

黄俊, 姚运生, 陈志高, 等. 累积绝对速度 CAV 和峰值加速度 PGA 联合报警在高铁地震监测预警中的应用[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 213-216. [Huang Jun, Yao Yunsheng, Chen Zhigao, et al. Application of Standardized Cumulative Absolute Velocity and Peak Ground Acceleration for High-speed Rail Earthquake Monitoring and Early Warning[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(2): 213-216.]

累积绝对速度 CAV 和峰值加速度 PGA 联合报警 在高铁地震监测预警中的应用*

黄俊, 姚运生, 陈志高, 杨江

(中国地震局地震研究所 地震预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: 美国电力研究所 EPRI 在 1991 年通过研究认为累积绝对速度 CAV 对低频震动敏感而对高频震动不敏感, 能很好避免没有破坏性的高频小震报警。简要介绍 CAV 的概念和标准化算法, 并以汶川地震及部分余震数据为例, 分析高铁采用 CAV 参数报警的可行性, 结果表明高铁地震监测预警中 CAV 参数可能会对破坏性小的远震大震报警, 但 CAV 参数和峰值加速度 PGA 参数联合报警能有效地排除近震小震和远震大震对高铁地震报警的干扰。

关键词: 高铁地震监测预警; 报警参数; 标准化 CAV 算法; 峰值加速度

中图分类号: P315.61; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)02-0213-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.039

地震预警系统能在地震动强度达到或超过预警水平时, 在一定的范围内采取适当的方式向正在运行的列车发出地震警报, 使之在破坏性地震波到达之前采取紧急处置手段^[1]。目前我国高铁地震监测预警系统通常将是峰值加速度 PGA 作为控车与否的参数^[2-3], 但峰值加速度只代表地震动的大小, 并不能反映地震的持续破坏能力, 可能会对较大的干扰或峰值大破坏小的高频小震报警。为避免这种干扰的发生, 美国电力研究所 EPRI 在核电地震监测报警设计中认为当反应谱参数和 CAV 阈值同时超出规定的限值, 即认为超出运行基准地震(OBE), 发出报警^[4]。我国三代核电站的地震监测预警系统也考虑采用此种报警方式。由于反应谱一般是在地震动结束之后计算的, 考虑高铁地震报警的实时性, 本文只研究 CAV 作为报警参数的情况。

1 CAV 的概念及标准化 CAV 算法

CAV 的概念由美国电力设计院 EPRI 在 1988 年提出。CAV 最初被定义为加速度绝对值对时间历程的积分。但由于此算法的 CAV 值过于依赖时间历程, 因此 EPRI 在 1991 年提出了标准化的

CAV 算法^[5]。标准化的 CAV 算法如下:

$$CAV_{Total} = CAV_i + \int_{t_{i-1}}^{t_i} |a(t)| dt \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为 1 s 间隔内的加速度, 其中至少有一个值超过 0.025 g; i 取 1, 2, ..., n , n 表示以 s 为单位的记录长度。EPRI 通过处理地震数据, 确定 CAV 潜在破坏阈值为 0.16 (g-sec), 对应的修正的麦加利地震烈度(MMI)为 VII 度。使用标准的 CAV 算法计算 2008 年 5 月 12 日汶川 5.8 级余震理县木卡台东西向记录的地震时程, 结果如图 1 所示。

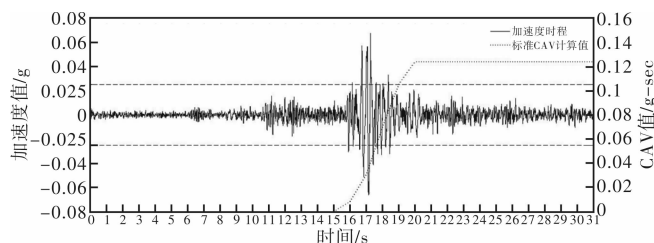


图1 标准 CAV 算法算例

2 我国高铁地震监测预警原理

目前我国已经建设的京津、京沪地震监测预

* 收稿日期: 2013-09-18 修回日期: 2013-11-07

基金项目: 湖北省自然科学基金(2012FFA063); 中国地震局地震研究所所长基金(IS20136001)

作者简介: 黄俊(1986-), 男, 湖北孝感人, 助理工程师, 主要从事地震预警技术研究. E-mail: huang.jun@139.com

警系统，其原理都是在高铁沿线地震基本烈度在Ⅶ度及以上的区段以20~30 km左右的间隔布设地震监测预警台，当沿线地震监测预警台站中相邻的三个地震监测预警台中有两个台检测到的地震加速度值超过0.04 g时即发出地震报警停车，原理示意图如图2所示。这种报警方式优点是易于操作且几乎不会出现误报，即使三个地震台中有一个地震台仪器发生故障不能正常工作依然可以发出报警控车，但是由于是基于多台报警，所以报警延时长，并存在一定漏报风险^[2]。

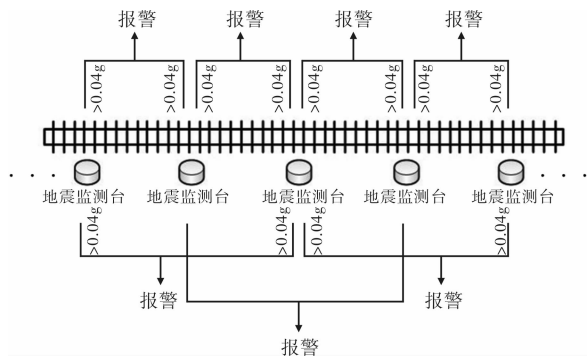


图2 京津、京沪高铁地震监测预警系统原理示意图

3 CAV 参数在高铁地震监测预警的应用分析

3.1 CAV 参数在高铁地震监测预警中的可行性分析

CAV 算法以是否超过0.025 g 作为对加速度积分的条件。经实测京津高铁和京沪高铁沿线变电所的背景噪声，统计得到的背景噪声峰值都未超过0.025 g。并且CAV 算法是一个累积的过程，对于只有若干个加速度值超过0.04g 的高频小震或者噪声干扰，CAV 值会很小。因此CAV 参数可以有效的防止高铁沿线高频小震和其他干扰，可以作为高铁地震监测预警参数。

3.2 CAV 参数在高铁地震监测预警中的报警阈值确定

CAV 参数最先在核电设计提出，0.16 (g·sec) 的报警阈值相当于修正的麦加利地震烈度Ⅶ度，而中国目前高铁地震监测预警设计中假定当自由场监测到的地震动达到0.047 g 时高铁轨道所承受的横向加速度值可达到0.12 g^[6-7]，这时列车可能脱轨，考虑安全因素取报警阈值为0.04 g^[2]。高铁轨道上的列车是以200~300 km/h 的速度运行，相对核电站来说在破坏性地震面前更加脆弱。因此选取CAV 参数作报警参数时不能简单地使用核电地震报警阈值，而应该结合目前高铁地震报警阈

值和国内的地震特性来综合考虑阈值的选取。下文将通过地震数据处理来探讨CAV 值与PGA 值的关系。

3.2.1 数据初选

在2008年发生的汶川8.0级地震中，共有全国的420个台站获得了主震加速度记录，距震中21~1 763 km 均有台站记录到强震数据。而选取的汶川地震部分余震，震级分布为3.8~6.3级，共有629组三分向记录，震中距分布在1~402 km。所选数据能够很好地代表远震小震、远震大震、近震小震和近震大震。选取的地震事件参数见表1。

表1 汶川地震及部分余震数据表

序号	发震时刻			震级		震中	
	年-月-日	时:分:秒	M	纬度/(°)	经度/(°)		
1	2008-05-12	14:28:04	8	31	103.4		
2	2008-05-12	14:36:39	5.8	31.27	103.58		
3	2008-05-12	14:41:55	5.1	32.099	104.65		
4	2008-05-12	14:43:15	6.3	31.27	103.819		
5	2008-05-12	14:54:17	5.8	31.26	103.589		
6	2008-05-12	15:01:34	5.5	31.45	104.489		
7	2008-05-12	15:07:36	6	32.29	104.8		
8	2008-05-12	15:13:45	4.7	31.069	103.339		
9	2008-05-12	15:17:29	4.3	31.12	103.629		
10	2008-05-12	15:22:43	4.7	31.28	102.75		
11	2008-05-12	15:25:19	4.6	31.1	103.48		
12	2008-05-12	15:31:07	4.8	30.899	103.54		
13	2008-05-12	15:34:42	5.8	31.29	103.769		
14	2008-05-12	15:40:07	4.8	31.389	103.73		
15	2008-05-12	15:44:16	4.6	31.34	103.86		
16	2008-05-12	15:45:33	4.7	31.319	103.779		
17	2008-05-12	15:47:29	4.6	31.02	104.209		
18	2008-05-12	15:48:27	4.4	30.979	103.419		
19	2008-05-12	15:58:21	4.3	31.139	103.629		
20	2008-05-12	16:02:19	4.1	31.43	104.3		
21	2008-05-12	16:02:58	4.7	31.829	104.379		
22	2008-05-12	16:08:06	4.3	31.03	103.4		
23	2008-05-12	16:10:57	5.5	31.139	103.599		
24	2008-05-12	16:16:56	4	31.86	104.139		
25	2008-05-12	16:18:49	4.1	31.329	104.04		
26	2008-05-12	16:21:40	5.5	31.53	104.279		
27	2008-05-12	16:26:12	5.1	31.399	104.12		
28	2008-05-12	16:31:39	4	31.17	103.4		
29	2008-05-12	16:35:05	5.2	31.29	103.65		
30	2008-05-12	16:36:26	4.2	31.049	103.22		
31	2008-05-12	16:40:30	4.2	31.379	103.48		
32	2008-05-12	16:41:40	4.1	30.95	103.129		
33	2008-05-12	16:43:28	4.3	31.379	103.4		
34	2008-05-12	16:47:23	5.1	32.159	105.12		
35	2008-05-12	16:49:39	4.2	31.299	103.319		
36	2008-05-12	16:53:36	3.8	32.7	103.33		

续表 1

序 号	发震时刻 年-月-日 时:分:秒	震级 M	震中 纬度/(°) 经度/(°)
37	2008-05-12 16:59:40	4	31.129 103.569
38	2008-05-12 17:06:59	5.2	31.159 103.69
39	2008-05-12 17:19:11	4.5	31.02 103.66
40	2008-05-12 17:23:35	5	32.189 104.919
41	2008-05-12 17:30:55	5.1	32.15 105.209
42	2008-05-12 17:31:15	5.2	31.159 103.559
43	2008-05-12 17:34:54	4.1	30.879 103.199
44	2008-05-12 17:42:24	5.3	31.479 104.129
45	2008-05-12 17:44:57	4.2	31.229 103.43
46	2008-05-12 17:47:46	4.4	31.35 104.05
47	2008-05-12 17:49:51	4.1	31.079 103.809
48	2008-05-12 17:54:53	4.3	31.01 103.41
49	2008-05-12 17:56:55	3.9	31.149 104.26
50	2008-05-12 18:02:36	4.6	32.45 105.22
51	2008-05-12 18:04:05	4.1	31.069 103.269
52	2008-05-12 18:06:12	4	31.479 103.919
53	2008-05-12 18:16:20	4.3	32.33 105.139
54	2008-05-12 18:19:15	4	31.25 103.62
55	2008-05-12 18:23:39	5	30.969 103.48
56	2008-05-12 18:43:12	4.6	31.5 104.11
57	2008-05-12 18:54:17	3.9	31.129 103.879
58	2008-05-12 18:59:22	4.1	30.979 103.62
59	2008-05-12 19:11:01	6.3	31.26 103.669
60	2008-05-12 19:25:55	4	31.299 103.489
61	2008-05-12 19:28:39	4.3	31.29 103.91
62	2008-05-12 19:33:20	5	32.549 105.349
63	2008-05-12 19:41:09	4.8	32.22 105.089
64	2008-05-12 19:45:17	4.5	32.31 105.05
65	2008-05-12 19:52:22	4.7	32.709 105.36
66	2008-05-12 20:01:52	4.4	31.2 103.91
67	2008-05-12 20:04:38	4.3	32.689 105.41
68	2008-05-12 20:06:18	4.4	32.409 105.239
69	2008-05-12 20:06:54	4.4	32.139 104.879
70	2008-05-12 20:09:05	4.3	30.809 103.58
71	2008-05-12 20:11:59	4.3	31.319 104.239
72	2008-05-12 20:13:48	4.3	31.389 103.629
73	2008-05-12 20:15:40	4.9	31.87 104.569
74	2008-05-12 20:17:29	4.1	31.27 103.569

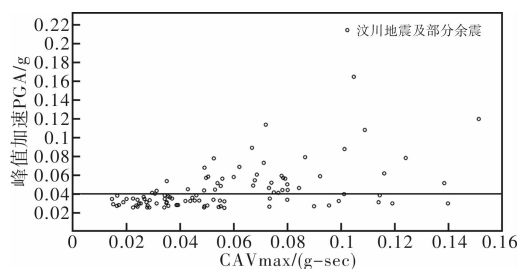
3.2.2 数据筛选

由于峰值加速度小于 0.025 g 的地震 CAV 值为 0, 并且高铁地震监测预警中的 CAV 报警阈值不会超过核电地震监测预警的报警阈值, 为便于分析 CAV 参数的报警阈值, 从汶川地震及余震数据中选取峰值加速度值超过 0.025 g 的三分向数据计算 CAV 值, 定义三分向中最大的 CAV 值为 CAV_{max}, 选取 CAV_{max} 值在 0 ~ 0.16 (g-sec) 的台

站数据供分析使用, 筛选之后共有 103 个三分向数据记录。

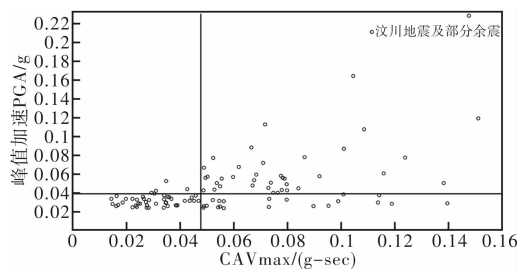
3.2.3 计算结果分析

筛选的 103 个三分向数据峰值加速度值 PGA 和 CAV_{max} 的对应关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出即使是峰值未超过 0.04 g, 也可能产生较大的 CAV 值。这是因为 CAV 值大小与地震的持续时间有关, 远震大震数据能产生峰值不大但长时间超过 0.025 g 的震动, 计算出的 CAV 值较大。在高铁地震监测预警中如果仅用 CAV 值作为报警参数, 可能会对破坏性不大的远震大震报警, 因此 CAV 不能单独作为高铁地震监测预警的报警参数。

图 3 汶川地震及部分余震 CAV_{max} 与 PGA 关系图

3.3 CAV 和 PGA 参数联合报警

将图 3 中 PGA 以 0.04 g 为界, CAV_{max} 以 0.048 (g-sec) 为界作两条直线, 可以将地震明显分为四个区域级别。如图 4 所示, 其中 0 区代表远震小震没有破坏, 1 区代表远震大震对列车有轻度影响, 2 区代表近震小震对列车有轻度影响, 3 区代表近震大震, 对列车有严重破坏。因此在高铁地震监测预警中联合 CAV 和 PGA 两个参数报警, 能有效的排除近震小震和远震大震对高铁地震报警的干扰。PGA 的报警阈值仍设为 0.04 g, CAV 的报警阈值根据图 4 分界线并考虑一定的安全性可以设为 0.045 (g-sec)。

图 4 汶川地震及部分余震分四个区域的 CAV_{max} 与 PGA 关系图

目前高铁地震监测预警中, 虽然对峰值加速度 PGA 超过 0.04 g 的地震报警, 但是报警之后并不知道地震的基本信息。CAV 与 PGA 参数联合报警不仅能提高单台报警的准确率, 还可以通过

CAV 和 PGA 值粗略判断地震的破坏性,从而灵活地采取不同的应急处置措施,如当地震处于 0 区时,可认为地震对列车行驶没有影响继续匀速行驶;当地震处于 1~2 区时,认为地震对列车有轻度影响,需要减速运行;当地震的报警级别为 3 区时,认为地震对列车有严重破坏,需要紧急停车。

4 结论与讨论

用汶川地震及其部分余震数据来证实 CAV 参数在高铁地震监测预警中应用的可能性,结果表明 CAV 参数作为高铁地震监测预警的报警参数可能会对高铁安全运行影响不大的远震大震报警,但联合 PGA 参数可以有效地排除近震小震和远震大震的干扰,并可将地震分为四个区域采取不同的应急处置措施。

CAV 和 PGA 参数联合报警与目前我国高铁监测使用的 PAG 参数报警相比要更加稳定高效,待在高铁路线试验一段时间证明稳定后可以作为单台地震报警参数取代基于 PGA 参数的多台报警方

式。目前 CAV 阈值选取依据来自于汶川地震及余震数据的统计结果,还需要高铁沿线大量的强震数据进行验证,才能得到更加合理的报警阈值。

参考文献:

- [1] 施伟华,崔建文,徐硕,等.快速轨道交通地震减灾对策研究[J].灾害学,2013,28(4):81-88.
- [2] 樊艳,京津城际高速铁路地震监控系统技术方案探讨[J].铁路技术创新,2010(5):116-119.
- [3] 马强,李山有,于海英,等.高速铁路地震防灾系统的应急处置范围确定[J].铁道学报,2013,35(6):110-115.
- [4] Electric Power Research Institute. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake[R]. EPRI Report NP-5930, 1988.
- [5] Electric Power Research Institute. Standardization of the cumulative absolute velocity[R]. EPRI Report TR-100082, 1991.
- [6] 刘林,阎贵平,辛学忠.京沪高速铁路地震预警系统的方案及关键参数研究[J].中国安全科学学报,2002,12(4):75-79.
- [7] 孙汉武,王澜,戴贤春,等.高速铁路地震紧急自动处置系统的研究[J].中国铁道科学,2007,28(5):121-127.

Application of Standardized Cumulative Absolute Velocity and Peak Ground Acceleration for High-speed Rail Earthquake Monitoring and Early Warning

Huang Jun, Yao Yunsheng, Chen Zhigao and Yang Jiang

(Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, China)

Abstract: In the research conducted by America Electric Power Research Institute in 1991, cumulative absolute velocity(CAV) is believed to be sensitive to low frequency vibration nor high frequency vibration, could well avoid alarms of high frequency small earthquakes without destruction. Concept and standardized algorithm of CAV are introduced briefly. Based on Wenchuan earthquake and some of its aftershocks, the feasibility of the application of CAV alarm on high-speed rail earthquake monitoring and early warning is analyzed. Result show that CAV may give an alarm when a larger and farther earthquake happened, but an alarm method which combined CAV and PGA could exclude the interferences of the nearer and smaller earthquakes as well as the larger and farther earthquakes.

Key words: high-speed rail earthquake monitoring and early warning; alarm parameter; standard CAV algorithm; peak acceleration