

精密控制机械震源在地下介质变化监测中的应用研究现状*

杨微¹, 王宝善¹, 葛洪魁², 袁松湧¹, 贾玉华¹, 段家杨³

(1. 中国地震局地球物理研究所 地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京, 100081; 2. 中国石油大学(北京) 非常规天然气研究院, 北京 102249; 3. 云南省大理州宾川县地震局, 云南 大理 671600)

摘要: 阐述了精密控制机械震源(ACROSS)的工作原理、发展历程、工作模式及信号检测等, 介绍了国际上利用 ACROSS 开展观测实验的研究现状, 并针对地震危险区域, 提出可利用 ACROSS 进行地下精细结构探测及其动态变化监测研究, 增强孕震环境和发震机理的认识水平, 为地震物理预报研究提供了一种潜在的技术途径。

关键词: 精密控制机械震源; 大功率人工震源; 扫描信号; 结构探测; 动态监测

中图分类号: P315.33

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)01-0025-10

0 引言

地震波是“照亮地球内部的一盏明灯”(傅承义等, 1985; 陈颢, 朱日祥, 2005), 它能够穿过地球内部传播, 携带了丰富的地下介质物性的信息, 是获取地球内部结构、物质组成及状态等最重要的研究手段。要想利用地震波来获取和研究地下介质的信息, 首先要有能产生地震波的源。根据地震波传播的距离范围, 地震学研究可分为全球尺度、区域尺度和局部尺度, 不同研究尺度所采用的源也不同。

全球尺度研究的是深至下地幔或地核的地球深部结构, 主要利用天然地震信息, 已获得了较为清楚的地壳、地幔和地核的大致结构; 局部尺度研究的是地球浅部或极浅部的沉积层结构, 属于勘探地震学的范畴, 目前技术较为成熟, 是探测地球内部油气、矿藏等资源的重要途径(Mooney, 1989); 区域尺度研究的是深至地下几十千米的地壳及上地幔顶部, 对于了解和研究地壳和上地幔的结构构造、物质组成、认识地球演化、强震分布规律和潜在震源区的量化判别等都具有重要的研究意义(梁慧云, 张先康, 1996; 陈颢等, 2007)。

目前可利用的源主要有天然地震源、人工震源和环境噪声源等(王宝善等, 2011), 在区域尺度的地震学研究中, 天然地震在发震时间和位置上具有极大的不确定性、分布不均匀、震源特征复杂等使其在区域尺度的探测方面存在局限性, 而噪声源能量弱, 需要长时间的叠加才能获得可靠的测量, 限制了开展区域尺度研究的时间和空间精度及分辨率。人工震源的位置和激发时间是已知的, 探测精度较高(陈颢, 朱日祥, 2005; 王宝善等, 2011), 但传统人工震源达不到区域尺度研究对探测尺度和精度的要求, 这就需要寻求合适的大功率震源来开展区域尺度研究。本文针对 20 世纪末期发展起来的一种新型连续震源(Yamaoka *et al.*, 2001; 庄灿涛, 2002; 廖成旺等, 2003), 即精密控制机械震源(Accurately Controlled Routinely Operated Seismic Source, 简称 ACROSS), 论述其工作原理、发展历程、工作模式以及应用等方面的研究现状。

1 ACROSS 工作原理

ACROSS 是一种旋转式的震源, 其设计和工作原理是利用伺服电机精密控制两个完全相同的偏

* 收稿日期: 2014-08-18.

基金项目: 地震行业科研专项(201208004)和国家科技支撑计划“汶川地震断裂带科学钻探—主动震源探测及发震断裂的走时变化监测”联合资助。

心轮块体,沿同一转动轴作相反方向的不平衡圆周转动,合成垂直方向或水平方向的振动力(图1),冲击地面产生地震波(庄灿涛,2002;廖成旺等,2003;Ikuta *et al.*, 2002, 2004; Alekseev *et al.*, 2005; 王洪体等, 2009a)。

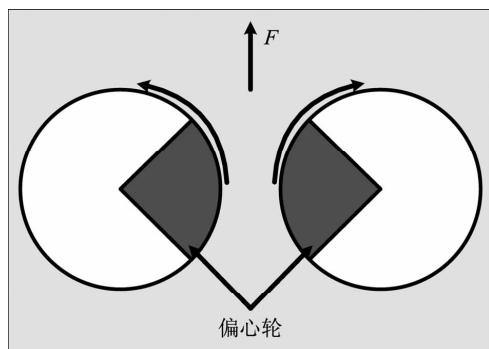


图1 ACROSS 工作原理示意图

Fig. 1 The working principle schematic of ACROSS

在震源运转时,由于偏心轮的旋转块体质量是不变的,转动速度是影响和控制震源机械特征的唯一参数,而偏心轮的转动可以通过伺服电机进行精密控制,因此 ACROSS 具有高度可重复性和精密可控等特点。当伺服马达带动偏心轮块体作恒定旋转,如果偏心轮块体的质量为 M ,转动频率为 f ,偏心轮重心到转轴的距离(偏心半径)为 R ,那么它产生的径向力大小为 $MR(2\pi f)^2$,这个离心力通过震源与地面的耦合接触面而作用在地面上。

震源可以通过沿不同的旋转轴旋转组合成不同类型的震源。若两个偏心轮块体沿同一水平轴旋转作相反方向的转动,合成的结果就只有在垂直方向的力,形成垂直震源,且作用力为

$$\begin{cases} F_x = 0, \\ F_y = 0, \\ F_z = 2MR\omega^2 \sin(2\pi ft). \end{cases} \quad (1)$$

若两个偏心轮块体沿垂直方向旋转作相反方向的转动,合成的结果就只有在垂直于偏心轮圆心连线方向的水平力,形成水平震源,且作用力是

$$\begin{cases} F_x = 2MR\omega^2 \sin(2\pi ft), \\ F_y = 0, \\ F_z = 0. \end{cases} \quad (2)$$

2 ACROSS 发展历程

ACROSS 是 20 世纪末期发展起来的一种新型震源,目前正逐步走向实用化,国际上研发、生产 ACROSS 和开展野外试验研究的国家主要是俄罗斯、日本、美国和中国等(图2)。

ACROSS 的原理建立比较早,在 19 世纪 70 年代,前苏联科学院在新西伯利亚市的计算数学和数字地球物理研究所就提出了这一设想(Alekseev *et al.*, 2005)。早期在技术上有一定的制作难度,如高精度可控稳频电机、大直径耐磨轴承、高性能地震计和实时处理机等(庄灿涛,2002;杨光亮,朱元清,2007)。随着科技的发展,相关技术难题都逐渐得到较好的解决,逐步研制出不同类型的 ACROSS,前苏联的这项研究一直没有公开,直到 2000 年以后俄罗斯科学院西伯利亚分院的试验基地才对国外开放,并在 2004 年日本召开的国际固体地球物理有源监控工作会上发表了相应的进展和成果(Anatoly *et al.*, 2004)。

日本的研究人员也利用相似原理,在 20 世纪 90 年代开始研制 ACROSS,核心为一个伺服电机驱动偏心轮转动,分别按相反的旋转方向各自旋转一次,然后进行叠加、相关或反褶积等处理(Ikuta *et al.*, 2002, 2004)。由日本富士电机株式会社形成产品,于 1998 年在 Nojima 断裂带附近开始试运行,该套技术系统在现场实验中得到了检验和进一步的完善,并在 2003 年 11 月至 2004 年 6 月在日本中部的土岐市正式运行,产生的地面振动可在周围百公里范围记录到(Kunitomo, Kumazawa, 2004a, b),这一成果引起了世界同行的关注。不少地震专家认为这是有希望攻克地震预测科学难关的一个突破点。日本的研究人员利用其精密可控的优点,大力发展 ACROSS 主动监测技术(Kasahara *et al.*, 2010, 2012; Yoshida *et al.*, 2012),并应用到石油、天然气的开采,CO₂ 气体注入地层的动态监测等。在数据处理分析方面,日本发展了一套相应的处理技术,主要采取倒谱技术、AIC 统计提取技术、传递函数法和自适应加权匹配滤波等。

美国加利福尼亚大学洛杉矶分校(University of California, Los Angeles, 简称 UCLA)土木工程系的研究人员也利用偏心轮旋转产生离心力的原理,在 21 世纪初期,为应用于地震工程中建筑物的健康诊



图2 目前国际上开展试验研究的 ACROSS

(a)俄罗斯固定式(CV-100);(b)移动式(CV-40)ACROSS 垂向震源;(c)日本垂向 ACROSS 震源;(d)水平向 ACROSS 震源;(e)美国固定式 ACROSS 水平向震源;(f)移动式 ACROSS 水平向震源;(g)中国固定式 (CASS-40)ACROSS 垂向震源;(h)移动式(CASS-10)ACROSS 垂向震源

Fig. 2 The types of ACROSS used for international experimental research in current
The fixed (CV-100) (a) and mobile (CV-40) (b) vertical ACROSS in Russia; the vertical (c) and horizontal (d) ACROSS in Japan; the fixed (e) and mobile (f) horizontal ACROSS in America; the fixed (CASS-40) (g) and mobile (CASS-10) (h) vertical ACROSS in China

断和监测研究 (Whang *et al.*, 2004a, b; Stewart *et al.*, 2005; Skolnik *et al.*, 2007), 研制出水平式旋转震源。Sliver 等 (2009a, b) 和 Niu 等 (2010) 与 UCLA 相关人员开展合作研究, 利用 ACROSS 分别在 Cascadia 和 Parkfield 开展了现场试验研究, 在震中距 90 km 处的流动台站检测到了水平旋转震源 (MK15) 产生的有效信号, 其初步成果在美国地震年会 (SSA) 和美国地球物理联合会 (AGU) 上进行展示, 但后续的成果未见报道。

在国内, 中国地震局地震预测研究所、北京港震机电技术有限公司和一些单位的研究人员 (庄灿涛, 2002; 廖成旺等, 2003; 王洪体, 2009b) 自 2000 年以来开始跟踪国际相关的动态, 对 ACROSS 开展相关技术的研发, 2002 年成功研制了水平向作用力的功能性样机 (单个旋转偏心轮), 开展了大量的测试与试验, 验证了控制震源控制系统和起震系统的工作原理, 并逐步进行完善和优化, 发展到垂直向作用力的小型化 ACROSS (两个旋转偏心轮), 2006 年北京港震机电技术有限公司开始进行 40 t 垂直向作用力 ACROSS 的研发, 并在一年后成功研发生产出国内第一台大吨位的垂直向作用力 ACROSS。

图 2 给出了目前国际上较成熟并用于野外观测研究的不同 ACROSS 类型。俄罗斯注重于大吨位的垂直线性震源研制 (图 2a、b), 主要有固定式 (CV-100) 和移动式 (CV-40) 两类震源, 这两类设备的特点是功率很大, 其中 CV-100 型对地面的最大作用力为 100 t, CV-40 型为 40 t, 信号频率低, 所以信号传播很远。CV-100 型振动源的单频信号传播距离可超过 1 000 km, 信噪比较高的信号可达 312 km, CV-40 型的单频信号传播距离可达 430 km, 信噪比较高的信号可达 100 km, 探测深度能达到莫霍面 (Alekseev *et al.*, 2005; Kovallevskiy *et al.*, 2012), 这样的震源对于探测地壳精细结构及其动态变化研究是非常有用的。

日本侧重于小型化的震源, 垂直向和水平向震源均有, 震源体只有一个偏心轮 (图 2c、d), 美国主要以水平振动震源为主 (图 2e、f), 国内成功研制了垂直旋转震源, 有固定式 (CCAS-40) 和移动式 (CCAS-10) 两种 (图 2g、h), 其中 CCAS-40 型对地面的最大垂向作用力为 40 t, CCAS-10 型的垂向力为 10 t, 信号频率范围为 2 ~ 10 Hz。各震源的频率特征和出力大小见表 1。

表 1 现有 ACROSS 类型及特征

Tab. 1 The types and characteristics of the current ACROSS

国 家	ACROSS 类型	频率范围 /Hz	最大作用力 /kN
俄罗斯	CV-100 固定式垂向震源	1.5 ~ 10	1 000
	CV-40 移动式垂向震源	6 ~ 12	400
日 本	垂向震源	0 ~ 50	160
	水平向震源	0 ~ 35	200
美 国	固定式水平向震源	0 ~ 25	900
	移动式水平向震源	0 ~ 20	180
中 国	CASS-40 固定式垂向震源	2 ~ 10	400
	CASS-10 移动式垂向震源	2 ~ 10	100

3 工作模式及信号检测

扫描技术是连续可控源的重要组成部分 (林君, 2004; 崔仁胜, 王洪体, 2011a), 由于 ACROSS 具有相位精密可控的特点, 目前采用的工作模式主要有单频扫描模式、线性扫描模式、非线性扫描模式等。为利用 ACROSS 进行地壳结构探测和地下介质变化的监测分析提供技术手段, 针对不同工作模式下扫描信号的特征, 不同研究人员采用的信号检测方法也不同 (杨微等, 2013)。

3.1 单频扫描模式

单频扫描是指在扫描时间内, 震源扫描的频率呈单一频率保持不变。单频扫描信号的能量都累积到该频率上, 在频率域里呈现单一峰值, 易于检测和辨认。在单频信号检测上, 日本的研究人员采用自定义的“存否”倒谱分析方法, 得到时间域的地震波形记录, 再采用常规地震资料处理方法来进一步分析和计算地壳介质参数等。俄罗斯的研究人员采用互相关处理和谐波分析 (Kasahara *et al.*, 2010), 获得二次谐波与基波的振幅比随时间的变化关系, 利用其敏感系数重构地球壳内介质微弱的应力变化, 并观测到了由日潮和半日潮引起的线应变。

3.2 线性扫描模式

线性扫描是指扫描的频率随时间呈单调变化, 且是时间的线性函数。在采用线性扫描过程中, 结合震源的工作原理, 产生的作用力与激发频率呈二次方线性增加, 一般采用先升频再降频的扫描模式。在信号检测方面, 俄罗斯的研究人员采

用匹配滤波相关法 (Alekseev *et al.*, 2005), 日本学者采用相干和反褶积法 (Ikuta *et al.*, 2002, 2004; Saiga *et al.*, 2006), 美国学者采用反褶积法 (Sliver *et al.*, 2009a, b; Niu *et al.*, 2010), 在国内, 崔仁胜和王洪体等 (2009b, 2011) 采用匹配滤波相关法进行检测分析。

由于线性调频信号的 Wigner-Ville 分布在时频域内呈一条直线, 且在霍夫 (Hough) 变换后表现为一个峰值, Li 等 (2012) 和刘希康等

(2013) 采用维格纳—霍夫变换 (Wigner-Hough Transform) 检测 ACROSS 线性扫描信号。图 3 给出了 Li 等 (2012) 利用 ACROSS (CASS-40) 在广东省新丰江水库东南的大坝峡谷区至河源一带的探测资料采用维格纳—霍夫变换法分析的结果, 在 40 km 内 Pg 和 Sg 波很明显 (图 3a、b), 在 80 ~ 120 km 的偏移距上也检测到了清晰 PmP 和 SmS 震相 (图 3c、d), 而且与拟合波形 (图 3e、f) 一致。

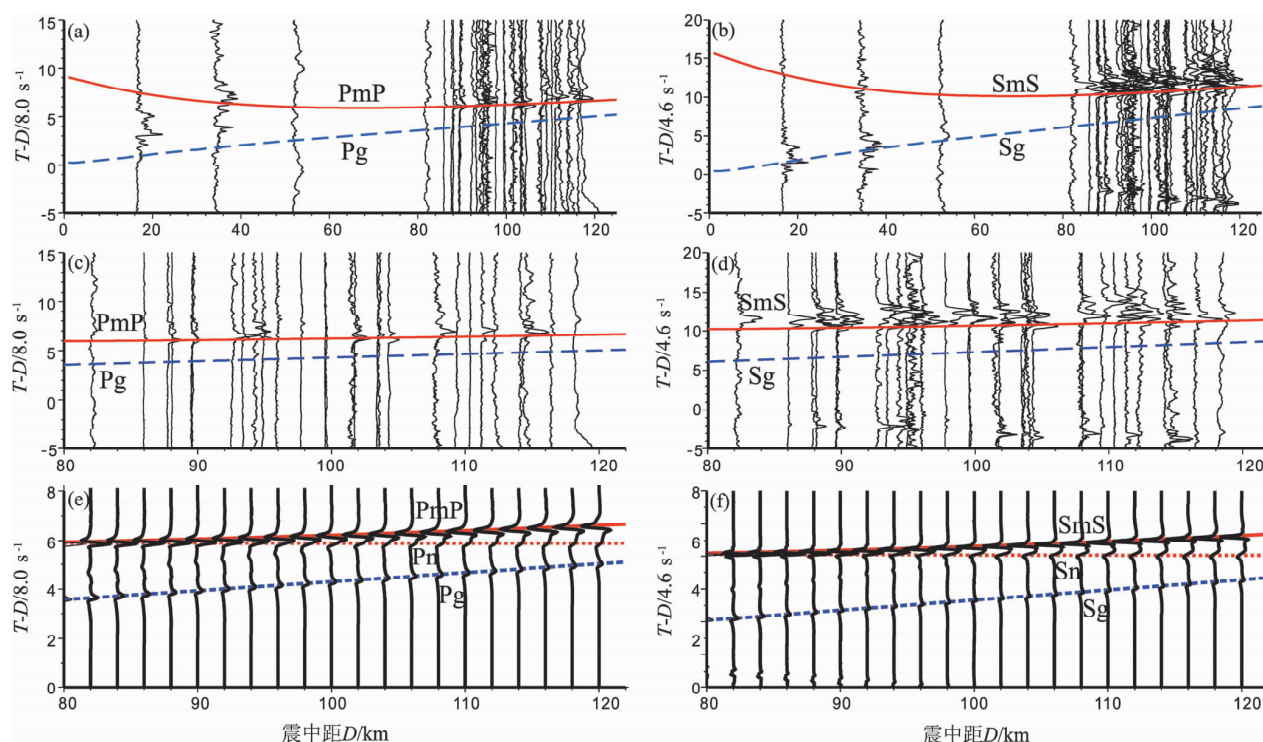


图3 利用维格纳—霍夫变换法分析 ACROSS 信号及其震相识别 (Li *et al.*, 2012)

Fig. 3 ACROSS signal analysis and its phase identification by Wigner-Hough Transform method data (Li *et al.*, 2012)

3.3 非线性扫描模式

非线性扫描是指扫描信号的频率与扫描时间不呈线性关系。ACROSS 在采用线性扫描模式时, 高频段信号扫描产生的能量较强, 而在低频段扫描的能量较弱, 为了让扫描信号的自相关函数尽可能的接近脉冲函数, 要求在低频段和高频段信号的能量尽量保持一致, 则在扫描周期里, 低频段信号扫描时间要比高频段的长, 以增强低频信号的能量, 降低自相关函数的旁瓣。杨微等 (2013) 对互相关、短时相关、相干和反褶积方法进行了对比分析研究, 认为大吨位的 ACROSS 产生的信号频带范围窄, 在信号检测和震相识别上,

相干和反褶积法优于互相关和短时相关法。

4 应用现状

由于 ACROSS 具有高度可重复性和相位精密可控等特征, 俄罗斯、日本、美国和中国等分别将 ACROSS 应用于地壳精细结构的探测和地震危险区断裂带介质应力状态的动态监测等。

4.1 结构探测研究

俄罗斯科学院的科研人员首先对 ACROSS 信号记录与人工爆破 (5 t TNT) 的记录进行了对比分析, 在地震剖面上两种震源产生的震相一致,

然后利用型号为 CV-40 的 ACROSS, 从 Pevek 到 Anadyr, 再到 Hаты́рта 进行了壳幔结构探测 (Kovalevskiy, 2012), 发现新的探测结果与以前的地质—地球物理剖面存在着明显的差异 (图 4): (1)

新的探测结果显示界面 K 与以前的探测结果有差异; (2) 在剖面 540 ~ 600 km 处, 地壳厚度约为 33 km, 莫霍面比其他区域的深度要浅, 分析认为可能与该区域的油气聚集区或者矿石区有关。

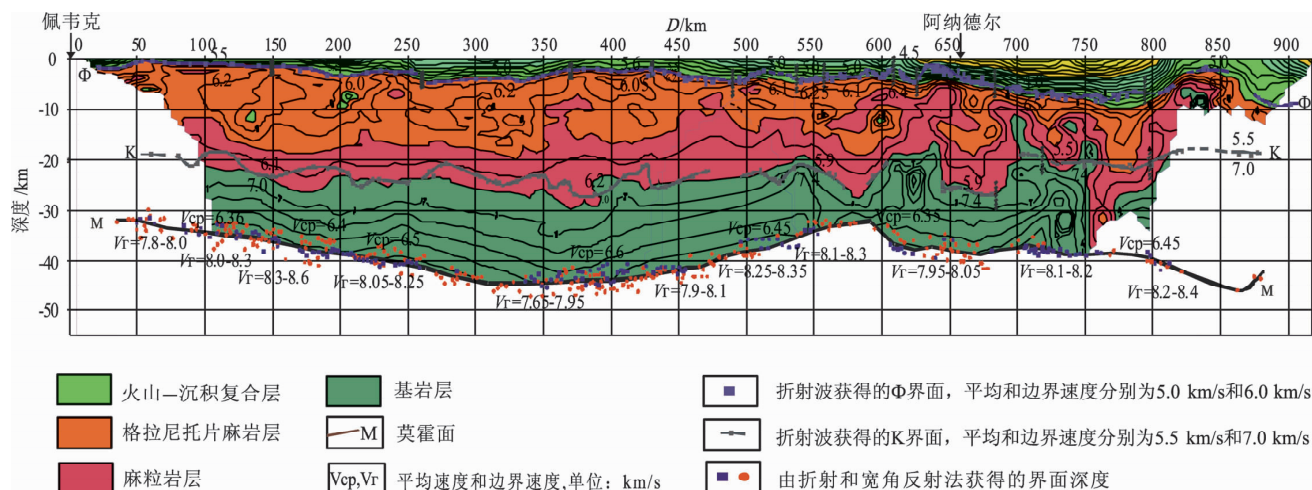


图 4 利用 ACROSS 探测的壳幔结构与地质—地球物理剖面对比分析 (Kovalevskiy, 2012)

Fig. 4 The comparative analysis of crust-mantle structure used ACROSS with the geological-geophysical section (Kovalevskiy, 2012)

王洪体等 (2009a) 联合北京港震机电技术有限公司利用其生产的 40 t 固定式 ACROSS, 在河北省沽源县布设了 150 km 的流动测线进行连续监测试验研究, 在 150 km 范围内取得有效的数据记录, 从其中可以提取多种地震震相的走时, 采用震相波组全波互相关的方法, 走时精度可以达到 1 ms 以上, 并将 126 次叠加的记录与中国地震局地球物理勘探中心 1996 年实施的爆破记录进行了对比分析, 二者初至震相的基本特征一致, 从 80 ~ 150 km 都能看到比较明显的莫霍面反射波, 垂直向 ACROSS 记录中也有明显的 S 波, 似乎还可识别更多的后续震相。

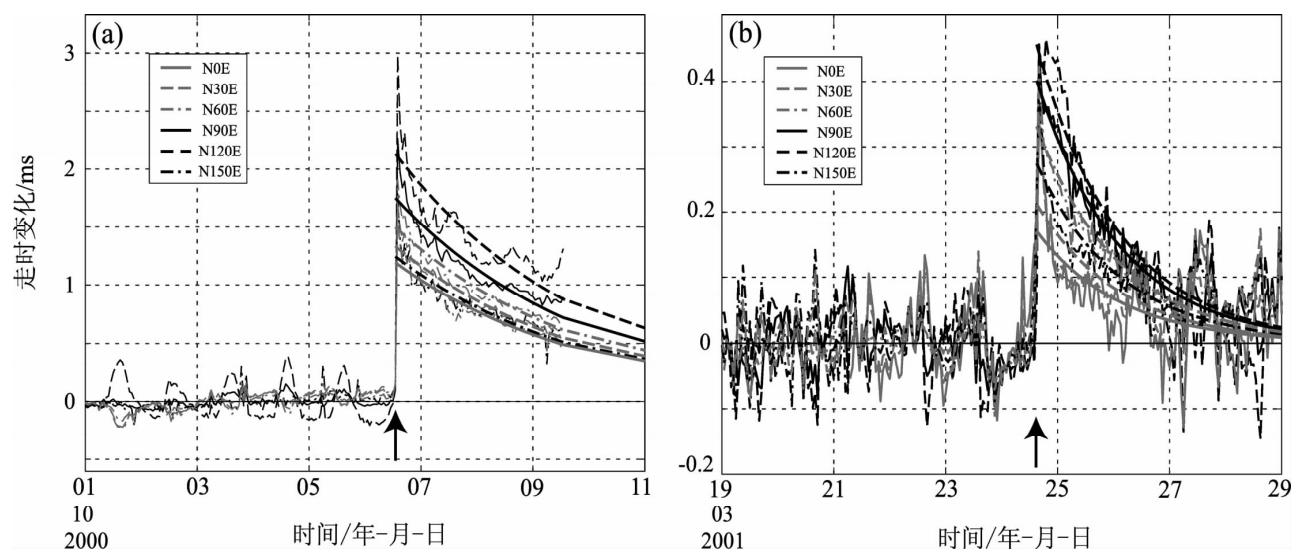
4.2 地震相关介质变化研究

ACROSS 震源的另一个优点是可以重复进行。俄罗斯地震学家在新西伯利亚的贝斯特罗夫卡实验场和贝加尔湖实验场都使用了这种震源, 研究区域深部地壳介质结构, 类似于人工地震探测方法。他们与日本合作, 在地质复杂的西伯利亚地区建立一条深度达 50 km 的波速剖面, 还在贝加尔湖实验场布设了一条长达 125 km 的连续观测剖面, 以连续检测波速随时间的变化, 相关成果还未见报道。

1995 年 Kobe 7.2 级地震后, Yamaoka 等 (2001) 等利用水平向 ACROSS, 在 Nojima 断裂带附

近建立一套监测系统, 动态监测精度为 0.02 ms, 在 1 km 的震中距上观测到相对走时变化为 0.1 ms, 相对波速变化约为 0.1%。该系统在 2000 年 1 月后又进行了为期 15 个月的连续观测, 在实验期间, 2000 年发生 Tottori M_w 6.6 地震和 2001 年发生 Geiyo M_w 6.4 地震, 两次地震震中离震源位置分别为 170 和 215 km, 在同震期间, 观测到 S 波相对走时突然延迟约为 0.4% 和 0.1% (图 5), 延迟的 S 波震相偏振方向垂直于 Nojima 断裂带, S 波的相对变化幅度比 P 波的变化大, 分析其原因主要是由于断裂带裂隙流体填充增加所引起 (Ikuta *et al.*, 2004)。在试验期间, 日本科学家同时也注意到震源与基板的耦合情况对观测结果有较大的影响, 在数据处理过程中采用反褶积和叠加的方法来降低其影响。同时, Saiga 等 (2006) 分析认为震源近场环境因素 (大气压、温度、降雨等) 的变化对观测动态变化存在着影响, 在去除掉 15 ~ 20 Hz 频率范围的信号后, 环境因素的影响明显减小。

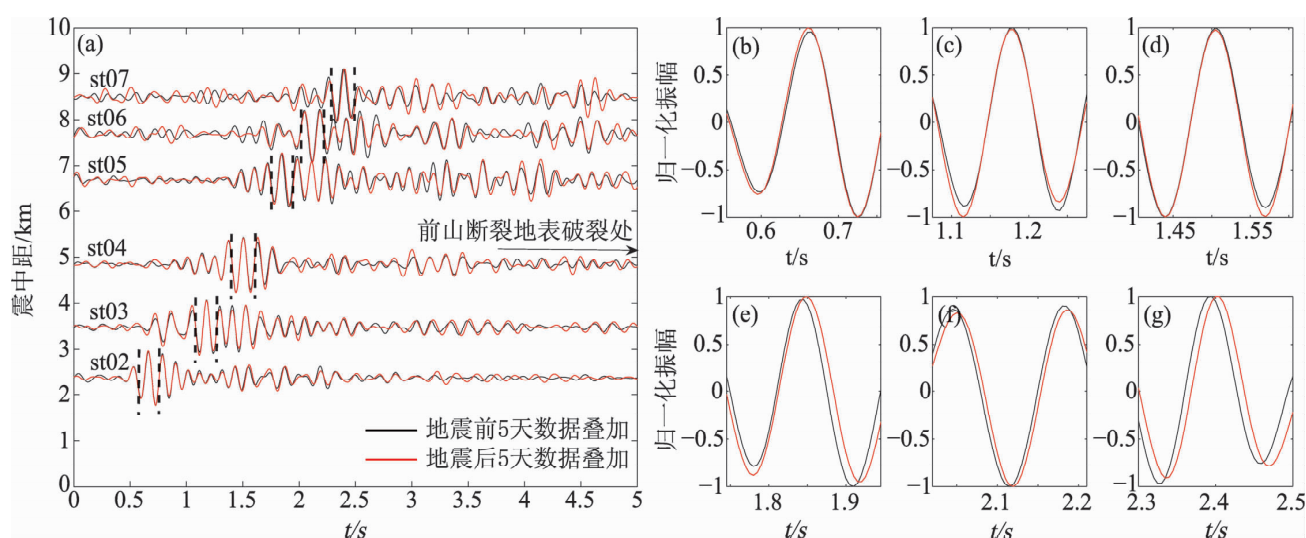
美国的地震科学家为了监测周期性的震颤和滑移由微弱的应力变化而触发 (Silver *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2010), 利用 ACROSS (MK15) 在 Cascadia 和 San Andreas Fault 开展主动监测试验, 以研究震颤和滑移的触发机制。首先与

图5 ACROSS 监测系统观测到的地震前后走时变化 (Ikuta *et al.*, 2004)Fig. 5 The travel time variation before and after earthquake observed by ACROSS monitoring system (Ikuta *et al.*, 2004)

ACROSS 产生的信号记录与炸药震源的记录进行了震相对比分析, 然后进行单频扫描模式验证主动监测系统的可行性, 在 90 km 外的流动观测台站检测到了清晰的直达 Pg 和 Sg 震相, 但后续连续观测结果还未见到报道。

2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震后, 杨微等 (2010) 在龙门山断裂带前山断裂带附近利用 ACROSS (CASS-10) 进行连续监测试验, 在试验观测期间绵竹发生了一次 $M_s 5.6$ 地震, 地震前后观测数据

的对比分析表明 (Yang *et al.*, 2012, 2013), 穿过断裂带的直达 P 波的相对走时延迟了 5 ~ 9 ms, 而未跨过断裂带的台站未观测到变化, 通过建模分析表明, 该时延主要是同震效应引起的 120 m 断裂带内应力改变, 变化幅度约为 2.0% (图 6)。Chen 等 (2014) 利用连续监测的试验数据, 通过噪声互相关和 ACROSS 主动探测方法进行分析, 发现获得的连续波速变化非常一致, 且与大气压力变化呈明显的正相关性。

图6 利用 ACROSS 观测到的绵竹 $M_s 5.6$ 地震前后地震波走时相对变化Fig. 6 The relative travel time variation before and after Mianzhu $M_s 5.6$ earthquake observed by ACROSS monitoring system

4.3 油气相关介质变化研究

俄罗斯科学家在北高加索和东西伯利亚油气地区利用多台固定式的 ACROSS (CV-100), 开展油气聚集和运移特征的连续监测研究, 发现位于油区外的环境噪声功率谱在 1 ~ 10 Hz 内低于油区上方的观测幅值, 分析认为在低频段的差异特征可能成为油气藏的经验性指示标志。

同时, 日本和美国的科学家也将 ACROSS 应用于 CO₂ 注入地层动态监测研究中, 发现在 CO₂ 注入前后注入井周围介质存在着明显的地震波速度变化。Kasahara 等 (2012) 在 Awaji Island 地区观测到 CO₂ 注入前后地震波速度在有些地方是快速变化, 有些是逐渐缓慢的变化, 且波速变化幅度较大的是后续震相而不是 P 波和 S 波的初至。

4.4 建筑物结构健康诊断

除监测地下构造应力变化以外, UCLA 研究人员还将 ACROSS 应用于其他方面, 他们研制 ACROSS 的初衷就是将其应用于建筑物的健康损伤检测 (Whang *et al.*, 2004; Stewart *et al.*, 2005; Skolnik *et al.*, 2007), 对建筑物施以微弱的振动信号, 测量不同时间各部位振幅和相位的变化来推断损伤部位和损伤情况, 目前已围绕高架桥梁、大坝、钢筋混凝土多层房屋等建筑物开展试验研究。

5 总结

随着 ACROSS 技术系统的关键问题逐渐得到改进和完善, 为人工地震探测方面提供了一种新的选择, 其应用主要有:

(1) 地壳精细结构探测。大吨位的 ACROSS 具有功率大、频率低、相位精密可控等特点, 一个几十吨量级的 ACROSS 的作用范围可达百公里量级, 其探测深度可穿透整个地壳, 为地壳精细结构探测提供了一条新的技术路线。

(2) 地震危险区断裂带动态监测。ACROSS 的绿色环保和高度可重复性, 可达到主动源动态监测的技术要求, 在地震危险区开展地下结构探测及其动态变化监测, 为了解地震孕育和发生机理以及余震趋势的判断提供了潜在的途径。

(3) S 波分裂研究。ACROSS 水平震源能产生 S 波震相, 分析剪切波偏振方向和断裂带性质的关系, 获取 S 波分裂随时间变化的规律, 进而反映地

下介质应力的动态变化, 为地震物理预测探索提供了可靠的物理途径。

在其他应用领域方面, 俄罗斯、日本和美国等国家已逐步开展工作, 如俄罗斯利用 ACROSS 在北高加索和东西伯利亚油气地区开展监测, 日本将 ACROSS 应用于 CO₂ 注入地层的监测, 美国也将 ACROSS 应用于 CO₂ 注入地层和建筑物健康诊断分析等监测研究。

利用重复人工震源获得地下介质波速结构和时间演化特征, 是 4D 地震学研究中一个新的发展方向, 尤其开展区域尺度的研究, 对于探测地壳结构的物质组成、了解岩石圈演化及成矿过程、认识地震的孕育和发生过程、进行大陆动力学研究和对地震进行物理预报都具有重要的意义。

在开展野外试验探索中, 得到了四川省地震局、北京市地震局、北京港震机电技术有限公司等多家单位相关研究人员的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- 陈颢, 王宝善, 葛洪魁, 等. 2007. 建立地震发射台的建议[J]. 地球科学进展, 22(5): 441-446.
- 陈颢, 朱日祥. 2005. 设立“地下明灯研究计划”的建议[J]. 地球科学进展, 20(5): 485-489.
- 崔仁胜, 王洪体. 2011a. 精密控制震源发射信号设计方法研究[J]. 地震地磁观测与研究, 32(2): 47-52.
- 崔仁胜, 王洪体. 2011b. 提取精密控制震源信号的自适应加权匹配滤波方法[J]. 地震, 31(4): 133-139.
- 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 1983. 地球物理学基础[M]. 北京: 科学出版社.
- 梁慧云, 张先康. 1996. 各国地壳上地幔深地震反射研究计划与进展[J]. 地球物理学进展, 11(1): 42-60.
- 廖成旺, 庄灿涛, 梁鸿森. 2003. 精密控制常时震源系统 (ACROSS) 的初步试验[J]. 中国地震, 19(1): 89-96.
- 林君. 2004. 电磁驱动可控震源地震勘探原理及应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘希康, 崔仁胜, 王洪体, 等. 2013. 用 Wigner-Hough 变换检测精密可控震源信号[J]. 地震, 33(3): 33-42.
- 王宝善, 王伟涛, 葛洪魁, 等. 2011. 人工震源地下介质变化动态监测[J]. 地球科学进展, 26(3): 249-256.
- 王洪体, 庄灿涛, 薛兵, 等. 2009a. 精密主动震源监测[J]. 地球物理学报, 52(7): 1808-1815.
- 王洪体. 2009b. 精密控制震源理论波形的计算方法[J]. 地震, 29(2): 25-31.
- 杨光亮, 朱元清. 2007. 可控震源在深部地壳探测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 27(5): 72-81.
- 杨微, 葛洪魁, 王宝善, 等. 2010. 由精密控制人工震源监测到的绵竹

- 5.6级地震前后波速变化[J]. 地球物理学报, 53(5):1149-1157.
- 杨微,王宝善,葛洪魁,等. 2013. 精密控制机械震源特征及信号检测方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 37(1):50-55.
- 庄灿涛. 2002. 探索预报大城市直下型灾害性地震的一种技术措施[J]. 国际地震动态, (8):35-37.
- Alekseev A., Chichinin I., Korneev V.. 2005. Powerful low-frequency vibrators for active seismology[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 95(1):1-17.
- Anatoly S., Alekseev A., Boris M., *et al.*. 2004. Active Monitoring of Medium with the Use of Seismic Vibrators; Experimental Systems and the Results of Works[C]//First International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics, S3-01.
- Chen H. C., Ge H. K., Niu F. L.. 2014. Semiannual velocity variations around the 2008 M_w 7.9 Wenchuan Earthquake fault zone revealed by ambient noise and ACROSS active source data[J]. Earthq. Sci., doi:10.1007/s11589-014-0089-5.
- Ikuta R., Yamaoka K., and Miyakawa K., *et al.*. 2002. Continuous Monitoring of Propagation Velocity of Seismic Wave using ACROSS[J]. Geophys. Res. Lett., 29(13):1627, doi:10.1029/2001GL013974.
- Ikuta R., Yamaoka K.. 2004. Temporal Variation in the Shear Wave Anisotropy Detected using the Accurately Controlled Routinely Operated Signal System [J]. J. Geophys. Res., 109 (B09305), doi:10.1029/2003JB002901.
- Kasahara J., Ito S., Fujiwara T., *et al.*. 2012. Results of the Time Lapse Experiment on Air Injection using the Ultra-stable and Continuous seismic ACROSS source[C]. Riyadh; Proc. KACST-JCCP International Workshop for the Earth's Surface and Subsurface 4D Monitoring.
- Kasahara J., Korneev V., Zhdanov M.. 2010. Active Geophysical Monitoring[M]//Handbook of Geophysical Exploration; Seismic Exploration. Holland; Elsevier Science.
- Kovalevskiy V.. 2012. The Experience of Using Powerful Seismic vibrational Sources for Vibro-DSS and Seismic Monitoring[C]. Riyadh; Proc. KACST-JCCP International Workshop for the Earth's Surface and Subsurface 4D Monitoring.
- Kunitomo T., Kumazawa M.. 2004a. Active Monitoring of the Earth's structure by the Seismic ACROSS-Development of the Seismic ACROSS and Continuous Transmission at Tono Mine ACROSS Station[C]. Japan; First International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics.
- Kunitomo T., Kumazawa M.. 2004b. Active Monitoring of the Earth's structure by the Seismic ACROSS-Transmitting and Receiving Technologies of the Seismic ACROSS[C]. Japan; First International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics.
- Li Z., You Q., Ni S., *et al.*. 2012. Waveform Retrieval and Phase Identification for Seismic Data from the CASS Experiment[J]. Pure and Applied Geophysics, 170(5):815-830, doi:10.1007/s00024-012-0585-2.
- Mooney W.. 1989. Seismic Methods of Determining Earthquake Source Parameters and Lithospheric Structure[J]. Geophysical Society of America Memoir, 172:11-34.
- Niu F. L., Silver P., Nigbor R.. 2010. Toward Using Eccentric Mass Shakers for Active Seismic Monitoring[C]. Portland, Oregon, USA; Seismological Society of American Annual Meeting.
- Saiga A., Yamaoka K., and Kunitomo T., *et al.*. 2006. Continuous Observation of Seismic Wave Velocity and Apparent Velocity using a Precise Seismic Array and ACROSS Seismic Source [J]. Earth. Planets. Space., 58(5):993-1005.
- Silver P., Niu F. L., Nigbor R.. 2009a. Assessing the Role of Fluids in Episodic Tremor and Slip Events using Active Seismic Sources; Results from a Prototype Experiment in Cascadia[C]. San Francisco, California, USA; AGU Fall meeting.
- Silver P., Niu F. L., Wang B. S., *et al.*. 2009b. The Feasibility of Using an Eccentric Mass Shaker for Time-lapse Seismic Imaging [C]. Monterey, California, USA; Seismological Society of American Annual Meeting.
- Skolnik D., Lukac M., Naik, *et al.*. Developments on the CENS Structural Health Monitoring Front. UC Los Angeles; Center for Embedded Network Sensing[EB/O]. (2007-10-10) [2014-09-10]. <http://www.escholarship.org/uc/item/8qx229h5>.
- Stewart J., Whang D., Wallace J., *et al.*. 2005. Field Testing Capabilities of nees@UCLA Equipment Site for Soil-Structure Interaction Applications[C]. Proc. Geo-Frontiers 2005, Austin Texas, ASCE Geotechnical Special Publication, 130-142.
- Whang D., Kang S., Wallace J., *et al.*. 2004b. Integration of NEESgrid into the nees@UCLA Field Testing Site[C]. Canada; 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B. C..
- Whang D., Wallace J., Stewart J., *et al.*. 2004a. Forced Vibration Testing of a Reinforced Concrete Building Using the nees@UCLA Field Testing site[C]. 17th ASCE Engineering Mechanics Conference, University of Delaware, Newark, DE.
- Yamaoka K., Kunitomo T., Miyakawa K., *et al.*. 2001. A Trial for Monitoring Temporal Variation of Seismic velocity using an ACROSS System[J]. The Island Arc., 10:336-347.
- Yang W., Ge H. K., Chen H. C., *et al.*. 2013. Seismic Velocity Temporal Variation Obtained from ACROSS and Ambient Seismic Noise in the Longmenshan Range-front Fault[C]. USA; Seismological Society of American.
- Yang W., Ge H. K., Yuan S. Y., *et al.*. 2012. Seismic Velocity Temporal Variation Across Fault Monitored by ACROSS[C]. Proc. KACST-JCCP International Workshop for the Earth's Surface and Subsurface 4D Monitoring, Riyadh.
- Yoshida Y., Kunitomo T., Katsumata A., *et al.*. 2012. Temporal Variation of Tensor Transfer Functions Obtained by ACROSS Signal Transmitted from Morimachi [C]. Proc. KACST-JCCP International Workshop for the Earth's Surface and Subsurface 4D Monitoring, Riyadh.

Research Status of Application of Accurately Controlled Routinely Operated Seismic Source on Monitoring Subsurface Medium Variation

YANG Wei¹, WANG Bao-shan¹, GE Hong-kui², YUAN Song-yong¹, JIA Yu-hua¹, DUAN Jia-yang³

(1. *Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

(2. *Unconventional Natural Gas Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*)

(3. *Binchuan Seismological Bureau, Dali 671600, Yunnan, China*)

Abstract

The working principle, developing history, operation mode and signal detection of Accurately Controlled Routinely Operated Seismic Source (ACROSS) is described, and the current status of experiment research with ACROSS on international is introduced. Aiming at the risk zone with potential earthquake, we put forward to detect the subsurface structure and its dynamic monitoring using ACROSS to improve the understanding on the seismogenic mechanism and environment, and provide a potential technology for physical forecast of earthquake.

Key words: ACROSS; superpaver artificial seismic source; scanning signal; structure detection; dynamic monitoring