

镇江市地震预警系统效能分析

董晨阳 董建平 陈江鸿

(镇江市地震台, 江苏镇江 212001)

摘要 2015 年镇江市建成地震预警系统, 但自该系统建成后, 镇江地区未发生过中强震, 使用方对该系统的实际应用效果不明确。地震部门对预警终端的增补也缺少相应的依据。通过计算台点间距及预警盲区的相互关系, 认为目前该系统的布点是合理的。根据地震动峰值加速度和地震烈度衰减关系, 镇江地区不同地点布设的地震预警终端最多可在地震到来前 2.5—13.1s 发出有效预警信号。地震预警系统对本地区 $M_s5.0$ 级以上的地震有效, 对 $M_s6.0$ 级以上地震效果更好。

关键词: 地震预警 有效预警时间 地震烈度

引言

镇江地区历史上发生过多次中强震, 地震预警系统的建设有一定意义, 2015 年 12 月镇江市地震预警系统建成并投入使用, 该系统分为 2 个主要部分, 即地震波接收台点(下文称烈度台点)、预警信号发出台点(下文称预警终端)。但该系统建成后, 镇江地区未发生过中强震, 有感地震震级也较小, 仅在很小的范围产生影响, 预警系统并没有产生一定作用, 因此该系统使用方(目前主要是学校师生)对预警系统的实际应用效果并不了解, 地震部门对预警终端的增补也缺少相应的依据。为了解决这些问题, 本文根据镇江地区预警台点分布情况及地震动峰值加速度和地震烈度衰减关系, 从理论上对该系统的预警效能进行分析, 确定目前本市地震预警系统的布点合理性及不同地点布设的预警终端对本市地震的理论预警时间。

1 地震预警系统

地震预警指地震发生后, 对震中附近一定距离区域尚未感知到但即将有可能感知到地震的民众发布的警报。地震波从地震发生地(震源)传播到周边一定范围, 根据距离远近需要几秒到几十秒, 如果在地震发生地布设地震探测仪器, 地震发生时仪器最先接收纵波, 经过短暂时间, 经计算机自动处理, 估算出地震三要素, 通过电磁波信号以比横波更快的速度($3 \times 10^5 \text{ km/s}$)发送给离震中一定范围外的民众, 达到地震预警目的。

地震预警系统虽能发挥一些社会效用, 但仍存在一些亟待解决的问题, 主要包含技术层面与非技术层面的问题。技术层面主要为预警信号发出区离震中太近存在盲区, 无法预警, 而离太远发出的预警信号无实际意义。本文主要分析技术层面的问题, 同时结合镇江地区地

震背景和各台点建设情况，分析各预警终端有效预警时间。

地震预警时间计算方法可用下式表示（郭凯等，2016）：

$$T_{\text{war}} = \frac{S_{\text{hyp}}}{v_s} - \frac{S_{\text{sta}}}{v_p} - T_{\text{dat}} - T_{\text{cen}} - T_{\text{iss}} \quad (1)$$

式中， T_{war} 为地震预警时间， S_{hyp} 为震源与目标区域的距离， S_{sta} 为震源到台站的距离（假设 3 个台触发阈值才发出预警信息）， v_s 为 S 波波速， v_p 为 P 波波速， T_{dat} 为预警系统计算所需 P 波数据时长， T_{cen} 为数据传输到数据处理中心的时延和系统计算时间之和； T_{iss} 为预警信息发布时间，震源视为点源。

纵波速度快，离台站最近，最先到达烈度台点，而破坏性较大的横波速度慢，离预警地区较远，较迟到达预警地区（图 1）。

当地震预警时间 $T_{\text{war}} > 0$ 时，预警有效；当 $T_{\text{war}} \leq 0$ 时，预警无效，根据式（1）可以计算出预警盲区，在震中附近一定区域无法预警。

但如果距震中过远，地震波到达时造成的地震烈度等级较低，有的甚至无法为人所感知，这种预警无实际意义。

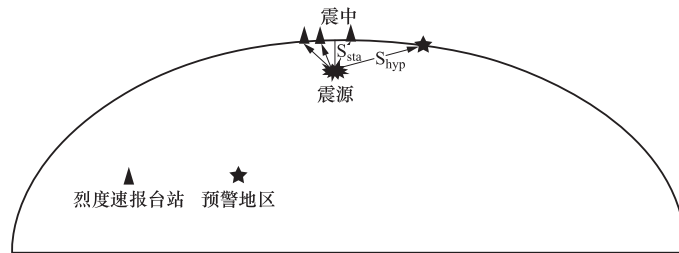


图 1 地震预警原理

Fig. 1 Principle of earthquake early warning

2 镇江市及周边地区地震预警系统建设情况

目前，镇江地区共有烈度台点 17 个，预警终端 8 个。烈度台点装有烈度仪，仪器感知地震动时向数据处理中心发出地震动信号，但该台站并不对外发出预警信号，预警信号主要由预警终端发出，该终端配备 2—3 个 60w 的喇叭，当接收到预警信号时，通过喇叭向使用者发出报警。为便于维护和管理，烈度仪安装在各辖市区原有地震台、强震台、宏观观测点及各乡镇镇政府内。预警终端在各辖市区选择 1—2 所学校布设，测试使用。

3 预警盲区与台点间距

假设需 3 个台点触发阈值，计算机自动处理并开始计算地震三要素，最好的情况是地震发生地点在 3 个台构成的三角形中心下方。因研究区域较小，将地表近似视为平面，假设台点间距相同，3 个台点构成等边三角形，则：

$$S_{\text{sta}}^2 = h^2 + \frac{1}{3}a_0^2 \quad (2)$$

式中， a_0 为台点间距， h 为震源深度。

根据式（1），当 $T_{\text{war}} \leq 0$ 时无法预警，设 $T_{\text{war}} = 0$ ，则式（1）变为：

$$S_{\text{hyp}} = v_s \left(\frac{S_{\text{sta}}}{v_p} + T_{\text{dat}} + T_{\text{cen}} + T_{\text{iss}} \right) \quad (3)$$

各参数可赋值为: $T_{\text{dat}}=3\text{s}$, $T_{\text{cen}}=2\text{s}$, $T_{\text{iss}}=1\text{s}$, $v_p=5.8\text{km/s}$, $v_s=3.6\text{km/s}$ 。

设震中距为 Δ_{epi} , 则:

$$\Delta_{\text{epi}} = \sqrt{S_{\text{hyp}}^2 - h^2} \quad (4)$$

可计算出不同台网密度(台点间距)对应的预警盲区(震中距), 计算结果如图 2 所示。

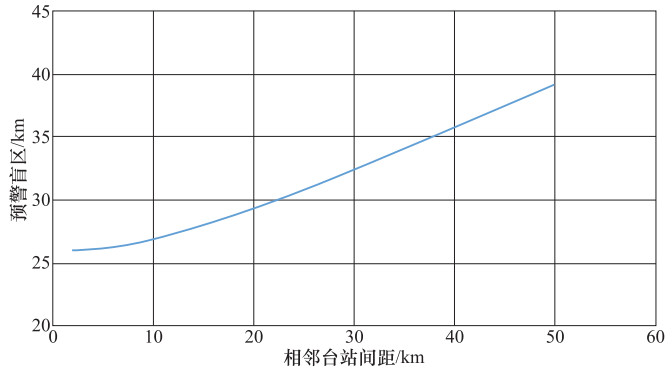


图 2 台点间距与预警盲区关系曲线

Fig. 2 Relation curves between station density and warning blind area

计算得出台点间距达 1km 时, 预警盲区为 25.96km, 随台点间距增大, 盲区扩大。

根据镇江市烈度台点分布, 台点间距近似用下式计算:

$$a_0 = \frac{a_{12} + a_{22} + \dots + a_{172}}{34} \quad (5)$$

其中, $a_{12} + a_{22} + \dots + a_{172}$ 为各台到最近 2 个台点的距离和。

台点间距离计算方法如下:

设两点经纬度分别为 A (W_A, J_A)、B (W_B, J_B), 根据大地坐标系与直角坐标系换算关系(孔祥元等, 2001), A 点直角坐标为:

$$\begin{cases} X_A = \frac{a \cos W_A}{W} \cos J_A \\ Y_A = \frac{a \cos W_A}{W} \sin J_A \\ Z_A = \frac{b \sin W_A}{V} \end{cases} \quad (6)$$

B 点直角坐标为:

$$\begin{cases} X_B = \frac{a \cos W_B}{W} \cos J_B \\ Y_B = \frac{a \cos W_B}{W} \sin J_B \\ Z_B = \frac{b \sin W_B}{V} \end{cases} \quad (7)$$

式中, a 为椭圆长半轴, b 为椭圆短半轴, W 、 V 为含椭圆偏心率的辅助函数。

为简化计算，将地球考虑为正球体而非椭球体， W 、 V 取值为 1，式 (1)、式 (2) 中 a 、 b 则为地球半径，因 a 、 b 仅参与弧度计算，可将 a 、 b 假设为 1。

AB 间弧长即地面 AB 两点间的球面距离 A_{AB} ：

$$A_{AB} = RC = R \times \arccos\left(\frac{a_1^2 + b_1^2 - c_1^2}{2a_1b_1}\right) \quad (8)$$

式中， C 为 OA 与 OB 直线间夹角（弧度）， R 为地球半径， a_1 为 A 点到球心的距离， b_1 为 B 点到球心的距离， c_1 为 A、B 点直线距离。

$$c_1^2 = (X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2 + (Z_A - Z_B)^2 \quad (9)$$

地球半径 R 取 6371.004km。计算得出镇江市烈度台点平均台点间距 a_0 为 16.3km，预警盲区为 28.4km，即预警系统对震中 28.4km 范围内的地区无法预警。如果台点间距缩至 10km，盲区范围为震中 27km 范围内，盲区面积缩小 10%，缩小范围较小。总体说来，镇江市烈度速报台站台点间距较合理。

4 预警有效范围

当预警地区地震动峰值加速度或地震烈度达到一定程度时，认为地震预警有效果。根据《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2008) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等，2009)，地震动峰值加速度达 22cm/s^2 或地震烈度达 V 度时，室内绝大多数人有感，房屋颤动，不稳定器物摇动或翻倒，因东部沿海地区民众对地震关注度不高，容忍程度较低，地震烈度为 V 度时预警已有一定意义。根据东部地区地震动峰值加速度 (PGA) 衰减关系 (王国新等，2014) 和中强地震活动区地震烈度衰减关系 (卢建旗等，2009)，可计算不同震级时地震动峰值加速度和地震烈度与震中距的关系如下：

$$\ln(Y_1) = 5.304 + 1.7196M_S - 2.5903\ln(L + 2.789e^{0.451M_S}) \quad (10)$$

$$\ln(Y_2) = 2.726 + 1.3467M_S - 1.7636\ln(L + 1.046e^{0.451M_S}) \quad (11)$$

$$I_a = 5.841 + 1.071M_S - 3.657\log(L + 15) \quad (12)$$

$$I_b = 3.944 + 1.071M_S - 2.845\log(L + 7) \quad (13)$$

其中， Y_1 、 Y_2 分别为长、短轴地震动峰值加速度， I_a 、 I_b 分别为长、短轴地震烈度， M_S 为震级， L 为震中距 (km)。

发生 $M_S5.0$ 以下地震时，在前文所述的 28.4km 盲区外，地震烈度达不到 V 度，地震动峰值加速度达不到 22cm/s^2 ，对预警来说意义不大。因此根据长轴公式 (10)、(12) 绘制 $M_S5.0$ 、 $M_S5.5$ 、 $M_S6.0$ 地震时地震动峰值加速度、地震烈度和震中距关系曲线图 (图 3)。由图 3 可知，震中距越大，地震动峰值加速度越小，地震烈度越小；当发生 $M_S5.0$ 地震时，震中距 38km 内地震动峰值加速度可达 22cm/s^2 ，震中距 34km 内地震烈度达 V 度；当发生 $M_S5.5$ 地震时，震中距 57km 内地震动峰值加速度可达 22cm/s^2 ，震中距 54km 内地震烈度达 V 度；当发生 $M_S6.0$ 地震时，震中距 84km 内地震动峰值加速度可达 22cm/s^2 ，震中距 82km 内地震烈度达 V 度。因此，本预警系统对于 $M_S5.0$ 地震预警有效范围为 34—38km，对于 $M_S5.5$ 地震预警有效范围为 54—57km，对于 $M_S6.0$ 地震预警有效范围为 82—84km。

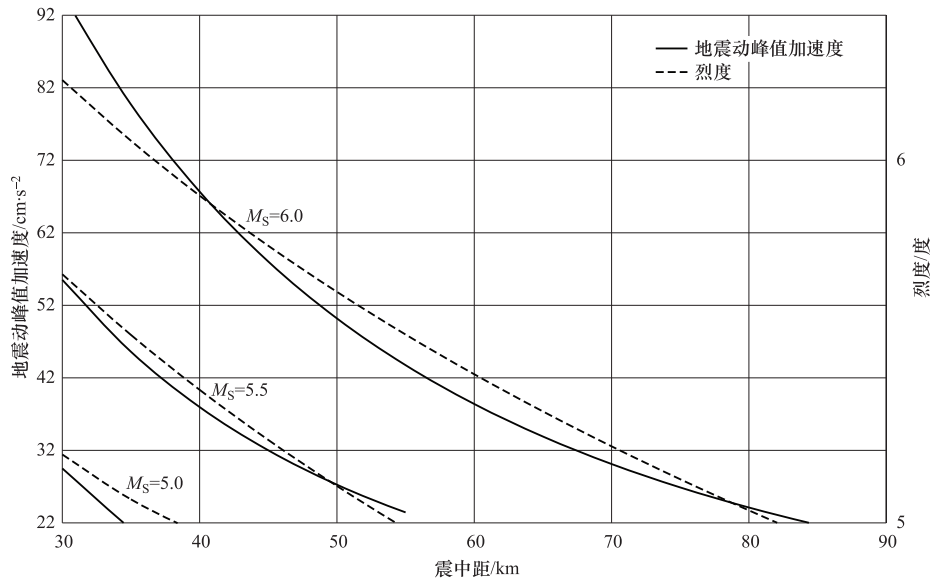


图3 地震动峰值加速度和地震烈度衰减关系曲线

Fig. 3 Curves of seismic peak acceleration and seismic intensity attenuation laws with various magnitudes

5 镇江市地震预警系统预警有效性分析

镇江市处于华北地震区长江下游—黄海地震带，属中强地震活动带。根据《中国历史强震目录（公元前 23 世纪—公元 1911 年）》（国家地震局震害防御司，1995）、《中国近代地震目录（公元 1912 年—1990 年， $M_S \geq 4.7$ ）》（中国地震局震害防御司，1999），镇江行政区域内共发生 4 次破坏性地震（ $M_S \geq 4.7$ ），分别为 1630 年 2 月 4 日江苏镇江句容 $4\frac{3}{4}$ 级地震、1872 年 7 月 24 日江苏镇江西 $4\frac{3}{4}$ 级地震、1913 年 4 月 3 日江苏镇江 $M_S 5.5$ 地震、1930 年 1 月 3 日江苏镇江 $M_S 5.5$ 地震。因此，镇江地区存在发生 $M_S 5.0$ 以上地震的背景。

根据 1970 年以来的中国台网地震目录，1970 年至今，镇江市虽未发生过 $M_S 5.0$ 以上地震，但在距镇江行政边界 90km 范围内，发生过 2 次 $M_S 5.0$ 以上地震（1974 年 4 月 22 日溧阳 $M_S 5.5$ 地震、1979 年 7 月 9 日溧阳 $M_S 6.0$ 地震）、2 次接近 $M_S 5.0$ 地震（1979 年 7 月 11 日溧阳 $M_S 4.7$ 地震、2012 年 7 月 20 日高邮 $M_S 4.9$ 地震）。因此，在镇江及周边地区建设地震预警系统具有一定意义。

计算有意义的最大预警时间时，假设地震发生在距各预警终端最远的 3 个烈度台点中心点，计算步骤如下：

(1) 根据各烈度台点经纬度得出每 3 个烈度台点中心点经纬度，再根据各预警终端经纬度求出各预警终端与各中心点的距离，可假设离各预警终端最远的中心点为震中，计算出震中与预警终端的震中距 Δ_{epi} ，根据震源深度 h （本文取 10km）计算出震源距 S_{hyp} ；

(2) 假设地震 P 波到达离其最近的第 3 个台站时开始进行数据处理，则根据震中经纬度（3 个烈度台点中心点经纬度）和 3 个烈度台点经纬度，求得震中与烈度台点的距离，取其最

大值，即为震中距 Δ_{sta} ，再根据震源深度 h （本文取 10km）计算出震源距 S_{sta} ；

(3) 根据公式 (1) 计算出最大预警时间 T_{max} 。

(4) 引入前述预警有效范围，当地震发生时，如果 Δ_{epi} 超过该震级对应的最大预警有效范围 ΔM_S ，则 Δ_{epi} 取值为该震级对应的最大预警有效范围 ΔM_S ， S_{sta} 可根据公式 (2) 取本市平均台点间距近似计算，再根据公式 (1) 计算出有意义的最大预警时间 T_{mea-M_S} 。如果 $\Delta_{epi} > \Delta M_S$ ，则有意义的最大预警时间 $T_{mea-M_S} = T_{max}$ 。

计算结果见表 1。

表 1 各地震预警终端有效预警时间

Table 1 Effective earthquake early warning time of the earthquake early warning terminals

预警终端	Δ_{sta}/km	Δ_{epi}/km	$T_{mea-M_S5.0}/\text{s}$	$T_{mea-M_S5.5}/\text{s}$	$T_{mea-M_S6.0}/\text{s}$
镇江市地震台	17.3	49.2	2.5	4.5	4.5
镇江实验学校万科魅力之城分校	17.3	53.5	2.5	5.7	5.7
江滨实验小学	17.3	57.8	2.5	7.7	6.9
辛丰小学	17.3	55.8	2.5	6.3	6.3
丹阳华南实验学校	17.3	46.8	2.5	3.9	3.9
扬中市外国语小学	17.3	80.8	2.5	7.7	13.1
句容实验小学	16.0	61.8	2.5	7.7	8.1
镇江新区实验小学	17.3	68.7	2.5	7.7	9.8

根据计算结果，当镇江市发生 $M_S5.0$ 地震时，因各地震预警终端最远震中距在该震级预警有效范围外，因此计算得出的有效预警时间相同，即可提前 0—2.5s 预警本地地震烈度在 V 度或地震动峰值加速度达 22cm/s^2 的地震；当镇江市发生 $M_S5.5$ 地震时，4 个预警终端最远震中距大于震级预警有效范围，可提前 0—7.7s 预警本地地震烈度在 V 度或地震动峰值加速度达 22cm/s^2 的地震，另外 4 个预警终端最多可提前 3.9—6.3s 预警本地地震烈度在 V 度或地震动峰值加速度达 22cm/s^2 的地震；当镇江市发生 $M_S6.0$ 地震时，各预警终端最远震中距均在该震级预警有效范围内，最多可提前 3.9—13.1s 预警本地烈度在 V 度或地震动峰值加速度达 22cm/s^2 的地震。

6 结论

(1) 根据三台触发最优结果为地震发生在三台中心点的原则，台点间距为 1km 时，预警盲区为 25.96km，且预警盲区随台点间距的增大而增大。根据镇江市各烈度台点至最近的 2 个烈度台点的距离，计算得出镇江市地震烈度台点平均台点间距为 16.3km，预警盲区为 28.4km。

(2) 根据地震动峰值加速度和地震烈度随震中距的衰减关系，计算得出发生不同震级地震时地震动峰值加速度和地震烈度与震中距的关系。为使当地地震预警具有一定意义，本文假设当地地震动峰值加速度达 22cm/s^2 或地震烈度达 V 度时预警有效，计算知：发生 $M_S5.0$ 以下地震时，在 28.4km 盲区外，地震烈度达不到 V 度，地震动峰值加速度达不到 22cm/s^2 ，对预警来说意义不大；当发生 $M_S5.0$ 地震时，震中距 38km 内地震动峰值加速度能达 22cm/s^2 ，

震中距 34km 地震内烈度达 V 度；当发生 $M_S5.5$ 地震时，震中距 57km 内地震动峰值加速度能达 22cm/s^2 ，震中距 54km 内地震烈度达 V 度；当发生 $M_S6.0$ 地震时，震中距 84km 内地震动峰值加速度能达 22cm/s^2 ，震中距 82km 内地震烈度达 V 度。

(3) 根据各烈度台点和预警终端经纬度，再引入预警有效范围，可计算得到发生不同震级地震时，不同地点预警终端最多可提前 2.5—13.1s 预警本地地震烈度为 V 度或地震动峰值加速度达 22cm/s^2 的地震。

参考文献

- 国家地震局震害防御司, 1995. 中国历史强震目录 (公元前 23 世纪—公元 1911 年). 北京: 地震出版社.
- 郭凯, 温瑞智, 杨大克等, 2016. 地震预警系统的效能评估和社会效益分析. 地震学报, **38** (1): 146—154.
- 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉, 2001. 大地测量学基础. 武汉: 武汉大学出版社.
- 卢建旗, 李山有, 李伟, 2009. 中强地震活动区地震动衰减关系的确定. 世界地震工程, **25** (4): 33—43.
- 王国新, 孙奉劫, 王东明, 2014. 高速铁路地震预警时间与预警区域和震级的关系. 中国铁道科学, **35** (2): 120—124.
- 中国地震局震害防御司, 1999. 中国近代地震目录 (公元 1912 年—1990 年, $M_S \geq 4.7$). 北京: 中国科学技术出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2009. GB/T 17742—2008 中国地震烈度表. 北京: 中国标准出版社.

Effectiveness Analysis of Earthquake Early Warning System in Zhenjiang

Dong Chenyang, Dong Jianping and Chen Jianghong

(Zhenjiang Seismic Station, Zhenjiang 212001, Jiangsu, China)

Abstract In 2015, The earthquake early warning system was completed in Zhenjiang. But since the system was built, no moderate-strong earthquake have occurred in Zhenjiang area, so the users are not clear about the actual application effect of the system and there is no corresponding basis for the addition of early warning terminal for earthquake departments. By calculating the interrelation between station density and warning blind area, it is concluded that the system is reasonable at present. Based on the attenuation laws of PGA and Seismic Intensity, it is caculated that the earthquake early warning terminals in different areas can send out effective warning signals up to 2.5—13.1 seconds before the ground motion. The earthquake early warning system is effective for earthquakes above $M_S5.0$ in Zhenjiang, and better for earthquakes above $M_S6.0$.

Key words: Earthquake early warning; Effective warning time; Seismic intensity