

于海英, 周宝峰, 王家行, 马新生, 张同宇, 徐旋, 胡振荣, 2017. 强震动观测仪器面临的机遇和挑战. 震灾防御技术, 12 (1): 68—77. doi: 10.11899/zzyfy20170107

强震动观测仪器面临的机遇和挑战¹

于海英^{1, 2)} 周宝峰^{1, 2)} 王家行^{1, 2)} 马新生^{1, 2)}
张同宇^{1, 2)} 徐旋^{1, 2)} 胡振荣^{1, 2)}

1) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

2) 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080

摘要 本文介绍了国内外强震仪、力平衡加速度计、烈度计、MEMS 加速度仪等强震动观测仪器的发展历史与现状, 概述了强震动记录中典型异常波形产生的原因和力平衡加速度计的仪器响应误差及校正, 建议了解决强震仪器缺陷的措施, 分析了强震仪在强震动观测发展中面临的机遇和挑战。研究结果如下: ①进行强震动记录异常波形的研究是有针对性改进现有强震仪存在问题的很好途径; ②早期数字强震仪(力平衡加速度计频带范围 0 至 30Hz)获取的强震动记录应进行仪器校正; ③应跟踪强震动观测新方法和相关领域新技术, 发展 MEMS 加速度仪和光纤加速度仪等新型仪器。

关键词: 强震仪 力平衡加速度计 烈度计 MEMS 加速度仪 强震动记录异常波形 仪器响应误差

引言

强震动观测、震害调查、振动试验是地震工程研究的 3 大重要途径, 其中强震动观测技术是地震工程得以发展的重要基础, 强震仪是强震动观测系统的核心仪器, 强震仪与强震动观测技术方法相辅相成, 相互促进。强震动记录是强震仪产出的重要基础数据, 对于研究地震动与结构反应特性, 确定引起结构破坏的地震动参数, 以及建立这些参数与震级、距离、场地条件之间的关系, 最终为场地的地震动预测和结构抗震设计提供数据支撑, 尤其是大地震中高质量的强震动记录对于地震工程学发展的研究意义重大。通过对这些数据的分析研究, 能够推动结构抗震设计、烈度速报及地震预警等方面的研究工作。

本文详细回顾了国内外强震动观测仪器的发展历史, 分析了不同时期强震动观测的发展对强震仪的需求, 研究了强震动记录中典型的异常波形及力平衡加速度计的仪器响应误差及校正, 分析了强震仪在强震动观测发展中面临的机遇和挑战, 为改进现有强震仪存在的问题和新型强震仪的研制提供一定的参考。

1 基金项目 中央级公益性研究所所长基金项目(2014B02)、国家科技支撑计划项目(2014BAK03B01-06)、黑龙江省自然科学基金面上项目(E2015069, E2015070)和国家自然科学基金项目(51308517, 41174161)

[收稿日期] 2016-08-08

[作者简介] 于海英, 男, 生于 1962 年。研究员。主要从事强震动观测与数据处理技术等方面研究。E-mail: haiyingyu@126.com

[通讯作者] 周宝峰, 男, 生于 1978 年。博士, 副研究员。主要从事强震数据处理与地震动特性等方面研究。E-mail: zbf166@126.com

1 历史与现状

传统的地震仪器发展于 19 世纪并完善于 20 世纪，用于测量强震动的仪器于 20 世纪 30 年代才得以发展。1929 年，日本东京召开了世界地震工程大会，会上美国学者约翰·弗里曼和日本学者末广恭二教授强烈呼吁设计和制造记录强震动的仪器。1931 年，在美国土木工程学会的报告会上，末广恭二教授第一次提出了关于“工程地震”的术语，为了有效地设计抗御地震的结构，强调了直接测量强震动记录的重要性。1931 年，美国地质调查局（USGS）得到美国国会科研基金的资助用于完成国家强震动计划，其中包括加速度计的研发。1932 年，美国研制成功了世界上第一台强震仪（内置加速度计），这是现代强震仪的开始。第一批仪器布设于洛杉矶地区，并于 1933 年 3 月 10 日的长滩地震中获得第一条强震动记录，这标志着现代地震工程的诞生（Trifunac, 2009）。

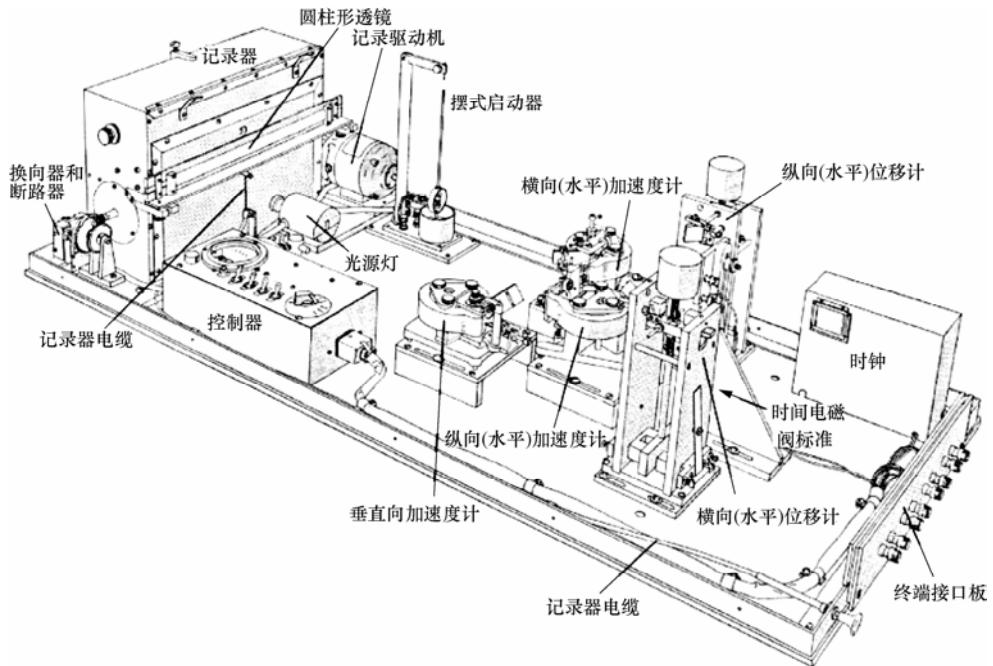


图 1 第一台强震仪内部结构图（Trifunac, 2009）

Fig. 1 The internal structure of the first strong motion accelerograph (Trifunac, 2009)

1.1 强震仪

美国、日本对于强震仪的研制工作最为活跃。20 世纪 70 年代，美国先后研制出第一代 SMA-1 型光记录式强震仪，第二代 SMA-2 型和 SMA-3 型模拟磁带记录式强震仪，但是，都存在记录动态范围小、记录不完整等缺点。20 世纪 80 年代，美国又研制出第三代 DSA-1 型和 PDR-1 型数字磁带强震仪，但是存在误触发、需要专门回放设备等问题。不久，美国又推出了 SSR-1 型固态存储式数字强震仪，视为第四代强震仪。该仪器可将地震模拟信号通过 A/D 转换为数字信号存储在 SRAM 存储器里，只需与计算机的串口相连就可以回收数据。20 世纪 90 年代，美国又先后推出 K2 型及大动态范围的固态数字存储强震仪（段向胜等，2010）。

21 世纪初, 美国凯尼公司推出 ETNA 型强震仪, 近几年又先后推出 Basalt 型、Obsidian 型强震仪。这 2 种型号强震仪较前几代在系统上有跨越式的发展, 采用嵌入式系统结构, 被称为可进行二次开发的数字强震仪。Obsidian 型相较于 Basalt 型其主要升级特性有以下几方面: ①数据传输方面, Obsidian 选择低延时传输模式时可实现最快 0.1s 一个数据包, 而 Basalt 仅能做到 1s 一个数据包; ②存储能力方面, Obsidian 最大可升级到 32G; ③Obsidian 采用 USB 接口, 可直接与 PC 或笔记本电脑连接。

日本在工程领域的强震动观测始于 20 世纪 50 年代。1948 年福井地震使研究者深刻意识到进行强震动观测的必要性。1951 年, 由教授、研究人员和工程技术人员组成的强震加速度计委员会开始研制强震仪。1953 年, SMAC 型强震仪研制成功。1995 年 7 月, 日本政府颁布实施了《地震灾害预防特别法》, 根据该法案规定, 日本政府开始更新地震观测系统, 新安装了大量强震仪。其中, 日本防灾科学技术研究所 (NIED) 布设了 1034 台强震仪, 构建了全国范围的地震观测网络 K-net (Kyoshin network); NIED 同时也在建设 Kik-net (KIBAN kyoshin network) 强震动观测网络, 该网络是 Hi-net (High-sensitivity seismograph network) 的子网, 由安装在地表和井下 (深度超过 100m) 的 660 个强震动观测台站组成。为了计算日本气象厅地震烈度和增强近实时数据通信功能, NIED 研制了新型强震仪 (K-NET02), 如果强震仪监测到地震发生, 将会自动在几十秒内与通信数据管理中心联系。此外, 测量范围由 2000gal 增加到 4000gal, 模数转换动态范围是 132dB (Kashima, 2000)。

中国地震局工程力学研究所 (以下简称工力所) 是中国强震动观测的牵头单位。1962 年 3 月, 广东新丰江水库诱发了 6.1 级强震, 为了研究裂缝产生的机理并给出应对措施, 工力所于 1966 年研制成功了 RDZ-12-66 型多道电流计记录式强震加速度仪, 先后在全国布设了数百个固定和流动台, 迄今已取得数百条质量较好的记录 (李沙白, 1987)。后来, 水利水电科学研究院研制了 SG-68 型电流计式强震仪。80 年代, 工力所和地震仪器厂合作研制生产了 GQIII 和 GQIII A 型三分量直接光记录式强震仪, 性能和美国 SMA-1 相当 (谢礼立等, 1984)。1988 年, 工力所成功研制 SCQ-1 型数字磁带记录式强震仪。90 年代末, 工力所又成功研制 GDQJ-I 型和 II 型数字强震仪, “九五”大量布设到首都圈强震动台网以及金沙江梯级水电站强震动台网。另外, 水利水电科学研究院也组织研制生产了适用于水库大坝结构的 EDAS-A 型、EDAS-B 型三通道和六通道数字强震仪, 布设在十几个大坝上, 并获得 150 余条加速度记录。随着数字强震动观测技术的迅速发展, 强震仪逐渐由传统胶片模拟记录方式过渡到数字记录式, 大大加快了数据处理分析的速度, 同时也增强了数据的可靠性。由于数字强震仪具有动态范围大、频带宽、预存能力强、绝对时标精度高等特点, 并可远程控制 and 实时数据通讯 (高光伊等, 2001), 在中国得到了很大的发展。2008 年 5 月 12 日发生的汶川地震更加刺激了数字强震仪的研制, 如北京港震 BBAS-2 型、珠海泰德 TDA-33M 型。同时, 国际上的一些新品牌也在涌入中国市场。例如美国凯尼的 Basalt 型、Obsidian 型强震仪, 美国 Reftek 公司的 130-SMA/9 型强震仪。

1.2 力平衡加速度计

数字强震仪系统已在世界各国强震动观测和重大生命线工程监测中广泛使用, 数字强震仪一般都采用力平衡式加速度计, 只有少量强震仪采用速度计。早在 20 世纪 80 年代初美国凯尼公司就生产了力平衡式加速度计 FBA-3 型和 FBA-13 型等; 工力所也研制生产了 DCJ 型伺服式加速度计和 RLJ 型差容式力平衡加速度计。经过几十年的发展, 力平衡式加速度计

的性能不断地完善和提高，且体积和重量越来越小。目前中国强震动台网使用最普遍的加速度计主要有：①20世纪90年代工力所研制生产的SLJ-100型（王家行等，1997），技术指标达到国际先进水平，性能稳定可靠，目前国内市场占有率达90%以上；②21世纪后美国凯尼公司生产的ES-T型。以上2种力平衡加速度计频带的扩展使得现今的数字强震仪系统能够在具有工程意义的频率范围内记录到可靠的地震动信息。一般来说，对于频带范围为0至80Hz或100Hz（如SLJ-100和ES-T）的力平衡式加速度计不作仪器频率响应特性校正（于海英，2007）就能满足工程抗震感兴趣的频率范围要求。然而，早期的力平衡式加速度计频带范围仍较窄（0至30Hz），这种仪器的强震动记录应该进行仪器校正（于海英，2006），利用该文献提出的仪器校正方法，经过仪器校正处理的加速度时程在工程抗震感兴趣的频率范围（0至50Hz）没有高频失真现象，满足了工程抗震的要求。仪器校正对低频误差影响不大，低频误差校正为纠正数字强震动记录中基线漂移，结果可提高强震动记录的质量和应用价值。

1.3 烈度计与 MEMS 加速度仪

为了在破坏性大地震时能够获得大量地震动数据，需要布设大量的强震仪。但是，强震仪系统价格较高、难以到处布设。因此，地震工程学家很早就提出了研制和布设价格低廉、维护方便，能够随处布设的烈度计。早期的烈度计功能简单，只需提供仪器地震烈度和峰值加速度值等地震动强度的参数，不需要记录地震动的全过程。1995年日本兵库县南部地震后，日本气象厅开始将原来的人为判定烈度改变为用仪器来测定烈度，至1996年4月，共布设了约300台烈度计，2004年布设数量增加到600台。日本Rion公司的SM-26型烈度计频带为0—40Hz，测量范围为0.015—2000gal。2006年日本消防厅发布了新一代烈度计标准，要求测量范围增大到3000gal，分辨率增加到20位，时间系统采用GPS同步。日本System公司根据新标准生产了SDP-1000型烈度计，这种烈度计有多个警报输出接点，可以设定发布警报的峰值加速度值、烈度值、谱烈度（SI）值或这些参数的组合，并且还可以与机器、广播和摄影设备等相连接，用来及时关闭机器、引导人员避难。显然，这种新型烈度计的技术指标与一般的强震仪已没有很大差别，价格也失去了低廉的优点（周雍年，2011）。随着微电子机械系统一体化技术（MEMS）的迅速发展，英国Guralp等公司都设计并推出了新型的MEMS地震仪器。斯坦福大学研究人员设计并委托一家德国公司生产了便携型MEMS地震加速度仪，用于强震台网的布设。一些研究提出MEMS技术可以应用于强震观测。美国USGS的科研人员设计并实现了一个基于MEMS简易加速仪的观测台网（曲明哲，2014）。在我国，珠海泰德公司生产的TAG-33M/53M一体化加速度仪，采用了24位大动态范围（>131dB@200Hz），频带0—200Hz，测量范围0—2g。台湾吴逸民教授与三联科技公司合作研制出基于MEMS技术、体积轻巧的Palert型地震P波感测仪，吴教授经5年多分析了各国地震资料，研究出地震S波与P波的对应关系，在P波发生后前3s检测到地震参数，在S波危害抵达前即可发出地震警报达到预警的功能。与传统的强震仪相比，MEMS加速度仪具有体积小、成本低、可靠性高、易于集成和实现智能化等特点，近年来此技术更多地应用于地震烈度速报和预警。

2 强震动记录中异常波形分析及解决强震仪器缺陷的建议

部分强震动记录中存在的异常值给研究带来了不利影响，为此，总结分析一些典型的奇异波形，为强震仪的设计、改进、使用提供一定的参考（于海英等，2008；李小军等，

2009; 周宝峰, 2012)。图 2 所示为记录首部尖刺问题, 出现该问题的原因可能是强震仪在记录事件前缓存内容衔接错误或缓存清空不彻底造成, 属于仪器软件问题, 或者由于外部供电出现纹波造成仪器内部供电突变引起毛刺噪声, 建议存在上述问题的厂家完善强震仪软件和仪器供电单元的性能。图 3 所示为记录尾部尖刺问题, 该问题可能是由于强震仪在记录数据结束后, 在数据尾部写入了一组多余数据造成的, 建议存在上述问题的厂家完善强震仪软件。图 4 所示为具有等间距的毛刺现象, 通过时间轴对比发现, 毛刺幅值都是 $12.75/\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$, 毛刺频率在 1Hz 左右, 而且只有垂直向出现毛刺, 可能是由于该分量混入 1Hz 噪声所引起, 建议增强强震仪的抗干扰能力, 采取有效的仪器接地措施。图 5 的非对称波形现象可能是由于“蹦床效应”造成, 也可能是加速度计“卡摆”所致, 建议检查有非对称波形现象的台站仪器墩是否符合建台要求, 同时取回加速度计在低频振动台上进行检测。图 6 所示的加速度基线漂移可能是由于“卡摆”造成, 或者是地震过程中仪器墩的倾斜造成传感器零点偏移所致, 建议检查有加速度基线漂移的台站仪器墩是否在地震中有严重倾斜, 同时取回加速度计在低频振动台上进行检测。图 7 的波形插入式镜像现象可能来源于仪器软件缺陷所致, 造成该问题的可能原因是强震仪在记录事件前缓存写入不正确或保存记录事件时截取的缓存位置不正确 (朱建刚等, 2006), 建议存在上述问题的厂家完善强震仪软件。另外, 在近年来的强震中, 存在 GPS 时钟失效、记录仪和加速度计故障、同一个台站中 2 个通道有记录而另一个通道无记录等现象, 建议观测人员分析故障原因, 需到现场解决的及时开展现场巡检, 取回有故障的仪器进行检查或交与生产厂家排除故障。

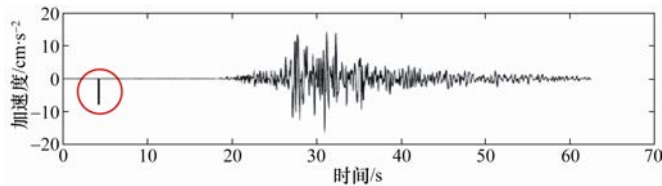


图 2 记录首部尖刺问题

Fig. 2 The spike at the beginning of the record

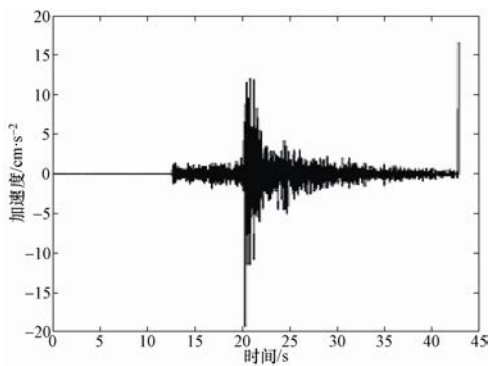


图 3 记录尾部尖刺问题

Fig. 3 The spike at the end of the record

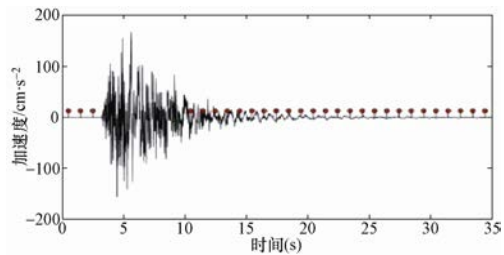


图 4 具有等间距的毛刺现象

Fig. 4 The spike with same intervals

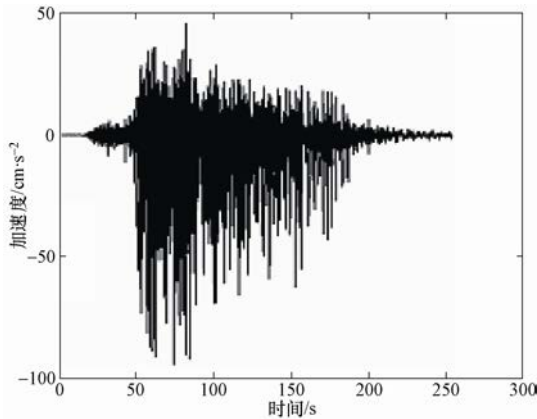


图 5 非对称波形现象

Fig. 5 Asymmetric waveform phenomena

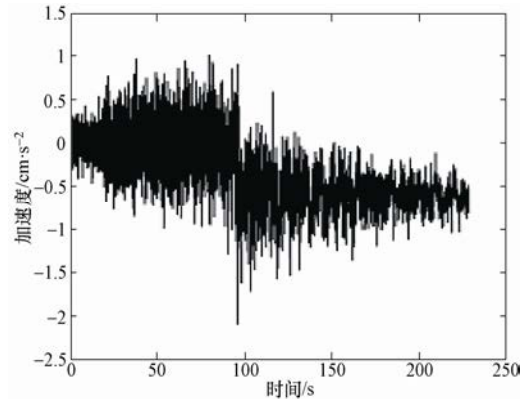


图 6 加速度基线漂移严重现象

Fig. 6 The obvious baseline drift in the acceleration time history

通过对异常数据的分析,可以发现强震仪中数据处理、缓存以及存储部分设计的可靠性将直接影响事件记录的准确性,对数据记录的质量有重要影响。研究人员在对 2013 年 1 月 23 日辽宁灯塔 5.1 级地震强震动记录进行零线调整和仪器校正后,原始加速度峰值平均减小约 20%,表明仪器有一定零漂现象存在(梁永朵等, 2015)。因此,仪器出现故障或产出异常波形时,首先应分析原因,属于强震仪软件或硬件问题的应送回生产厂家检测,加速度计应定期进行检查标定,避免仪器由于长期缺乏维护而导致“卡摆”、“零漂”过大等问题造成记录不准确。

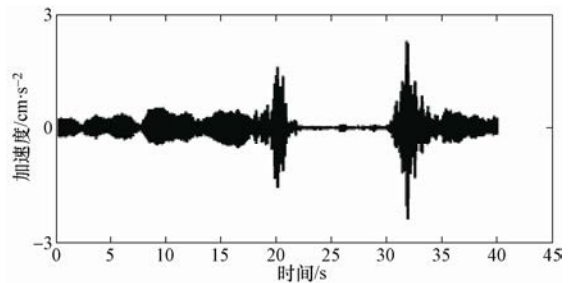


图 7 波形镜像重复现象

Fig. 7 The waveform duplication

3 机遇和挑战

30 多年来, 固态数字强震仪在强震动观测方面取得了巨大成果, 日本防灾科学技术研究所 (NIED) 在 1995 年阪神地震后布设了间隔为 25km 的 K-NET 和 KIK-NET 强震动观测台网 (Toshihide, 2000), 在 2011 年 3 月 11 日发生的日本东海大地震中获得多条 PGA 大于 1g 的加速度记录。1990 年, 中国台湾完成了 SMART-1 台阵的布设, 并且在 1999 年 9 月 21 日的集集地震中获得了大量高质量的强震动加速度记录。国家强震动台网自场站均使用三通道数字强震仪, 强震动仪分别使用 GDQJ-II、GDQJ-1A、GSMA-24IP、Etna、K2、GSR-18、MR-2002 等 7 种型号的数字强震仪, 传感器大部分使用 SLJ-100 型力平衡式加速度计, 只有少部分 Etna 内置传感器采用 ES-T 型力平衡加速度计(于海英等, 2009)。国家强震动台网专用台阵均使用多通道数字强震动仪。上海环球金融大厦, 北京昌平体育路等 6 个结构台阵均使用 MCMS 型 64 通道中心记录式数据采集器、SLJ-100 力平衡加速度计, 通海三维场地影响台阵使用 K2 型六通道数字强震动仪和 ES-DH (SBEPI) 深井加速计(周雍年, 2011)。这些台站

(阵)在 2008 年正式运行以来,特别是在“5·12”汶川大地震中获得了大批强震动记录(中国地震局灾害防御司,2008)。这些记录对研究近场地震学及地震工程学具有重要意义。

因地震烈度速报和预警台网以及不断涌现的大型建筑结构对于强震动观测的需要,强震仪迎来了新的发展机遇。2008 年的汶川 8.0 级特大地震,由于缺乏较为可信的烈度速报系统,延误了部署抢险救援的最佳时机(喻焯等,2013)。因此,从防震减灾的需要出发,在一次大震发生时,人们不仅需要尽早知道地震发生地点和震级大小,而且同时也要知道地震动强度(烈度)的分布情况,正是这些需求刺激并推动了大震快速反应系统的发展。强震数字技术的发展使得在大震发生时迅速提供大震的全部信息成为可能。几种仪器的烈度算法在汶川地震与芦山地震中,其可靠性得到了比较,研究者们认为在未得到更多强震数据的检验前,建议采用袁一凡(1998)提出的仪器烈度算法,或利用谱烈度值确定仪器烈度的算法,或利用加速度反应谱值确定仪器烈度的算法(王玉石等,2013)。中国地震局于 2015 年 3 月 1 日发布了《仪器地震烈度计算暂行规程》,如果将仪器烈度计算方法固化到烈度计中,则会给我国的地震烈度速报工作带来很大的便利。何先龙等(2010)介绍了一种提高单孔法剪切波速测量精度的新方法——多重互相关函数法,如果将该算法固化到强震仪中,则可便于为强震动台站提供场地信息。

随着强震动观测方法的不断创新和多样化发展,在仪器性能、种类方面提出了更高要求,对新型仪器的需求十分迫切。例如:用于三维地震动理论研究的井下观测技术需要大动态、高灵敏度、具备智能定位、密封性很高的井下加速度计;扭转地震动理论研究需要能够记录扭转分量的观测技术和设备;结构健康监测需要强震动观测系统具有时钟同步、多通道记录、无线传感器等功能,将相关算法固化到仪器中实现系统的高度自动化和智能化的新技术将使得地震后建筑物或构筑物的健康状况得以快速评估,结构可能遭受的损坏程度可迅速通过布设在建筑关键部位的传感器台阵获得记录并得以判断;重大工程的地震报警和预警系统需要强震动观测系统具有高时效性、高可靠性、高准确性等,近年来我国高速铁路试验线地震预警监测设备大都选择了低延时传输数据数字强震仪(如美国 Obsidian 型、国产 TDE 型等),达到快速应急处置的需求。在强震动观测方法不断创新及地震工程需求多样化的刺激下,强震仪也正向多功能、智能化、嵌入式开发等方向发展。

国家“十二五”防震减灾规划体系之 GH/2-09——地震科技规划就明确提出:开展新型传感技术和高精度便携数字地震观测技术的研究,提高地震观测技术水平;开展地震烈度与预警一体化传感器技术研究,为地震预警能力建设提供技术支撑。开展井下和结构观测强震动观测技术研究,为场地与构筑物的抗震设防研究提供观测技术支撑。强震仪的发展进步给强震动观测注入了新的活力,使之从为科学研究服务为主拓展至为社会防震减灾服务。高质量的强震动观测数据不仅仅助力于科学研究的基础资料,而且将有效地用于减轻地震灾害的实践(李沙白,1998)。鉴于目前使用的强震动观测仪器还存在着测量灵敏度、带宽及动态范围受限等诸多问题,作者与哈尔滨工程大学苑立波教授合作申请的国家自然科学基金资助项目“光纤地震监测机理及其关键技术研究”,提出了以光波长作为测量基准,利用光纤干涉位移度量方法代替了传统的电子位移转换装置,实现了无需转换地质形变和振动的直接测量,具有超高分辨率、超宽测量频带和超大动态范围。该项目探索研究了一种基于光纤干涉型的地震加速度记录仪(苑立波等,2008),有望替代传统加速度计,成为新一代强震动观测信息获取和地球物理研究的重要测量手段。光纤地震测试技术能够突破灵敏度、带宽、动态范围

的综合性能极限，替代传统的地震监测方法。

另外，便于携带、体积小、高度智能化，达到成本与系统观测性能指标之间的最佳平衡，如用于地震烈度速报和预警的 MEMS 加速度计的研究、批量生产以及台网布设是强震仪器的发展重要方向。未来强震仪应该保证现场设备具有自诊断与简单故障处理的能力，加速度计能够自动调平和指北，减小强震仪器放置的方向误差，同时便于操作，并可以将相关诊断维护信息送至强震动台网中心，便于用户查询、诊断并掌控强震仪的运行状态，便于快速排除仪器故障，缩短维护、停测时间，减少维护工作量并节约维护成本，保证强震动台网的高效运行。

4 结论

本文综述了强震仪器由模拟到数字化的演变过程，表明强震仪器正在由单一功能到多功能智能化发展，同时，近年我国将投入大量经费建设国家烈度速报与预警台网，这对强震动观测仪器研发来说既是机遇也是挑战。抓住这一难得的机遇，研制出适应我国台网建设需求的可靠性、时效性和智能化都很高的仪器，以满足重大工程监测、烈度速报和预警等方面的需求是推动我国强震动观测发展的必然趋势。为此，研究表明：①进行强震动记录中异常波形的研究能够发现和有针对性地改进现有强震仪存在的问题；②早期数字强震仪频带范围较窄（0 至 30Hz），强震动记录应进行仪器校正，结果可提高强震动记录的质量和 application 价值；③应跟踪强震动观测新方法和相关领域新技术，研制适合我国强震动观测应用所需要的新型仪器，如加强 MEMS 加速度仪和光纤强震仪的研制，提高强震动观测技术水平，迎接强震动观测发展中面临的机遇和挑战。

参考文献

- 段向胜, 周锡元, 2010. 土木工程监测与健康诊断原理、方法及工程实例. 北京: 中国建筑工业出版社.
- 高光伊, 于海英, 李山有, 2001. 中国大陆强震观测. 世界地震工程, **17** (4): 13—18.
- 何先龙, 赵立珍, 2010. 基于多重互相关函数分析剪切波速. 岩土力学, **31** (8): 2541—2545.
- 李沙白, 1987. 强震加速度仪的发展近况. 世界地震工程, **1**: 28—34.
- 李沙白, 1998. 强震数字技术的最新进展及其在大震快速反应中的应用. 自然灾害学报, **7** (2): 79—85.
- 李小军, 温瑞智, 于海英, 2009. 汶川 8.0 级地震余震固定台站观测未校正加速度记录. 北京: 地震出版社.
- 梁永朵, 姜金征, 李莹等, 2015. 辽宁灯塔 5.1 级强震记录分析. 地震地磁观测与研究, **36** (5): 25—29.
- 曲明哲, 罗新恒, 温瑞智, 2014. MEMS 加速度传感器噪声分析. 地震工程与工程振动, **34** (6): 26—32.
- 王玉石, 李小军, 梅泽洪, 刘燕, 2013. 几种仪器烈度算法在汶川地震与芦山地震中的可靠性比较. 地震学报, **35** (5): 759—770.
- 谢礼立, 彭克中, 1984. 强震动观测的数字纪元. 国际地震动态, (7): 4—8, 32—33.
- 王家行, 胡振荣, 1997. SLJ 型宽频带大动态力平衡三分向加速度计的设计与研制. 地震地磁观测与研究, **18** (5): 46—52.
- 于海英, 2006. 力平衡式加速度计仪器响应误差分析和校正方法. 地震工程与工程振动, **26** (6): 200—203.
- 于海英, 韦良杰, 2007. 强震动记录误差分析和校正方法综述. 仪器仪表学报, **28** (4 Suppl.1): 175—177.
- 于海英, 杨永强, 王栋, 周宝峰, 解全才等, 2008. 汶川 8.0 级地震强震动加速度记录初步分析处理. 汶川地震工程震害调查交流研讨会报告, 成都.

- 喻畑, 陆鸣, 2013. 随机方法在地震烈度速报中的应用. 地震地磁观测与研究, **34** (5/6): 271—276.
- 袁一凡, 1998. 由地震动三要素确定地震动强度(烈度)的研究. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所.
- 苑立波, 耿涛, 杨军, 2008. 双芯光纤集成式加速度计及测量方法: 中国, CN101368978A. 2009-02-18.
- 中国地震局震害防御司, 2008. 汶川 8.0 级地震未校正加速度记录. 北京: 地震出版社.
- 周宝峰, 2012. 强震动观测中的关键技术研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 周雍年, 2011. 强震动观测技术. 北京: 地震出版社.
- 朱建刚, 周朝晖, 赖敏, 黎大虎, 2006. 有缺陷强震仪的使用及其数据处理. 纪念松潘平武地震 30 周年交流文集: 272—276.
- Trifunac M. D., 2009. 75th anniversary of strong motion observation—a historical review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**: 591—606.
- Kashima K., 2000. Strong Earthquake Motion Observation in Japan. // <http://iisee.kenken.go.jp/staff/kashima/soa2000/soa.htm>.

Opportunities and Challenges of Strong Motion Observation Instruments

Yu Haiying^{1,2)}, Zhou Baofeng^{1,2)}, Wang Jiahang^{1,2)}, Ma Xinsheng^{1,2)}
Zhang Tongyu^{1,2)}, Xu Xuan^{1,2)} and Hu Zhenrong^{1,2)}

1) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

2) Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

Abstract The development history of strong motion instruments, force-balance accelerometers, seismic intensity meter and MEMS accelerometers is described, and typical abnormal waveforms in strong motion records and instrument response errors correction for force-balance accelerometers are analyzed in brief, then challenges and opportunities of strong motion instruments are studied. The measures to solve the defects of strong motion instruments are suggested. The results are showed as following: (1) it is a good way to promote the development of strong motion instruments by studying abnormal waveforms in strong motion records; (2) for force-balance accelerometers with the band range from 0 to 30Hz, strong motion records obtained by early digital strong motion instruments should be corrected by instrument response; (3) new methods and technology in strong motion observation should be tracked, and new instruments (MEMS accelerometers and Opticalfibre accelerometers) should be developed to meet the demands of our country.

Key words: Strong motion instruments; Force-balance accelerometers; Seismic intensity meter; MEMS accelerometers; Strong motion records abnormal waveforms; Instrument response errors