

中国高速铁路地震预警系统的研究与试验

卢春房, 周黎, 张志方

中国铁路总公司, 北京 100844

摘要 分析了中国高速铁路地震预警系统研发的迫切性, 介绍了地震预警系统最新研究进展和试验验证情况, 明确了地震预警系统的研究目标与预警方法, 提出了地震预警系统的发展方向。

关键词 高速铁路; 地震预警; 地震紧急处置

1 问题的提出

1.1 地震对铁路安全危害巨大

地震是一种发生概率小但对铁路行车安全危害性极大的突发性自然灾害, 特别是当列车运行速度达到 200 km/h 以上时, 地震对路基、桥梁、隧道、轨道等结构的冲击都可能在极短时间内造成十分严重的损失和人员伤亡(图 1^[1-7])。



图 1 地震导致的铁路列车脱轨事件

Fig. 1 Derailment accidents of high-speed railway subject to earthquake

例如, 1995 年发生的阪神地震造成列车脱轨及轨道结构和下部基础的严重破坏; 2004 年 10 月 23 日, 日本新潟发生里氏 6.8 级地震, 造成多辆列车脱轨, 由东京开往新潟的新干线列车(10 节车辆编组)有 8 节车辆发生脱轨; 1976 年发生的唐山大地震, 造成数以万计的人员伤亡和数以亿计的财产损失, 同时导致数辆列车脱轨和多处铁路线路瘫痪; 2008 年 5 月 12 日汶川发生里氏 8.0 级地震, 致使宝成线、成昆线、成渝线等铁路多处塌方, 31 列客车、149 列货车在途中滞留, 沿线部分车站房屋设备遭到不同程度的损坏。为了防止或减轻地震灾害对高速铁路运行和旅客生命财产安全的危害, 世界上拥有高速铁路的国家, 如日本、法国及中国台湾等均建立了地震监控系统^[8]。

1.2 中国高速铁路初期建设地震报警系统

中国位于环太平洋地震带与欧亚地震带之间, 地震活动频度高、强度大、震源浅、分布广, 50% 以上的国土面积位于 VII 度以上的地震高烈度区^[9](图 2)。近年来地震频发, 继 2008 年汶川 8.0 级强震以来, 青海玉树、台湾高雄、新疆和田等地区相继发生了 6.7 级以上地震。在京津、京沪、哈大高速铁路等工程建设的同时, 中国研发了高速铁路地震监测报警系统, 但该系统仅具有阈值报警功能, 各条线路的地震监测报警系统独立且不能互联互通, 报警信息无法共享, 没有与国家地震台网相连, 报警和处置时延长, 不能完全达到高速铁路预警的最终目的。

为实现预警功能, 中国高速铁路在建设初期曾考虑引进消化其他国家和地区的高铁地震预警系统, 但由于中国地震断裂带分布范围大, 高铁线路已经成网, 高速铁路装备技术

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-06-06

作者简介: 卢春房, 教授级高级工程师, 研究方向为铁道科技、铁道建设, 电子信箱: chflu1956@126.com

引用格式: 卢春房, 周黎, 张志方. 中国高速铁路地震预警系统的研究与试验[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 258-264; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.035

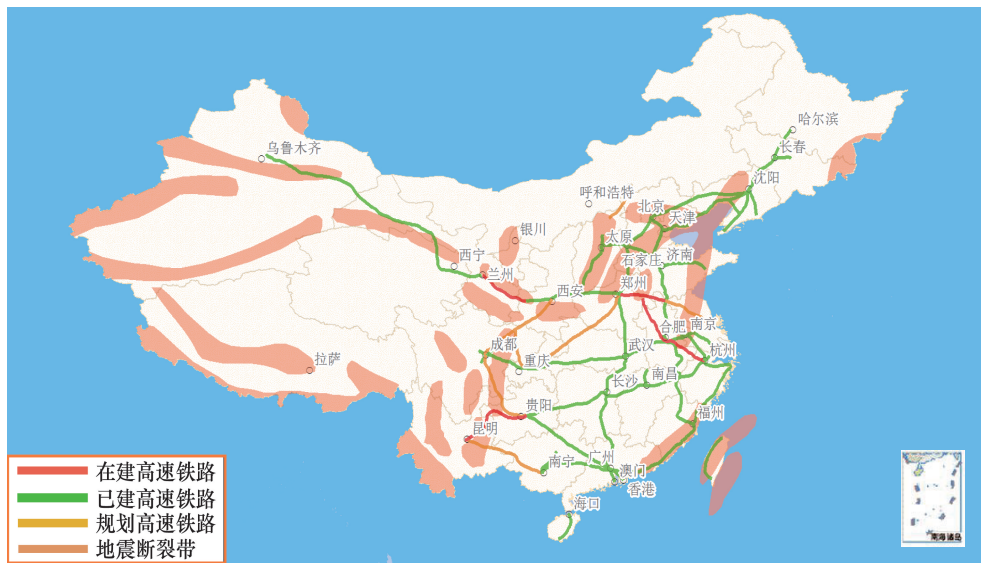


图2 中国主要地震断裂带分布与高速铁路网

Fig. 2 Distribution of earthquake fault zones and high-speed railway networks in China

与日本、法国等国家的接触网过分相技术、列车运行控制系统、轨道电路制式等不同,因此没有现成技术能满足高速铁路地震预警的需求^[7,8],研发满足中国高速铁路实际要求的新一代地震预警系统迫在眉睫。

1.3 高速铁路地震预警基本原理

高速铁路地震预警主要利用震源附近地震台站观测到的地震波初期信息,快速估计地震参数并预测地震对周边地区高速铁路的影响,利用电磁波(速度约30万 km/s)与地震波速度(速度 <7 km/s)差,P(纵向)波(速度5.0~7.0 km/s)与S(横向)波(速度3.2~4.0 km/s)速度差,抢在破坏性地震波(S波)到达周边地区高速铁路之前,发布地震警报信息,向影响范围内的高速铁路提供数秒至数10秒的预警时间,使运行的高速列车能够尽快采取降速或停下等紧急处置措施。

预警方式包括P波预警和现地预警、异地预警。P波预警是利用初至的P波信息快速估算地震基本参数或预测铁路沿线地震动参数,当预测的地震动参数达到或超过给定阈值时发出地震警报信息;现地预警是利用铁路沿线地震台站监测信息向本地铁路发送警报信息;异地预警则是同时接收由政府等公共部门布设的近震源台站所监测到的地震信息,向地震影响范围内的异地铁路发送警报信息。

2 中国高速铁路地震预警系统研究目标

为进一步加强高速铁路防震减灾能力建设,提升高速铁路安全运营水平,原铁道部与中国地震局于2012年2月22日共同签署了《铁道部、中国地震局关于共同推进高速铁路地震安全战略合作协议》,联合成立了“共同推进高速铁路地震安全战略合作协议实施联合领导小组”,组建了由中国铁道科学院和中国地震局工程力学研究所牵头的“高速铁路地震安全技术研发组”(以下简称研发组),2012年7月13日发布

了《高速铁路地震安全战略合作协议实施工作方案》。自此,中国新一代高速铁路地震预警系统的技术攻关有序推进。

根据中国地震断裂带分布及高速铁路运营安全需求,新一代高铁地震预警系统包括地震监测预警及紧急处置两部分。其中,监测预警具备阈值报警、P波预警、现地预警、异地预警等多种监测预警功能,可以实时接收国家地震台网报警和预警信息,地震影响范围内多条高速铁路之间和相邻铁路局之间实现互联互通,地震事件判别尽可能快速且准确;紧急处置快速且可靠,系统的时效性、准确性、误报率等关键技术指标达到世界先进水平,以保证高铁的运营安全或将灾害损失降至最低。

3 研究进展

2013年以来,中国铁路总公司会同中国地震局共同推进高铁地震预警合作,充分发挥各自的科技和资源优势,积极开展技术攻关,实现了技术突破,并取得明显成效。

3.1 顺利完成高铁地震预警系统技术方案

研发组先后研究提出了高速铁路地震监测预警及紧急处置技术方案,包括:地震监测预警方案、铁路局中心系统方案、网络传输方案、数据综合处理分析平台方案等,高铁地震预警系统与相关系统的接口关系见图3。

紧急处置方案(以III级警报为例,见图4)明确了车载装置提示或触发列车制动、列控系统实施紧急防护和接触网断电3种方式,各种处置方式间相互独立,处置级别由低到分为I级、II级和III级,相应的3个级别的报警阈值分别为计测或预测加速度峰值 ≥ 40 、80、120 gal(可设定)。

I级处置范围内,列车车载装置将会语音提示司机手动施加最大常用制动限速运行(暂定160 km/h),从范围外驶向控车范围的列车应在驶达该范围边界时达到规定限速值,驶

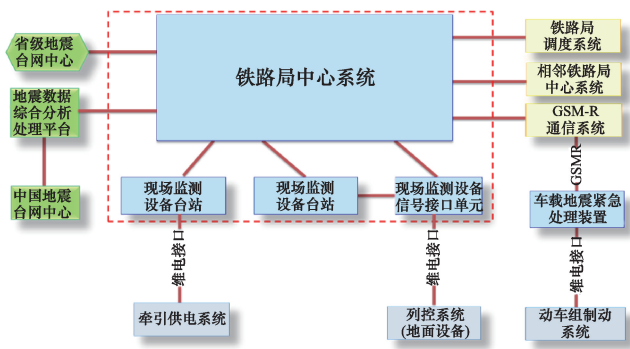


图3 高铁地震预警系统与相关系统的接口示意
Fig. 3 Schematic diagram of interfaces between CRES and related systems

离控车范围的列车则正常行车;II级处置范围内,列车车载装置将触发列车紧急制动,同时列控系统通过地面设备实施紧急防护,从范围外驶向控车范围的列车,根据其距该范围的最小距离进行限速,驶离控车范围的列车则正常行车;III级处置范围内,列车车载装置将触发列车紧急制动,列控系统通过地面设备实施紧急防护,同时接触网断电(图4),从范围外驶向控车范围的列车,根据其距该范围的最小距离进行停车,驶离控车范围的列车按照II级、I级范围相应处置。

系统发出紧急处置信息后,实时接收国家地震台网自动速报和确报等信息,并将实际地震信息向相关系统发送,运输管理部门根据相关规定,遵循相关流程,具备恢复行车条件后,向地震预警系统发送震后恢复命令,地震监测预警系统自动恢复到正常状态,铁路行车按照高速铁路行车有关规定执行。

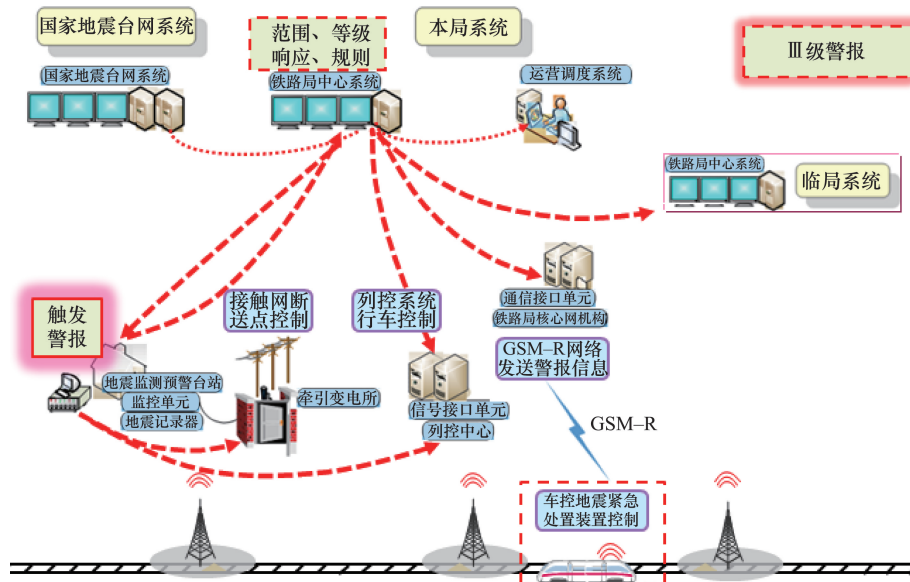


图4 高速铁路地震预警与处置流程
Fig. 4 Process of high-speed railway earthquake early-warning and disposition

3.2 形成高铁地震预警系统技术标准体系

先后制定了《高速铁路地震监测预警系统暂行技术要求》《高速铁路地震监测预警系统暂行试验办法》《车载地震紧急处置系统暂行技术条件》《车载地震紧急处置系统暂行试验办法》及《中国高速铁路地震预警系统型号编制规则》,技术标准体系基本形成,为高铁地震预警系统的研发、试验、工程建设及运营维护提供了技术依据。

3.3 P波预警技术取得重大进展

P波预警技术事关预警系统的时效性,实际价值最高。研发组在充分吸收国内外相关研究的基础上,结合高铁实际,在P波震相自动识别、震中方位角、震中距估算、震级估算、区域台网的地震预警定位、震级的连续估算、地震动场的预测方法等方面取得进展(图5~图8)。通过福厦线、成灌线

及大西线,开展了多种P波预警算法软件的对比试验,单台、多台P波预警功能已经实现。

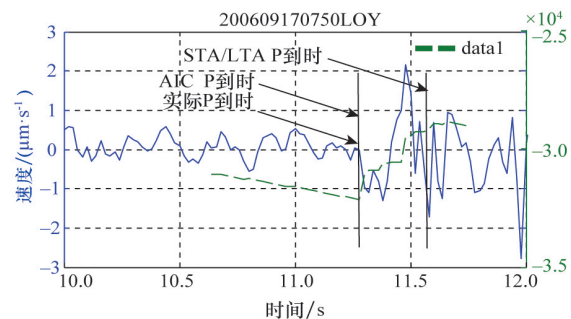


图5 P波震相自动识别技术
Fig. 5 Automatic identification skill of seismic phase of P wave

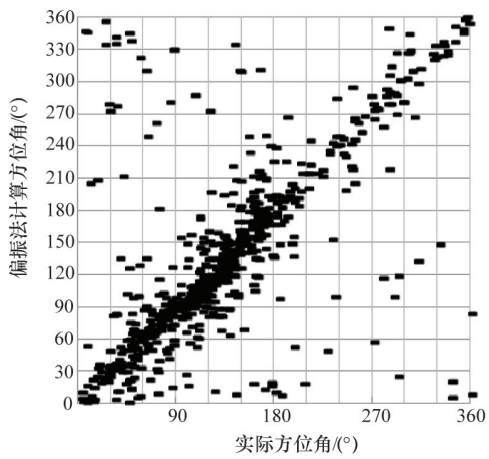


图6 震中方位角估算

Fig. 6 Estimation of azimuthal angle of epicenter

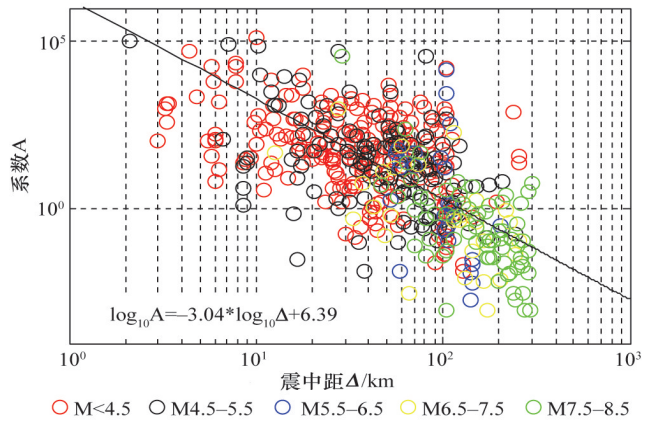


图7 震中距估算

Fig. 7 Estimation of epicenter distance

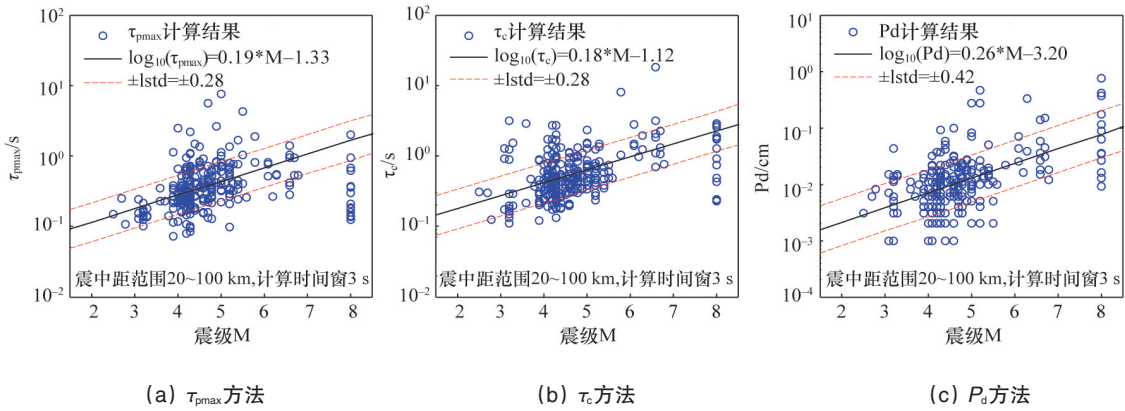


图8 3种估算震级方法的结果对比

Fig. 8 Comparisons of the results by three methods to calculate earthquake magnitude

3.4 高铁地震预警系统样机研发成功

在突破大量关键技术的基础上,研发组解决了高铁地震预警系统与牵引供电系统、信号系统、地震台网中心、GSM-R

网络系统接口问题,成功研发了高速铁路地震预警系统样机,主要包括现场监测设备(图9)、铁路局中心系统(图10)及车载地震紧急处置装置(图11)。

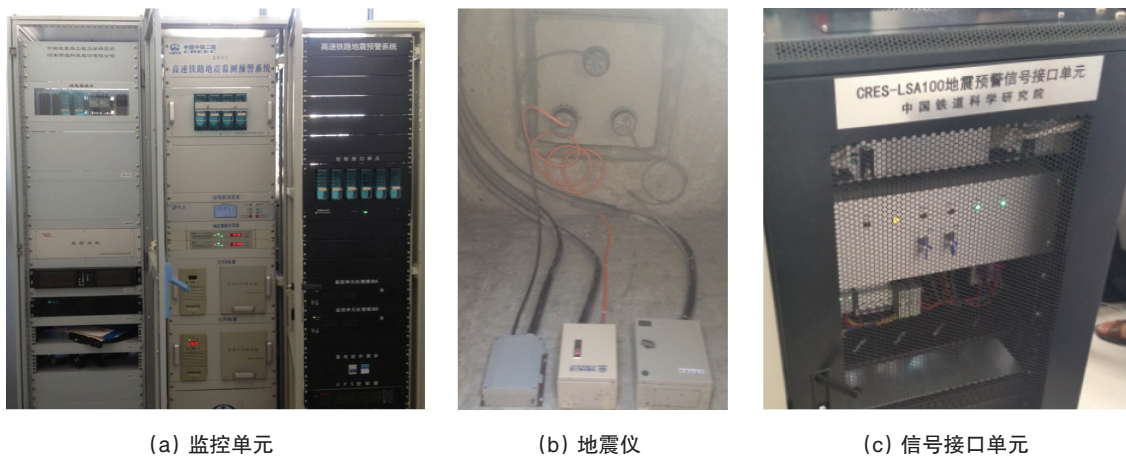


图9 现场监测设备

Fig. 9 On-site monitoring devices

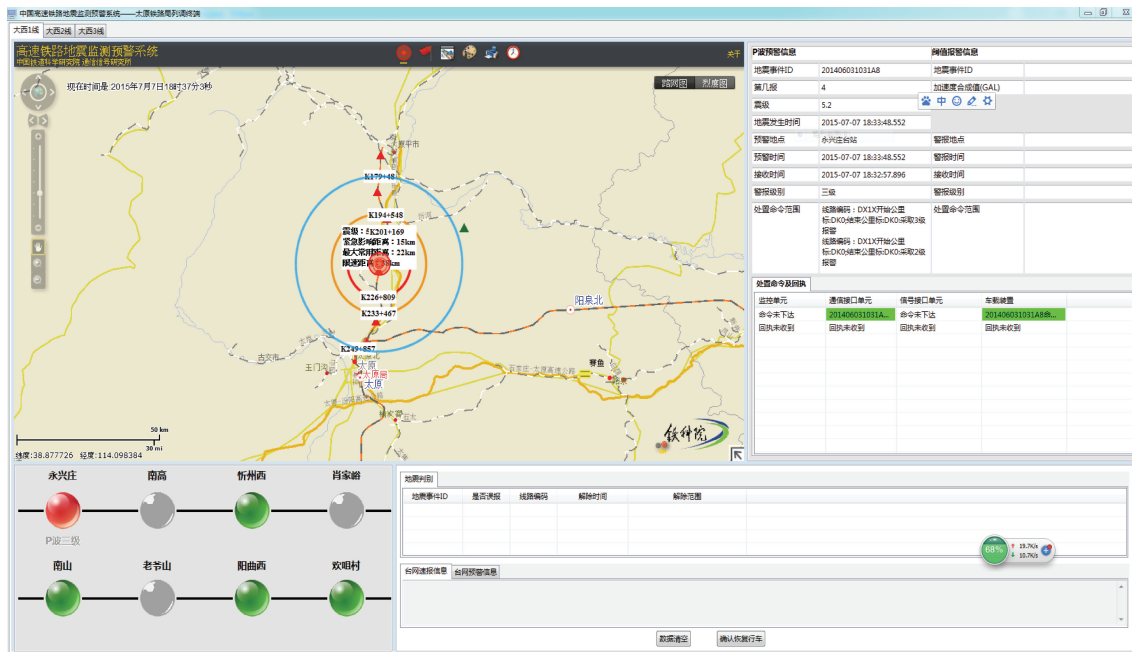
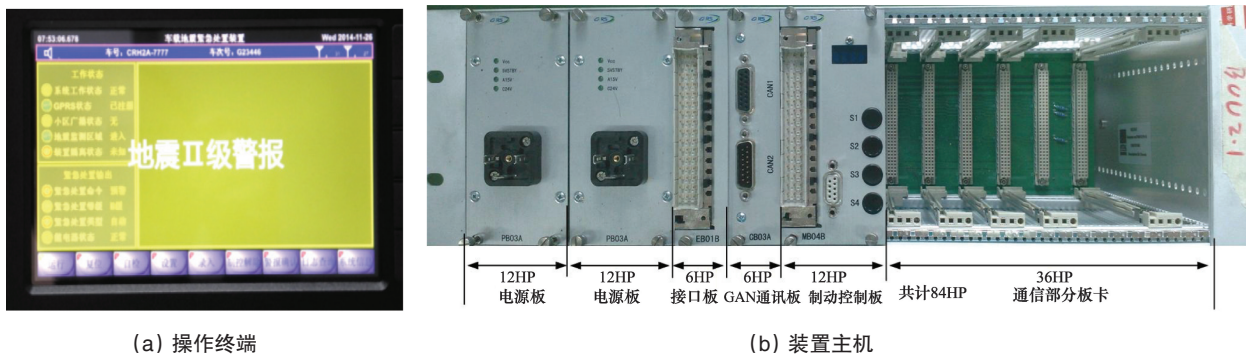


图 10 铁路局中心系统的调度终端

Fig. 10 Train dispatching terminal of railway administration central system



(a) 操作终端

(b) 装置主机

图 11 车载地震紧急处置装置

Fig. 11 On-board earthquake emergency treatment device

现场监测设备设置在铁路沿线牵引变电所、分区所、AT所、通信中继站和列控中心附近,由地震仪、监控单元、信号接口单元、网络通信设备及电源等配套设备组成;铁路局中心系统包括地震监测预警信息系统和通信接口单元两大部分,图 10 显示了铁路局中心系统的调度终端,主要包括地震发生时刻、预警时间、报警时间、处置等级、处置范围等信息;车载地震紧急处置装置主要包括操作终端和装置主机,前者安装于司机驾驶室,后者设置于设备间。

4 试验进展

高铁地震预警系统试验分为 2 个阶段:第 1 阶段包括室内试验、福厦线和成灌线现场试验,重点针对监测预警系统的各项功能和性能进行优化比选,为后续开展的全系统控车试验奠定基础;第 2 阶段安排在大西高铁试验段进行,系统开

展高铁地震监测预警系统及车载紧急处置实车试验验证,为完善系统及相关技术标准提供支持。

4.1 第 1 阶段试验完成情况

室内试验通过全国范围内公开征集确定了 7 家参加单位,主要实验内容包括地震动模拟、环境振动干扰模拟、电磁兼容和雷电干扰试验。通过试验(图 12)摸清了国内地震监测预警系统的技术现状,发现并解决了地震监测预警设备在 S 波报警、P 波预警功能及设备抗干扰等方面存在的问题。2013 年 8 月,室内试验结果得到评审,通过“公开、公平、公正”的测试评价,优选出 4 家单位开展现场试验。

第 1 阶段现场试验先后选择福厦线和成灌线进行。在福厦线东源牵引变电所、莆田分区所、散溪山 AT 所设置了监测台站,并在莆田分区所搭建了集多条高铁线路为一体的模拟铁路局中心系统,完成了 3 次环境干扰测试、辅助功能模拟测



图 12 振动台试验

Fig. 12 Shaking table test

试、设备故障模拟试验及预警功能验证试验,实现了与省级台网中心的预警信息接入。在成灌线沿线建设了青城山、崇义2个台站,并接入了郫县地震台站数据、四川省地震台网中心的速报数据、成都高新减灾所的预警数据,完成了9次现场模拟试验。通过试验发现并解决了P波地震参数快速确定、紧急处置指令发布、警报影响范围快速确定、地震警报信息综合显示、地震数据远程监控及分析统计等方面存在的问题。2015年2月,对高铁地震监测预警系统成灌线试验结果进行专家评审,专家一致认为试验内容全面、试验方法正确,过程公开透明,结果真实可信,在成灌线4家参试单位中按照综合得分排序,择优选取3家单位进入大西线高铁地震预警系统试验。

4.2 第2阶段系统试验进展情况

第2阶段现场系统试验在大西线综合试验段进行。在大西线布设忻州西、阳曲西牵引变电所、永兴庄、南山分区所和欢咀村AT所5个台站,每个台站同时设置3个单位的3套现场监测设备,太原铁路局中心系统设在太原铁路局信息机房,接入山西省地震台网中心及大同、晋祠、临汾3个地震台站,同时在忻州西站设置模拟相邻铁路局中心系统(图13),在两列中国标准动车组分别安装车载地震紧急处置装置。

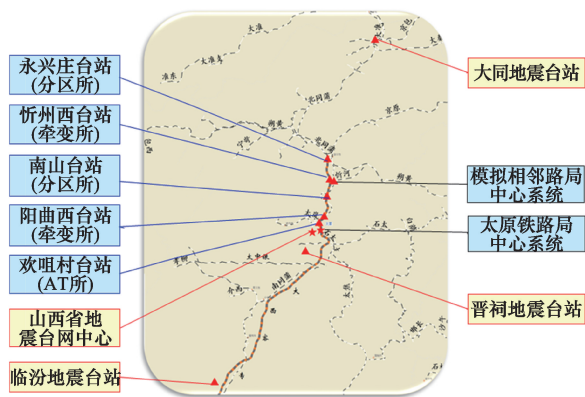


图 13 大西线地震预警系统各部分分布情况

Fig. 13 Distribution of all parts of Daxi high-speed railway earthquake early-warning system

截至2016年2月底,先后开展了3次单台站试验、8次多台站试验、4次牵引系统接口试验、5次列控系统接口试验、2次车载地震紧急处置装置单独控车试验,1次全系统的实车验证试验。通过试验发现并解决了多项技术问题,提升了地震预警系统的性能指标。

4.3 天然地震监测预警情况

在非模拟试验期间,福厦线、成灌线及大西线同时开展天然地震监测,多次成功实现预警。2014年11月22日,康定地震(6.3级,震中距205 km)在S波到达前23.4 s发出P波预警信息;2015年1月14日,乐山地震(5.0级,震中距182 km)在S波到达前20.7 s发出P波预警信息;2015年12月10日,原平地震(3.2级,震中距阳曲西台站77 km)在S波到达前7.032 s发出预警信息。通过天然地震监测试验发现并解决了P波预警准确性问题,优化了地震事件识别后紧急处置范围和方式。

5 结论

通过技术攻关,完成了高速铁路地震监测预警及紧急处置的顶层设计,明确了符合中国高速铁路地震特点的地震监测预警及紧急处置技术方案,突破了地震预警方法等一系列关键技术,自主研发了铁路局中心系统、接口单元、车载地震紧急处置装置等相关配套的软硬件,制定了相关技术条件、试验办法等成套技术标准,建立了地震波数据库,开展了大量的高速铁路地震预警系统试验验证。结果表明,高铁地震预警系统的功能已经全部实现,现场监测设备、铁路局中心系统、车载地震紧急处置装置、CRES与GSM-R、列控、牵引供电、省地震台网中心等相关系统接口功能均满足技术要求规定。

参考文献(References)

- [1] 栗林荣一, 蔡之瑞. 1995年1月17日本神户地震兵库县南部地震调查报告[J]. 世界地震工程, 1995(2):63-73.
Li Linrongyi, Cai Zhirui. Japan's earthquake in Kobe of Uanuary 17, 1995[J]. World Earthquake Engineering, 1995(2):63-73.
- [2] 彭岩, 朱传镇. 1995年1月17日本兵库县南部地震概况综述[J]. 国际地震动态, 1995(3): 6-12.
Peng Yan, Zhu Chuanzhen. An overview of the earthquake occurring in the south of Hyogo prefecture, Japan[J]. Recent Developments in World Seismology, 1995(3): 6-12.
- [3] 崔秋文. 新潟6.8级地震综述[J]. 防灾博览, 2004(6): 11-16.
Cui Qiuwen. 6.8 magnitude earthquake summary on Niigata[J]. Overview of Disaster Prevention. 2004(6): 11-16.
- [4] 刘如山, 林均歧, 郭恩栋. 日本新潟中越地震震况及抗震救灾的经验教训[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(2): 23-28.
Liu Rushan, Lin Junqi, Guo Endong. Survey of mid niigata earthquake in Japan and the experience and lesson from earthquake resistance and disaster relief[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(2): 23-28.
- [5] 铁道部大桥局桥梁抗震抢修组. 唐山-丰南地震六座铁路桥梁抗震抢修工作情况简介[J]. 桥梁建设, 1976, (6).
- [6] 丁剑霆, 姜淑珍, 包峰. 唐山地震桥梁震害回顾[J]. 世界地震工程,

- 2006, 22(1): 68-71.
Ding Jianfeng, Jiang Shuzhen, Bao Feng. Review of seismic damage to bridges in Tangshan earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(1): 68-71.
- [7] 高速铁路地震安全技术研发组. 高速铁路地震监测预警系统调研分析[R]. 北京:中国铁道科学研究院, 2012.
High-speed railway seismic safety technology research group. High-speed railway earthquake monitoring and warning system research and analysis[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012.
- [8] 张志方. 我国高速铁路地震预警技术的创新与思考[J]. 中国铁路, 2014(6): 24-27.
Zhang Zhifang. Innovation and consideration of earthquake early warning technology of high-speed railway[J]. Chinese Railways, 2014(6): 24-27.
- [9] 李祥根. 中国地震构造运动[M]. 北京:地震出版社, 2010.
Li Xianggen. China earthquake tectonic movement[M]. Beijing: Seismological Press, 2010.

Research and test on China high-speed railway earthquake early-warning system

LU Chunfang, ZHOU Li, ZHANG Zhifang

China Railways Corporation, Beijing 100844, China

Abstract The urgent development target of the China high-speed railway earthquake early-warning system (CRES) is analyzed, and the latest progress on the research and test verification are introduced in this article. At the same time, the research target and early-warning methods are described. Based on the breakthrough of P wave early-warning method and earthquake emergency treatment method, the reasonability of CRES has been verified by laboratory experiment, and field tests on Fuxia high speed railway (Fuzhou-Xiamen), Chengguan high speed railway (Chengdu-Guanxian), and Daxi high speed railway (Datong-Xian), as well as by the field experience about natural earthquake. The results show that its functionality and performance can meet the corresponding requirements, and that the stage target is reached. At last, the development direction is proposed.

Keywords high-speed railway; earthquake early-warning; earthquake emergency disposal

(编辑 韩丹岫)