

多分量地震监测系统 AETA 的研究与实现

王新安^{1,†} 雍珊珊¹ 徐伯星¹ 梁意文² 白志强¹ 安辉耀¹ 张兴³ 黄继攀¹
谢峥¹ 林科¹ 何春舅¹ 李秋平¹

1. 北京大学深圳研究生院集成微系统科学与工程与应用重点实验室, 深圳 518055; 2. 武汉大学计算机技术学院, 武汉 430072; 3. 北京大学信息科学技术学院, 北京 100871; † E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

摘要 研制多分量地震监测系统 AETA (acoustic & electro-magnetic testing all in one system)。在云南、四川、西藏、河北、北京、广东等地区的现场实验表明, 该系统能够满足大区域密集布设中高灵敏度、低成本和易布设的需求。同时, 若干点的实验观测数据和均值、振铃率、峰值频率在一定程度上反映了映震效果。目前正在中国西南部、首都圈、台湾海峡等地区密集布设, 系统地开展映震效果研究。

关键词 地震监测; 电磁扰动; 地声; 地震前兆; 临震预测

中图分类号 TN492

Research and Implementation of Multi-component Seismic Monitoring System AETA

WANG Xin'an^{1,†}, YONG Shanshan¹, XU Boxing¹, LIANG Yiwen², BAI Zhiqiang¹, AN Huiyao¹,
ZHANG Xing³, HUANG Jipan¹, XIE Zheng¹, LIN Ke¹, HE Chunjiu¹, LI Qiuping¹

1. The Key Laboratory of Integrated Micro-systems Science and Engineering Applications, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. Computer School of Wuhan University, Wuhan 430072; 3. School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871; † E-mail: anxinwang@pku.edu.cn

Abstract The authors introduce the multi-component seismic monitoring system AETA (acoustic & electro-magnetic testing all in one system). The results of experiments in Yunnan, Sichuan, Tibet, Hebei, Beijing and Guangdong prove that the system AETA has the proper sensitivity with low cost and is easy to be installed. Meanwhile, the raw data and feature data refined from raw data have a good indication of earthquake. More subsequent experiments will be organized in west of China, capital circle of China and Taiwan Strait for deep research on effect of prediction.

Key words earthquake monitoring; electromagnetic disturbance; geo-sound; earthquake precursory; imminent earthquake forecast

地震预报指在地震发生前比较准确地预报地点、时间和震级(即地震三要素)。地震预报能够极大地避免大地震在未知的情况下发生所造成的人员伤亡, 因此有关地震预报的研究一直备受关注^[1-5]。国内外的地震学者通过研究地质构造和地壳运动等, 并借助信息科学的发展研制观测仪器, 建立观测体系, 期望发现地震的机理^[6-11]。但是,

目前仍然没有探索出一种可靠的地震预报方法, 地震预报任重而道远。

地震监测是探测地震发生前、发生时以及发生后地球发出的一些信号, 尤其是地震发生前信号(也称为前兆信号)的异常变化^[12-15], 并研究这些信号与地震的关系(包括但不限于因果关系), 从而预测地震的发生。马宗晋等^[16]总结了李四光关于地

应力变化与地震密切相关的有关论述。1966年,我国正式采用钻孔观测地应力变化^[17-18],并逐渐推广。邱泽华等^[19]和池顺良^[20]发明钻孔应变仪,并在四川姑咱山洞观测台探测到汶川大地震清晰的、长时间的应变前兆信号。随着空间技术的发展,利用全球定位系统(GPS)^[21-23]、卫星孔径雷达干涉测量技术(InSAR)等观测方法^[24],可以快速地观测到区域地壳形变。地震前地下流体的物理和化学性质异常也是重要的观测量(如水位、水温、水氡和水汞含量等),在很多历史震例中均观测到地下流体的异常^[25]。地震前的电磁异常也是非常重要的观测量,国内开展的岩石破裂实验也证实地震活动产生电磁现象^[26],地震台网已将地电阻率和地电场的观测纳入常规观测项目,并在多次实际震例中观测到异常现象^[27-29]。

地震监测技术涉及的地震前兆信号类型较多,监测仪器多种多样,监测指标注重高性能和高环境要求,使得地震监测设备受安装环境、安装成本、设备性能稳定性、一致性和可靠性等因素限制,难以高密度地布设和推广,并进行系统性试验。虽然现有的常规地震观测的前兆分量在多次历史震例中均有异常情况出现,但由于观测台站有限以及异常现象不一致,难以相互佐证,无法确定该分量的异常与地震发生的关系。

本文认为,地震发生时在震中区域有很大的能量释放,处于前震中的地区及其附近更大的区域,多种前兆信号都可能非常明显,只是由于地质构造不同,导致地震的异常信号在不同区域的表现可能不完全一致。但是,如果监测区域和监测密度足够大,有可能捕获比较一致的前兆异常信号,从而进行地震预测。鉴于上述情况,本文提出一种能够支持大区域、高密度布设的多分量地震监测系统——AETA (acoustic & electro-magnetic testing all in one system)系统。

1 地震前兆监测分量选择

大区域、高密度地布设地震监测设备的前提是降低对环境的要求,降低设备的成本,提升设备的可靠性和一致性。监测分量的选定和技术指标的制定是基于映震效果、系统成本、环境要求等因素的综合考量。

中国是一个历史悠久、陆地面积大、地震多的国家,每一次大地震的发生,都有较完整的宏观异

常现象记载,可归纳为多种动物异常、强烈地声、地下水异常和天气异常等^[30-32]。但是,不同地点的大地震,宏观异常现象可能不同,或者没有宏观异常现象也发生大地震,或者有宏观异常现象而没有发生大地震^[33]。本文认为,不同观测点到震中之间的地质体(或孕震体)地质构造不同会导致震前宏观异常现象不同。

地震的孕育和发生是地下巨大的能量活动过程,在这个活动过程中,会有物理(声、光、电等)和化学(气体等)形态的信号分量产生或者发生相对变化,物理和化学形态的信号分量的异常均可以作为前兆监测的目标分量,不同的观测量对应不同的监测系统。

地声是一个重要的监测量。国内外有一些关于次声与地震关系的研究^[34-36],有关地声的研究不多。我们认为地声的频段不仅限于次声波段。另外,我国历史上记载的多次大地震,震前都有地声出现。但是,由于没有仪器记录,这些重要的历史地震记载不被国外研究者认同。

国内研究者在早期的地声监测研究中发现,震前地声存在密集→平静的现象,这与地声发生的频率相关。地声声源不是一个点源,而是分布在孕震体上的体源,具有一定的走向和范围。不同地区地震发生时的地声前兆异常不同,其原因可以归结于地质构造不同和观测点不同。岩石破裂实验表明,岩石破裂时发出的声信号和电磁信号与岩石的岩性、强度以及含水量等因素有关^[37],而震中区域与观测点之间的地质构造更加复杂。我们认为,可以将震中区域与观测点之间的地质构造视为一个滤波器,它会影响到地声的强度和频率。因此,多个观测点覆盖震中区域的长期观测具有重要价值。

电磁扰动作为一种短临预报的手段,也是一个重要的监测量。从20世纪70年代中期开始,对此一直有研究。实验数据也显示,电磁扰动存在“弱—强—弱”的变化过程,一般在电磁扰动异常消失时发震,对电磁扰动的监测属于临震监测,所以有可能从震前电磁波辐射信号中提取短期临震前兆信息^[38-39]。对地震电磁辐射异常的监测以超低频为主,也覆盖极低频和甚低频^[27,40]。对电磁扰动的监测多采用电磁感应式传感器。国内外很多研究机构均有性能很好的传感器,但出于没有系统地证明其映震效果以及指标不统一等原因,目前没有纳入我国地震观测常规仪器采购清单^[41-42]。本文认为电磁扰

动的监测指标应涵盖低频至高频,以宽频带为重点进行实验研究。

本研究专注于地声和电磁扰动两个分量的监测。基于成本和布设等原因,对其他有意义的监测量(如地应力、氦气等惰性气体)暂时没有考虑。

2 监测系统设计

2.1 系统设计指标

首先,以产生好的映震效果为标准定义系统技术指标。其次是较低的成本,包括制造、布设和运维成本。

第一个需要定义的是电磁和地声的监测指标,是否需要考虑垂直、水平东西、水平南北3个方向的监测。目前,地震仪器(如应力仪)通常考虑3个方向,希望依据3个方向来定位,但这样对仪器和布设的要求比较高,两者的成本都高达几十万人民币,带来较大的实施代价。本文认为,从孕震中心区到一个地表点,地震前兆信号经过构造不同的地质体,不一定具有唯一的方向性,更可能是多向性。如图1所示,系统的定位取决于一个区域多点的信号异常变化。本系统只考虑一个大致方向,按垂直方向布设。

第2个指标是系统的灵敏度,也是影响仪器和布设成本的重要因素。目前,地震仪器基本上都有极高的灵敏度(如纳米级形变监测、 0.0001°C 温度

分辨率),有些指标的实现是基于理论推导,技术上能否实现有待商榷。我们以能够监测不发生地震时的正常信号波动为参考指标,定义系统的灵敏度。我们认为大地震的前兆异常高于正常波动值,同时结合历史震例中观察到的异常信号,制定地声的灵敏度为 1 Pa ,即在系统的最小分辨率下可识别 1 Pa 强度的变化。电磁扰动的灵敏度制定为在观测频段范围内 1 nT 的信号,即系统分辨率可识别 1 nT 的变化。

第3个指标是电磁的频段和地声的频率监测范围。在不显著增加仪器、布设和运维成本的前提下,尽可能覆盖较大的范围。据此,确定地声监测频段为 $0.1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$,电磁扰动监测频段为 $0.1\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$ 。

综上所述,多分量地震监测系统 AETA 的传感探头监测指标定义如下。

1) 地声传感探头:监测频段为 $0.1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$,从次声波、声波到部分超声波波段,灵敏度为 $3\text{ LSB/pa}@0.1\text{ Hz}\sim 50\text{ kHz}$,18位分辨率,采样率为低频 500 Hz ,全频 150 kHz 。

2) 电磁传感探头:监测 $0.1\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$, $0.1\sim 1000\text{ nT}$ 较宽动态范围的甚低频、超低频电磁波段,灵敏度 $>20\text{ mV/nT}@0.1\text{ Hz}\sim 10\text{ kHz}$,18位分辨率,采样率为低频 500 Hz ,全频 30 kHz 。

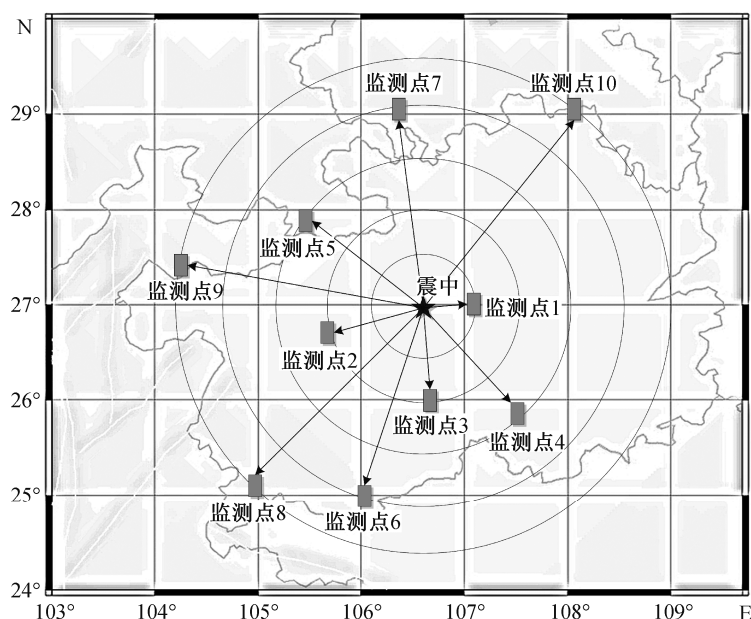


图1 多分量地震监测系统的监测网络

Fig. 1 Monitor net composed of multi-component seismic monitoring system

2.2 系统设计实现

本项目于 2010 年启动,专注于大地震监测预测技术研究。2015 年 8 月完成多分量地震监测系统 AETA 的小批量研制,研制过程中与深圳深创谷、卓翼科技、中兴新地、京泉华等企业深度合作,对环境适应性、可靠性、稳定性、一致性等品质进行改进和实现,同时在深圳市巴伦技术等测试公司配合下进行系统的可靠性和性能测试。最终,本系统达到工业级产品的规范。

如图 2 所示,多分量地震监测系统 AETA 由地声传感探头、电磁传感探头、数据处理终端以及云平台数据存储和分析系统组成。地声传感探头和电磁传感探头布设在山洞内或埋设于地表 2 m 以下(主要是屏蔽空间干扰),数据处理终端放置在室内。通过有线或无线网络,将数据发送到云平台进行存储和处理分析。AETA 系统充分考虑了对环境干扰的消除,简化了安装流程,同时采用远程自动运维方式,提高了设备的环境适应性,降低了安装成本,提高了运维的效率和便利。

多分量地震监测系统 AETA 的监测数据存储在云服务器端,可通过网页查看,如图 3 所示。数

据分析系统的数据产出包括以下方面。

- 1) 均值:窗口时间内信号幅值的平均值,单位为 V(电压值),用于标示窗口时间内的信号能量。
- 2) 振铃计数:窗口时间内正向穿越门槛阈值的点数,是信号变化频次的统计,用于检测是否存在异常的频次事件。
- 3) 峰值频率:窗口时间内信号的主频率成分,从频域的角度观察是否有异常的频率信号出现。

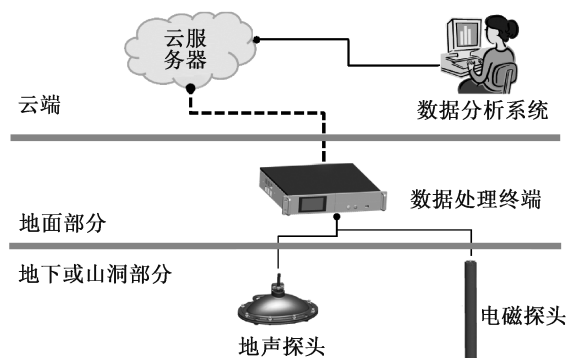


图 2 多分量地震监测系统 AETA
Fig. 2 Multi-component seismic monitoring system AETA



图 3 多分量地震监测系统网页数据查看界面
Fig. 3 Data view interface of multi-component seismic monitoring system's website

3 现场实验

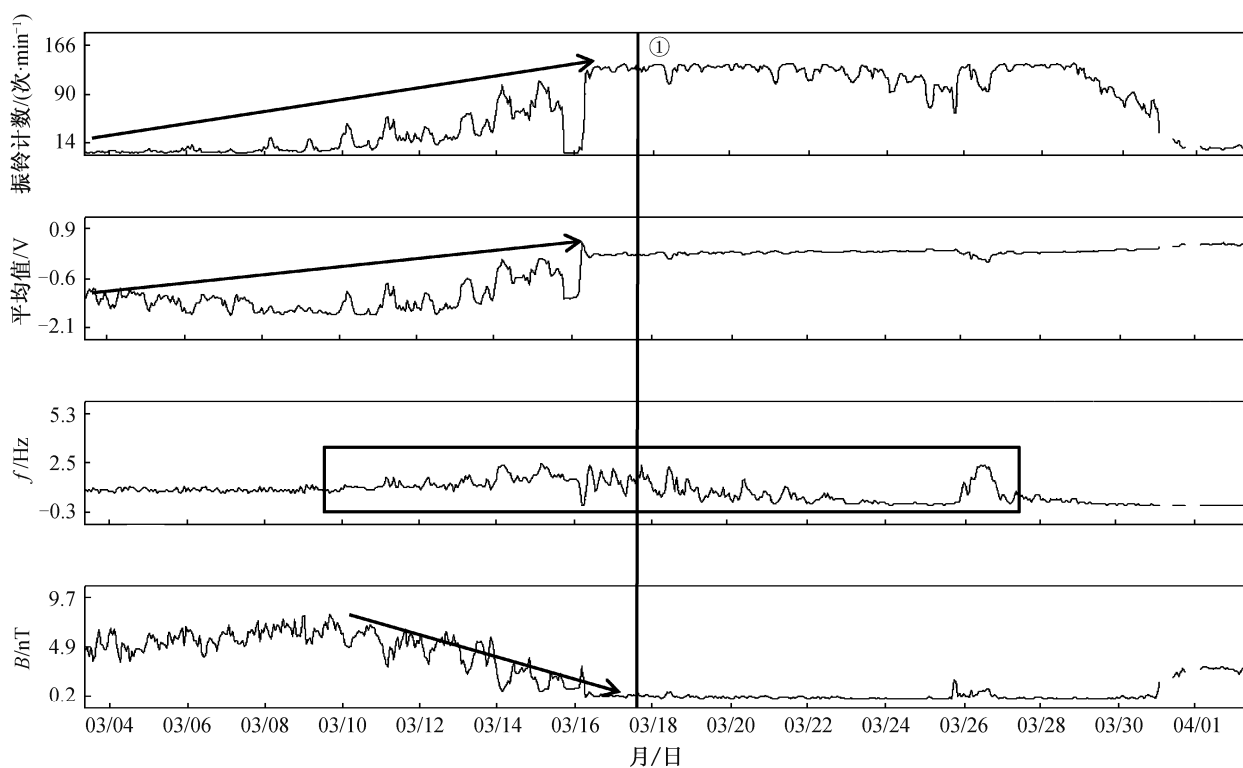
2015年11月至2016年3月,第一批多分量地震监测系统在中国地震局监测预报司的支持以及河北省、四川省、云南省、北京市地震局的协助配合下,完成第一次现场实验,监测站点包括河北张家口怀来东梁山洞监测站、北京延庆西拔子监测站、云南丽江地震台监测站和西昌川兴监测站。

第一次现场实验的数据如图4~6所示。在多次实际震例中,多个台站的数据均有前兆异常信号出现。2016年3月18日,河北张家口市崇礼县发生3.1级地震,震中距怀来县东梁山洞的监测设备66 km,设备的多项指标在震前出现异常,在震后信号趋于平静(图4)。2016年4月10日阿富汗7.1级地震、2016年4月13日缅甸7.2级地震以及2016年4月16日日本九州岛7.2级地震,西昌和丽江设备的指标均在震前出现异常,包括震前一周出现异常波动,或者震前出现上升或下降(图5和6)。实验数据表明,系统的灵敏度反映地球无地震孕育和发生时的信号波动,也在一定程度上反映地震的前兆

异常,符合设计预期。为了进一步研究地震前兆异常与地震事件之间的关系,需要布设更多的设备,获取更多的数据。

2016年3—11月,项目组多次修正现场实验过程中发现的问题,改进系统的环境适应性,使设备更易安装布设,进一步降低成本。2016年6月完成20套的小批量生产,2016年7月开始第二次现场实验。第二次现场实验中,经过几个月的实际监测和观察,在多次地震事件中捕捉到异常现象,进一步验证了设备的灵敏度和适用性。在2016年9月25和29日的康定地震中,距离康定较近的雅安石棉山洞和姑咱山洞设备的部分分量出现震前异常波动(图7)。当实验区域内没有出现电磁和地声异常信号时,没有地震发生。

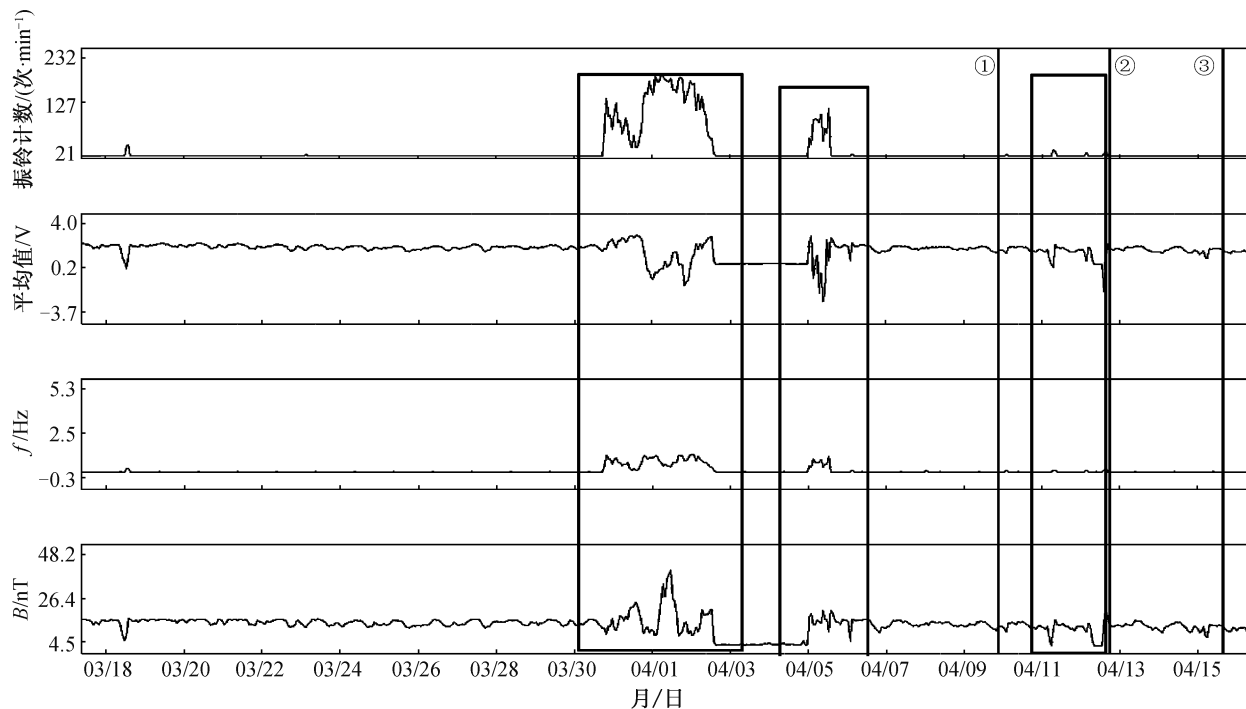
第一次和第二次现场实验的监测数据均可在数据共享网页查看,并按规定对实验安装台站相关人员开放,共同进行数据的观测和分析工作。经过两次现场实验,设备在灵敏度、环境适应性、可靠性、稳定性和一致性等方面得到验证和测试。目前,多分量地震监测系统已经定型并批量生产,正



① 2016年3月18日河北张家口市崇礼县3.1级地震,震中距离台站66 km,震源深度为10 km

图4 河北怀来东梁山洞监测站设备震例异常反应示例

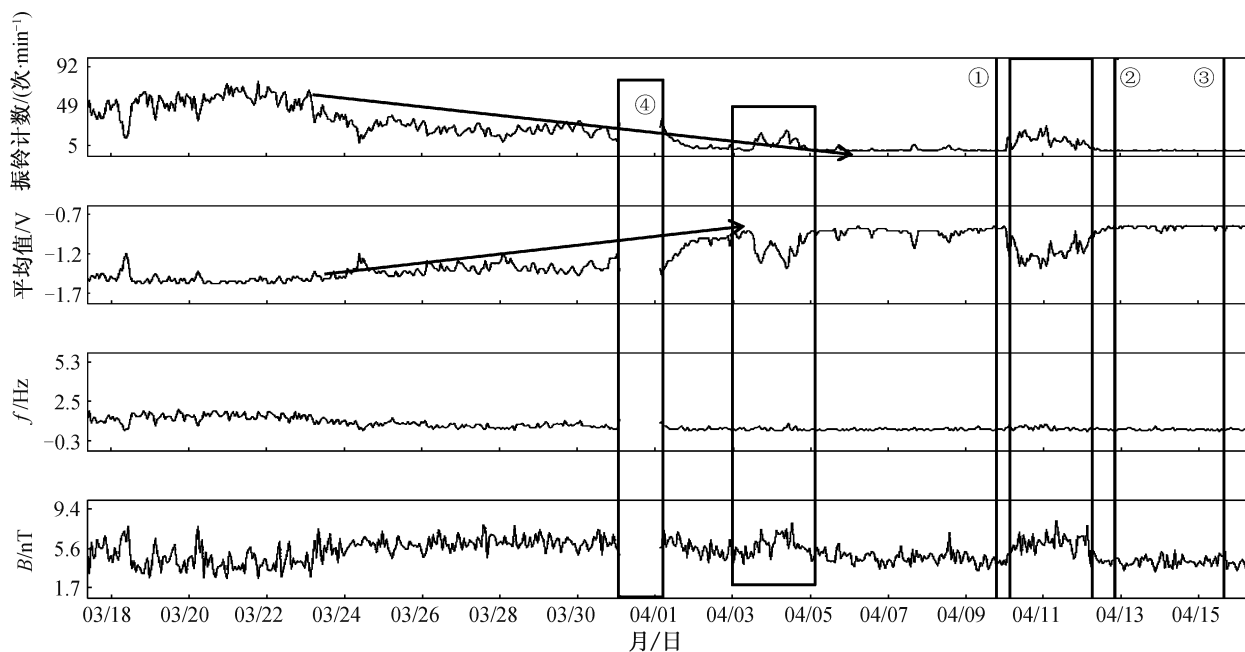
Fig. 4 An example of abnormal response of AETA in Dongliang cave in Huailai, Hebei Province



① 2016 年 4 月 10 日阿富汗 7.1 级地震, 震中距离台站 3062 km, 震源深度为 200 km; ② 2016 年 4 月 13 日缅甸 7.2 级地震, 震中距离台站 910 km, 震源深度为 130 km; ③ 2016 年 4 月 16 日日本九州岛 7.2 级地震, 震中距离台站 2780 km, 震源深度为 130 km

图 5 四川西昌川兴监测站设备震例异常反应示例

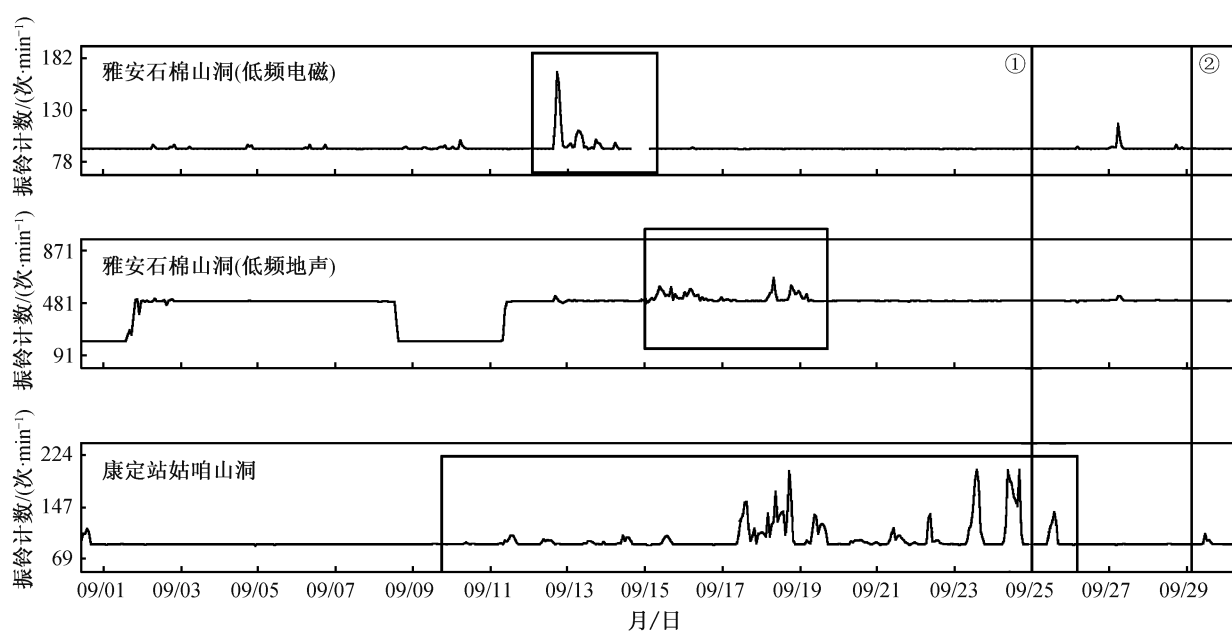
Fig. 5 An example of abnormal response of AETA in Chuanxing monitoring station in Xichang, Sichuan Province



① 2016 年 4 月 10 日阿富汗 7.1 级地震, 震中距离台站 2928 km, 震源深度为 200 km; ② 2016 年 4 月 13 日缅甸 7.2 级地震, 震中距离台站 680 km, 震源深度为 130 km; ③ 2016 年 4 月 16 日日本九州岛 7.2 级地震, 震中距离台站 3000 km, 震源深度为 130 km; ④ 长时间断电导致数据丢失

图 6 云南丽江地震台监测站设备震例异常反应示例

Fig. 6 An example of abnormal response of AETA in Lijiang monitoring station in Yunnan Province



① 2016年9月25日康定 3.6级地震,震源深度为13 km; ② 2016年9月29日康定 3.6级地震,震源深度为11 km

图7 多台设备震例异常反应示例

Fig. 7 An example of abnormal response of three AETAs in different places

在中国西南部、首都圈以及台湾海峡进一步开展映震实验研究。

4 结语

地震发生前的孕育或临震过程有明确的前兆信号,地震震级越大,信号越强。因此,本文研制了能够支撑大区域、高密度布设的多分量地震监测系统 AETA。在云南、四川、西藏、河北、北京、广东等地区的现场实验表明, AETA 系统在灵敏度、一致性、环境适应性、可靠性、稳定性和成本等方面能够满足大区域、高密度布设的需求。目前,正在中国西南部(云南、四川、西藏和青海)、首都圈(河北和北京)以及台湾海峡(广东、福建和台湾)进行大区域布设,进一步开展地震监测预测研究。将来,我们会继续与地震监测研究人员合作,以期实现提前 1~15 天准确预测地震。

致谢 感谢深圳市卓翼科技、中兴新地以及京泉华等公司的支持,尤其是深创谷的设计服务支撑。感谢中国地震局、云南地震局、四川地震局、四川气象局、河北地震局、西藏地震局、北京地震局、广东地震局以及各个相关台站的支持和配合。感谢杨芙清院士和王阳元院士多次参与项目研讨。

参考文献

- [1] 梅世蓉,冯德益. 中国地震预报概论. 北京:地震出版社,1993
- [2] 陈运泰. 地震预测:回顾与展望. 中国科学:地球科学,2009,39(12):1633-1658
- [3] 吴中海,赵根模. 地震预报现状及相关问题综述. 地质通报,2013,32(10):1493-1512
- [4] 张晁军,陈会忠,李卫东,等. 大数据时代对地震监测预报问题的思考. 地球物理学进展,2015,30(4):1561-1568
- [5] 刘莉. 国家行动:中国地震预测预报五十年——写在5·12防灾减灾日之际. 科技日报,2016-05-12(001)
- [6] Bouchon M, Durand V, Marsan D, et al. The long precursory phase of most large interplate earthquakes. Nature Geoscience, 2013, 6(4): 299-302
- [7] Ammon C J, Kanamori H, Lay T. A great earthquake doublet and seismic stress transfer cycle in the central Kuril islands. Nature, 2008, 451: 561-565
- [8] Jónsson S. Importance of post-seismic viscous relaxation in southern Iceland. Nature Geoscience, 2008, 1(2): 136-139
- [9] Brinkman B A, LeBlanc M, Ben-Zion Y, et al. Probing failure susceptibilities of earthquake faults using small-quake tidal correlations. Nature Communica-

- tions, 2015, 6: 6157
- [10] Lucazeau F, Leroy S, Bonneville A, et al. Persistent thermal activity at the Eastern Gulf of Aden after continental break-up. *Nature Geoscience*, 2008, 1(12): 854–858
- [11] Peng Z, Zhao P. Migration of early aftershocks following the 2004 Parkfield earthquake. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 877–881
- [12] Brodsky E E, Lay T. Recognizing foreshocks from the 1 April 2014 Chile Earthquake. *Science*, 2014, 344: 700–702
- [13] Skelton A, Andr n M, Kristmannsd ttir H, et al. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland. *Nature Geoscience*, 2014, 7(10): 752–756
- [14] Harry I I, Chen W P, Brudzinski M R. Seismic evidence of negligible water carried below 400-km depth in subducting lithosphere. *Nature*, 2010, 467: 828–831
- [15] Honkura Y, Oshiman N, Matsushima M. Rapid changes in the electrical state of the 1999 Izmit earthquake rupture zone. *Nature Communications*, 2011, 4: 2116
- [16] 马宗晋, 高庆华. 李四光教授的系统整体论思想. *地质评论*, 1990, 36(5): 431–434
- [17] 邱泽华, 张宝红. 我国钻孔应力-应变地震前兆监测台网的现状. *国际地震动态*, 2002(6): 5–9
- [18] 邱泽华, 石耀霖. 国际钻孔应变观测的发展现状. *地震学报*, 2004, 26(增刊): 162–168
- [19] 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 等. 汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(8): 1031–1039
- [20] 池顺良. 日本 9 级大震前我国钻孔应变网测到两起地块强烈受压时间. *地球物理学进展*, 2011, 26(5): 1583–1587
- [21] 孟国杰, 苏小宁, 徐婉楨, 等. 基于 GPS 观测研究 2010 年青海玉树 Ms7.1 地震震后地壳形变特征及其机制. *地球物理学报*, 2016, 59(12): 4570–4583
- [22] Li Xingxing, GeMaorong, Zhang Yong, et al. New approach for earthquake/tsunami monitoring using dense GPS networks. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2682
- [23] Hashimoto C, Noda A, Sagiya T, et al. Interplate seismogenic zones along the Kuril-Japan trench inferred from GPS data inversion. *Nature Geoscience*, 2009, 2(2): 141–144
- [24] 刘洋, 许才军, 温扬茂. 两次大柴旦 Mw6.3 地震间地表形变的 InSAR 观测及与同震破裂的联合分析. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(2): 110–119
- [25] 程万正, 官致君, 李军. 对汶川 8.0 级地震前四川地区地下流体观测异常的研究. *四川地震*, 2013(2): 1–8
- [26] 王继军, 赵国泽, 詹艳, 等. 中国地震电磁现象的岩石实验. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2): 22–28
- [27] 陈化然. 1980 年以来我国电磁辐射地震前兆信息的观测与研究. *中国地震*, 2008, 24(2): 180–186
- [28] 钱书清. 地震电磁辐射与地震预报的观测实验研究. *国际地震动态*, 2009(7): 57–62
- [29] 田山, 王建国, 徐学恭, 等. 大地电场观测地震前兆异常提取技术研究. *地震学报*, 31(4): 424–431
- [30] 张小涛, 张永仙, 许敦煌. 汶川 8.0 级地震前后宏观异常现象分析. *地震*, 2009, 29(2): 104–117
- [31] 生物系动物专业地震研究组. 动物行为异常与地震活动关系的初步研究. *武汉大学学报(理学版)*, 1977(4): 43–58
- [32] 任佩科, 闫胜三, 孟秀玉, 等. 震前动物习性异常与地震活动的关系. *华北地震科学*, 1992, 10(1): 89–93
- [33] 卢双苓, 曲保安, 蔡寅, 等. 宏观异常与地震关系的统计关系. *中国地震*, 2015, 31(1): 141–151
- [34] 丁丹, 倪四道, 田晓峰, 等. 地震相关的声音现象研究进展. *华南地震*, 2010, 30(2): 46–53
- [35] 夏雅琴, 崔晓艳, 李均之, 等. 震前次声波异常信号的研究. *北京工业大学学报*, 2011, 37(3): 463–469
- [36] 吕君, 郭泉, 冯浩楠, 等. 北京地震前的异常次声波. *地球物理学报*, 2012, 55(10): 3379–3385
- [37] 曹惠馨, 钱书清, 吕智. 岩石破裂过程中超长波段的电磁信号和声发射的实验研究. 1994, 16(2): 235–241
- [38] 何康, 郑海刚, 李军辉, 等. 基于震例的地震电磁异常特征研究. *地震*, 2016, 36(4): 144–152
- [39] 钱书清, 仁克新, 吕智. 随岩石破裂的 VLF, MF, HF 和 VHF 电磁辐射特性的实验依据. *地震学报*, 1996, 18(3): 346–351
- [40] 邵英秋. 宽频带感应式磁传感器的研制[D]. 长春: 吉林大学, 2012
- [41] 张建国, 刘晓灿, 马新欣, 等. 不同型号电磁波仪观测数据对比分析. *地震地磁观测与研究*, 2010, 31(6): 99–103
- [42] 陈化然, 刘晓灿, 丁跃军, 等. 地震电磁扰动观测的一些新进展. *国际地震动态*, 2009(7): 2–7