

# 综述：台湾地区爆破和近震地面旋转运动观测的进展

W. H. K. Lee Bor-Shouh Huang C. A. Langston Chin-Jen Lin  
Chun-Chi Liu Tzay-Chyn Shin Ta-Liang Teng Chien-Fu Wu

**摘要** 已成功地测量到由大震引起的远场地面旋转运动，其观测结果与经典弹性理论计算结果基本吻合。然而，最近日本和中国台湾地震的近场旋转测量结果却比经典弹性理论预测值大10~100倍。1999年台湾集集地震( $M_w 7.6$ )的近场强地面运动记录显示沿长达100km破裂的地面运动极其复杂，因此，要想从加速度数据的二重积分得到合理的位移值则必须进行随机基线校正。因为旋转运动会对地球重力场产生扰动，进而影响到加速度观测，所以我们在台湾开展了相应的对地面旋转运动的观测研究。

有3篇文章描述了台湾地区地面运动旋转的观测结果：(1)HGSD台站的观测结果(Liu *et al*, 2009)；(2)台湾综合地球动力学研究(TAIGER)项目的两个爆破在N3台站的观测结果(Liu *et al*, 2009)；(3)中正大学(NCCU)校园的观测结果(Wu *et al*, 2009)。此外，Langston等(2009)给出了对台湾综合地球动力学研究爆破数据的分析结果。如前面几位作者指出的那样，我们发现台湾地区近震峰值旋转速率(PRR，单位mrad/s)和峰值地面加速度(PGA，单位 $m/s^2$ )之间存在线性关系，这个关系式为： $PRR=0.002+1.301PGA$ ，其相关系数为0.988。

## 引言

用沿着 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的线性平移运动量( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ )和绕 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴的角度转动量( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_z$ )就可以完全描述刚体的运动(Evans *et al*, 2009)。此外，对形变体还需要6分量应变变量(Bath, 1979)。由于旋转运动和应变的测量比较困难，以及普遍认为地面旋转运动并不显著，观测地震学主要是基于测量平移运动。例如，Richter在脚注(1958)曾写道：“理论说明并且观测也证实，这种旋转是可以忽略不计的。”这其实是一个误导，Richter没有提供任何参考文献，在那个时期也没有任何仪器灵敏到可测量每秒微弧度的旋转运动。Aki和Richards(1980)指出：“一般旋转传感器的最高灵敏度还不足以

在地球物理学应用中发挥效用。”在第二版，Aki和Richards(2002)再一次重申：“地震学仍在等待着合适的仪器来进行这样的测量。”

在过去的10年中，由大震引起的远场地面旋转运动测量已经在德国、新西兰和南加利福尼亚州(例如，Igel, 2007)等地的台站成功实现，观测结果与经典弹性理论的预测结果基本吻合(Suryanto *et al*, 2006)。然而近来在日本(Takeo, 1998, 2009)和台湾地区(Huang *et al*, 2006; Liu *et al*, 2009)的地震近场旋转测量结果却要比经典弹性理论预测值大10~100倍。在提出旋转运动不在经典弹性理论涵盖范围内的论文中，Teisseyre所写的2篇论文(1973, 1974)是开创性的。2篇最近的专著(Teisseyre *et al*, 2006, 2008)中有很多章节是关于旋转运动理论与实际观测等方面的。

1999 年  $M_w 7.6$  级集集(台湾)地震的 50 次以上近场强地面运动记录表明沿长达 100km 破裂的地面运动极其复杂(Lee *et al*, 2001)。如果没有对加速度数据进行随机基线校正或高通滤波(如, Boore, 2001), 则很难从加速度的二重积分得到可靠的位移值, 而位移值可以通过大地测量独立观测得到。因为旋转运动会对地球重力场产生扰动, 进而影响加速度观测, 而我们想知道这种影响到底有多大, 旋转运动是否是一个重要因素, 所以我们在台湾开展了相应的对地面旋转运动的观测研究。有 3 篇文章描述了台湾地区地面旋转运动的观测结果: (1) 在 HGSD 台站的观测结果(Liu *et al*, 2009); (2) 台湾综合地球动力学研究的两个爆破在 N3 台站的观测结果(Liu *et al*, 2009); (3) 中正大学(NCCU)的观测结果(Wu *et al*, 2009)。目前, 所有相关数据都可以从国际旋转地震学工作组网站(见数据来源一节)得到。此外, Langston 等(2009)还使用梯度测量法(Langston, 2007a, b, c)给出了台湾综合地球动力学研究爆破数据的相关分析结果。

本文旨在通过介绍上述文章强调一些结果, 讨论正在进行的监测项目, 从而对台湾地面旋转运动的观测进展进行简要的回顾。我们希望其他研究人员使用这些数据来进行更深一步的研究, 同时也欢迎读者对我们在台湾进行的地面旋转运动观测项目进行评论或提出建议。

## 1 观测地面旋转运动的方法

地面旋转运动可以直接通过旋转传感器测量得到或者间接通过平移传感器台阵推断得到。根据 Cochard 等(2006), 质点  $x$  处的位移  $u$  与  $x$  相邻点  $x + \delta x$  位移的关系为:

$$u(x + \delta x) = u(x) + \delta x + \omega \times \delta x \quad (1)$$

式中  $\varepsilon$  为应变张量, 且

$$\omega = \frac{1}{2} \nabla \times u(x) \quad (2)$$

$\omega$  是表示由扰动而产生的刚体转动角度的膺矢量。地表  $x, y, z$  轴的 3 个旋转分量分别由下列方程(例如, Cochard *et al*, 2006)给出:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \frac{\partial u_z}{\partial y}, & \omega_y &= -\partial u_x / \partial x, \\ \omega_z &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

因此, 地面旋转运动可以通过以下 2 种方法测量得到: (1) 间接由一组平移加速度计台阵测量得到, 当然这是在假定旋转运动对加速度测量影响非常小且经典弹性理论有效(例如, Spudich *et al*, 1995; Huang, 2003; Spudich and Fletcher, 2008)的前提下; (2) 直接由旋转传感器测量得到(例如, Nigbor, 1994; Takeo, 1998; Huang *et al*, 2006, 2009)。此外, 还有几个早期的测量地面旋转运动的实验, 例如在波兰, Droste 和 Teisseyre(1976)就第一次成功地记录到了旋转波。但是讨论这些早期论文超出了这篇综述的范围, 我们要集中讨论的是近期通过小而经济的旋转探测器对近震和爆破进行测量的方法。

Nigbor(1994)使用 GyroChip 旋转传感器在距内华达试验场(NTS)大爆炸 1km 处成功地记录到了地面旋转运动。此后, Takeo(1998, 2009)使用类似仪器分别记录到了 1997 年和 1998 年震群期间日本伊豆半岛近海地震激发的地面旋转运动。然而, 在 Nigbor(私人通讯, 2006)把他的仪器移到南加利福尼亚州博里戈山的观测台之后, 虽经 10 多年的观测, 却没有记录到任何有意义的地面旋转运动。

平移加速度通常被称为线性加速度或简称加速度。在强震学中,因为速度被广泛用来连结加速度和位移,我们(根据 Takeo, 2009)更喜欢使用旋转速率来代替角速度或旋转速度。同样我们也可以使用由 Majewski(2008)建议的旋转速率。根据国际单位体制(Lide, 2002),加速度的单位是  $m/s^2$ , 角速度单位是弧度/秒( $rad/s$ )。但是,为了避免存在太多的小数位,对旋转速率更为便捷的方法是使用单位毫弧度/秒( $mrad/s$ )。因为重力加速度  $g \approx 9.80m/s^2$ ,  $1m/s^2$  近似为  $0.1g$ , 所以工程地震中经常以  $g$  作为加速度的单位。

## 2 此前台湾地区地面旋转运动的研究

1980年,在台湾罗东地区建立 SMART-1 台阵,用来研究近场强震对核电站结构的影响,但1990年底台阵关闭了(Shin *et al.*, 2003)。该台阵由一个中心台站和分别分布在以200m、1km和2km为半径的3个同心圆上的加速度计构成,每个圆内均匀分布12个传感器。所有43个加速度计绑定为误差范围在 $\pm 0.01s$ 内的公共时基内。每个加速度计由一个连结到以盒式磁带为存储装置的数字事件记录器上的记录范围为 $\pm 2g$ 的三轴力平衡式加速度计构成。加速度计由预先设好的水平或者垂直加速度阈值触发。信号以13bit大小的分辨率、100采样/s采样率被数字化。Oliveira和Bolt(1989)使用 SMART-1 台阵的数据对5个震级  $M_s 5.7 \sim M_s 7.8$ 、震中距  $6 \sim 84km$  的地震产生的地面强震动中的旋转分量进行了估算。他们的计算方式涉及到台阵中台站对的使用和通过叠加对台阵数据的平均。他们的结果显示垂向旋转峰值大约是  $40\mu rad$ 。但是, SMART-1 台阵建立于信息数字化刚刚起步的时代,所记录到的加速度数据分辨率水平很低(13bit),因此,很难得到方程(3)

中用于计算旋转运动的精确的位移空间分布值。

Huang(2003)使用位于集集地震断裂北端以北6km的鲤鱼潭大坝的加速度台阵记录到的数据推测出了1999年台湾集集地震的地面旋转运动。这个7个台站的台阵由4个安设在地面的台站组成:1个在大坝内,1个靠近坝基,1个在坝顶,专门用来监测大坝对地震的反应。使用 Oliveira 和 Bolt(1989)的计算方法, Huang 得出峰值旋转速率约为  $0.4mrad/s$ 。

受到 Nigbor(1994)和 Takeo(1998)的启发, C. C. Liu 和 B. S. Huang 于2000年12月12日在临近台湾东部花莲的 HRLT 台站开始使用三轴旋转传感器记录地震。所使用的传感器为 PVC-5 旋转转换器(灵敏度  $0.2V/rad/s$ ) 和 GyroChip 旋转转换器( $1.43V/rad/s$ )。用来记录旋转传感器和采样率为200采样/s触发模式下的力平衡加速度计(FBA)的输出的是 Kinometrics 公司生产的12通道19bit的数字记录器。遗憾的是经过5年的连续观测并没有得到可用的地面旋转运动数据。他们认为其原因是所用的旋转传感器灵敏度不够。

## 3 HGSD 台站的地面旋转运动观测

2004年7月, C. C. Liu 和 B. S. Huang 在台东 HGSD 台站布置了一台高分辨率的三轴旋转地震计(由 Eentec/PMD 制造的 R-1 型)。R-1 的灵敏度可以达到  $50V/rad/s$ , 是 GyroChip 的35倍, PVC-5 的250倍。HGSD 台站是作为板块边界观测台建立的,拥有大地测量、地震、应变测量等仪器设备。他们之所以选择此台站观测地面旋转运动,也是因为其有优良的仪器配备。从2004年12月7日到2006年11月12日,安置在地表的 R-1 三轴旋转地震计和安置在井下100m深度的 Guralp CMG-3TB 宽频带地

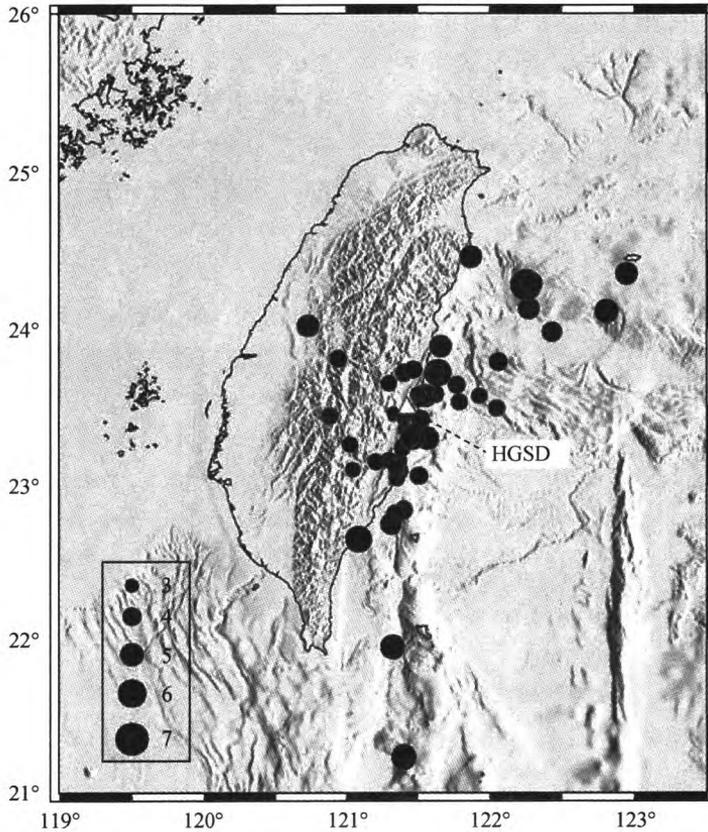


图 1 2007 年 5 月 8 日至 2008 年 2 月 17 日期间台湾东部 HGSD 台站记录到的旋转运动发育较好的地震位置图。图中圆点的大小与地震震级(M)大小成比例，样本圆点显示在图例中

震计记录到了几百个地震事件。尽管如此，这段时期对于他们来说也只是学习时期，在两个 R-1 传感器停止运行后，他们也于 2006 年 11 月结束了观测活动。

考虑到 R-1 旋转地震计从来没有经过独立测试，本文第一作者(W. H. K. Lee)2006 年初建议台湾气象局(CWB)与 Kinemetrics 公司交涉，商讨升级两个台湾气象局的 6 通道 K2 数字加速度计以用来承载 R-1 旋转传感器作为外部输入。我们把这个仪器称为 K1+R1。K2 是 Kinemetrics 公司生产的知名的加速度计(详见数据来源一节)。2006 年秋相关人员在南加利福尼亚和台湾对仪器进行了升级测试(Nigbor and Lee, 2006)。

最近 Nigbor 等(2009)对商业化的旋转

传感器进行了广泛测试，发现 R-1 传感器基本达到了厂家给出的说明书所述规范，但是由于限幅水平和频率响应变化多样，所以对个体进行更加精准的校正(详见数据来源一节中 R-1 传感器的传递函数)。Nigbor 等(2009)证明，仪器响应在 0.1Hz~20Hz 范围内近似平滑，在相同的频带范围内其自身噪声小于  $10^{-6}$  rad/s rms。所以，R-1 传感器完全可以从频繁发生在 HGSD 台站周围 100km 范围内的小近震(震级 4~5)测量我们想要的旋转速率。

2007 年 4 月，C. C. Liu 从台湾气象局借到了一套 K2+R1 仪器，并布置在 HGSD 台站，以此开展了第 2 阶段的观测。在新建成的地下室放置了 K2+R1 仪器、带有 Ki-

nemetrics 电子指示传感器的 6 通道 24bit 的 Quanterra Q330 数据记录器和旗舰级的短周期地震计(L-4A 型; 2Hz 自然频率)。从 2007 年 5 月 8 日至 2008 年 2 月 17 日期间, K2+R1 记录到了 50 多个近震。图 1 所示为 HGSD 台站记录到的地面旋转运动比较发育的地震的位置(地震参数来自台湾气象局, 2007, 2008)。2008 年 2 月中旬, HGSD 台站遭遇洪水而中断了这个系统的成功运行, 2008 年 5 月才恢复运行。

Liu 等(2009)在 9 个月期间从 50 多个近震中获得了一些令人关注的地面旋转运动记录。这些地震的近震震级为 2.6~6.6, 震源距离为 14km~260km。记录到的最大峰值旋转速率(0.63mrad/s)是 2007 年 7 月 23 日 13:40 在距 HGSD 台站 51km 的  $M_w$ 5.1 级地震。此前, Takeo(1998)在一个 5 级地震周围(3km 以内)观测到了甚至比预期值更大的旋转速率。记录到的最大峰值旋转速率为 26mrad/s, 是 1997 年 3 月 3 日 14:09 5.2 级地震时东西向的峰值旋转速率。读者可以与 Liu 等(2009)联系就 HGSD 台站的旋转运动观测进行讨论。

#### 4 爆破的地面旋转运动观测

就连在台湾这样的地震高发区我们也无从知道什么时候会在一个既定的台站周围发生地震, 所以利用爆破源来收集地震波形数据是一个更为便捷的方法。Lin 等(2009)利用了 2008 年 3 月 4 日台湾东北部 N3 爆破点进行的 2 次爆破(N3P 爆破的药量为 3 000kg, N3 爆破的药量为 750kg)。这 2 次爆破也是为检验台湾造山运动模型而进行的台湾综合地球动力学研究(TAIGER)项目中主动折射实验的一部分(详见数据来源一节)。为了记录到这两次爆破, 相关人员布置了 8 个三轴旋转传感器, 13 个三轴加速度计, 12 个 6 通道、24bit 并带有全球定位

系统(GPS)接收器的数据记录器来连续记录爆破前后数小时的数据。这些仪器分别被安置在距离爆破源 250m(1 个台站)、500m(11 个台站)和 600m(1 个台站)处, 其中 500m 处的 11 个台站布设成间距为 5m 的中心台阵。

除了 GyroChip 旋转传感器, 其他所有布设的传感器都获得了相应记录。虽然 N3P 爆破点炸药的使用量是 N3 点的 4 倍, 但是在 N3P 爆破时 13 个台站观测到的峰值地面平移加速度和旋转速率是 N3 爆破的 1.6 倍。以 5m 间距空间均布的中心台阵观测到平移加速度和旋转速率的变化幅度达到了几十个百分点。距离 N3P 和 N3 爆破点 254m 处观测到 X 向最大峰值旋转速率, 分别达到 2.74 和 1.75mrad/s。Nigbor(1994)在距离内华达核试验场大化学爆破(1 000 吨) 1km 处观测到的峰值旋转速率是 38mrad/s。

为了直接和间接地观测到地面旋转运动, Lin 等(2009)之前就对仪器布设进行了设计。所收集到的平移加速度和旋转速率数据提供了很多子台阵台站的配置, 这样就可以对点的旋转运动和由加速度计台阵记录的数据推断出的面的旋转运动进行比较。Spudich 等(1995)和 Spudich 与 Fletcher(2008)开发了一套稳健的算法, 由台阵的平移加速度数据推断相应的地面旋转运动。把他们的软件(Spudich and Fletcher, 2009)应用在由 5 台站的子台阵限定的区域里, 我们计算得到的旋转速率比由中心台阵测量得到的大 3 倍。因为 R-1 传感器的频率响应范围是 0.1~20Hz(Nigbor *et al.*, 2009), 所以对此差异的可能解释是: R-1 传感器没有记录到 2 次爆破的频率 20Hz 以上的信息, 因此得到了比较低的值。此外, Langston 等(2009)所提到的复杂的波传播也是一个可能的解释。

Lin 等(2009)所用仪器收集的数据对于

记录爆破并不是最理想的, 这是因为: (1) Q330 数据记录器只能达到 200 采样/s 的采样率, 而实际需要的可能要达到 1 000 采样/s; (2) R-1 旋转传感器的频率响应限制为 20Hz, 而实际需要的可能要达到 200Hz。

地面旋转运动和同期的动态应变观测理论上统一了关于连续介质中平移波运动的认识。Langston 等(2009)使用最新研制的地震波梯度技术对 N3 台阵记录到的台湾综合地球动力学研究爆破数据进行分析, 确定了 3 000kg 和 750kg 炸药爆炸的强运动地震图的组成。解波动方程需要知道波场的时间导数与空间导数之间的具体关系。通常说来, 波场的空间梯度与波场本身是线性关系, 波场的时间导数是几何扩散和视速度的系数函数(Langston, 2007a, b, c; Langston and Liang, 2008)。事实上, 如方程(3)所示, 波场垂向成分的水平空间梯度就是关于水平轴的水平倾斜或旋转。为了解波场, 地震波梯度测量把旋转成分作为基础并入了它的统一形式。

使用大地测量台阵方法从 N3 台阵记录到的强运动波场数据中得到了空间梯度(例如, Spudich *et al.*, 1995; Langston and Liang, 2008), 然后通过梯度测量法把空间梯度与波场联系起来确定了波的视速度、波的类型、传播方位角以及射线与方位角的振幅情况等。结果显示, 由于近源区速度和地形各向异性引起散射效应, 体波和面波的传播非常复杂。直达 P 波到达台阵顺时针 35° 的位置, 这说明折射来自于下倾界面。初始高频瑞利波沿与射线方位角方向呈逆时针 45° 的方向传播, 它可能已经经过了山谷边缘的反射。后至瑞利波被观测到沿各个方位, 甚至背源的方向都有传播, 显示出在台湾这片山脉地区的强散射。垂向旋转振幅和区域应变相比较, 可知爆炸源不是轴对称的, 波散射与 P 波场、SV 波场和 SH 波场耦合较好。

我们在解释数据的各种模型上加了太多的限制, 这样, 此类信息在用来理解各种类型和频段的地震波场上就没有什么价值。在涉及模型之前, 我们应该对地震数据有更深层次的理解, 这样我们才能把平移波场和旋转、应变关联起来。要想直接从旋转、应变、平移数据几个方面确定波的属性, 就需要对由密集的地震台阵得到的结构和震源参数进行新的以实验为依据的研究。

## 5 沿活断层的地面旋转运动观测

因为 HGSD 台站的观测数据说明近震的旋转运动值与 Takeo(1998)的观测值相似, 我们在 2007 年开始对地面旋转运动进行更加深入的研究。Wu 等(2009)在台湾嘉义中正大学架设了 4 套仪器, 从而可以更详尽地研究地震学和地震工程意义上的近场地震。在此研究中, 沿梅山活断层正在监测地面旋转和平移这两种运动。而早在 1906 年 3 月 17 日该断层处发生过 7.1 级地震, 所以该断层今后仍可能有大地震复发。架设的仪器包括: (1) 有 32 个台站的自由场地震台阵; (2) 由三分向宽频带地震计和三分向加速度计构成的 6 通道单元; (3) 由加速度计和外部旋转传感器组成的 6 通道单元; (4) 在大约 300m 远的建筑中安装的由 32 个加速度计和旋转传感器组成的台阵。这套装置首先记录自由场和附近建筑物内 6 自由度的地面运动。在完成最初布设后的 7 个月内, 这 4 套仪器中的一个或几个仪器记录到了 24 个近震。如同任何仪器新布设后的情况一样, Wu 等(2009)遇到了很多需要逐步解决的实际操作方面的困难。

## 6 地面旋转运动观测中的实际问题

因为普遍的观念认为地面旋转运动是没有意义的, 再加上灵敏的旋转传感器极其昂

贵,所以很难设立野外项目去观测地面旋转运动。但是,这种普遍的观念是建立在线弹性理论的基础之上的,线弹性理论虽在远场地震方面完全适用,但其合理性却无法在近震的近场范围内得到验证。事实上,Takeo(1998)在这方面先驱性的工作显示近场旋转运动测量值要比线弹性理论预测值大10~100倍。

Bouchon和Aki(1982)通过数字模型计算得到了距离6.5级地震1km处垂向最大旋转速率为1.5mrad/s。这意味着,如果要对近震引起的地面旋转运动进行观测,我们就需要精度可以达到 $\mu\text{rad/s}$ 量级的旋转传感器。尽管高灵敏度的旋转传感器应用于航空航天已经几十年了,但对于地震学家来说还是极其昂贵的。事实上,测量精度为 $\mu\text{rad/s}$ 量级的典型美国造旋转传感器的价格达5万美元。在德国用于观测远震地面旋转运动的环形激光陀螺仪,即在天文领域里用来观测地球自转变化的仪器,其价格达到数百万美元。

2004年,虽然R-1旋转传感器的价格仅为6000美元(比类似的传感器便宜10倍),但仍然很难找到资金去购买。幸运的是,我们有一些可自由支配的资金可用来购买R-1,借此我们利用现有资源(人力和仪器)在台湾开展了一个项目。这种方式虽不甚理想,但我们从过去4年的困难中得到了宝贵的经验。下面我们将讨论一些实际问题。

### 6.1 R-1传感器的可靠性

现在有足够的证据(来自3组不同的用户)证明:(1)安置在同一点或附近点的R-1传感器有相似的记录;(2)对同一爆破,安置在同一点的R-1传感器和GyroChip传感器记录非常相似;(3)在德国慕尼黑的一次建筑物倒塌事件中,R-1传感器记录到的波形与围绕R-1传感器布设的加速度计台阵记录计算所得波形一致性相当好(Wassermann

*et al*, 2009)。但我们对8个R-1传感器的标定显示,传感器的灵敏度与制造商所提供的值有百分之几十的偏差。

2004年末最先在台湾布设的2台R-1传感器一年后停止了工作,被发回俄罗斯返修。因此,地震领域仍然等待着可靠、灵敏度可以达到 $\mu\text{rad/s}$ 量级而且并不昂贵的旋转传感器出现。同时,我们抓紧在台湾布设13个旋转传感器,其中包括2008年到货的5个新传感器。我们已经申请了另外20个旋转传感器的资金,希望资金能按时下达,届时可购买的旋转传感器的选择范围会更大。

### 6.2 平移和旋转传感器的台阵布设

考虑到R-1传感器的可靠性和由经典弹性理论(如方程(3))得到的地面旋转运动是否适用于地震近场这两方面的问题,我们需要并排布设由平移传感器和旋转传感器一起组成的台阵来研究地面运动的特性。我们目前在中正大学的布设方法就是为应对这两方面的问题而进行的尝试。此外,我们把平移传感器和旋转传感器布设在附近的一个建筑物内,并对此提出了一个关键的工程问题。具体说来就是,建筑物内的旋转运动是怎样的及其对建筑设计的意思如何?

### 6.3 配置仪器的有效方法

Lin等(2009)已经证实了用由平移传感器和旋转传感器组成的便携式台阵来收集爆破中地面旋转运动数据方面的优势。但是,这个台阵的设备是为限时两周的临时野外布设通过借用现有设备而整合到一起的。因此,为了能够尽快记录到余震和爆破,我们希望能有专用的便携式台阵来实现快速响应。布置一个类似于Lin等(2009)的台阵在2008年需要50万美元。笔者计划提交一个议案,希望在不久的将来购置布设旋转地震学观测所需的便携式台阵。届时,这样的台

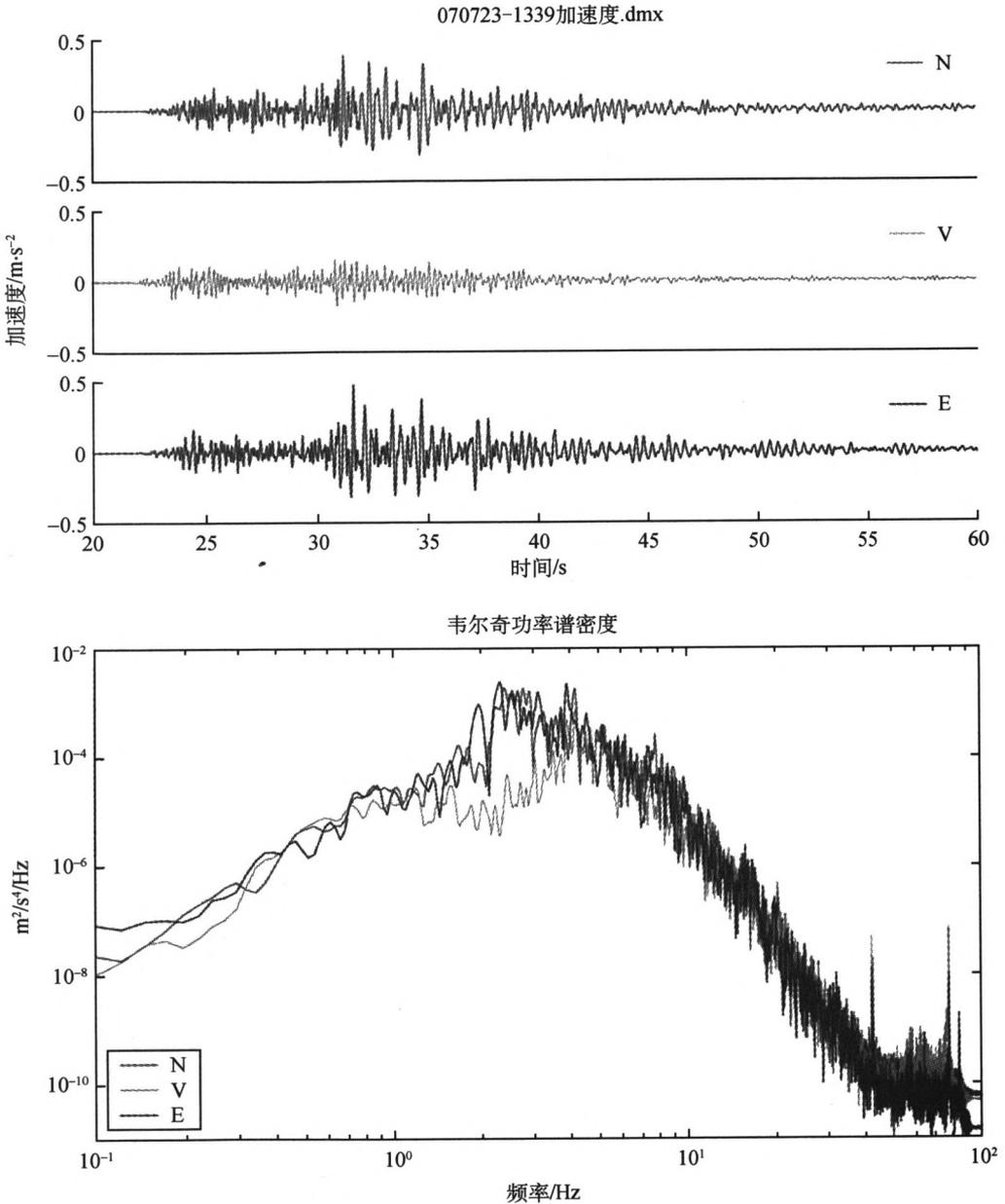


图 2 HGSD 台站 K2+R1 内置三分向加速度计记录的 2007 年 7 月 23 日地震的平移加速度振幅和频谱图(见讨论一节)

阵在大震余震的近场观测领域将会是非常有用的。

## 7 讨论

不妨先看一个近震记录的平移和旋转数

据的例子。目前我们记录到的最大峰值旋转速率值是 2007 年 7 月 23 日 13:40 (UTC)  $M_w$  5.1 地震时在距离震源 51km 处的 HGSD 台站测得的。图 2 展示的是 HGSD 台站的 K2+R1 内置三分向加速度计(型号 FBA-23, Kinemetrics 公司生产)记录到的这次地

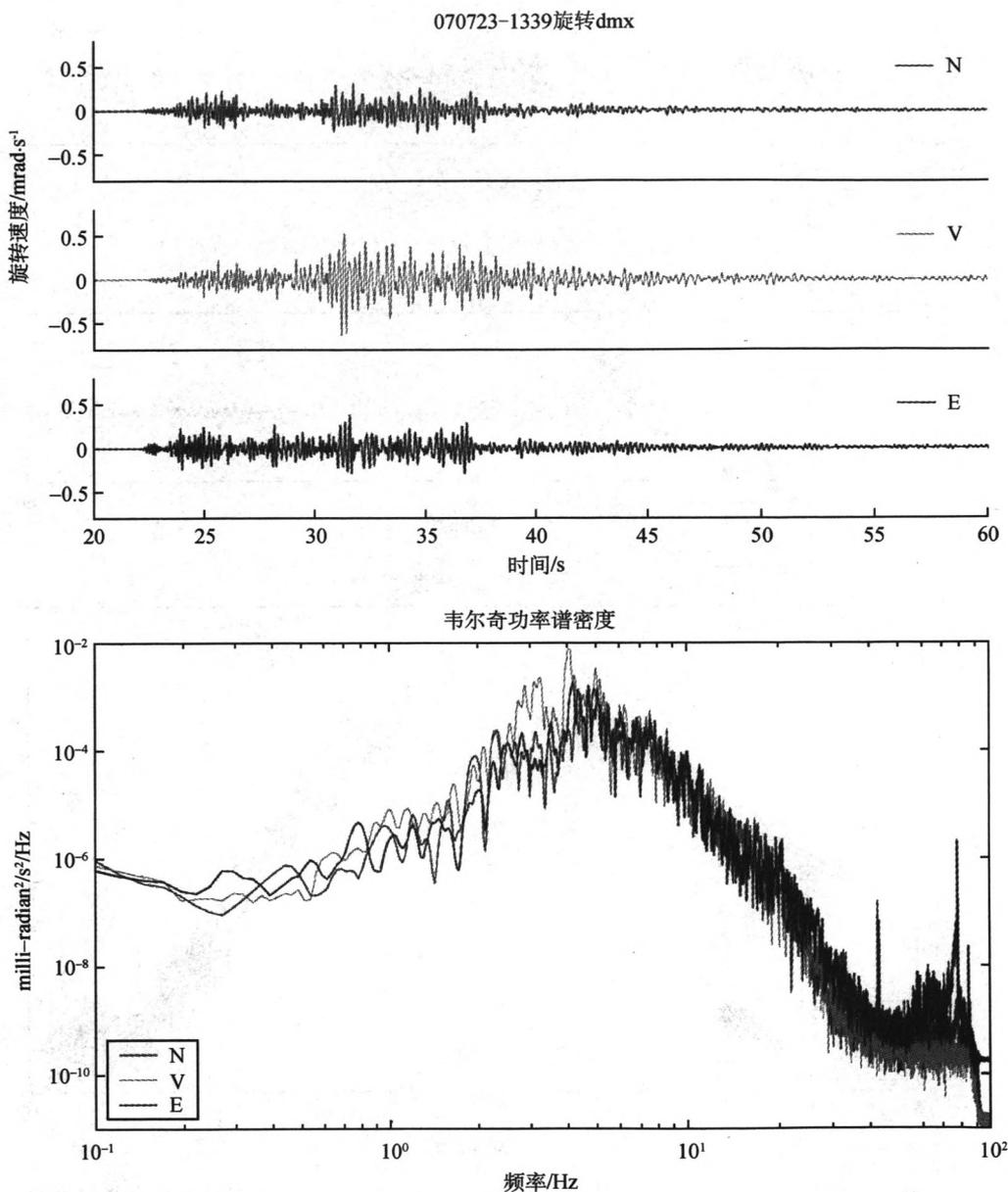


图3 HGSD台站K2+R1外置三分向旋转传感器记录的2007年7月23日地震的旋转速度振幅和频谱曲线(见讨论一节)

震的平移加速度振幅和频谱图。绘图所用数据没有经过仪器响应校正。请注意，加速度计的频率响应函数曲线在 $0\sim 50\text{Hz}$ 之间是水平的。所记录到的峰值地面加速度为 $0.47\text{m}/\text{s}^2$ ，两个水平分向振幅比垂向的大

很多。图3展示的是由外置三分向旋转传感器记录到的同一地震的旋转速率振幅和频谱曲线。绘图所用数据没有经过仪器响应校正。请注意旋转传感器的频带比加速度计的频带要窄得多，它的频率响应在 $1.0\sim 20\text{Hz}$

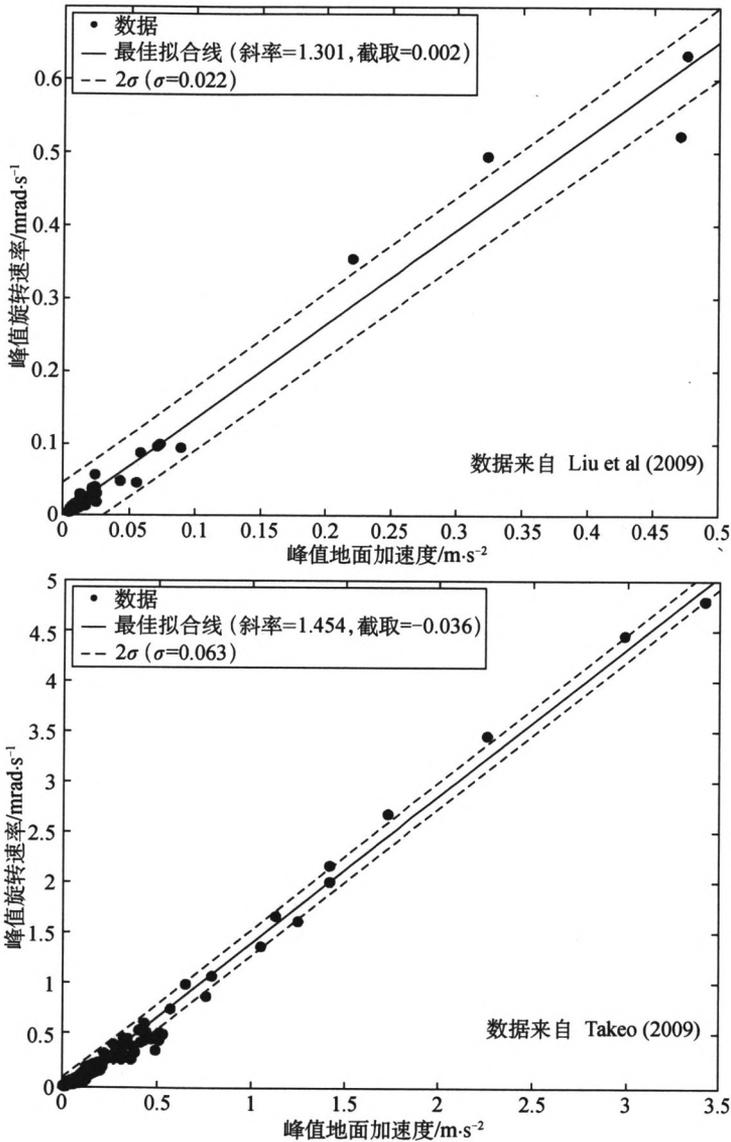


图 4 Liu 等(2009, 上图)和 Takeo(2009, 下图)发布的地震数据库中峰值旋转速率—峰值地面加速度图。解释见正文

之间近似平滑。所记录到的峰值旋转速率为 0.63mrad/s，垂直分向的振幅比两个水平分向振幅大很多。其实我们也可以从方程 (3)中推知：垂向的旋转运动是由水平向位移的水平梯度控制的。

图 2 的频谱显示，两个水平分向上地面加速度的优势频带为 2~5Hz，而图 3 的频

谱显示，垂直分向上地面旋转速率的优势频带为 2.0~5.5Hz。所以，频率响应为 0.05~20Hz 的 R-1 传感器完全可用于监测近震地面旋转运动。

到目前为止，所有的近震地面旋转运动数据都是从单一台站获得的。尽管我们已经开始在多个台站布置旋转传感器，但还是没

表 1 对旋转运动观测数据进行带有误差检验的最小平方直线拟合

数据集	数据样品	$b \pm \epsilon_b / s \cdot \text{km}^{-1}$	$a \pm \epsilon_a / \text{mrad} \cdot \text{s}^{-1}$	$\epsilon / \text{mrad} \cdot \text{s}^{-1}$	$r_{xy}$
Liu <i>et al</i> (2009)	52	$1.301 \pm 0.028$	$0.002 \pm 0.003$	0.028	0.988
Takeo (2009)	216	$1.454 \pm 0.010$	$-0.036 \pm 0.004$	0.060	0.995

据 Liu 等(2009)和 Takeo(2009)

有得到单个地震在多个台站记录的数据。台湾现有的可用数据还不足以用来研究旋转运动随震源距离的衰减。但是我们可以尝试研究旋转运动与平移运动之间的关系(如果有的话)。图 4 展示的是 Liu 等(2009, 上图)和 Takeo(2009, 下图)发布的地震数据库中以  $\text{mrad/s}$  为单位的峰值旋转速率与以  $\text{m/s}^2$  为单位的峰值地面加速度图。第一个数据库包含 52 个地震, 我们用 MATLAB(2000)的 `polyfit` 函数对其进行线性拟合得到了拟合很好的直线,

$$\text{PRR} = 0.002 + 1.301 \text{ PGA} \quad (4)$$

为了比较, 我们展示了 Takeo(2009)发布的数据集, 其包含拥有更大峰值地面加速度(PGA)值域的 216 个地震。利用同样方法, 我们也得到了很好的结果:

$$\text{PRR} = -0.0036 + 1.454 \text{ PGA} \quad (5)$$

如图 4 所示, 误差界是随后使用 MATLAB 的 `polyval` 函数计算得到的。所绘虚线之间的间距是与 95% 的置信区间相对应的  $\pm 2\sigma$ 。

为了更加详细地研究这种线性关系, 利用计算机编程拟合为直线,

$$y = a + bx \quad (6)$$

对一组观测数据  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , 采用高斯最小平方算法 (Gellert *et al*, 1977), 并且假定每次观测权重为 1, 则我

们得到的结果见表 1, 其中  $\epsilon_a$  和  $\epsilon_b$  分别为  $a$  和  $b$  的标准误差,  $\epsilon$  是拟合的标准误差,  $r_{xy}$  是相关系数。

显然, 我们需要更多的数据才能建立峰值旋转速率与峰值地面加速度的明确关系。几位作者已经提到了相似的线性关系(例如: Spudich and Fletcher, 2008; Stupazzini *et al*, 2009; Takeo, 2009; Wang *et al*, 2009)。尤其是 Takeo(2009)展示了垂向最大旋转位移与最大(地面)速度之间的线性相关。我们的图 4 其实与 Takeo 的线性关系是等价的, 只是我们没有对测量到的旋转速率和地面加速度做积分得到旋转位移和地面速度而已。方程(4)和(5)中,  $b$  的量纲为  $\text{s}/\text{km}$ , 或者说是慢度单位(速度的倒数)。Spudich 和 Fletcher(2008)把慢度解释为表征地震波场的视速度的倒数。我们同时也想把注意力放在这种超越经典弹性理论的旋转运动机制上(例如, Teisseyre *et al*, 2006, 2008)。

## 8 数据来源

本文中的所有平移和旋转地震图都是由作者收集的。国际旋转地震学工作组的网站 (<http://www.rotational-seismology.org/>, 最后访问时间 2009 年 1 月)提供免费数据下载。K-2 加速度计的详情和技术说明可以在制造商的网站 (<http://www.kinometrics.com/>, 最后访问时间 2009 年 1 月)上找到。R-1 传感器的传递函数可以在制造商的网站 (<http://www.eentec.com/>, 最后访问时间

2009 年 1 月)上找到。为测验台湾造山运动而进行的台湾综合地球动力学研究计划的相关信息可从 <http://taiger.binghamton.edu/>(最后访问时间 2009 年 1 月)上获取。

译自: Bull Seismol Soc Amer. 2009. **99** (2B): 958~967

原题: Review: progress in rotational ground-motion observations from explosions and local earthquakes in Taiwan

(中国地震局地球物理研究所 辛维译; 边银菊校)