

地震预警(报)系统及减灾效益研究

夏玉胜¹, 杨丽萍²

(1. 青海省地震局, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学技术大学地球
和空间科学系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 简要阐述了地震预警(报)系统(利用震灾区某点相对震中区地震波的走时差来进行预警)的设计原理, 并从理论上分析了其在减少人员伤亡方面的功效, 8 级左右大震其减少人员伤亡率 P 可达到 70% 以上. 进一步的分析计算还发现, 震害损失和地震预警(报)系统减少人员伤亡率 P_i 的极大值均不在高烈度区和低烈度区, 而是在中等烈度区.

关键词: 地震预报; 地震灾害; 地震预警系统; 减灾效益

中图分类号: P315.75; TU352.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2000)04-0452-06

0 前言

为了最大限度地减少破坏性地震造成的人员伤亡和灾害损失, 最根本的途径是准确地预报地震并设法减缓其能量释放速率. 但在地震预报尚未过关的今天, 在没有作出预报的情况下, 一旦发生破坏性地震, 如何想办法通过一定的措施减少灾害损失是防震减灾工作所面临的一个现实对策问题.

对于一次灾害性地震, 其破坏尺度多在数十至数百公里, 但在此破坏范围内, 地震波的袭击却是一步步进行的, 如在 $\Delta=50\text{ km}$ 处, 受地震波(S 波)袭击要比震中处滞后约 10 s. 若能将震中处或极震区接受到的大震信号迅速用电信号向其周围地区(成灾区)发出, 则一定震中距之外的人们将能获得相当宝贵的一个“时间差”——预警时间, 根据其所处的环境状态, 决择其避难方案, 如: 躲入室内坚固支撑的空间, 逃向户外, 避开建筑物等, 可避免部分人员的直接震害伤亡. 另外, 在地震次生灾害源(火、毒、气等)的“溢出”口处配以自动关切装置, 还可进一步减少次生灾害损失.

一次破坏性地震发生时, 在烈度大于 VI 度的地区都有人员伤亡的可能. 作者在进行“强震空带”现象研究^[1]时发现, 强震多发生在千百年来已建成的大型城市以外数十乃至数百公里的区域, 即震中区多不在城内, 但地震影响场却能对城市造成破坏, 如: 1985 年, 距墨西哥城 300 多公里外的海域发生的一次 8 级地震, 1 分多钟后, 地震波袭击了该城, 造成万余人的死亡损失^[2]. 当时若进行了预警设置, 则死亡的万人中的绝大部分是可以逃生的. 所以在地震预报尚未过关的今天, 研究设置地震预警(报)系统是减少地震灾害损失的一项很有现实意义的工作. 同时, 结合震害预测结果, 还可提高大震及其灾情速报的速度, 以利于抢险救灾.

收稿日期: 2000-02-28

基金项目: 青海省科委资助项目(97-S-223)

作者简介: 夏玉胜(1957—), 男(汉族), 吉林人, 副研究员. 现主要从事地震预报、综合灾害等方面的研究工作.

1 地震预警(报)系统设计

地震预警(报)系统是利用震灾区某地相对震中区地震波的走时差(预警时间)来进行预警的,即将震中区接受到的强震信息用电信号传至控制中心(时间可忽略),经过控制中心的微机处理,首先判断是否成灾,若成灾,再判断受灾区域,并向受灾区发出警告(一级警报),随着台阵接受到地震信息的台点的增多,逐渐修正和完善地震参数.依次发出二、三级警报,并利用区域地震动衰减特征,给出烈度分布图和震灾区任意点(有预警接受器处)的地震 S 波波前到达倒计时数及光显地震波波前模拟进程图,以便灾民抉择其避难方案.

该系统主要由 4 个部分组成,即:台阵、控制中心、警报器和安全自动控制附属设施.

1.1 台阵

台阵是为接受并向控制中心发射(以有线或无线的方式)地震信息而设置的若干台点,根据预警区的特点,台阵的布设可分为以下几种形式:

(1) 人口“连续”分布的大区域(如京、津、冀、晋),其潜源又是零散分布的,或者地震活动和人员分布都是随机的,这时台阵的台点可布成近似等间距的网络式(图 1a).因地震的最大成灾半径为 500 km 左右,故一个 400 km×400 km 的方阵对发生在阵内及周边的地震可有效预警(报)的空间范围近似为 1 400 km×1 400 km.

(2) 人口集中分布的孤立城市的台阵可布成围绕城市的环形(图 1b).

(3) 潜源确定后的台阵可布成围绕潜源的环形(图 1c).

以上第(2)和第(3)种情况下的台阵分布可以看作是第(1)种情况的特例,故在此只讨论第(1)种情况下的信息处理和预警问题.

1.2 控制中心

控制中心的作用是将预警台阵传来的地震信息进行判断处理,若成灾,再判断受灾地区,并向灾区发出警报.警报的发射:首先由控制系统自动强行中断本区电台和电视台的节目播放,并根据本区电台和电视的收视频率,通过电台和电视台向灾民发出已经或即将发生的灾害信息.

如图 1,假设第 J 个台点首先接受到地震初动,利用单台 P 波资料粗略估算地震参数及受灾区和理论上的烈度分布,并发出一级警报:光显震中(屏幕中心)、任一接受点所处的位置、烈度分布图、S 波波前模拟进程及到达倒计时数,并伴有简要的广播,当台点分布较密时,也可将 J 点作为地震的准震中或近似震中.

随着接受到地震信息台点的增多,总控系统不断修正地震参数(震中、震级、发震时刻、震源深度等),依次发出更准确的二级和三级警报,灾民可立即在收音机或电视机上听或看到有关的地震信息,并根据其所处的环境状态抉择其避难方案.

1.3 警报接受系统

该系统主要由有线或无线接受器、扬声器和光屏几部分组成,居民家可以直接用电视机代替,为使不同地点的用户得到各自所在处的地震波(S 波)波前到达倒计时数,可将预警区分割成若干块,每

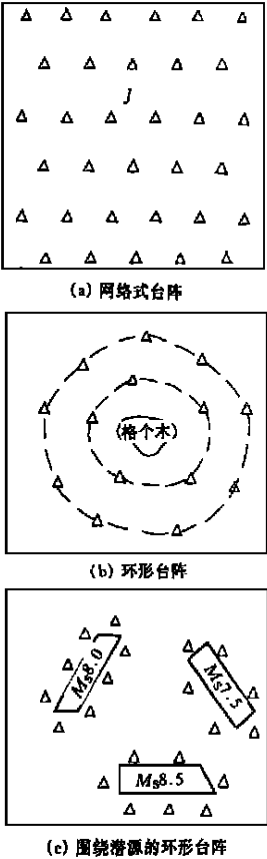


图 1 预警台阵
Fig. 1 Arrays for earthquake warning.

一块给出一平均地理坐标,控制中心通过程序控制给出该处的有关灾害信息,在屏幕上可看到震中(调在屏幕中心)、烈度大于等于 VI 度各区的理论等震线、本地所处的位置、S 波波前模拟进程图及到达的倒计时数,并伴有简明的广播,由于各家各户电视开、关的不定时,可在电源与电视机之间配备一自动开关,当地震警报信号触动时,它将自动打开电视机,并配以地理坐标调换器(经度和纬度),相当第几信号区,程序自动控制转换为适于本区的有关震害信息。

在大型公共场所、交通要道可以借助大型广告屏幕,或专门设置带有声、文、图、像的警报装置,办公楼也可以用已连网的计算机作为警报器,火车、轮船等重要交通工具上安装地震警报器,需配备地理位置自动定位系统,较固定场所困难一些。

1.4 次生灾害源(火、毒、气等)安全自动控制装置

一次破坏性地震发生时,除直接灾害外,不可避免地产生许多次生灾害,有时次生灾害的损失甚至超过直接灾害损失,如:1923 年 9 月 1 日日本关东大地震死亡的 14 万人中有 5 万人是由于火灾所致,大火几乎烧毁了大半个东京城和整个横滨市。在诸多次生灾害中,若采取一定的预警防御措施,则可减少部分灾害损失。地震次生灾害的制止,主要是扼制住灾害源成灾物质的溢出,如:油、气、毒等,这只要在储存库的出口处安装自动控制关切装置即可,当灾害性地震警报电信号一经触动该装置,由电磁-机械开关自动断开其通道,从而制止或减轻由其引起的灾害损失。

2 地震预警(报)系统对减少人员伤亡的理论预测

能够产生破坏的地震主要是浅源地方震或近震,一级预警可利用 P 波,而地震产生的破坏主要是 S 波,故震中距为 Δ 的某点处的一级预警时间可近似的表示为

$$T = \frac{\sqrt{\Delta^2 + h^2}}{v_s} - \frac{h}{v_p} - \delta \quad (T \geq 0)$$
 (1)

式中: h 为震源深度,对某预警地区可取一平均值, δ 为从准震中处接受到 P 波初动至处理并发出一级警报所需的时间,一般约为 3~5 s^①, 因此,预警时间 T 可近似的看成是震中距 Δ 的函数(图 2),某处获得的预警时间越长,能够逃亡的人员比例也就越大,在同样预警时间下,住平房比住楼房人员的逃亡率更高,在我国乡村和城镇郊区居民多数住平房(其居民数高于城市),为了预测地震预警(报)系统的减灾效益之一——减少人员伤亡率 P ,即减少人员伤亡数与正常伤亡数之比,不仿假设,预警区内人员、建筑与地震在空间上都是随机分布的,并酌情给出一定预警时间下可能的减少人员伤亡比 $\epsilon(T)$,因国内外还没有具体的实例统计验证,故此处所给出的 $\epsilon(T)$ 值是不够精确的,旨在分析减灾效益。下面讨论在不同预警时间下,人们根据自己所处的环境状态,应采取何种避难方式及可能的减少人员伤亡比 $\epsilon(T)$ (表 1 和图 3)。为方便计算,将数

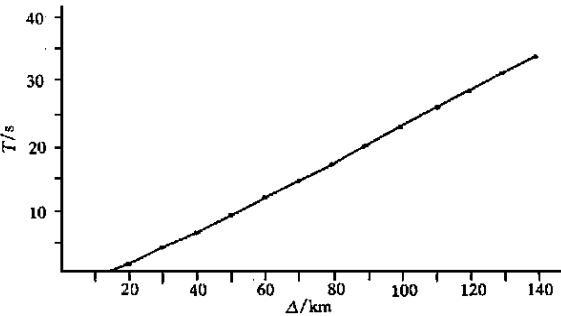


图 2 $T-\Delta$ 曲线 ($h = 15 \text{ km}$, $\delta = 3 \text{ s}$, $v_s = 3.6 \text{ km/s}$, $v_p = 6.1 \text{ km/s}$).

Fig. 2 The $T-\Delta$ curve of $h = 15 \text{ km}$, $\delta = 3 \text{ s}$, $v_s = 3.6 \text{ km/s}$, $v_p = 6.1 \text{ km/s}$.

① 国家地震局预测预防司(95-01). 中国数字地震观测系统建设. 1996. 143~155.

组 $\epsilon_i(T)-T_i$ 模拟成以下关系式

$$\epsilon(T)=1-e^{-0.05T}$$

(2)

将式(1)代入式(2)可变为

$$\epsilon=1-\exp\left[-0.05\left(\frac{\sqrt{\Delta^2+h^2}}{v_s}-\frac{h}{v_p}-\delta\right)\right]$$

(3)

表 1 $\epsilon_i(T)-T$ 对应表			
预警时间 T/s	避难方式及结果	$\epsilon_i/\%$	$1-e^{-0.05T}$
3	室内坚固体旁 室外部分人员可避开建筑物	5	14
5	楼内: 坚固体旁 楼外: 部分避开建筑物 平房: 部分逃掉	20	22
10	楼内: 一、二层部分可逃 楼外: 大部分避开建筑物 平房: 大部分逃掉	40	39
15	楼内: 一、二层部分可逃 楼外: 大部分避开建筑物 平房: 大部分逃掉	50	53
20	楼内: 一~四层多部分可逃 楼外: 大部分避开建筑物 平房: 大部分逃掉	60	63
25	大部分逃掉	70	71
30	绝大多数可逃生	80	78
35	绝大多数可逃生	85	83
40	绝大多数可逃生	85	86
45	绝大多数可逃生	90	90
50	绝大多数可逃生	90	92
55	绝大多数可逃生	90	94
60	绝大多数可逃生	95	95

因不同烈度区, 其平均震害指数 η_l 是不同的, 而单位面积的平均人员伤亡应与 η_l 成正比, 根据文献[3] , η_l 与 I 有表 2 之对应关系, 故地震预警(报)系统在给定地震 (M) 袭击下, 能实现的减少人员伤亡率 P 可表示为

$$P=\frac{\int\limits_{s(I\geqslant 6)}\eta_{l_k}\epsilon(T_k)ds}{\int\limits_{s(I\geqslant 6)}\eta_{l_k}ds}$$

(4)

式中: η_{l_k} 为烈度为 I 的空间任意点 k 处的震害指数, 虽然在不同方向上烈度的衰减率不同, 但地震波的传播速度却基本相同, 即预警时间只是震中距的函数, 而与方向无关或关系不大. 再根据烈度衰减关系

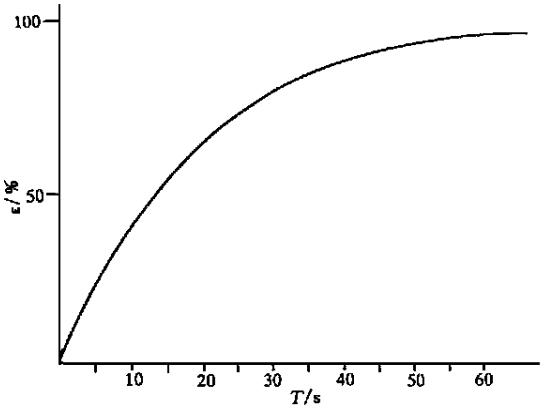


图 3 $\epsilon-T$ 曲线

Fig. 3 The $\epsilon-T$ curve.

$$\begin{cases} I_a = A_1 + B_1 M - C_1 \ln(\Delta + R_1) \\ I_b = A_2 + B_2 M - C_2 \ln(\Delta + R_2) \end{cases} \tag{5}$$

经极坐标变换可给出空间任意点(Δ, θ)在震级为 M 的地震袭击下的烈度值

$$I = I(M, \Delta, \theta) \tag{6}$$

表 2 震害指数与烈度对应关系

I	XII	XI	X	IX	VIII	VII	VI
η	1.0	0.95	0.80	0.6	0.4	0.2	0.05

结合式(6)和表 2 可拟合成下式

$$\eta = \eta(M, \Delta, \theta) \tag{7}$$

这时, ϵ 和 η 都已转为空间函数, 将式(3) 和式(7) 代入式(4) 即可计算 $P(M)$.

由于全国各地烈度衰减关系式差异较大, 即使在同一地区不同震级的烈度衰减也有很大差异. 为了简化式(4) 的计算, 现将全国各地的烈度衰减近似等效成一圆形, 其等效半径 $r = \sqrt{ab}$, 分 5 个震级档统计出各烈度区的等效半径及面积, 在每个烈度区内, 根据式(2) 折成一平均的 ϵ_i 值, 则式(4)可近似写成

$$P(M) = \frac{\sum \eta_i S_i \epsilon_i}{\sum \eta_i S_i} \tag{8}$$

将数据代入式(8)得

$$\begin{aligned} P(8.5 \leq M \leq 8.6) &= 0.87 \\ P(7.8 \leq M \leq 8.4) &= 0.76 \\ P(7.5 \leq M \leq 7.7) &= 0.45 \\ P(7.0 \leq M \leq 7.4) &= 0.24 \\ P(6.3 \leq M \leq 6.9) &= 0.20 \end{aligned}$$

由以上数据可见, 利用地震预警(报)系统平均可实现的减少人员伤亡率 P 随着震级的升高而增大. 8 级左右地震时 P 可达 76%, 这是相当可观的减灾效益, 震级较小的地震其减灾效益(人员伤亡)也小, 该系统对 6 级以下地震几乎无减灾效益(图 4).

3 讨论

3.1 不同烈度区震害损失比和预警(报)系统的减少人员伤亡比

假设人员、建筑及地震在空间上都是随机分布的. 下面分震级档次统计在破坏性大地震袭击下, 不同烈度区的震害损失占其总损失的比率($\frac{\eta_i S_i}{\sum \eta_i S_i}$)及预警(报)系统在不同烈度区的减少人员伤亡占总减少伤亡的比率 $\frac{S_i \eta_i \epsilon_i}{\sum S_i \eta_i \epsilon_i}$ (图 5).

虽然高烈度区其震害指数较大, 但由于面积小, 其震害损失并不一定大, 对于震中烈度为 XII 度的 8.5 级大震, 其震害损失最大的地区在 IX 度区; 8 级大震在 VIII 度区; 7 级地震在 VII

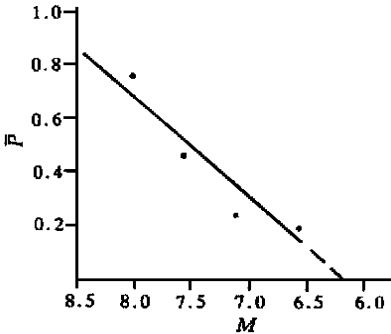


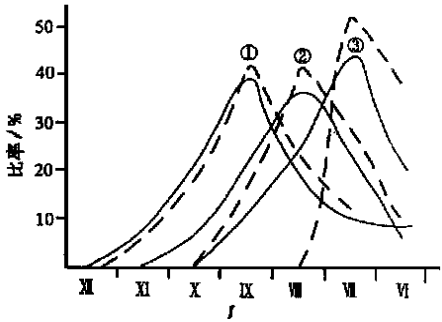
图 4 P - M 变化曲线
Fig. 4 The P - M curve.

度区,即按烈度区划分的震害损失极值区不在其极震区,预警(报)系统对减少人员伤亡的情况也是如此(见图 5 中虚线),即大地震灾害损失的主要地区不在极震区和低烈度区,而在中等烈度区,其减灾(减少人员伤亡)最见成效的也是中等烈度区,但对其它次生灾害的减灾,由于安全自动控制的瞬时间可实现性,在高烈度区,其减灾功效仍会是显著的.

3.2 地震预警(报)系统的阈值

在 6 级左右地震的破坏区内,可能的预警时间很短或为零,地震预警(报)系统对它已无多大减灾意义,故本系统的阈值取 6 级地震较为合适. 另外,地震预警(报)系统一旦出现误触发,将会产生严重的无震成灾后果,因此在具体设计时应充分考虑如何防止此问题的发生. 因本文主要是讨论该系统的理论问题,故在此对这类技术问题不作更深入的探讨.

综上所述,地震预警(报)系统是以极震区的“牺牲”为代价来“唤醒”和拯救其它灾区人们,从而实现减灾目的.



① $8.5 \leq M \leq 8.6$; ② $7.8 \leq M \leq 8.4$
③ $7.0 \leq M \leq 7.4$

图 5 各烈度区震害损失比(实线)及预警报系统的减少人员伤亡比(虚线)

Fig. 5 The $\frac{\eta_i S_i}{\sum \eta_i S_i}$ (solid lines) and $\frac{S_i \eta_i \epsilon_i}{\sum S_i \eta_i \epsilon_i}$ (dashed lines) for different intensity areas.

[参考文献]

[1] 夏玉胜, 等. 强震空带机理和应用研究[J]. 高原地震, 1997, 9(1): 1—11.
[2] 王伏龙, 等. 减灾趣闻启事录[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
[3] 尹之潜. 地震灾害及损失预测方法(四)[M]. 北京: 地震出版社, 1996.

ON EARTHQUAKE PREDICTION(WARNING) SYSTEM AND ITS DISASTER
REDUCTION BENEFIT

XIA Yu-sheng¹, YANG Li-ping²

(1. Seismological Bureau of Qinghai Province, Xining 810001, China;
2. Department of Earth and Space Sciences, University of Science
and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The principle of the earthquake prediction (warning) system is introduced and the system effect of reducing the injuries and deaths is analyzed and the ratio of reducing injuries and deaths (P value) may be beyond 70% in the M_S 8 earthquake. It is found that the maximum of the seismic hazard and P value are in the middle intensity area, and not in the higher and the lower intensity areas.

Key words: Earthquake prediction; Seismic hazard; Earthquake warning system; Disaster reduction benefit