

文章编号: 1001-4632 (2023) 02-0200-11

引用格式: 孙文韬, 宣言, 江汶乡, 等. 近断裂带铁路地震预警系统台站布设方案及评价方法[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 200-210.

Citation: SUN Wentao, XUAN Yan, JIANG Wenxiang, et al. Station Layout Scheme and Evaluation Method of Railway Earthquake Early Warning System Near Fault Zone [J]. China Railway Science, 2023, 44 (2): 200-210.

近断裂带铁路地震预警系统台站布设方案及评价方法

孙文韬¹, 宣言¹, 江汶乡¹, 王友彪¹, 宋斌²

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道科学技术研究发展中心, 北京 100081;

2. 本溪市规划设计研究院, 辽宁 本溪 117000)

摘要: 依托某跨越断裂带密集区域的长大干线铁路, 提出1种通用性的铁路地震预警系统台站布设方案及评价方法。首先, 采用平均分布法建立台站分布模型, 根据不同时期的保护对象并参考盲区半径指标, 确定系统的初期和中期预警台站布设和预警方案; 然后, 估算理论上单台的预警监测能力, 并根据历史地震数据验证不同预警方案下的系统预警监测能力; 最后, 评价不同预警方案的时效性, 根据历史地震得到烈度-预警可用时间累积分布, 确认区域预警效果。结果表明: 该铁路平均台间距不应小于20 km; 初期预警方案可监测到76.50%的历史地震, 理论和历史地震的预警可用时间平均值分别为23.18和12.19 s; 中期3台、4台预警方案分别可监测到80.80%和78.54%的历史地震, 3台方案理论和历史地震的预警可用时间平均值分别为15.31和8.62 s, 4台方案分别为13.79和8.47 s; 初期和中期方案的区域预警效果均满足工程运用。

关键词: 地震预警; 近断裂带; 台站布设; 预警可用时间; 预警时效性

中图分类号: U298 文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2023.02.21

截至2022年, 我国铁路运营总里程超过14万km, 铁路的蓬勃发展极大地促进了我国国民经济发展, 给人民生活带来了诸多便利。地震是威胁铁路安全的重大自然灾害之一, 对于破坏性地震, 地震动作用可能引发列车出轨等事故, 导致生命财产的重大损失。长大干线在选线设计时很难完全避开活动断层, 有可能穿越多个地震频发区^[1-3]。这种情况下, 有必要充分评估地震场景下线路面临的风险^[4]。日本的经验证明, 地震预警是提升高速铁路安全的有效途径之一^[5-8]。针对穿越地震风险性较高地区的铁路, 可考虑研究布设地震预警监测系统进行有效保护^[9-11]。

为增强我国铁路防震减灾能力, 2012年起原铁道部和中国地震局开展地震安全联合攻关, 到

2015年底基本完成了高速铁路地震预警监测系统研发。该系统能够在破坏性地震波到达铁路线之前通知列车采取紧急措施, 保证列车行车和乘客安全, 现已在大西高铁、京张高铁、京雄城际、京沈客专和成渝高铁等线路陆续运用, 并逐步向全国普及。长大干线铁路的建设时间可长达数余年, 如果线路跨越地震高风险区, 为了保障施工安全, 在工程伊始就需要建立地震预警监测系统; 在工程建设结束进入运营阶段后, 地震预警监测系统还可以继续发挥效力, 为铁路基础设施和列车提供预警防护。

时效性分析是评价地震预警系统预警效果的客观方法之一。可认为预警可用时间是在一次地震中目标接受预警信息时刻与地震S波到达时刻的时间

收稿日期: 2021-12-06; 修订日期: 2022-12-27

基金项目: 中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发计划项目 (2022YJ149)

第一作者: 孙文韬 (1989—), 男, 北京人, 助理研究员。E-mail: sunwentao_cars@163.com

通讯作者: 宣言 (1972—), 男, 河北卢龙人, 研究员, 博士。E-mail: xuanyan1972@126.com

差，其与预警信息的发布时间和预警目标的震中距等因素相关。刘辰^[12]认为预警信息发布的有效时间是预警能力的重要指标；余思等^[13]也认为发出地震预警信息的时间直接影响地震台网的预警监测能力；Allen^[14]在旧金山湾地区地震预警的分析中同样用到了此指标。

我国高速铁路地震预警监测系统在进行地震台站选址时，一般考虑将其布设在铁路沿线的牵引变电所、分区所、AT所等场所，因此台站多以约25 km的间距沿线路线状分布^[15]，但台站等间距分布并未考虑到潜在震源区的因素，且呈线状分布也可能带来算法函数的奇异性问题。穿越近断裂带的长大干线离沿线潜在地震更近，因此更需要对系统预警的台站布设方案和预警时效性进行分析^[16]。

针对某跨越断裂带密集区域的具体铁路，提出一种通用性的铁路地震预警系统台站布设方案及预警监测能力和时效性评价方法。首先，利用平均分布法建立台站分布模型，根据不同时期的保护对象并参考盲区半径指标，确定系统的初期和中期预警台站布设和预警方案；然后采用离散网格虚拟震源法和近震传播计算式，估算系统的单台理论监测能力，并根据历史数据验证不同预警方案下的系统预警监测能力；最后采用预警可用时间指标，评价不同预警方案的时效性，并根据历史地震计算得到不同预警方案的烈度-预警可用时间累积分布，确认方案的区域预警效果。

1 模型及方法

一般情况下，地震预警系统在台站布设时需结合区域特征确定合理的台间距，同时系统还应根据预警目标对时效性和准确性要求的不同提供多种预警发布方案。因此考虑采用预警盲区半径指标，针对不同发布方案讨论合理的台间距。

设有若干台站以 D 为纵横间距呈网格状平均分布，台站模型如图1所示。模型中任意位置发生

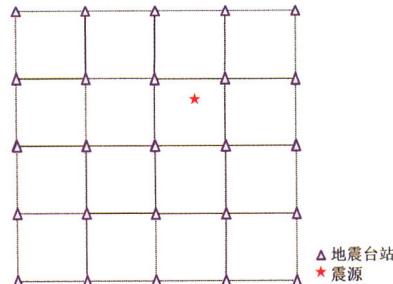


图1 平均分布台站模型

地震后，预警可用时间不大于0的区域的半径被称为盲区半径，如图2所示，此时台间距与预警盲区半径间的关系可采用平面几何方法分析确定。处在盲区中的区域没有足够时间收到地震预警警报，可认为依托相应台站分布的地震预警系统将无法对该区域提供防护作用。

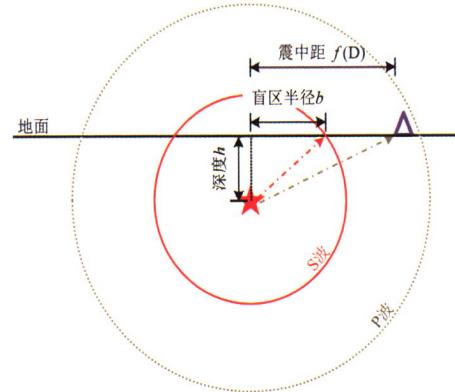


图2 盲区半径示意图

根据震中距、震源距和深度的物理意义可知，盲区半径 b 为：在某一地震P波传播至某台站并经过系统处理后发布的时刻，地震S波传播范围在地面的投影半径。根据几何关系，盲区半径的求取计算式为

$$b = \left\{ \left[\left(\frac{1}{v_p} \sqrt{f^2(D) + h^2} + t_{sys} \right) v_s \right]^2 - h^2 \right\}^{1/2} \quad (1)$$

式中： D 为台间距； h 为震源深度； v_p 为P波波速； v_s 为S波波速； t_{sys} 为地震预警系统各项时延总和。

式（1）中，地震预警系统各项时延总和 t_{sys} 指采用P波预警算法时，从地震波到达台站的时刻到预警目标收到预警警报时刻的总时长。为接近实际情况，可简化采用目前高速铁路地震预警监测系统中地震计、监控单元、铁路局中心系统等信息计算和传输时间的总和。

由式（1）可知，根据不同发布方案可在模型网格内寻找导致地震波到达台站时间最大化的震源位置。在此情况下求得的最大盲区半径值 b_{max} 反映了整体系统时效性的下限，因此须讨论此时台间距 D 与盲区半径 b_{max} 的关系。

选取某条位于断裂带密集区域的长大干线铁路作为研究对象。将铁路线200 km范围的外包络作为研究区域，根据查阅的区域内4 000余次历史地震目录，统计出该区域的平均震源深度约为15.5 km， h 取15.5；根据习年生等^[17]和白琳娟^[18]的研究结果以及高速铁路地震预警监测系统技术条件的要求，预估地震预警系统各项时延总和为3.5 s，

t_{sys} 为3.5 s; v_p 和 v_s 均取客观实际常量, 分别为6.5和 $3.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2 预警方案及台站布设方案

2.1 不同时期预警方案

通常1个台站的三分向地震数据就能粗略估算出地震参数, 达到初步预警的目的; 3个台站的数据则可满足一定的精度要求。铁路地震预警时, 应根据不同预警目的制定不同预警方案。

铁路建设初期, 主要关注重点施工位置的地震预警保护, 此阶段的预警方案具有如下特点: 地震预警系统无须控制列车, 但地震来临时应对重点施工位置提供预警警报, 以便施工点工人停止作业、尽快逃生。故应在台站数量较少的条件下侧重于预警的时效性。从获得最大预警可用时间的角度, 初期可采取单台预警的方案。

线路建成投用后, 因全线已布设较多台站, 可对全线及运行列车提供预警报警服务。此阶段的预警方案具有如下特点: 误报会对运营的列车造成不良影响, 预警应兼顾时效性与准确性。故中期可采取3台或4台的多台预警方案。

1) 初期预警方案

初期单台预警方案下的台间距示意图如图3所示。图中: ①—④为单元网格上4个台站的编号。由图3可知: 模型单元网格内, 地震发生的最不利位置为中心点; 若震源位于网格中心, 则至各个首台的震中距均为 $\frac{\sqrt{2}}{2}D$, 即式(1)中 $f(D)=\frac{\sqrt{2}}{2}D$ 。

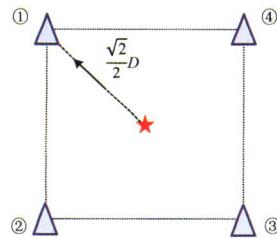


图3 初期单台预警方案下的台间距示意图

2) 中期预警方案

中期3台、4台预警方案下的台间距示意图如图4所示。图中: ①—⑤为震源附近的台站编号。由图4可知: 3台发布方案单元网格内地震发生的最不利位置为台站①和台站②连线的1/2处, 此时地震波传播至3个台站的最远距离为 $\frac{\sqrt{5}}{2}D$, 即式(1)中 $f(D)=\frac{\sqrt{5}}{2}D$; 4台发布方案单元网格内地震发生的最不利位置为台站①和台站④连线上距后者5/6处, 此时地震波传播至4个台站的最远距离为 $\frac{5\sqrt{2}}{6}D$, 即式(1)中 $f(D)=\frac{5\sqrt{2}}{6}D$ 。

(1) 中 $f(D)=\frac{\sqrt{5}}{2}D$; 3台发布方案单元网格内地震发生的最不利位置为台站①和台站②连线上距后者1/2处, 此时地震波传播至3个台站的最远距离

为 $\frac{5\sqrt{2}}{6}D$, 即式(1)中 $f(D)=\frac{5\sqrt{2}}{6}D$ 。

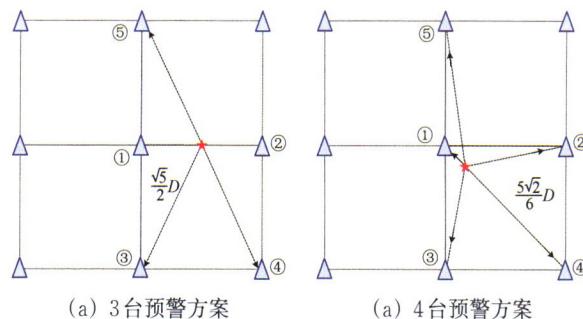


图4 中期3台、4台预警方案下的台间距示意图

2.2 台站布设方案

2.2.1 台间距与盲区半径关系

在2种预警方案下, 根据平均分布台站模型计算得到台间距 D 与盲区半径 b 的关系以及增加1个台站对盲区半径降幅的贡献比见表1。由表1可知: 对于同一台间距, 发布所需台站越多, 盲区半径越大, 相对时效性越差; 对于同一发布方案, 台间距越小, 单位面积下的台站数量越多, 盲区半径越小。但台间距与盲区半径的减小为非线性关系, 随着台间距逐渐减小, 每增加1个台站对盲区半径降幅贡献比越来越小。

综合实际情况和经济性, 理论上建议区域的平均台间距应不小于20 km; 平均台间距小于20 km后, 台间距每减少1 km对盲区半径降幅贡献比不足0.1%。

2.2.2 研究区域的台站布设方案

对于目标铁路, 综合线路走势、历史地震、断裂带、台间距、施工区和预警需求等因素, 得到重点保护区及台站布设位置如图5所示。

初期预警方案下, 只需要对于施工作业地点进行预警保护, 所有台站均为基础台。具体台站布设方案为: 在设置的4块重点保护区中布设基础台站18个。

中期预警方案下, 因铁路已经建成运营, 预警目标为铁路全线。同时考虑形成“网状”监测布局, 根据线路周边全新世断裂的分布, 进一步扩充台站。具体台站布设方案为: 铁路沿线每隔20~25 km设置1个台站; 再沿断层两端方向向外延伸, 各设置1~3个延伸台站; 延伸台站与基础台站共同组成中期台站, 共计55个。

表1 台间距D与盲区半径b的关系及增加1个台站对盲区半径降幅的贡献比

台间距D/km	单位面积下的台站数量/个	初期预警方案		中期预警方案		4台	
		盲区半径/km	单个台站对盲区半径降幅贡献比/%	盲区半径/km	单个台站对盲区半径降幅贡献比/%	盲区半径/km	单个台站对盲区半径降幅贡献比/%
60.0	11	33.12	4.59	46.82	4.91	48.83	4.94
50.0	16	29.17	1.62	40.63	1.74	42.31	1.75
40.0	25	25.24	0.90	34.41	0.97	35.76	0.98
30.0	45	21.37	0.40	28.16	0.44	29.17	0.44
25.0	65	19.50	0.15	25.05	0.17	25.89	0.18
24.0	70	19.14	0.15	24.43	0.17	25.24	0.18
23.0	76	18.78	0.12	23.82	0.14	24.58	0.15
22.0	84	18.42	0.09	23.20	0.11	23.93	0.11
21.0	92	18.07	0.09	22.59	0.11	23.29	0.11
20.0	101	17.73	0.08	21.99	0.09	22.64	0.10
19.0	112	17.39	0.06	21.38	0.08	22.00	0.08
15.0	180	16.12	0.04	19.03	0.05	19.50	0.05
10.0	404	14.79	0.01	16.37	0.02	16.63	0.02

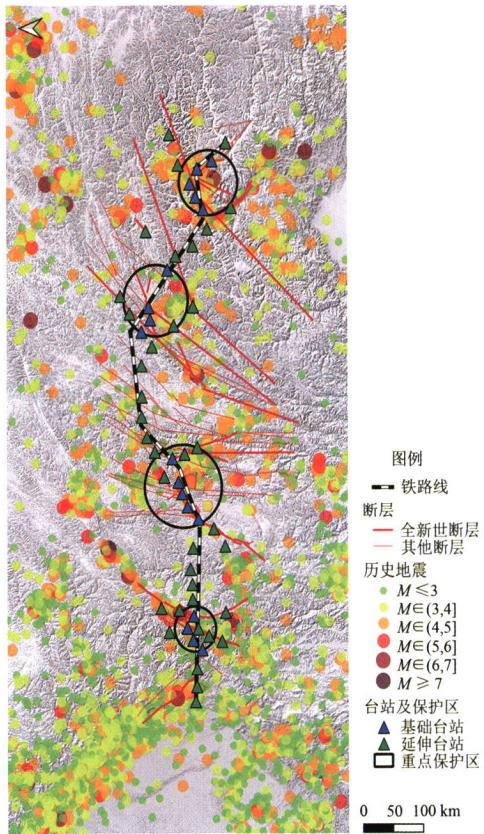


图5 保护区及台站布设位置

2种预警方案下的台站数量分别为19和55个，取该台站与最近3个台站间距的平均值为台间距，得到相应台站信息分别见表2和表3。由表2和表3可知：初期台间距平均值为24.55 km，台间距中位数为21.35 km，台间距不小于20 km的台站占比约78%；中期台间距平均值为28.11 km，台间距中位数为24.99 km；台间距不小于20 km的台站占比约89%。

表2 初期预警方案台间距

编号	台间距/km	编号	台间距/km	编号	台间距/km
1	25.76	7	26.40	13	65.50
2	19.69	8	26.18	14	32.23
3	19.62	9	28.98	15	28.03
4	22.17	10	27.53	16	26.38
5	34.28	11	24.89	17	27.58
6	29.84	12	29.02	18	43.52

表3 中期预警方案台间距

编号	台间距/km	编号	台间距/km	编号	台间距/km
1	20.35	20	20.00	39	31.59
2	20.35	21	22.67	40	46.81
3	20.03	22	24.94	41	22.75
4	20.89	23	29.24	42	22.75
5	26.22	24	29.79	43	26.79
6	22.39	25	44.65	44	22.39
7	18.53	26	28.77	45	22.39
8	18.53	27	31.87	46	22.97
9	36.02	28	23.99	47	31.45
10	22.76	29	20.79	48	24.99
11	17.74	30	22.64	49	24.99
12	17.74	31	32.04	50	29.49
13	62.81	32	27.48	51	29.49
14	21.80	33	29.76	52	32.76
15	21.35	34	39.07	53	24.21
16	21.35	35	41.80	54	31.35
17	26.53	36	59.62	55	34.96
18	26.53	37	29.52		
19	17.94	38	45.38		

3 预警监测能力和时效性评价

3.1 预警监测能力评价

3.1.1 单台理论控制距离

通常,单台监测能力与台站仪器的信噪比有直接关系。王莉娟等^[19]认为预警处理能力与台站运行质量相关。近震震级公式可以计算单台站对不同大小地震的控制距离

$$M_L = \lg\left(\frac{V_s}{2\pi f}\right) + R(\Delta) \quad (2)$$

式中: M_L 为里氏震级; V_s 为地震记录中的平均速度; f 为近震频率,一般取 2~5 Hz; $R(\Delta)$ 为量规函数。

目标铁路所在区域的台站噪声水平近似于强震台站。引用白琳娟^[18]的结论,当 P 波峰值达到强震台背景噪声峰值的 18 倍时,可清晰辨认 P 波震相,认为此时具有预警能力。根据前期工作中对该区域的实测情况,预警监测台站的平均均方根噪声(RMS) 约为 0.05 gal, 将 V_s 代入式(2) 计算不同震级下的量规函数 $R(\Delta)$, 再从量规函数表中查出相应震级下最大震中距,即可得到各台站在相应震级下的最远控制距离^[20~21]。

参照文献[22],以 $R_{13}(\Delta)$ 和 $R_{14}(\Delta)$ 分区中的较小值确定震级量规函数,得到该区域铁路地震预警单台站震级和最远控制距离间对应关系见表4。

表 4 铁路地震预警单台站震级和最远控制距离对应关系

震级/级	最远控制距离/km
2.0	25
2.5	45
3.0	85
3.5	190
4.0	320
4.5	560

3.1.2 预警监测能力

地震台网监测能力是指台网能测定地震震源位置、发震时刻和震级等基本参数的控制区域,一般用不同震级控制范围等值线图的方式表达。白琳娟^[18]定义监测能力是地震台网能够准确测定地震基本参数,并满足一定精度要求的台网控制面积。

将目标铁路的周边研究区域离散网格化,计算每 0.05° 位置上发生能够被系统监测到的地震的震级下限。以初期为单台监测能力的震级下限、中期为 3 台和 4 台监测能力的震级下限,分别给出 2 种预警

方案的监测能力分布,并对区域内历史上发生的不小于 3.0 级地震进行验证,结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知: 初期预警方案下, 系统对于铁路沿线 100 km 范围内绝大部分区域的监测震级下限 M_L 为 2.5; 中期预警方案下, 系统对于铁

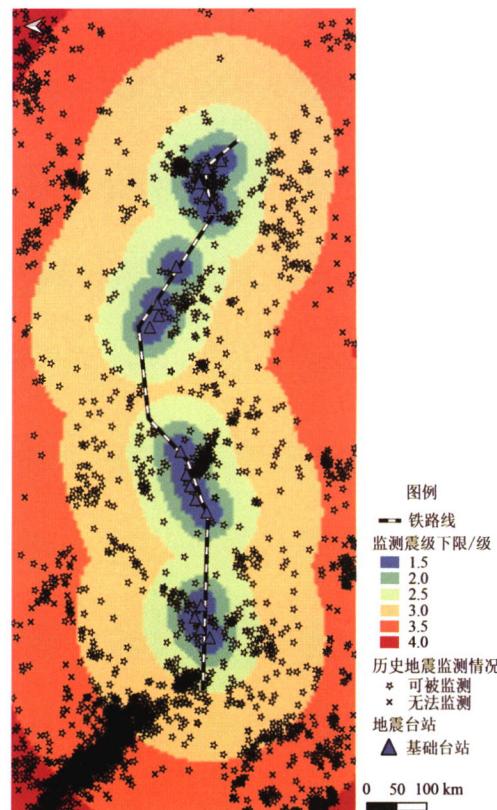
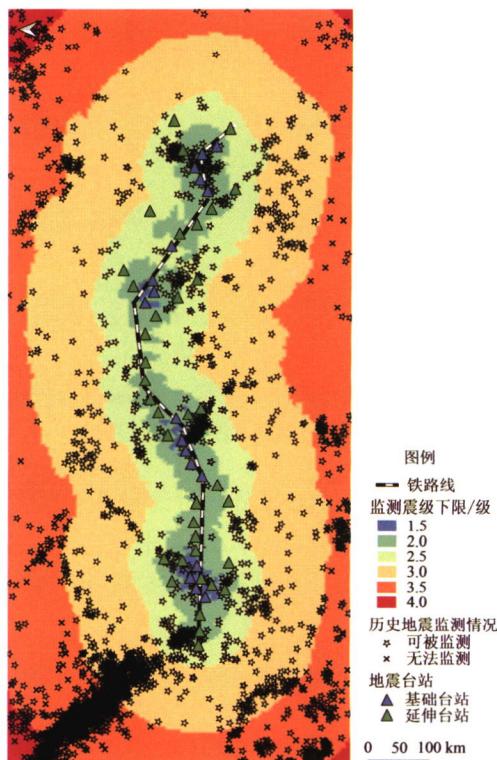


图 6 初期预警方案的监测震级下限分布



(a) 3 台方案

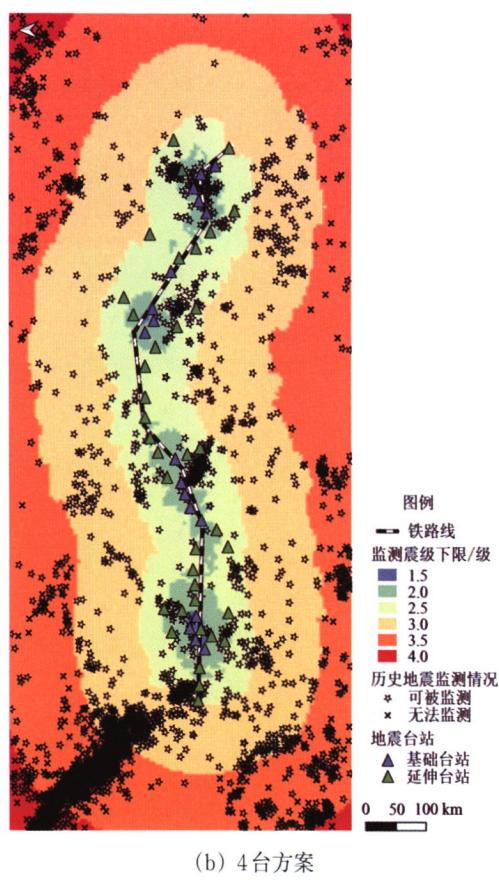


图7 中期3台、4台预警方案监测震级下限分布

路沿线200 km范围内绝大部分区域的监测下限 M_L 为3.0;以上结果均达到了QCR 634—2018《高速铁路地震预警监测系统试验方法》中,系统对于天然地震的监测要求^[23]。

验证区域内历史上发生的所有不小于3.0级地震,结果见表5。由表5可知:76.50%的历史地震可被初期预警方案监测到,80.80%和78.54%的历史地震可被中期3台、4台预警方案监测到;初期和中期预警方案均能监测到所有4级及以上的历史地震,证明提出的所有方案均具备一定的监测能力。

表5 区域内历史地震监测能力 次

震级区间	初期预警方案可监测数	中期预警方案可监测数		历史总数
		3台方案	4台方案	
$M \geq 6$	32	32	32	32
$M \in [5, 6)$	142	142	142	142
$M \in [4, 5)$	1 005	1 005	1 005	1 005
$M \in [3, 4)$	1 224	1 359	1 288	1 962
总计	2 403	2 538	2 467	3 141

3.2 预警时效性评价

3.2.1 不同预警方案下台站时效性

选取预警可用时间 $t_{\text{可用}}$ 作为衡量地震预警系统时效性的指标。定义某地点的预警可用时间为该地点发生地震时目标保护区在当前预警系统下的

获得的逃生时间,即

$$t_{\text{可用}} = \frac{\sqrt{d^2 + h^2}}{v_s} - \frac{\sqrt{d^2 + h^2}}{v_p} - t_{\text{sys}} \quad (3)$$

式中: d 为震中距。

由式(3)可知,预警可用时间越大预警效果越好。预警可用时间又与距离、系统总体时延相关,震源距离监测台站越近、距离目标保护区越远、系统总体时延越小,预警可用时间越大。

将研究区域以0.05°离散网格化,假设每个位置发生1次能够被系统监测到的地震,基于地震动传播理论计算整体预警可用时间分布。计算时,初期预警方案下的目标保护区为4块重点保护区,中期预警方案下为铁路全线; h , v_p , v_s 和 t_{sys} 仍按前文取值。由于断层附近的区域活动性和大震风险均较高,故将断裂带周边区域的震源加密,提高其在整体可用时间平均值计算中的权重。铁路周边区域的总体时效性可通过预警可用时间分布图直观展现。

1) 初期预警方案

根据初期预警方案,计算得到研究区域内的预警可用时间分布如图8所示。图中红色区域代表此处发生的地震对于系统的地震预警可用时间不大于0 s,意味着对应的保护区处于盲区中。相应的初期台站预警可用时间散点分布及平均值如图9所示。图中:预警可用时间取负值表明处于预警盲区,在

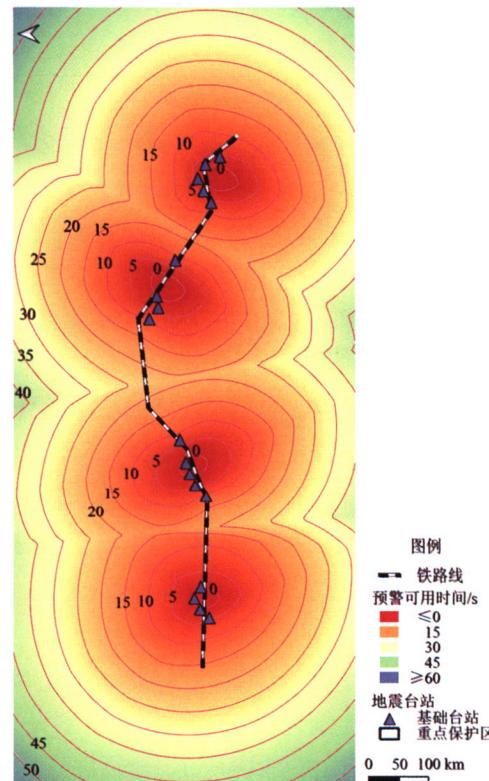


图8 初期预警方案下预警可用时间分布

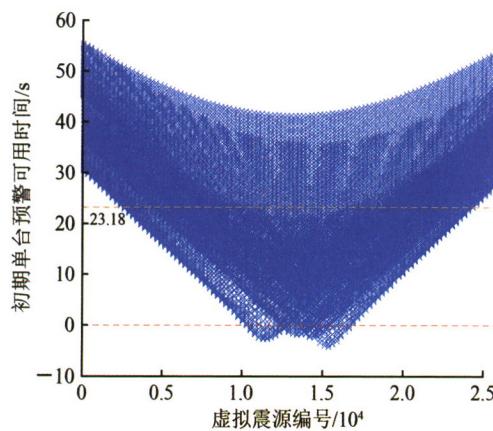


图9 初期预警方案下台站预警可用时间散点分布及平均值

地震波到来之前都无法预警。由图9统计可得，初期预警方案下盲区震源占比约1.10%，整体区域预警可用时间平均值为23.18 s。

2) 中期预警方案

根据中期预警方案计算得到研究区域内的预警可用时间分布，如图10所示。相应的中期预警方案下台站预警可用时间散点分布及平均值如图11所示。统计可得，中期3台、4台预警方案下盲区震源占比分别为12.67%和15.94%，整体区域预警可用时间平均值分别为15.31和13.79 s。由于对中期预警方案的准确性要求高于初期，需要更多的台站接收到地震波，且目标保护区设置为铁路全线最近处，故时效性相比初期单台方案有所降低。

3.2.2 基于历史地震烈度的整体评价

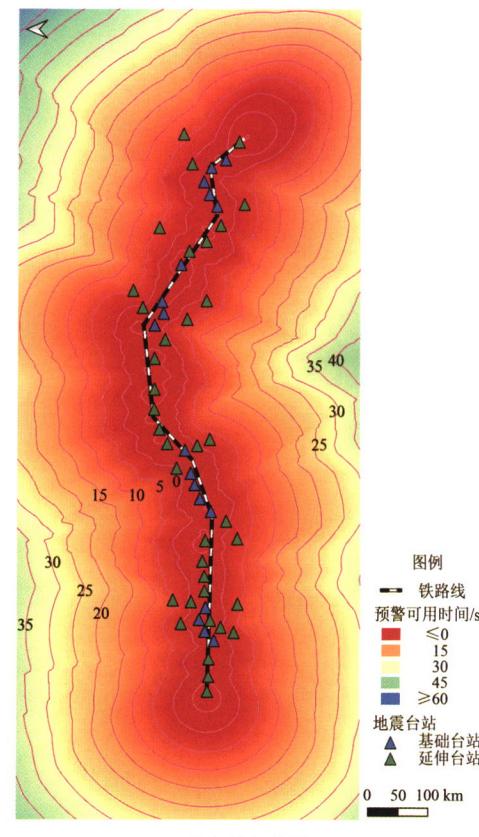
地震烈度表述为地震破坏的程度。一次地震后不同地区的地震烈度不同。根据我国第五代区划图中地震烈度衰减关系（长轴）^[24-25]，基于选取区域4 000余次历史地震记录（去除使目标处于盲区、不能被系统监测到和保护目标烈度小于Ⅱ度的地震），得到保护目标的最大烈度后计算对应预警可用时间，便可反映在某种破坏下预警可用时间的多少。

1) 初期预警方案

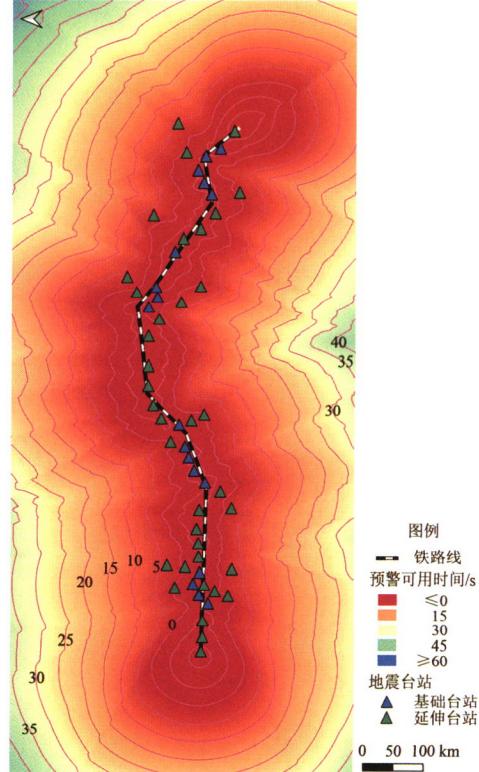
根据初期预警方案，统计不同地震烈度对应的预警可用时间分布见表6，对应的占比累积分布图如图12所示。当目标保护区遭受烈度在Ⅱ~Ⅶ度的地震时，平均预警可用时间为15.84，11.65，8.73，4.06，5.94和8.96 s，总体平均值为12.19 s。

2) 中期预警方案

根据中期预警方案，统计3台和4台方案下不同地震烈度对应的预警可用时间分布分别见表7和表8，对应的分布图如图13所示。当目标保护区遭受烈度在Ⅱ~Ⅶ度的地震时，3台方案的平均预警



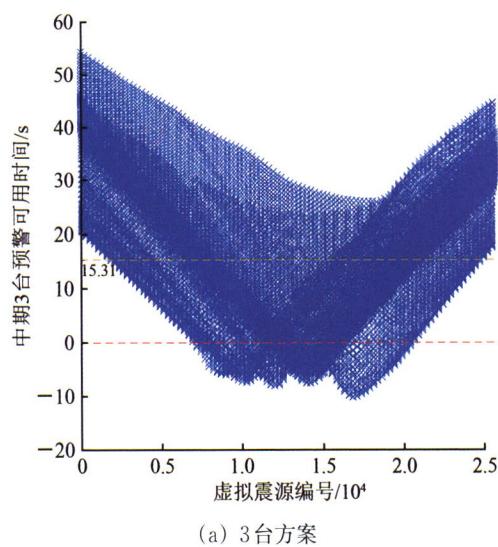
(a) 3台方案



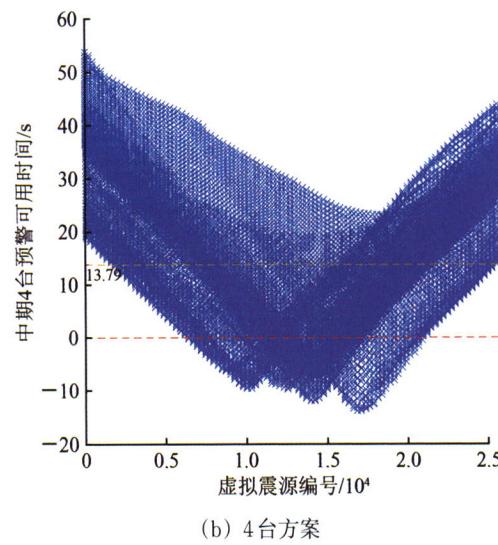
(b) 4台方案

图10 中期3台、4台预警方案下预警可用时间分布

可用时间依次为10.88，8.79，4.98，5.16，4.17和5.88 s，总体平均值为8.62 s；4台方案的平均预警可用时间依次为9.68，8.42，6.14，6.29，4.08和6.46 s，总体平均值为8.47 s。



(a) 3台方案



(b) 4台方案

图11 中期3台、4台预警方案下台站预警可用时间散点分布及平均值

表6 初期预警方案下不同地震烈度对应的预警可用时间分布

地震烈度/度	不同预警可用时间占比/%					平均预警可用时间/s
	≤5	(5,10]	(10,20]	(20,30]	>30	
II	4.25	5.72	14.71	6.37	2.94	15.84
III	10.13	17.16	10.62	4.08	2.94	11.65
VI	6.70	3.43	2.12	1.47	0.49	8.73
V	3.10	1.30	0.49	0	0	4.06
VI	0.98	0.16	0.33	0	0	5.94
VII	0.33	0	0	0.16	0	8.96

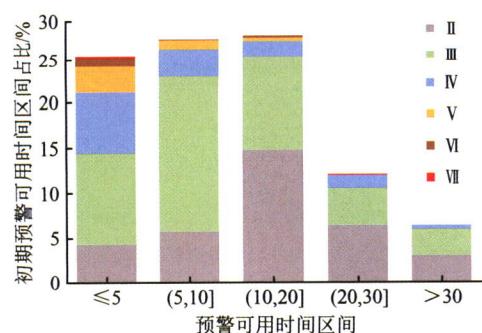


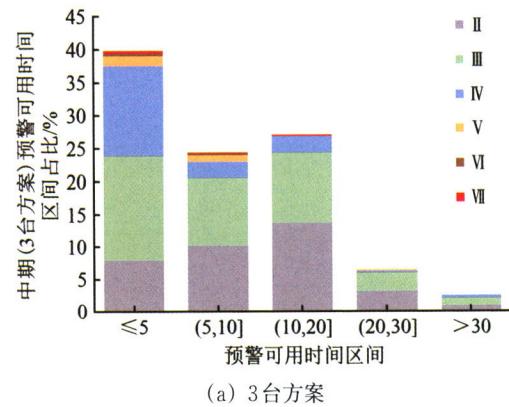
图12 初期预警方案下地震烈度-预警可用时间累积分布

表7 中期3台预警方案下不同地震烈度对应的预警可用时间分布

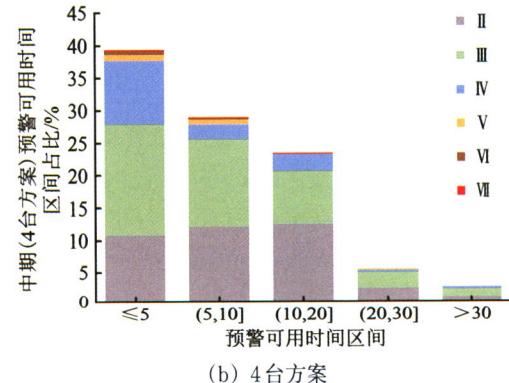
地震烈度/度	不同预警可用时间的占比/%					平均预警可用时间/s
	≤5	(5,10]	(10,20]	(20,30]	>30	
II	7.86	10.15	13.58	3.11	0.82	10.88
III	15.88	10.31	10.64	2.78	1.15	8.79
VI	13.75	2.45	2.62	0.33	0.49	4.98
V	1.47	0.98	0	0.16	0	5.16
VI	0.49	0.33	0	0	0	4.17
VII	0.33	0.16	0.16	0	0	5.88

表8 中期4台预警方案下不同地震烈度对应的预警可用时间分布

地震烈度/度	不同预警可用时间的占比/%					平均预警可用时间/s
	≤5	(5,10]	(10,20]	(20,30]	>30	
II	10.75	12.09	12.48	2.50	0.96	9.68
III	17.08	13.44	8.06	2.50	1.34	8.42
VI	9.79	2.30	2.69	0.38	0.38	6.14
V	0.96	0.77	0	0.19	0	6.29
VI	0.58	0.19	0	0	0	4.08
VII	0.19	0.19	0.19	0	0	6.46



(a) 3台方案



(b) 4台方案

图13 中期3台、4台预警方案下地震烈度-预警可用时间累积分布

综合分析初期和中期预警方案，可以看出：初期采用单台P波预警，即使台站数量较少，仍可获得较大的预警可用时间，总体平均值为12.19 s；

中期预警方案出于准确性考虑，由单台预警调整为3台、4台预警，且目标保护区由4块区域调整为铁路最近处，因区域内大部分东北部历史地震离铁路线较近且离台站过远，故总体平均值反而低于初期预警方案的单台结果，分别为8.62和8.47 s；以上结果表明，基于历史地震，初期和中期预警方案均可起到一定的区域预警效果，可满足工程运用。

国家地震台网在研究区域东部的台站分布十分密集，如接入台网信息参与预警，可获得更好的结果。此外，如果中期采用阈值报警算法，系统延时 t_{sys} 更小^[17]，将获得较大的预警可用时间，在此不做讨论。

4 结 论

(1) 依托某跨越断裂带密集区域的长大干线铁路，提出一种通用性的铁路地震预警系统台站布设方案及预警监测能力和时效性评价方法，可用于确

定沿线台站的合理间距，并对系统的预警监测能力和时效性做出评价。基于该方案得到的初期和中期预警方案均能起到区域预警的效果。

(2) 基于研究区域的历史地震情况，该铁路沿线的合理台间距为平均台间距不应小于20 km。初期预警方案为沿线4个重点保护区的单台预警，合理台间距台站占比约78%；中期预警方案为铁路全线的3台和4台预警，合理台间距台站占比约89%。

(3) 根据单台站的理论控制距离和台网监测能力，初期预警方案可监测到76.50%的历史地震；中期预警方案中，3台方案可监测到80.80%的历史地震，4台方案可监测到78.54%的历史地震。初期和中期预警方案均具备一定的预警监测能力。

(4) 基于地震动传播理论和离散网格虚拟震源法，初期预警方案和中期3台、4台预警方案的理论预警可用时间平均值依次为23.18, 15.31和13.79 s；历史地震下的预警可用时间平均值依次为12.19, 8.62和8.47 s。初期和中期预警方案的区域预警效果均满足工程运用。

参 考 文 献

- [1] 孙文韬.首都圈地震预警系统效能理论分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.
(SUN Wentao. The Performance Evaluation for Earthquake Early Warning System in Capital-Zone of China [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2016. in Chinese)
- [2] 铁瑞,王俊,贾连军,等.强震地震数据统计及其地表破裂特性研究[J].世界地震工程,2016,32(1):112-116.
(TIE Rui, WANG Jun, JIA Lianjun, et al. Data Statistics of Strong-Moderate Earthquake and Characteristics Research of Ground Rupture [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32 (1): 112-116. in Chinese)
- [3] 叶文华,徐锡伟,汪良谋.中国西部强震的地表破裂规模与震级、复发时间间隔关系的研究[J].地震地质,1996,18(1):37-44.
(YE Wenhua, XU Xiwei, WANG Liangmou. Quantitative Relationship between Surface Rupture Parameter, Earthquake Magnitude and Recurrence Interval for Surfacerupturing-Earthquakes in West China [J]. Seismology and Geology, 1996, 18 (1): 37-44. in Chinese)
- [4] 国家铁路局.TB 10671—2019 高速铁路安全防护设计规范[S].北京:中国铁道出版社,2019.
(National Railway Administration of the People's Republic of China. TB 10671—2019 Code for Design of Safety Protection for High-Speed Railway [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019. in Chinese)
- [5] ASHIYA K. Earthquake Alarm Systems in Japan Railways [J]. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, 2004, 4 (3): 112-117.
- [6] DOI K. The Operation and Performance of Earthquake Early Warnings by the Japan Meteorological Agency [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31 (2): 119-126.
- [7] National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (NIED). Strong-Motion Seismograph Networks [EB/OL]. (2018-12-31) [2022-04-13]. <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>.
- [8] YAMADA M, HEATON T, BECK J. Real-Time Estimation of Fault Rupture Extent Using Near-Source Versus Far-Source Classification [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97 (6): 1890-1910.
- [9] 宋晋东,教聪聪,李山有,等.基于地震P波双参数阈值的高速铁路I级地震警报预测方法[J].中国铁道科学,2018,39(1):138-144.
(SONG Jindong, JIAO Congcong, LI Shanyou, et al. Prediction Method of First-Level Earthquake Warning for High

- Speed Railway Based on Two-Parameter Threshold of Seismic P-Wave [J]. China Railway Science, 2018, 39 (1): 138-144. in Chinese)
- [10] 宋晋东,朱景宝,李山有.基于支持向量机的高速铁路地震预警震级连续预测方法[J].中国铁道科学,2021,42(3):156-165.
(SONG Jindong, ZHU Jingbao, LI Shanyou. Continuous Prediction Method of Earthquake Early Warning Magnitude for High-Speed Railway Based on Support Vector Machine [J]. China Railway Science, 2021, 42 (3): 156-165. in Chinese)
- [11] 宋晋东,余聪,李山有.地震预警现地PGV连续预测的最小二乘支持向量机模型[J].地球物理学报,2021,64(2):555-568.
(SONG Jindong, YU Cong, LI Shanyou. Continuous Prediction of Onsite PGV for Earthquake Early Warning Based on Least Squares Support Vector Machine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64 (2): 555-568. in Chinese)
- [12] 刘辰.地震预警模式及预警能力分析方法研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2014.
(LIU Chen. Research of Earthquake Early Warning Mode and Capability Assessment of Earthquake Early Warning [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2014. in Chinese)
- [13] 余思,唐婷婷.江西省测震站网地震预警能力评估初步研究[J].地震科学进展,2021,51(6):246-251.
(YU Si, TANG Tingting. Preliminary Discussion on the Earthquake Early Warning Network of Jiangxi Province [J]. Progress in Earthquake Sciences, 2021, 51 (6): 246-251. in Chinese)
- [14] ALLEN R M. Probabilistic Warning Times for Earthquake Ground Shaking in the San Francisco Bay Area [J]. Seismological Research Letters, 2006, 77 (3): 374-379.
- [15] 中国铁路总公司.Q/CR 633—2018 高速铁路地震预警监测系统技术条件[S].北京:中国铁道出版社,2018.
(China Railway Corporation. Q/CR 633—2018 Technical Specification for High-Speed Railway Earthquake Early-Warning and Monitoring System [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018. in Chinese)
- [16] 宋晋东,朱景宝,刘艳琼,等.基于支持向量机预测模型的高速铁路现地地震预警方法[J].中国铁道科学,2022,43(5):177-187.
(SONG Jindong, ZHU Jingbao, LIU Yanqiong, et al. On-Site Earthquake Early Warning Method for High-Speed Railway Based on Support Vector Machine Prediction Models [J]. China Railway Science, 2022, 43 (5): 177-187. in Chinese)
- [17] 习年生,王澜,马莉,等.高速铁路地震本地监测预警时延特性研究[J].世界地震工程,2017,33(4):94-103.
(XI Niansheng, WANG Lan, MA Li, et al. Characteristic of Time-Delay for On-Site Earthquake Monitoring and Early Warning System of High-Speed Railway [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33 (4): 94-103. in Chinese)
- [18] 白琳娟.区域及高速铁路地震预警系统的效能分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2017.
(BAI Linjuan. The Performance Evaluation for Earthquake Early Warning Systems for Region and High-Speed Railway [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2017. in Chinese)
- [19] 王莉婵,毛国良,李小军,等.2020年7月12日唐山 M_s 5.1地震预警处理能力分析[J].中国地震,2020,36(3):394-406.
(WANG Lichan, MAO Guoliang, LI Xiaojun, et al. The Analysis of Early Warning Processing Capacity for Tangshan M_s 5.1 Earthquake [J]. Earthquake Research in China, 2020, 36 (3): 394-406. in Chinese)
- [20] 彭朝勇,杨建思,薛兵,等.基于汶川主震及余震的预警参数与震级相关性研究[J].地球物理学报,2013,56(10):3404-3415.
(PENG Chaoyong, YANG Jiansi, XUE Bing, et al. Research on Correlation between Early-Warning Parameters and Magnitude for the Wenchuan Earthquake and Its Aftershocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (10): 3404-3415. in Chinese)
- [21] FESTA G, ZOLLO A, LANCIERI M. Earthquake Magnitude Estimation from Early Radiated Energy [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (22): L22307.
- [22] 王丽艳,刘瑞丰,杨辉.全国分区地方性震级量规函数的研究[J].地震学报,2016,38(5):693-702,813.
(WANG Liyan, LIU Rui Feng, YANG Hui. Calibration Function of Local Magnitude for Different Regions in China [J]. Acta Seismologica Sinica, 2016, 38 (5): 693-702, 813. in Chinese)
- [23] 中国铁路总公司.Q/CR 634—2018 高速铁路地震预警监测系统试验方法[S].北京:中国铁道出版社,2018.
(China Railway Corporation. Q/CR 634—2018 Test Method for High-Speed Railway Earthquake Early-Warning and Monitoring System [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018. in Chinese)
- [24] 俞言祥,李山有,肖亮.为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J].震灾防御技术,2013,8(1):24-33.
(YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of Ground Motion Attenuation Relations for the New Seismic

- Hazard Map of China [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2013, 8 (1): 24-33. in Chinese)
- [25] ANASTASOPOULOS I, GEROLYMOS N, DROSOS V, et al. Behaviour of Deep Immersed Tunnel under Combined Normal Fault Rupture Deformation and Subsequent Seismic Shaking [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6 (2): 213-239.

Station Layout Scheme and Evaluation Method of Railway Earthquake Early Warning System Near Fault Zone

SUN Wentao¹, XUAN Yan¹, JIANG Wenxiang¹, WANG Youbiao¹, SONG Bin²

(1. Railway Science & Technology Research & Development Center, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;

2. Benxi Urban Institute of Planning Design, Benxi Liaoning 117000, China)

Abstract: Based on a long trunk railway crossing a dense area of fault zone, a general station layout scheme and evaluation method for railway earthquake early warning system are proposed. Firstly, the distribution model of stations is established by using the average distribution method, and the station layout and early warning scheme for the early and medium-term early warning of the system are determined according to the protected objects in different periods and referring to the radius index of blind area. Then, the early warning and monitoring ability of a single station is estimated theoretically, and that of the system under different early warning schemes is verified according to the historical earthquake data. Finally, the timeliness of different early warning schemes is evaluated. According to the accumulative distribution of intensity-early warning lead time obtained from historical earthquakes, the regional early warning effect is confirmed. The results show that the average spacing of railway station should not be less than 20 km. The early warning scheme can monitor 76.50% of historical earthquakes, and the average early warning lead time of theoretical and historical earthquakes is 23.18 and 12.19 s, respectively. In the medium-term, 80.80% and 78.54% of the historical earthquakes can be monitored by the schemes of three-stations and four-stations, respectively. The average lead time for early warning of theoretical and historical earthquake of the three-stations scheme is 15.31 and 8.62 s, respectively, and that of the four-stations scheme is 13.79 and 8.47 s, respectively. The regional early warning effect of the early and medium-term schemes can meet the engineering application.

Key words: Earthquake early warning; Near fault zone; Station layout; Early warning lead time; Early warning timeliness

(责任编辑 耿枢馨)