[J]. *Seismological Research Letters*, 1997, 68: 727-733.
- [53] Okada Y, K Kasahara, S Hori, et al. Recent progress of seismic observation networks in Japan-Hi-net, F-net, K-NET, KiK-net[J]. *Earth, Planets, and Space*, 2004, 56: xv-xxviii.
- [54] Horiuchi S, Y Horiuchi, S Yamamoto, et al. Home seismometer for earthquake early warning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L00B04.
- [55] Erdik M, Y Fahjan, O Ozel, et al. Istanbul earthquake rapid response and early warning system[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2003, 1: 157-163.
- [56] Wu Y-M, T-L Teng. A virtual subnetwork approach to earthquake early warning[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92: 2008-2018.
- [57] Wenzel F, M Onescu, M Baur, et al. An early warning system for Bucharest[J]. *Seismological Research Letters*, 1999, 70: 161-169.
- [58] Ionescu C, M Böse, F Wenzel, et al. An early warning system for deep Vrancea (Romania) earthquakes[A]// P Gasparini, G Manfredi, J Zschau, edit. *Earthquake Early Warning Systems*[G]. Berlin and Heidelberg: Springer, 2007: 343-349.
- [59] 刘林, 阎贵平, 辛学忠. 京沪高速铁路地震预警系统的方案及关键参数研究[J]. *中国安全科学学报*, 2002, 12(4): 75-79.
- [60] 廖旭, 黄河. 企业地震预警系统应用研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(6): 142-149.
- [61] 张晓东, 张国民. 关于地震预警的思考[J]. *国际地震动态*, 2004, (6): 42-46.
- [62] 袁志祥, 单修政, 徐世芳, 等. 地震预警技术综述[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(6): 216-224.
- [63] 李山有, 武东坡, 金星, 等. 地震信号瞬时参数实时计算方法[J]. *地震工程与工程振动*, 2004, 24(5): 13-16.
- [64] 张延年, 刘丽, 刘明, 等. 基于地震预警的台阵布局优化[J]. *沈阳建筑大学学报*, 2009, 25(1): 1-25.
- [65] 周彦文, 刘希强, 胡旭辉, 等. 早期地震预警方法研究现状及展望[J]. *国际地震动态*, 2008, (4): 28-34.
- [66] 李山有, 金星, 马强, 等. 地震预警系统与智能应急控制系统研究[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(4): 21-26.
- [67] 杨马陵, 沈繁奎, 陈大庆, 等. 基于互联网的地震预警问题的社会调查与分析[J]. *灾害学*, 2009, 24(3): 33-38.
- [68] Quarantelli H. *The Condition of Panic*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1956.
- [69] Heaton T H. A model for a seismic computerized alert network[J]. *Science*, 1985, 228: 987-990.
- [70] Allen R M. Probabilistic warning times for earthquake ground shaking in the San Francisco Bay Area[J]. *Seismological Research Letters*, 2006, 77: 371-376.
- [71] Yamada M, T Heaton. Real-time estimation of fault rupture extent using envelopes of acceleration[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98: 607-619.