

# 地震烈度速报与预警台站选址相关问题探讨\*

何少林<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震台网中心, 北京 100045; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 对地震烈度速报与预警台站选址时涉及到的台站布局、台站选址与台址测试要点、台址环境地噪声要求等相关问题进行了讨论, 提出了供参考的具体建议, 可作为地震烈度速报与预警台站建设规范的补充材料, 供大家在开展相关工作时参考。

**关键词:** 地震烈度速报; 地震预警; 台站选址

**中图分类号:** P315.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2017)01-0015-07

## 0 引言

《地震台站代码》(DB/T 4—2003)中指出, 地震台站是开展地震观测的基础机构, 其建设涉及到台站空间位置的选址、台址噪声的测试、台站的土建等多方面内容。台站建设优劣在很大程度上决定了其观测资料的质量、台网功能和性能的实现、台站运维成本的高低等, 可以说, 台站建设虽工程量小, 却是一项涉及内容多、技术要求高的综合工程, 且台站建设完成后, 考虑投资因素, 一般情况下不便再迁址重建, 因此, 对台站建设要给予足够的重视, 需精心设计、优质施工。

目前, 我国已建成不同形式的多个地震烈度速报和预警系统, 如福建省地震局在2011年建成了由125个台站组成的福建地震烈度速报与预警示范系统; 中国地震局地球物理研究所和河北省地震局在2013年建成了由150个台站组成的唐山地震烈度速报和预警试验系统; 甘肃省地震局在2015年建成了由80个台站组成的兰州地震预警示范系统; 中国地震局地球物理研究所在2015年建成了由104个台站组成的首都圈地震预警示范系统等。在2016年底, 还将建成由220个台站构成的京津冀地震预警协同网、由300个台站构成的福建

地震预警实验网、由270个台站构成的川滇地震预警验证网<sup>①</sup>。此外, 即将实施的国家地震烈度速报与预警工程项目将建设地震烈度速报与预警台站15 000多个, 将实现在地震发生后, 首台触发3 s内原地报警, 4~6 s生成地震预警第一报信息, 震后3 min内生成实测地震烈度速报信息, 10 min内生成地震烈度分布图<sup>②</sup>。在如此短时间内要产出地震预警和烈度信息, 对台站位置分布、台站建设等提出了更高的要求。同时, 随着社会经济的发展, 环境地噪声干扰不断增大, 也对台站位置选择构成了不同程度的约束。如何进行地震烈度速报和预警台站的选台和建台成为一个亟需认真研究的问题。笔者作为第一起草人曾编制过《地震台站建设规范 地震烈度速报与预警台站》(DB/T 60—2015), 但由于规范对内容描述有严谨的要求, 某些内容在实际工作中需要, 但未在规范文本中反映。本文探讨的内容可作为规范的补充材料, 供大家在进行地震烈度速报与预警台站设计或建设时参考借鉴。

在本文中, 地震烈度速报和预警台站可以是基准站、基本站和一般站。地震预警盲区指的是不能在破坏性地震动到达前提供地震预警信息的地区, 一般是以震中为圆心的圆形区域。预警目标区指需要提供地震预警服务的目标或区域范围, 一般是居民区、生命线工程、重要工业设施等。

\* 收稿日期: 2016-08-09.

**基金项目:** 中国地震局地震行业科研专项-自动速报震级测定方法研究与实时运行监控软件研制(201508012)和“十二五”国家科技支撑计划项目专题-地震预警台站建设标准研制(2014BAK03B01-03)联合资助.

① 何少林, 温瑞智, 任叶飞, 等. 2016. “地震预警台站建设标准研究编制”专题报告之一——预警台站建设现状调研报告.

② 中德华建(北京)国际工程技术有限公司. 2016. 国家地震烈度速报与预警工程项目可行性研究报告.

地震预警时间指破坏性地震动到达时刻和接收到地震预警信息时刻的时间差。

## 1 台站布局与地震预警

在地震预警系统的设计中,台站整体布局及其具体位置确定对预警效果影响显著,需要在系统建设之前对其影响做出评估或分析。

### 1.1 单台预(报)警地震预警盲区估算

地震台网实际地震预警盲区范围的精确计算需要对地下速度结构有详细的了解,但对于预警台站位置的初步选择,可以在符合目标或任务要求的前提下,进行条件假设和近似估算以作为台站位置确定的参考依据。

对单个台站,可利用其 P 波  $n$  秒数据计算地震基本参数,对本地或异地 S 波造成破坏提供预(报)警信息。在地震波速是一维分层均匀近似情况下,有如下关系:

$$\frac{\sqrt{\Delta_2^2 + h^2}}{V_s} = \frac{\sqrt{\Delta_1^2 + h^2}}{V_p} + t_0 + t. \quad (1)$$

式中,  $\Delta_1$  为检测到 P 波台站的震中距,单位为 km;  $\Delta_2$  为接收预警信息处的震中距,单位为 km;  $h$  为震源深度,单位为 km;  $V_p$  为 P 波速度,单位为 km/s;  $V_s$  为 S 波速度,单位为 km/s;  $t_0$  为系统用时,单位为 s,包括数据打包封装、信号传输、计算地震参数的波形长度 ( $n$  秒)、地震参数计算和判定、预警信息发布与接收等所用的时间;  $t$  为可提供的预警时间,单位为 s。

(1) 单台预(报)警最小地震预警盲区估算。可理想地假设震源距最近的台站在震中位置,即取  $\Delta_1 = 0$ 、 $\Delta_2 = \Delta$ ,则由式(1)得到:

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{h}{V_p} + t_0 + t\right)^2 \cdot V_s^2 - h^2}. \quad (2)$$

若仅考虑 100 km 震中距范围,则 P 波和 S 波主要是 Pg 和 Sg 波,且考虑浅源地震、近台记录,取地壳上层厚度为 22 km,且在地壳上层  $V_p = V_{Pg} = 5.7$  km/s、 $V_s = V_{Sg} = 3.4$  km/s,系统用时取  $t_0 = 4.0$  s。

若分别取预警时间  $t$  等于 0.0 s 和 3.0 s,则由式(2)可得到不同深度地震的单台预(报)警最小盲区距离,如表 1 和图 1 所示。由表 1 可见,在上述条件下,若预警时间为 0.0 s,震源深度在

10.0 ~ 15.0 km 时,预警盲区最大,为 16.8 km;若预警时间 3.0 s,震源深度 22.0 km 时,预警盲区最大,为 29.7 km。

表 1 单台预(报)警,不同震源深度时的最小地震预警盲区估计(台站震中距 0 km、系统用时 4 s)

Tab. 1 Minimum earthquake early warning blind zone estimation at different focal depths when a single station is used (station epicenter distance: 0 km, system used time: 4 s)

震源深度/km	预警盲区/km	
	预警时间 0.0 s	预警时间 3.0 s
0.0	13.6	23.8
3.0	15.1	25.4
5.0	15.8	26.3
10.0	16.8	28.0
15.0	16.8	29.1
20.0	15.9	29.6
22.0	15.2	29.7
23.0	14.7	29.6

注:表中预警盲区距离是在一定条件下的大致估计,仅供参考应用。

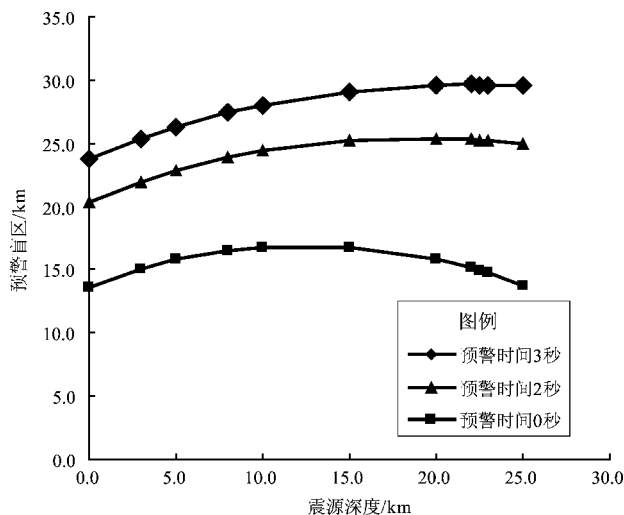


图 1 单台预警时地震预警盲区和震源深度的关系(台站震中距 0 km、系统用时 4 s)

Fig. 1 The relationship between earthquake early warning zone and focal depth when a single station is used

(station epicenter distance: 0 km, system used time: 4 s)

(2) 单台预(报)警地震预警盲区估算。假设震源深度 10 km,取预警时间  $t = 0$  s,则不同震中距台站的预警盲区距离估计如表 2 和图 2 所示。

表 2 单台预警，不同震中距时的预警盲区估计（震源深度 10 km，系统用时 4.0 s，预警时间 0.0 s）

Tab.2 Distance estimation of early warning blind area of different epicenter distance when a single station is used (focal depth: 10 km, system used time: 4.0 s, warning time: 0.0 s)

震中距 Δ/km	预警盲区/km
0	16.5
5	17.5
8	18.7
10	19.7
12	20.7
14	21.8
16	22.9
20	25.2
30	31.1
40	37.1

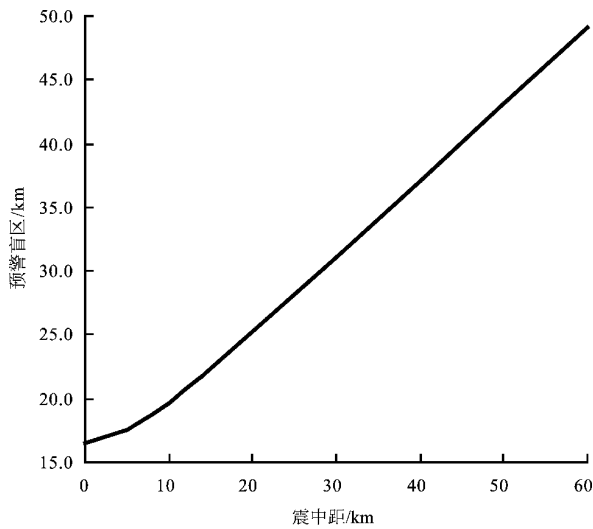


图 2 单台预警时震中距和地震预警盲区的关系（震源深度 10 km、系统用时 4 s，预警时间 0 s）

Fig.2 Relationship between the epicenter distance and the earthquake early warning blind area when a single station is warning (focal depth: 10 km, system used time: 4.0 s, warning time: 0.0 s)

1.2 单台预（报）警最大预警时间估算

对单个台站，利用其 P 波  $n$  秒数据计算地震基本参数，对本地或异地 S 波破坏提供预警信息，在地震波速是一维分层均匀近似情况下，假设震源距最近的台站在震中位置，由式（2）式得出：

$$t = \frac{\sqrt{\Delta^2 + h^2}}{V_s} - \frac{h}{V_p} - t_0.$$

(3)

若仅考虑 100 km 范围，则 P 波和 S 波主要是 Pg 和 Sg 波。且考虑浅源地震、近台记录，假设地震震源在上地壳，取  $V_p = V_{Pg} = 5.7$  km/s、 $V_s = V_{Sg} = 3.4$  km/s、 $h = 10$  km、系统用时取  $t_0 = 4.0$  s，则由式（3）得到不同震中距时的最大预警时间（假设台站震中距为 0.0 km），如表 3 和图 3 所示。

表 3 单台预警，不同震中距时最大的预警时间估计（震源深度 10 km）

Tab.3 Maximum time estimation of the different epicenter distance when a single station is used (focal depth: 10 km)

震中距 Δ/km	预警时间 t/s
5	-2.5
10	-1.6
15	-0.5
20	0.8
30	3.5
40	6.4
50	9.2
60	12.1
70	15.0
80	18.0
90	20.9
100	23.8

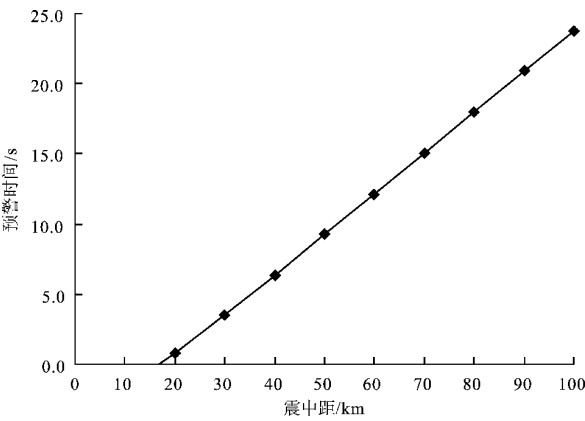


图 3 单台预警时震中距离与最大预警时间关系（震中距 0 km，震源深度 10 km、系统用时 4 s）

Fig.3 The relationship between the epicenter distance and the maximum early warning time in a single station (epicenter distance: 0 km, focal depth: 10 km, system used time: 4 s)

### 1.3 多台预警地震预警盲区估算

如采用 2 个台站预警,理想情况是地震震中在 2 个台站连线的中间,此时,地震预警盲区最小。取 2 台站间距为  $L$  (km),则台站间距和预警盲区的关系为(杨陈,2013)

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{L^2/4 + h^2}}{V_p} + t_0 + t\right)^2 \cdot V_s^2 - h^2}. \quad (4)$$

若仅考虑 100 km 震中距范围,则 P 波和 S 波主要是 Pg 和 Sg 波。且考虑浅源地震,取震源深度  $h=8$  km,且在地壳上层  $V_p = V_{Pg} = 5.7$  km/s、 $V_s = V_{Sg} = 3.4$  km/s,系统用时取  $t_0 = 4.0$  s,取预警时间为  $t=0$  s,由式(4)可得到 2 台站间距和预警盲区对应关系。同样,在相同条件下,也可得到 3 台站预警时,台站间距和预警盲区的对应关系,如表 4 和图 4 所示。

表 4 2 台或 3 台预警,不同台间距时最小的地震预警盲区估计(震源深度 8 km,预警时间 0 s)

Tab. 4 Different station spacing, the minimum earthquake early warning blind area estimation when 2 or 3 stations are used (focal depth 8 km, warning time 0 s)

台站间距/km	预警盲区/km	
	2 台预警	3 台预警
1.0	16.5	16.5
4.0	16.7	17.2
6.0	16.9	17.9
8.0	17.2	18.7
10.0	17.5	19.7
12.0	17.9	20.7
14.0	18.3	21.8
16.0	18.7	22.9
18.0	19.2	24.1
20.0	19.7	25.2
30.0	22.4	31.1
40.0	25.2	37.1
50.0	28.1	43.1
60.0	31.1	49.1
80.0	37.1	61.0
100.0	43.1	73.0

从图 1~4 可看出:

(1) 对相同震源深度地震,台站间距减小(台站密度增加),地震预警盲区减小,但台站间距减小与地震预警盲区减小是非线性关系。

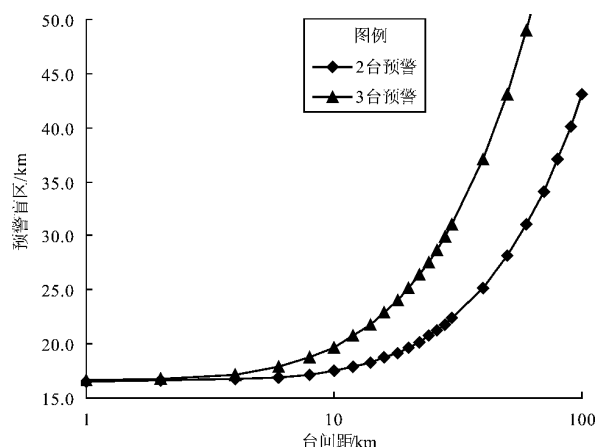


图 4 3 台或 2 台预警时不同台间距和预警盲区的关系(震源深度 8 km,预警时间 0 s)

Fig. 4 The relationship between different station spacing and early warning blind area when 2 or 3 stations are used (focal depth 8 km, warning time 0 s)

(2) 随震源深度增加,预警盲区先增加,之后减小。对于浅源地震,当台间距低于某个值时,预警盲区趋于一个常值。对于较深的地震,稀疏的台站分布也可满足预警需求,且震源深度达到一定值时,将不存在地震预警盲区。

(3) 需要提供的预警时间越长,预警盲区越大。

(4) 减少计算地震参数所需要的台站数,盲区的半径也会减小。当台站间距较大时,减少计算地震参数所需台站数,地震预警盲区的减少较明显;但台站间距较小时,减少计算地震参数所需台站数,地震预警盲区的减少不明显。即对台站密度较小的台网,可减少计算地震参数所需台站数,缩小地震预警盲区。对台站密度较大的台网,可采用较多的台站计算地震参数,以保证结果的可靠性。

## 2 台站布局与烈度速报

对于完全基于仪器观测值进行实测的地震烈度速报,或在实测地震烈度基础上经过插值后进行地震烈度速报的台网,台站的空间分布也很重要,它将影响烈度速报的准确性,因此,需要对台站分布和不同区域烈度衰减关系做分析,以便指导台网台站布局设计。

汪素云等(2000)采用椭圆长短轴联合衰减的模型,给出了中国西部地区的烈度衰减关系,

如式(5)、(6)所示,以及中国东部地区的烈度衰减关系,如式(7)、(8)所示。

中国西北地区长轴方向

$$I_a = 5.253 + 1.398M - 4.164\log(R_a + 26). \quad (5)$$

中国西北地区短轴方向

$$I_b = 2.019 + 1.398M - 2.943\log(R_b + 8). \quad (6)$$

中国东北地区长轴方向

$$I_a = 5.019 + 1.446M - 4.136\log(R_a + 24). \quad (7)$$

中国东北地区短轴方向

$$I_b = 2.240 + 1.446M - 3.070\log(R_b + 9). \quad (8)$$

由式(5)~(8)计算可知,中国地区地震烈度衰减Ⅰ度,短轴半径差最小在6~17 km,长轴半径差最小在14~27 km。

### 3 台网台站布局建议

地震台网的地震烈度速报和预警性能依赖于台站分布。初步总结前面的分析,给出如下台网台站布局建议。

#### 3.1 总则

(1) 台站在整体上的布局应满足地震烈度速报和预警服务能力的要求。单个台站位置的确定宜符合《地震台站建设规范 地震烈度速报与预警台站》(DB/T 60—2015)中第4章“台站选址”和第5章“台址测试”的规定。

(2) 台站整体布局宜考虑烈度速报和预警目标区内已运行、可共享,且可用于地震烈度速报和预警服务的其他类型台站的分布。

(3) 台站间距决定了地震预警盲区的大小。在相同的条件下,台站间距越大,地震预警盲区越大。

(4) 台站应包围潜在震源区,台站宜离潜在震源区尽量近。

(5) 在无法预测潜在震源区时,台站宜包围烈度速报和预警目标区。

(6) 在无法预测潜在震源区和不能确定烈度速报和预警目标区时,台站宜大体均匀分布。

#### 3.2 台站间距

(1) 在潜在震源区,台站间距可在8~10 km。

(2) 在预警目标区,为提供尽可能多的地震预警时间,台站宜离预警目标区在2 s地震波传播距离外。

(3) 当台站大体均匀分布时,对浅源地震,台站平均间距应不大于20 km,宜在8~12 km。具体确定台站间距时,可参照台间距和目标区地震烈度衰减、地震预警盲区的依赖关系。对中源和深源地震,台站间距小于50 km,对缩小预警盲区意义不大。

#### 3.3 计算地震参数前时间的估计

对地震预警服务,当台网的台站布局确定后,可根据计算地震参数需要的台站数估计某个地震从发震到计算地震参数时需要的时间。对一定区域内每个震中进行估计,可得到台网在一定区域内从发震到计算地震参数时需要的时间分布,据此,可为估计台网地震预警能力提供参考数据。

### 4 台站选址和台址测试

#### 4.1 台站选址

台站选址是建设高品质台网的基础,台址的环境条件直接影响台站产出数据的质量和台网效能的实现。台站选址时地理位置要符合整体台网的功能和性能的需求,观测环境条件要满足台站观测环境技术要求,同时还要兼顾通信、供电、避雷、交通、安全、维护条件以及长期观测需要。

台站选址的过程可分为初步遴选(图上作业)、现场踏勘、场地测试、编写遴选报告和台址确定5个阶段,如图5所示。

单个台站的遴选报告中应包括:

(1) 主要测试设备(至少包括传感器和数据采集器)的描述(如型号、编号、生产厂家、主要技术参数)、仪器标定原始波形数据、标定波形处理分析(如处理程序来源、处理得到的仪器工作参数、仪器工作是否正常)。

(2) 台址环境地噪声测试。包括仪器测试参数设置、测试环境条件、测试原始波形数据。

(3) 测试数据的处理。包括测试时间说明、原始数据预处理说明、数据处理公式、处理软件说明、处理结果(如表和图)。

(4) 传输信道说明。

(5) 结论和说明。包括处理结果、判定依据、判定结论,相关说明。

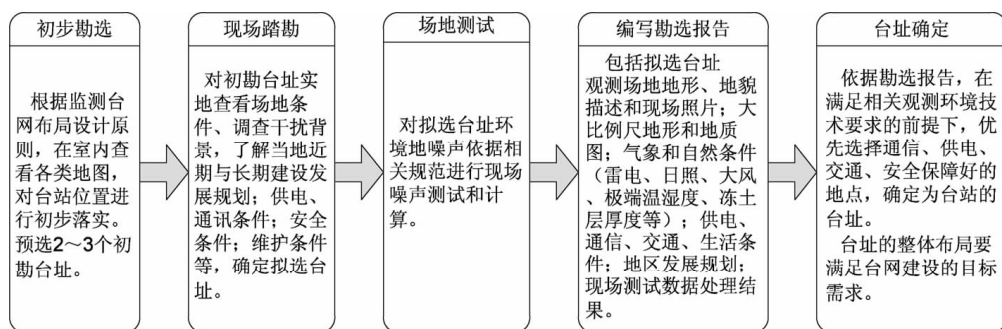


图5 台站选址过程

Fig. 5 Station site selection process

当所有台址确定后,对地震烈度速报和预警台网,应有台网台站遴选总报告,内容至少包括:

(1) 台站信息汇总表。包括经度、纬度、高程、台址地理位置、场地岩性、噪声处理结果、场地噪声类型、通讯方式、供电方式、交通条件、场地权属、用地方式等。

(2) 台站位置分布图。

(3) 台址噪声分布图。

(4) 台站间距的分段统计表和图。

(5) 台网能力预估。对照台网建设功能和性能指标进行评估,如台网地震监测能力、台网烈度速报能力、台网预警能力等。

#### 4.2 台址测试

台址选定后要进行台址测试,包括以下要点:

(1) 测试仪器采样率宜尽量大,不应低于100点/秒,以采集到高频脉动。

(2) 测试仪器在保证不限幅条件下,宜使测试数据值尽量大,以采集到小振幅脉动。

(3) 测试前和结束时,应在测试现场对仪器进行标定,以保证测试仪器正常、测试仪器参数设置合理,进而保证测试数据的正确性。

(4) 应对测试点进行处理,即清除表面分化层,并做平整处理作为测试面。安放地震计后,应采取减少环境干扰措施,如加仪器罩、周围密封等。

(5) 做好测试的详细记录,包括文字和照片资料。

### 5 台址环境地噪声要求探讨

台址环境地噪声是具体地点的地噪声,它是背景地噪声和其他干扰地噪声的总和。台址环境

地噪声水平决定了台站能记录到地震的下限,也决定了台网的地震监测能力,是台站选址的最重要约束指标。

(1) 《地震台站观测环境技术要求 第1部分:测震》(GB/T 19531.1—2004) 4.2节中规定: I级环境地噪声水平为小于  $3.16 \times 10^{-8}$  m/s。依据宽频带面波震级  $M_{S(BB)}$  (地震震级的规定, GB/T 17740—2016) 可知,在震中距  $1^\circ$  处,此噪声相当于1.0级地震的最大幅度。

(2) 若有2个台站,震中距分别为  $\Delta_1$  和  $\Delta_2$ ,观测的速度最大振幅分别为  $(V_{\max})_1$  和  $(V_{\max})_2$ ,对同一个地震,假设①:测定宽频带面波震级  $M_{S(BB)}$ ,有:

$$\begin{aligned} M_{S(BB)} &= \lg\left(\frac{V_{\max}}{2\pi}\right)_1 + 1.66\lg(\Delta)_1 + 3.3 \\ &= \lg\left(\frac{V_{\max}}{2\pi}\right)_2 + 1.66\lg(\Delta)_2 + 3.3. \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)得到:

$$\left(\frac{V_{\max}}{V_{\max}}\right)_1 = \left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right)^{1.66}. \quad (10)$$

假设②:台站间距减小,使震中距减少1倍,即  $\Delta_2 = \Delta_1/2$ ,则由式(10)得到:  $(V_{\max})_2 = 3.16 \times (V_{\max})_1$ 。即:保证监测能力不变的前提下,震中距减小1倍(减小到1/2),地震最大幅度增加3.16倍;震中距再减小1倍(减小到1/4),地震最大幅度增加10 ( $\approx 3.16 \times 3.16$ ) 倍。若认为地震最大振幅和初动有相似的衰减特性,则可近似认为,记录同样的地震,当震中距减小1倍(减小到1/2)时,环境地噪声允许增加3.16倍。当震中距再减小1倍时(减小到1/4),环境地噪声

也允许增加10倍。

(3) 估算示例。若有一台站,记录  $M_{S(BB)} = 0.5$  地震,其震中距为  $\Delta = 2^\circ$ ,则根据式(9),计算得到:  $V_{\max} = 3.15 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 。按照上述(2)中的结论简单推测,若震中距减小到6.9 km,即每次震中距减少一半,减少5次,则此处的  $V_{\max} = 3.15 \times 10^{-9} \times 3.16^5 = 9.93 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,若近似认为波形最大振幅是初至波最大振幅的8倍,则  $M_{S(BB)} = 0.5$  地震,在震中距6.9 km处,初至波最大振幅约为  $9.93 \times 10^{-7} / 8 = 1.24 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,更进一步假设认为允许的噪声是信号的1/2,即若在6.9 km处能记录  $M_{S(BB)} = 0.5$  地震,可允许的台址噪声是  $6.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ,即允许台址是Ⅱ级环境地噪声水平。

综上,可得出:

(1) 不同类型的台站选址应满足其对环境地噪声的要求。

(2) 对相同的监测能力,当台站间距减小(台站密度增加)时,对台址环境地噪声的要求会降低,即允许相对高的环境地噪声水平。

(3) 若近似认为地震波形最大振幅是初至波最大振幅的8倍,则对  $M_{S(BB)} = 0.5$  地震,在震中距7 km处,初至波最大振幅约为  $1.24 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ ,允许的噪声可是  $6.2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ ,即允许台址是Ⅱ级环境地噪声水平。

(4) 当某些特殊地点必须安装仪器进行地震

烈度速报或预警时,可根据该地点地震烈度速报或预警震级的下限,计算该地点需监测的最小地面振动的加速度或速度峰值,台址最大环境地噪声加速度或速度峰值不应大于该地点需检测的最小地面振动的加速度或速度峰值的1/2。

(5) 其它目的的台站选址,可根据观测目的进行专门的研究和确定。

## 6 小结

地震烈度速报与预警台网要求在尽可能短的时间内提供信息服务,其台站布局和选址不同于以地震基本参数速报为目的的地震台网,在建设烈度速报与预警台网前,要根据建设目的,对台站布局、选址等有关问题进行全面、详细的设计,并对拟建台网的功能和性能进行评估,以保证所建台网功能实现、性能优异。

## 参考文献:

- 杨陈. 2013. 中国地震预警系统建设的几个关键问题[J]. 工程研究 - 跨学科视野中的工程, 5(4): 354 - 364.
- 汪素云, 俞言祥, 高阿甲, 等. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定 [J]. 中国地震, 16(2): 99 - 106.
- DB/T 4—2003, 地震台站代码[S].
- DB/T 60—2015, 地震台站建设规范 地震烈度速报与预警台站[S].
- GB/T 17740—2016, 地震震级的规定[S].
- GB/T 19531.1—2004, 地震台站观测环境技术要求 第1部分: 测震 [S].

# Discussion on the Related Problems of Seismic Intensity Rapid Reporting and Earthquake Early Warning Station Location

HE Shaolin<sup>1,2</sup>

(1. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

(2. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

## Abstract

In this paper, the station distribution problem of seismic intensity rapid reporting and early warning station involves station location and test points, issues related to site environmental noise requirements is discussed. We put forward the corresponding suggestions, which can be used as supplementary materials of seismic intensity quick reporting and earthquake early warning station construction norms. And the results can also be referred for other related works.

**Keywords:** seismic intensity rapid reporting; earthquake early warning; station location.