李拴虎,陈立峰,姚远,等.现代地震预警系统中的时间延迟效应分析[J].地震工程学报,2017,39(4):0790-0796.doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2017.04.0790

LI Shuan-hu, CHEN Li-feng, YAO Yuan, et al. Analysis of the Time Delay Effect in Modern Earthquake Early Warning Systems[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(4):0790-0796. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0790

现代地震预警系统中的时间延迟效应分析。

李拴虎1,陈立峰1,姚 远2,韩晓明1,杨红樱1

(1. 内蒙古自治区地震局,内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 地震预警系统(EEW)中时间延迟制约着地震预警的时效性,缩短地震预警延迟时间能显著 提高地震预报效能和应急反应能力。通过分析地震预警系统的延迟因素,分解从地震发生到预警 信息发布过程的各个环节,计算出每个环节的时间延迟值,并对原地、异地和混合地震预警模式的 地震预警水平、预警盲区半径进行对比,分析三种地震预警模式的时间延迟效应。结果显示,预警 系统的时间延迟主要包含数据传输和数据处理两方面,实验室理论最少延迟时间为 $\Delta t = 3.9$ s; 主 流预警系统平均延迟时间为 $\Delta t = 14.3$ s;最先进的预警系统延迟只有 $\Delta t = 8.7$ s。时间延迟同样影 响着浅源地震(0~60 km)的预警盲区半径,二者呈正相关性,当 $\Delta t = 8.7$ s 时,盲区半径最高达 52.2 km; 当 $\Delta t = 3.9$ s 时,盲区半径最大只有23.4 km。分析认为,有效缩短地震预警系统中的延 迟时间,不仅能提高地震预警的时效性,同时能降低预警的盲区范围,对整个监测预报、预警和防灾 减灾事业也有积极的推动作用。

关键词:预警系统;时间延迟;时效性;预警盲区 中图分类号:P315 文献标志码:A 文章编号:1000-0844(2017)04-0790-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0790

Analysis of the Time Delay Effect in Modern Earthquake Early Warning Systems

LI Shuan-hu¹, CHEN Li-feng¹, YAO Yuan², HAN Xiao-ming¹, YANG Hong-ying¹ (1.Earthquake Agency of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2.Earthquake Agency of Xingjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xingjiang, China)

Abstract: The problem of time delay in earthquake early warning (EEW) systems restricts their effectiveness. Shortening the delay time can significantly improve the efficiency and emergency response ability of EEWs. In this study, we analyze the delay factors, decompose the period from earthquake occurrence to the warning information release to many links, then calculate the specific delay time in each link. We then compare the warning level and radius of warning blind area in autochthonous, allochthonous, and mixed EEW models, and analyze each model's delaying effect. The results show that the time delay in EEWs mainly comprises delay in data transition and pro-

通信作者:陈立峰(1984-),男,硕士,主要从事地震地质方面研究。E-mail:lfchen@zju.edu.cn。

① 收稿日期:2016-04-26

基金项目:2016年內蒙古自治区科技厅重大专项(强震短临跟踪和空地立体观测技术集成创新);中国地震局监测、预测、科研三结合 课题(160506)

作者简介:李拴虎(1985-),男,硕士,助理工程师,主要从事 GPS、InSAR 方面的研究工作。E-mail:lizhengke06@126.com。

cessing; with a minimum theoretical delay time of $\Delta t = 3.9$ s, an average delay time of $\Delta t = 14.3$ s in the mainstream EEW, and $\Delta t = 8.7$ s in the most advanced EEW. Moreover, the time delay exerts influence on the radius of the blind area in a shallow earthquake and a positive relationship can be witnessed. For example, when $\Delta t = 8.7$ s, the blind area radius is 52.2 km and when $\Delta t =$ 3.9 s, the largest blind area radius is only 23.4 km. The results indicate that effective shortening of delay time can not only improve the timeliness of earthquake early warnings, but also reduce the blind area.

Key words: early warning system; time delay; timeliness; early warning blind area

0 引言

地震早期预警(EEW)系统可以在抗震减灾中 发挥重要作用,填补建筑设计中长期抗震问题的空 白,促进中短期地震预报效能的发展,提高强震情况 下的快速反应能力^[14]。在过去的二十年中,计算方 法的改进、地震网络的密集布设和通讯方式的快速 发展使 EEW 的应用有了很强的时效性,并随着近 年来地震预警次数的不断增加,EEW 将会具有更加 广泛的潜在发展前景。

EEW 大致可以分为三类:单点地震预警、多点 地震预警和预判地震预警。单点预警方法是当某个 站点的实时监测波形参数超过一定阈值时,现场将 及时发出报警[5-7]。多点预警方法是通过多台地震 检波器记录到的地震来联合确定震中的位置,然后 用最初几秒的波形数据来推断地震的振幅和台站的 地面运动特征[8-11]。预判预警方法是一种特殊的多 点预警方法,对特定区域内的地震活动(敏感地区) 进行快速预警,其只对震级大小进行初步判定[12-13]。 由于不能假定地震总会出现在预判的区域,因此目 前地震预警方法使用较多和技术较成熟的是单点预 警[14],更普遍的是依靠高密度的测震网络使用单点 和多点预警方法联合向震区群众发布信息[15-16]。 EEW 系统已经在日本、中国(包括台湾地区)、墨西 哥和土耳其等国家中应用,其他区域如美国西海岸、 南意大利或瑞士则处于 EEW 算法研究的新阶 段[17]。这些算法常被用来测量地震发生与发布预 警之间的时间延迟,还有关于震源参数估计和地面 运动预测的准确性。在预警速度和准确性之间有一 个内在的平衡点,单点算法通常更快,但往往精度较 低;多点定位很慢,但精度较高。多位学者对不同地 震预警算法的延迟时间做了相关分析,如 Bröwn^[18] 和 Kuyuk^[19]根据加利福尼亚的地震预警系统(ElarmS)讨论了预警延迟时间,包括数据采集和数据处 理耗时;Bose^[20]分析了南加利福尼亚单点预警算法 的延迟时间;Satriano^[11]对意大利南部的伊尔皮尼

亚地震台网进行了类似的延迟效应研究,但这些研 究都是用真实的地震来评估各自算法的效能,仅限 于地震发生在测试过算法的区域。Kuyuk等^[21]利 用一个固定区域或断裂带的假想震源来研究预警时 间,得到了数据传输和处理延迟时间的常数值。所 有 EEW 系统的设备也增加了整体的预警时间,更 重要的是时间延迟在不同的时间和测震网络中具有 波动性,如果假定延迟是固定的,则不能很好地解释 实时系统中观测到的预警时间。在 EEW 系统中, 速度是关键的主导因子,分析 EEW 系统中各个环 节对总延迟时间的贡献率,确定预警体系中最薄弱 的环节,这对预警体系的改进至关重要。

本文重点对多点预警系统的时间延迟进行详细 分析,研究成果不仅可以对比在相同的测震网络内 使用不同的算法得到的不同延迟时间,进而优化现 有的多点 EEW 算法,同时对单点 EEW 算法也有参 考价值。

1 地震预警延迟理论

地震 P 波的传播速度快于 S 波,而电磁波的传 播速度(3×10⁵ km/s)远大于地震波(5~ 10 km/s)。地震预警技术就是利用 P 波和 S 波的 速度差、电磁波和地震波的速度差,在地震发生后而 破坏性地震波尚未到达的数秒至数十秒之前发出预 警,从而采取相应措施,以避免重大的人员伤亡和经 济损失。目前地震预警算法基本类似,主要包括:① 检测首至波;②初步判定地震源;③判定震级;④发 出预警信息。延迟参数分布在整个预警系统中的各 个环节(表1和图1)。

大多数运行的 EEW 系统是根据震级、震中和 距离参数来发布预警信息的,本文在此基础上优化 了预警系统的延迟算法,使其具有普适性。地震发 生和第一次预警发送之间的时间可以拆分如下:

 $\Delta t_{\text{origin}} = \max(\Delta t_{\text{P-wave}} + \Delta t_{\text{trigger}}) + \Delta t_{\text{epicentre}}$ (1)

表 1 典型 EEW 系统预警时间延迟参数说明

able i Description of time delay parameter in typical ELW	ic i Description of th	ne uciay	parameter		. cypicai	LL II System	
---	------------------------	----------	-----------	--	-----------	--------------	--

延迟参数	详细说明	相关性性因素
$\Delta t_{ m alart}$	发震与第一次预警发布之间的时间差(预警发布延迟)	$\Delta t_{ ext{P-wave}}$, $\Delta t_{ ext{trigger}}$, $\Delta t_{ ext{waveform}}$, $\Delta t_{ ext{epicentre}}$, $\Delta t_{ ext{magnitude}}$, $\Delta t_{ ext{disseminate}}$
$\Delta t_{ m origin}$	发震与第一次震源判定之间的时间差(发震判定延迟)	Δt P-wave , Δt trigger , Δt epicentre
$\Delta t_{ m P-wave}$	P 波初次传播到第 n 个台站所用的时间	台站几何布局和震中位置
Δt trigger	仪器触发延迟时间	Δt _{picker}
$\Delta t_{ m latency}$	数据在台站内传输过程使用的时间	$\Delta t_{ m latency} = \Delta t_{ m datalogger} + \Delta t_{ m trans} + \Delta t_{ m receiver}$
Δt datalogger	测震台站的数据采集器处理和打包数据所用时间	数据采集设备类型、配置或采样率
$\Delta t_{ m trans}$	台站记录到的数据传输到数据处理中心所需时间	通信设备,采样率
Δt receiver	数据中心接收传来的数据所需时间	接收数据软件
Δt _{picker}	地震预警软件自动采集数据的延迟时间	EEW 软件
Δt epicentre	地震预警软件判定发震所需时间	EEW 软件
Δt waveform	波形整合时间(判定震级所需波形数据整合时间)	$\Delta t_{ m waveform} = \Delta t_{ m latency} + \Delta t_{ m win} + \Delta t_{ m preprocess}$
Δt win	地震预警软件波形窗口中的显示延迟	EEW 软件
Δt preprocess	地震预警软件波形数据预处理时间	EEW 软件
Δt magnitude	地震预警软件确定震级所需要的时间	EEW 软件
$\Delta t_{ m disseminate}$	发布预警信息所需要时间	信息发布手段,接收者通讯设备





Fig.1 Schematic diagram of EEW delay time

 $\Delta t_{\text{alart}} = \max \left[\min(\Delta t_{\text{P-wave}} + \Delta t_{\text{waveform}}), \Delta t_{\text{origin}} \right] + \Delta t_{\text{magnitude}} + \Delta t_{\text{disseminate}}$ (2)

式中: Δt_{origin} 为发震与第一次震源判定之间的时间 差(发震判定延迟); $\Delta t_{\text{P-wave}}$ 为发震时P波从震中传 播到可定位地震所要求的最低数目台站的时间; $\Delta t_{\text{trigger}}$ 为仪器装置触发所需时间(发现 P 波所用时 间); $\Delta t_{\text{epicentre}}$ 为判定发震所需时间。不同的测震台 站有不同的硬件、数据采集器或遥测装置,因此离震 中最近的台站不一定能最早得到判定结果。 Δt_{alart} 为发震与第一次预警发布之间的时间差(预警发布 延迟);min($\Delta t_{\text{P-wave}}$ + $\Delta t_{\text{waveform}}$)为震级判定所用的最 少时间; $\Delta t_{\text{P-wave}}$ 为发震时 P 波从震中传播到可判定 地震震级所要求的最低数目台站的时间; Δt waveform为 波形整合延迟时间(判定震级所需波形数据整合时间); Δt magnitude为确定震级所需要的时间; Δt disseminate 为 发布预警信息所需要时间。

2 地震预警系统时间延迟分析

由于震级的大小可以根据一个台站的波形资料 来确定,当只有一个波形资料可用时,min(Δt_{P-wave} + $\Delta t_{waveform}$)通常要小于 Δt_{origin} 的延迟值,在地震网络 密集的区域, Δt_{origin} 则小于 min(Δt_{P-wave} + $\Delta t_{waveform}$) 的延迟值。 $\Delta t_{latency}$ 主要受数据采集器/传感器的配 置和采样率、数据传输转换和接收过程的控制

793

($\Delta t_{datalogger}$, Δt_{rrans} , $\Delta t_{receiver}$)。国内目前没有相关传感 器和数据传输方面延迟的精细研究,只有粗略的延 迟估算时间,而不同的传感器导致的延迟时间是有 很大差异的。加州大学伯克利分校地震实验室研究 显示,一般数据采集器采集数据约有5s的平均延 迟时间。Kuyuk等^[22]通过优化地震台站的数据采 集器,使数据采集器的平均延迟时间降低了3s,意 味着其在整个预警系统中争取到了额外的3s预警 时间,因此数据采集器的优化是减少预警延时的必 要措施。 $\Delta t_{trigger}$ 不仅延迟了震中位置的估算时间(研 究认为延迟时间为0.5~2.5s),更重要的是其延迟 引入到了定位的误差计算中,往往使P波的传播时 间变长,直接导致震中的定位相对偏远^[23],因此优 化 $\Delta t_{trigger}$ 不仅能减少预警延迟,还可以提高预警的 精度。Rosenberger^[24]研究认为 $\Delta t_{evicentre}$ 的延迟时 间与地震台站的布局密度有很大关系,统计 289 个 地震事件显示, $\Delta t_{epicentre}$ 的延迟时间最短为 0.7 s,最 长为 3.7 s,其中 84%的事件的延迟 <1.0 s。Yannik Behr^[25]使用 SC3 模型研究得到 $\Delta t_{magnitude}$ 的延迟值 为 1.1 s,但认为计算实际速度要大于模型给出的速 度,最后根据实际经验给出的延迟为 0.7 s。

表 2 显示了当今主要预警系统存在的预警延迟。其中数据传输延迟包括数据传输过程的延迟,即数据接收、数据转化、数据打包和数据传送等过程 所用的时间;软件处理延迟主要包括 EEW 软件接收数据、转换数据、计算数据等过程的耗时。这说明 在一个相对完整的 EEW 系统中存在约 4.0~16.3 s 的预警延迟,从目前全球布设的预警系统来看至少 也存在约 10.7 s 的预警延迟,对于预警时间缩短还 有 6 s 的潜在时间。

表 2 地震	【预警	系统中	啡的时Ⅰ	间延迟	值
--------	-----	-----	------	-----	---

Table 2	Time delay	in	earthquake ear	rly	warning	(EEW)	system
---------	------------	----	----------------	-----	---------	-------	--------

延迟分类	延迟参数	取值范围	经验取值/s
	Δt 电磁波	L 震中距 / v 电磁波	2.0
数据传输延迟	${\it \Delta}t_{ m datalogger}$; ${\it \Delta}t_{ m trans}$; ${\it \Delta}t_{ m receiver}$	$2.0\!\sim\!7.0~{\rm s}$	5.0
	Δt trigger	$0.5 \sim 2.5 \ s$	2.0
软件处理延迟	$\Delta t_{ m picker}$; $\Delta t_{ m win}$; $\Delta t_{ m preprocess}$	$0.7\!\sim\!3.7~{ m s}$	1.0
	$\Delta t_{ m magnitude}$	$0.7 \sim 1.1 \text{ s}$	0.7

3 预警模式延迟效应分析

3.1 预警模式分类

目前地震预警模式主要有三类:第一类是以地 震发生地附近(相对远离地震预警对象位置)的地震 信息为基础的异地预警;第二类是以地震预警对象 所在地附近的地震信息为基础的原地预警模式;第 三类是混合预警模式,也就是特殊的异地预警模式。 无论哪一种预警模式,均需要通过地震检波器检测 到的地震 P 波和 S 波信息结合地震波的传播理论 来发出地震预警。

异地预警模式基于潜源区密集的强震监测台 网,利用电磁波速远大于地震波速的原理为预警目 标区域提供预警警报。理想状态下,异地预警模式 下监测台站足够密集,有一台站位于震中,这样就 可以在地震发生后的 $h/v_{\rm P}$ s时触发计算并向预警 区域传递电磁信号,而S波到达数据处理中心的时 间为 $\sqrt{h^2 + r^2}/v_{\rm S}$ s,假设电磁信号传播与接收耗时 2 s,对地震波的计算耗时 8.7 s(根据表 2),最快可 以提供 $\sqrt{h^2 + r^2}/v_{\rm S} - (h/v_{\rm P} + 10.7)$ s的预警 时间。

原地预警模式,利用 P 波传播速度快于 S 波的 原理,地震检波器和预警系统处在同一位置,不需要 电磁波传播信号这一环节。地震发生后 $\sqrt{h^2 + r^2}/v_{\rm P}$ 秒触发计算,S 波到时为地震发生后 $\sqrt{h^2 + r^2}/v_{\rm S}$ s,对地震波的计算耗时 8.7 s,可提供的预警时间为 $\sqrt{h^2 + r^2}/v_{\rm S} - (h/v_{\rm P} + 8.7)$ s。

设定参数 $h=20 \text{ km}(震源深度), v_P=6 \text{ km/s}, v_S=3 \text{ km/s}, t_0=8.7 \text{ s}(数据处理延迟时间), t_1=2 \text{ s}$ (电磁波传输时间),可以计算出两种预警模式有效预警时间随震中距的变化情况(图 2,图 3)。

异地预警模式和原地预警模式的预警时间对比 表明,异地预警模式具有更优越的预警能力。在震 源深度为 20 km 时,异地预警模式的盲区半径约 37 km,原地预警模式的盲区半径约 48 km,混合模 式的盲区半径约为 37~61 km。如果一个已知震源 深度 20 km 的断层发生了地震,那么使用异地预警 模式在理论上可以对 37 km 以外的地区提供有效 预警信息,而原地预警模式只能对 48 km 以外的地 区提供有效预替信息,异地模式相比原地模式在理 论上可以提供更多的有效预警时间。本文分析的异 地预警模式是针对检测 S 波的模式,如果异地预警 模式采用 P 波信息和 S 波信息相结合的模式将有 可能提供更多的有效预警时间。

在不同的震源深度范围内两种预警模式的地震

预警盲区也不尽相同,震源深度和盲区半径存在一种非线性的关系,二者的大小关系随着震源深度的 不同而变化。图3分析了两种预警模式的盲区半径 随震源深度变化关系。









在浅源地震(0~60 km)情况下原地预警模式 和异地预警模式均比较复杂。异地预警模式的盲 区半径在16.0~38 km,盲区半径随震源深度的增 加呈现先上升后下降的趋势;原地预警模式的盲区 半径在0~52.2 km,盲区半径随震源深度的增加 而下降,且在震源深度≥52.2 km 时将不存在预警 盲区;在震源深度为40.2 km 时,异地预警模式和 原地预警模式的盲区半径同为33.3 km;在震源深 度为0~40.2 km 时,异地震源模式的预警盲区半 径相对较小,在震源深度 40.2~60 km 范围内,原 地震源模式的预警盲区半径相对较小。

从三种预警模式的原理可以知道,在时效性方面,异地预警模式最优,原地预警模式和混合预警模 式各有优劣,随着震源深度和震中距的不同而相互 超越,总的来说,在震中距相对较远时,混合预警模 式优于原地预警模式。在可能发生较大破坏性地震 的已知断层区域,建设异地地震预警模式需要密集 的台阵,以便更早地检测地震信息,提早对预警对象 提供预警信息;在台站极度缺乏的地区,只在预警中 心建设一个台站的原地预警模式同样也能基本满足 预警要求;在绝大多数情况下使用的是混合预警模 式,主要针对地震台站相对均匀地布设在行政区内 的幅员辽阔地区,这样在不需要大量建设台站的同 时可保证一定的预警时效性。

在经济方面,异地预警系统需要比原地预警系 统多出数倍到数十倍的经济投入,混合系统的经济 投入介于二者之间,所以给出一个地震预警系统类 型的选择标准就显得非常必要。根据实际情况将标 准分类如下:(1)重点断裂带、人员密集的地震易发 区域应以时效性为主,建议采用异地预警模式;(2) 远离断裂带且人烟稀少的地区,原地预警模式即可; (3)距离地震带有一定距离、人员相对密集的区域, 一般采用混合预警模式。

3.2 预警时间延迟效应

地震预警系统的时间延迟直接影响地震预警模式的时效性和盲区的半径范围(表 3)。在当前预警系统中,最先进的系统延迟时间为 8.7 s,一般的预 警系统平均有 14.3 s 的延迟,根据系统优化和硬件 升级等措施,实验室内最短可以把延迟缩短到 3.9 s。在不同的震源深度有着不同的预警盲区半 径,原地预警模式中二者呈负相关的关系,盲区半径 随着震源深度增大而减小;异地预警模式中二者开

始呈正相关,相关曲线达到顶点后又呈负相关。无 论哪种预警模式,缩短预警系统的延迟时间将能直

表 3 时间延迟和震源深度对预警盲区的影响

Table 3	Influence of	time d	elay and	focal depth	on early	warning	blind area
---------	--------------	--------	----------	-------------	----------	---------	------------

假设条件	延迟时	间值/s	异地预警模式盲区半径/km	延迟时	间值/s	原地预警模式盲区半径/km
	$T_{ m max}$	16.3	48.9	$T_{ m max}$	14.3	85.8
h = 0 km	$T_{\rm now}$	10.7	32.1	$T_{\rm now}$	08.7	52.2
	$T_{ m min}$	05.9	17.7	$T_{ m min}$	03.9	23.4
	$T_{ m max}$	16.3	55.4	$T_{ m max}$	14.3	83.4
h = 20 km	$T_{\rm now}$	10.7	37.0	$T_{\rm now}$	08.7	48.0
	$T_{ m min}$	05.9	19.1	$T_{ m min}$	03.9	12.1
	$T_{ m max}$	16.3	56.1	$T_{ m max}$	14.3	75.9
h = 40 km	$T_{\rm now}$	10.7	33.4	$T_{\rm now}$	08.7	33.5
	$T_{ m min}$	05.9	00.0	$T_{ m min}$	03.9	00.0
	$T_{ m max}$	16.3	51.2	$T_{ m max}$	14.3	61.3
h = 60 km	$T_{\rm now}$	10.7	16.0	$T_{\rm now}$	08.7	00.0
	$T_{ m min}$	05.9	00.0	$T_{ m min}$	03.9	00.0

接减少盲区半径。在浅源地震中,现代普通预警系 统异地预警模式最小盲区半径为48.9 km,原地预 警模式最小盲区半径61 km;最先进的预警系统异 地预警模式最小盲区半径为16.0 km,原地预警模 式最小盲区半径0 km;实验室理论最佳预警系统异 地预警模式最小盲区半径为0 km,原地预警模式最 小盲区半径0 km。因此有效地减小预警系统延迟 时间,不仅能提高预警的时效性,同时能有效减小预 警盲区的半径,提高预警的能效。

4 结论建议

(1) 地震预警系统注重时效性:从地震发生到 检波器接收到 P 波开始,一般只留有几十秒的时间 来发出预警,缩短预警系统的时间延迟将对地震的 防灾减灾有着关键作用。地震预警系统(EEW)的 时间延迟主要为数据传输和数据处理两个过程,数 据传输过程的优化主要通过提升数据打包速、数据 传输速度和数据接收触发速度等方法缩短时间,平 均延迟 9.5 s,理论最小延迟能达到 2.5 s;数据处理 过程优化主要通过优化软件和算法来缩短时间,平 均延迟 4.8 s,理论最小延迟能达到 1.4 s。通过对预 警系统的整体优化,目前最多能提高 10.4 s 的预警 时间,这将为防灾减灾提供宝贵的时间。

(2) 地震预警系统注重效能性:在浅源地震的 预警中,原地预警模式的盲区半径随着震源深度的 增加而减少,随着预警时间的缩短而减少,在预警延 迟为 14.3 s时,盲区半径可达 85.8 km,而延迟为 3.9 s时,盲区半径最大为 23.4 km;异地预警模式的 盲区半径随着震源深度的增加而先变大后减小,随 着预警时间的缩短而减小,在预警延迟为16.3 s 时, 盲区半径可达56.1 km,而延迟为5.9 s 时,盲区半 径最大为19.1 km。通过缩短预警时间延迟,减小 了预警的盲区半径,极大的提高了地震预警系统的 预警效能。

(3)地震预警系统注重经济性:通过对原地、异 地和混合地震预警系统地震预警经济性进行对比分 析可知,异地预警系统需要在潜在震源区布设大量 的台站,原地预警系统只需要在预警中心处布设个 别台站,所以前者需要比后者多出数倍到数十倍的 经济投入,混合模式的经济投入介于二者之间,同时 其时效性和效能性也介于二者之间。所以在保证预 警能力的条件下,要根据实际需要选择更经济合理 的预警系统模式。

参考文献(References)

- Housner G W, Bergman L A, Caughey T K, et al. Structural Control:Past, Present, and Future[J].J Eng Mech. 1997, 123
 (9):897-971.
- [2] Gerstenberger M C, Wiemer S, Jones L M, et al. Real-time Forecasts of Tomorrow's Earthquakes in California [J]. Nature, 2005, 435(7040):328-331.
- [3] Wald D J, Quitoriano V, Heaton T H, et al. TriNet "ShakeMaps": Rapid Generation of Peak Ground Motion and Intensity Maps for Earthquakes in Southern California [J]. Earthq Spectra, 1999, 15(3): 537-555.
- [4] 许川佩,梁光发,吴玉龙.一种地震预警监测传感器模块的设计 及实现[J].地震工程学报,2013,35(3):604-609.
 XU Chuan-pei,LIANG Guang-fa,WU Yu-long.Design and Realization of a Seismic Monitoring Sensor Module[J]. China Earthquake Engineering Journal,2013,35(3):604-609.(in Chinese)

- [5] Nakamura Y.On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS) [C]//Proc. Ninth World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo-Kyoto, Japan, 1988.
- [6] Kanamori H. Real-time Seismology and Earthquake Damage Mitigation[J]. Annu Rev Earth Planet Sci, 2005, 33(1): 195-214.
- [7] Bose M, Hauksson E, Solanki K, et al.Real-time Testing of the On-site Warning Algorithm in Southern California and Its Performance During the July 29 2008 M_w5.4 Chino Hills Earthquake[J].Geophys Res Lett,2009,36(3):2-6.
- [8] Allen R M, Kanamori H. The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California[J].Science, 2003, 300:786-789.
- [9] Cua G B, Heaton T H. The Virtual Seismologist (VS) Method: A Bayesian Approach to Earthquake Early Warning, in Earthquake Early Warning Systems[M].P Gasparini, G Manfredi, J Zschau, Edit. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2007: 97-130.
- [10] Cua G B, Fischer M, Heaton T H, et al. Real-time Performance of the Virtual Seismologist Earthquake Early Warning Algorithm in Southern California[J].Seismol Res Lett, 2009, 80(5):740-747.
- [11] Satriano C, Elia L, Martino C, et al. PRESTo, the Earthquake Early Warning System for Southern Ltaly: Concepts, Capabilities and Future Perspectives[J]. Soil Dyn Earthq Eng, 2011, 31(2):137-153.
- [12] Espinosa-Aranda J M, Jimenez A, et al. Mexico City Seismic Alert System[J].Seismol Res Lett, 1995, 66(6):42-53.
- [13] Mărmureanu A, Ionescu C, Cioflan C O. Advanced Realtime Acquisition of the Vrancea Earthquake Early Warning System [J].Soil Dyn Earthq Eng, 2011, 31(2):163-169.
- [14] Nakamura Y, Saita J, Sato T.On an Earthquake Early Warning System (EEW) and Its Applications[J].Soil Dyn Earthq Eng, 2011, 31(2):127-136.
- [15] Hoshiba M, Kamigaichi O, Saito M, et al. Earthquake Early Warning Starts Nationwide in Japan[J]. Eos Trans AGU,

2008,89(8):73.

- [16] Hsiao N C, Wu Y M, Zhao L, et al. A New Prototype System for Earthquake Early Warning in Taiwan[J].Soil Dyn Earthq Eng, 2011, 31(2): 201-208.
- [17] Allen R M, Gasparini P, Kamigaichi O, et al. The Status of Earthquake Early Warning Around the World: An Introductory Overview[J].Seismol Res Lett, 2009, 80(5):682-693.
- [18] Bröwn H M, Allen R M, Hellweg M, et al. Development of the ElarmS Methodology for Earthquake Early Warning: Realtime Application in California and Offline Testing in Japan [J].Soil Dyn Earthq Eng, 2011, 31(2):188-200.
- [19] Kuyuk H S, Allen R M, Brown H M, et al. Designing a Network-based Earthquake Early Warning Algorithm for California:ElarmS-2[J].Bull Seismol Soc Am, 2014, 104(1):162-173.
- [20] Bose M, Hauksson E, Solanki K, et al. A New Trigger Criterion for Improved Real-time Performance of Onsite Earthquake Early Warning in Southern California [J]. Bull Seismol Soc Am, 2009, 99(2A):897-905.
- [21] Kuyuk H S, Allen R M. Optimal Seismic Network Density for Earthquake Early Warning: A Case Study from California[J]. Seismol Res Lett, 2013, 84(6):946-954.
- [22] Kuyuk H S, Allen R M, Brown H M, et al. Designing a Network-based Earthquake Early Warning Algorithm for California:ElarmS-2[J].Bull Seismol Soc Am, 2014, 104(1):162-173.
- [23] Satriano C, Lomax A, Zollo A. Real-time Evolutionary Earthquake Location for Seismic Early Warning [J]. Bull Seismol Soc Am, 2008, 98(3):1482-1494.
- [24] Rosenberger A.Arrival-time Order Location Revisited[J].Bull Seismol Soc Am,2009,99(3):2027-2034.
- [25] Yannik Behr, John Clinton, Philipp Kästli, et al. Anatomy of an Earthquake Early Warning (EEW) Alert: Predicting Time Delays for an End-to-End EEW System[J].Seismol Res Lett, 2015,86(3):830-840.