

DOI: 10.11779/CJGE201507010

# 基于小波分析的地震动转动分量研究

魏文晖, 薛广文, 张迪, 喻梦

(武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 基于强震时断层附近地面地震动转动分量对单摆式地震仪水平和竖向摆造成的响应差异性, 建立采用小波分析获取地震动转动分量的方法。首先采用离散小波变换探讨未修正地震动水平和竖向分量的局部时频特性; 进而在水平和竖向分量低频差异性的基础上, 建立新的阈值处理方法对水平分量的小波系数进行处理, 从而获取了地震动转动分量; 最后, 通过振动台试验验证了基于小波分析的地震动转动分量获取方法的正确性和精度。结果表明: 基于小波分析获取的地震动转动分量的残余倾斜位移与实测的基本吻合, 且过滤掉转动分量的水平分量傅里叶谱的低频部分与竖向分量的较为相似; 振动台试验验证了基于小波分析获取地震动摇摆分量方法的正确性, 且相较于基于傅里叶分析的方法, 结果与实际情况更加吻合, 精度实现了大幅提高。

**关键词:** 地震动; 转动分量; 小波分析; 阈值处理; 傅里叶分析; 振动台试验; 残余倾斜

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)07 - 1241 - 08

**作者简介:** 魏文晖(1963 - ), 男, 教授, 主要从事结构抗震等方面的教学和科研。E-mail: weiwenhui@whut.edu.cn。

## Rotational components of ground motion based on wavelet analysis

WEI Wen-hui, XUE Guang-wen, ZHANG Di, YU Meng

(Hubei Key Lab of Road Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The rotational components of strong ground motion near faults have differences in the response to the horizontal and vertical pendulums of seismograph, and according to this principle, a method for obtaining the rotational components of ground motion is established using the wavelet analysis. The local time-frequency characteristics of uncorrected horizontal and vertical earthquake accelerograms using the discrete wavelet transform are discussed. Then a new threshold method, which processes the wavelet coefficients for horizontal earthquake accelerograms, is established to obtain the rotational components of ground motion. Finally, the correctness and precision of the method for obtaining the rotational components using the wavelet analysis is verified through shaking table tests. The results show that the calculated residual tilt displacement of rotational components of ground motion is consistent with the actual one. And the low-frequency part of the horizontal Fourier spectra of ground motion with the rotational component being filtered out is similar to the vertical ones. The correctness of the proposed method is verified through shaking table tests. Compared with the results processed by the Fourier analysis, the wavelet analysis can achieve more accurate results, and it is consistent with the actual situation.

**Key words:** ground motion; rotational component; wavelet analysis; threshold processing; Fourier analysis; shaking table test; residual tilt

## 0 引 言

地震产生的地面振动是以波的形式在岩土中从震源向各个方向传播的, 由于岩土行波的影响, 地震波在岩土介质的传播中会同时产生平动和转动分量。在地质学领域, 一般认为地震动在地表引起的破坏主要是 S 波和面波的水平 and 竖向振动, 而常常假定转动分量足够小以至于可以被忽略。但是在震源附近, 面波传播时, 瑞雷波会引起地表明显的摆动, 且在震后会有一定的残余倾斜, 这些由地震动转动分量导致的地表摆动和倾斜对结构造成的破坏非常显著。例如

1971 年 San-Fernando 地震中, 地震动水平和转动耦合作用导致了桥梁的垮塌<sup>[1]</sup>; 1994 年的 Northridge 地震中, Pacoima 大坝站点受到了强烈的振动, 其记录分析表明场地在地震过程中沿东北方向倾斜达到了  $3.1^\circ$ <sup>[2]</sup>; 1999 年的台湾集集地震震源附近的地面最终倾斜角为  $0.8^\circ$ <sup>[3]</sup>。因此, 震源附近的地震动转动分量对结构带来的影响十分明显, 足以使其破坏或者倒塌, 对地

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178362); 武汉市城建委科技资助项目(201411)

收稿日期: 2014 - 11 - 20

震动转动分量（主要为摇摆分量）的研究变的十分重要。

目前，地震动时程通常是由单摆式地震仪进行测量的，只记录了地震动的水平或竖向分量，而缺乏对地震动转动分量的实测记录。所以，地震动转动分量的获取方法变得尤为重要。国内外学者对该领域已进行了较多研究，主要方法可分为两类：一类是基于岩土中波动论的方法，例如 Lee 等<sup>[4]</sup>在 1987 年提出了采用 P 波、SV 波和瑞雷波的转动自由度合成转动加速度时程的方法；Li 等<sup>[5]</sup>在 2004 年提出的在此基础上，根据弹性波动理论，从记录的正交水平分量中推算出地震动转动分量；Che 等<sup>[3]</sup>在 2010 年运用弹性波动论，并根据 1999 年台湾集集地震某个站点的地震记录，得到了该地震的地震动转动分量，计算和分析了转动地震动的时程频谱及其特征。但是上述方法需假定地震波的传播土层介质是各向同性的均匀弹性半空间或分层弹性半空间，即地震波在土层中是均匀传播的，但由于地震波在活性断层附近复杂的传播特性，该类方法只在处理远离震源处才能得到较满意的结果，但地震动转动分量通常在震源附近较为显著；另一类是 Vladimir Graizer<sup>[2]</sup>在 2006 年提出的基于强震时单摆式地震仪水平和竖向摆由地表倾斜造成的响应差异性，通过傅里叶分析和低通滤波从未修正地震动水平分量中获取地震动转动分量的方法。该方法虽然已通过地震模拟振动台试验验证了其合理性，但由于在实际操作过程中，常常因为特征频率没有一个确定标准而达不到理想的精度，并且通过低通滤波得到的地震动转角位移时程中包含了部分低频的水平加速度时程，在拟合地震动转角加速度时程时常会发生偏移。因此，该方法还有待进一步完善和改进，而采用小波变换可以较好的解决这个问题。

小波变换是近些年发展起来的较傅里叶分析能更好的对非平稳信号进行时频分析的一种手段。其克服了傅里叶分析只能表现地震波信号频域特征的缺陷，同时又具有很好的时频局部化特性，可以实现对地震动时程不同频域段的分解以及地震动水平和竖向加速度时程在时间-频率窗内的全面对比。本文将在文献[2]提出的强震中地表倾斜导致地震仪响应差异性的基础上，采用小波变换以及阈值处理的相关原理，建立由未修正的地震动水平（包含地震动转动的影响）和竖向分量获取地震动转动分量的方法。

## 1 地面振动的三轴地震仪响应分析

用于记录强震时地面运动的地震仪通常都是类似于单摆的加速度仪，对输入的地震动响应可通过二阶微分方程来描述。若考虑了地震动的 3 个平动

分量和 3 个转动分量，水平摆和竖向摆的小振动微分方程可表示为<sup>[6]</sup>

$$y_1'' + 2\omega_1 D_1 y_1' + \omega_1^2 y_1 = -x_1'' + g\psi_2 - \psi_1'' l_1 + x_2'' \theta_1, \quad (1)$$

$$y_3'' + 2\omega_3 D_3 y_3' + \omega_3^2 y_3 = -x_3'' + g\psi_1^2 / 2 - \psi_1'' l_3 + x_2'' \theta_3. \quad (2)$$

式中  $y_i$  为记录所得的仪器的响应， $i=1, 2$ （水平）和 3（竖向）； $\theta_i$  为单摆转动角度； $l_i$  为摆长； $y_i = \theta_i l_i$ ； $\omega_i$  和  $D_i$  分别为固有频率和第  $i$  个传感器的临界阻尼系数； $g$  为垂直方向重力加速度； $x_i''$  为  $i$  方向的地面加速度； $\psi_i$  是地面绕  $x_i$  轴转动的转角。

式（1）、（2）右边第二项中，地表的倾斜角  $\psi_2$  会显著影响水平摆的输出。而对于竖向摆， $\psi_1^2 / 2$  可作为高阶微量忽略；第三项和第四项中的角加速度和交叉轴的平动分量对于拥有约 100 Hz 的固有频率和短摆臂的经典加速度仪影响非常小，也可被忽略。最终水平摆和竖向摆方程简化为

$$y_1'' + 2\omega_1 D_1 y_1' + \omega_1^2 y_1 = -x_1'' + g\psi_2, \quad (3)$$

$$y_3'' + 2\omega_3 D_3 y_3' + \omega_3^2 y_3 = -x_3''. \quad (4)$$

由式（3）、（4）可知，在地震仪记录实际地震动时程的过程中，水平加速度分量混合了地震动转动分量的影响，而竖向加速度分量记录未受其影响。

基于上述水平和竖向摆微分方程的不同，发现水平摆由于受到了地震动转动分量造成的断层残余倾斜的影响，其记录的未修正加速度时程水平基线与初始位置相比发生了变化，这是由于倾斜通常是以一个长周期的信号叠加在水平加速度时程内。而对无地震动转动分量影响的水平和竖向加速度时程记录进行傅里叶分析后，其谱的幅值在频率为 0 到最大的几 Hz 的范围内会增长，且在 0 到几赫兹的低频范围内，应该有相似的形状。图 1，2 分别为 El-Centro 波和 1994 年 Northridge<sup>[7]</sup>地震波未修正水平和竖向加速度时程的傅里叶谱及其比值（本文中强调采用未修正的地震动，是因为实测地震波修正后，可能将转动分量作为噪声滤除）。由于 El-Centro 波没有地震动转动分量，水平和竖向分量傅里叶谱低频部分形状较为相似，比值较平缓，如图 1 所示。而 Northridge 地震包含了地震动转动分量（该地震在震后测得有明显的倾斜位移<sup>[2]</sup>），即其水平分量受到地震动转动分量  $\psi_2$  的影响，显著增加了其傅里叶谱的低频部分幅值，在低频区域会呈现出明显高于竖向分量的现象，如图 2 所示，因此，其水平分量低频部分主要受地震动转动分量控制。另外，一些噪声等不确定因素也会引起水平加速度时程基线偏移，但通过傅里叶谱的对比分析发现，这些噪声的频域主要在高频部分，与探讨的范围间隔较远，且幅值相对较小，说明噪声等不确定因素对水平分量的低频部分影响较小。

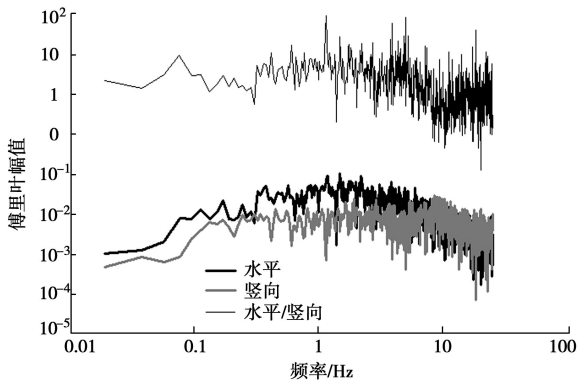


图 1 El-Centro 波水平和竖向傅里叶谱及其比值

Fig. 1 Fourier amplitudes of El-Centro earthquake vertical and horizontal components and spectral ratios of horizontal-to-vertical components

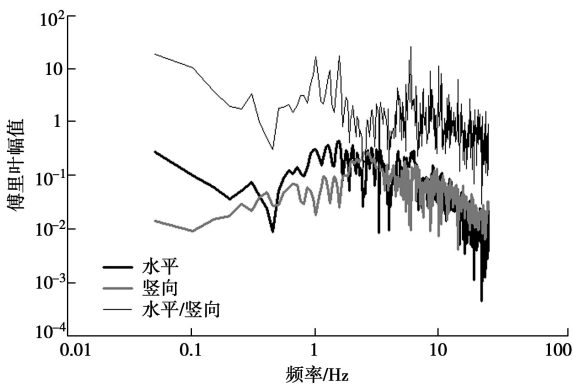


图 2 Northridge 波水平和竖向傅里叶谱及其比值

Fig. 2 Fourier amplitudes of Northridge earthquake vertical and horizontal components and spectral ratios of horizontal-to-vertical components

文献[2]对 1994 年 Northridge 地震未修正水平分量选取一个特征频率进行低通滤波, 提取出其低频部分, 进而得到了 Northridge 地震的地震动转动分量。但是不难发现, 滤出的地震动转动分量中混合了一部分水平分量的低频部分, 而滤波后的水平分量也会失去原有的低频部分, 最终得到的水平分量和转动分量都不能精确的反映出真实情况。同时, 若低通滤波时选择的特征频率太低, 将很可能会导致低估了转动分量的动态(摆动)部分; 如果临界频率太高, 很有可能会导致高估了转动分量的动态部分, 对于特征频率的选取没有一个确切的标准。这是此方法存在的几个问题。

## 2 基于小波分析的地震动转动分量的获取方法

小波分析相较于傅里叶分析, 是一种时间和频率窗都可以改变的局部化分析手段, 克服了傅里叶分析中只能进行频域分析的不足, 更适用于非平稳信号的研究。小波分析通过多分辨分析可以实现对信号频域

采取逐步精细的划分<sup>[8-9]</sup>, 而地表倾斜主要影响未修正的地震动水平分量的低频部分, 通过对地震动水平和竖向分量进行离散小波变换和分解后, 可以把目光直接聚集在其各低频部分, 并且还能读取其低频分量的时域特征, 实现对地震动水平和竖向分量低频部分在时间-频率窗内的全面对比, 从而找出水平分量中受地震动转动倾斜影响的部分。

设非平稳信号为  $f(t)$ , 通过离散小波变换和多分辨分析可以对  $f(t)$  进行不同频率段的分解, 具体分解图示可以用一个金字塔式逐次分解图来表示。如图 3 所示的 3 层分解图, 首先将信号分解为一低频逼近信号  $A_1$  和一高频细节信号  $D_1$ , 然后下一层是针对上一层的低频信号继续进行划分。 $f(t)$  信号分解后的关系可以表示为

$$f(t) = A_i + D_i + D_{i-1} + \dots + D_1 \quad (5)$$

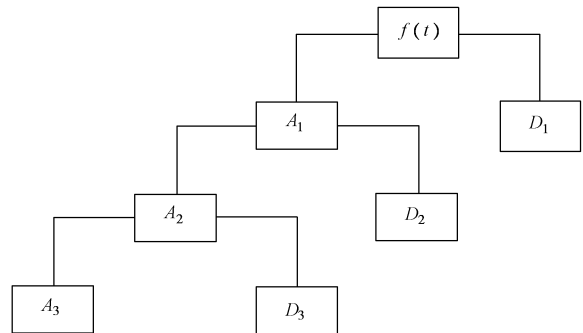


图 3 3 层金字塔式逐次分解图

Fig. 3 Decomposition of three-storey pyramid

小波滤波器和阈值处理方法在信号分离中已得到广泛的应用<sup>[10-12]</sup>, 阈值处理的原理是对信号进行离散小波变换后, 小波系数可以通过某个阈值分离出大于和小于阈值的部分, 并根据新的小波系数进行重构。那么, 是否可以通过此原理, 利用未修正水平和竖向分量在低频部分的差异性, 从未修正水平分量中分离出地震动转动分量呢?

本文选取 1994 年的 Northridge 地震帕科伊马大坝——左桥台上部站点所记录的地震动数据为研究对象, 震后经 CSMIP 的员工测量了此站点强震仪的最后倾斜角度, 显示在东北方向(山脊下坡), 倾斜角为  $3.1^\circ$ , 受到明显的地震动转动分量的影响。图 4 为该站点地震仪记录的未修正的水平 194 度和竖向加速度时程。

对此地震动时程记录进行离散小波变换, 首先是要选取合适的小波基函数和分解层数。本文选取对非平稳地震信号模拟更有利的非对称正交小波 db6 和 9 层分解层数进行离散小波变换, 9 层分解层数可以划分到地震动时程的较低频部分, 可以满足此地震动时程低频部分分析的要求。

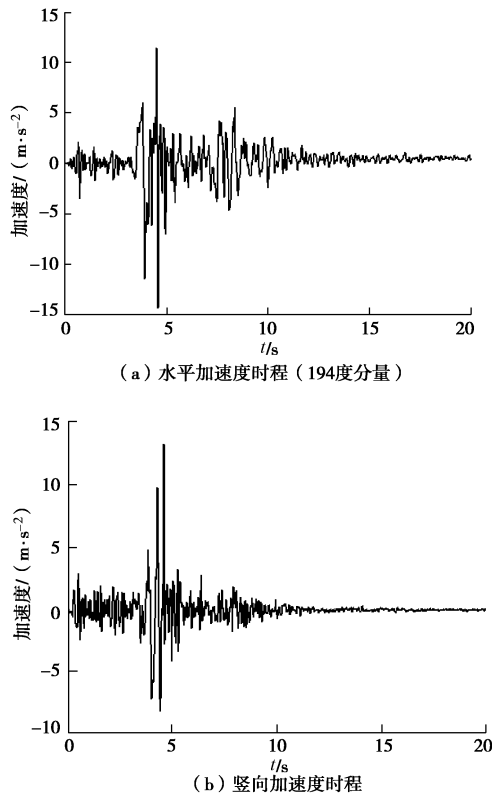


图4 Northridge地震未修正水平和竖向加速度时程  
Fig. 4 Horizontal and vertical record of uncorrected Northridge earthquake

用 Matlab 编写的离散小波变换程序, 分别对未修正的水平 194 度和竖向加速度时程进行离散小波变换, 实现 9 层分解。 $A_0$  为分解后的最低频近似分量,  $D_0 \sim D_1$  为各层分解的高频细节分量, 各层小波系数分别用  $CA_i$  和  $CD_i$  表示。图 5 为水平 194 度分量和竖向分量的  $A_0$  和  $D_0 \sim D_1$  分量对比图, 水平和竖向分量分别用实线和虚线表示。

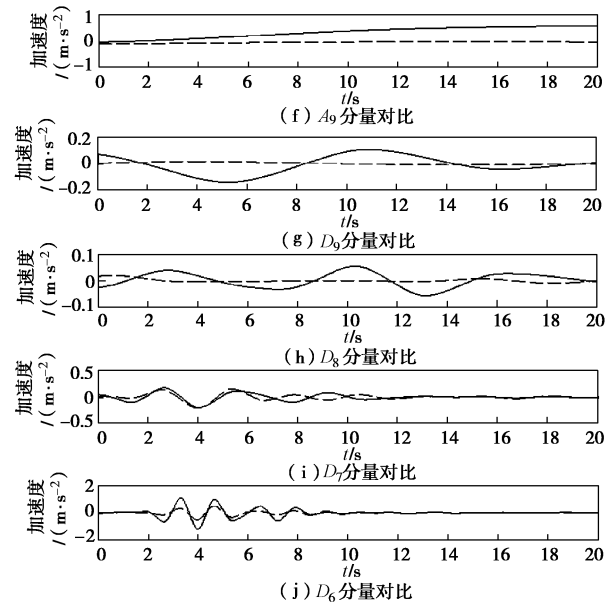
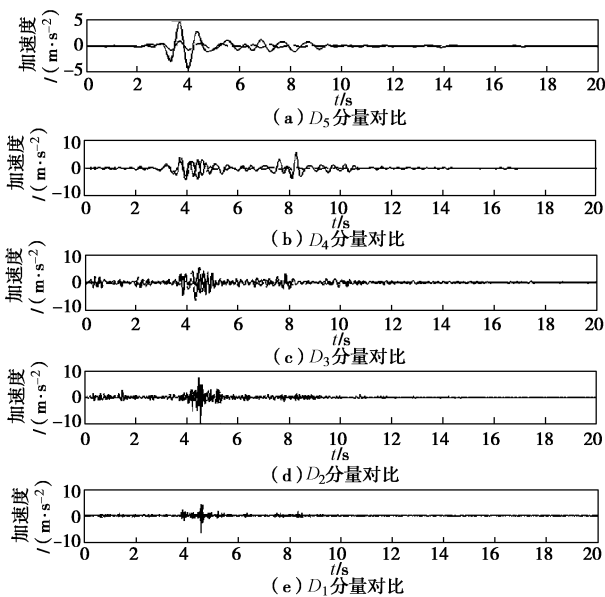
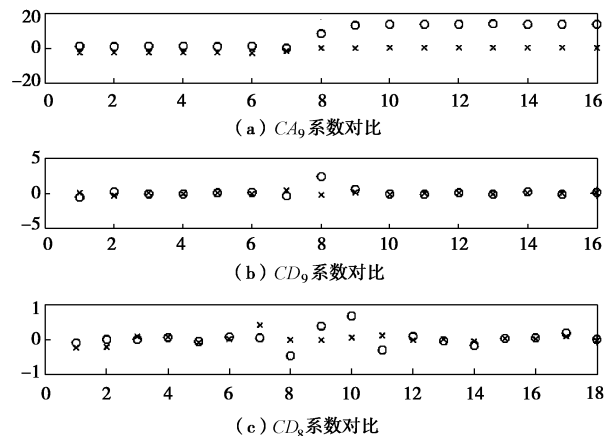


图5 水平 194 度分量和竖向分量的  $A_0$  和  $D_0 \sim D_1$  信号对比  
Fig. 5 Comparison between horizontal (194 degrees) and vertical signals divided into  $A_0$  and  $D_0 \sim D_1$

从图 5 中可以看出: ①地震动转动分量的残余倾斜对水平加速度时程的低频部分 ( $A_0$ ,  $D_0$  和  $D_8$ ) 造成显著影响; ②通过分量对比图发现: 水平加速度时程的  $A_0$  分量的水平 0 基线发生了明显的偏移, 这是由于一个长周期的残余倾斜位移叠加在水平加速度时程上造成的结果; ③通过各时-频窗, 可以直观地看出  $A_0$  地震信号在时间轴上的分布情况, 了解倾斜分量时域上的特征, 这是傅里叶分析所达不到的, 例如通过  $A_0$  可以得知, 残余倾斜位移的增长主要出现在前 10 s。

图 6 为水平 194 度和竖向分量的  $CA_0$  和  $CD_0 \sim CD_5$  小波系数对比 (水平和竖向分量分别用  $\circ$  和  $\times$  表示), 由于地震动转动分量只影响水平分量的低频部分, 因此, 高频部分的小波系数不具备可比性, 不对其列出。



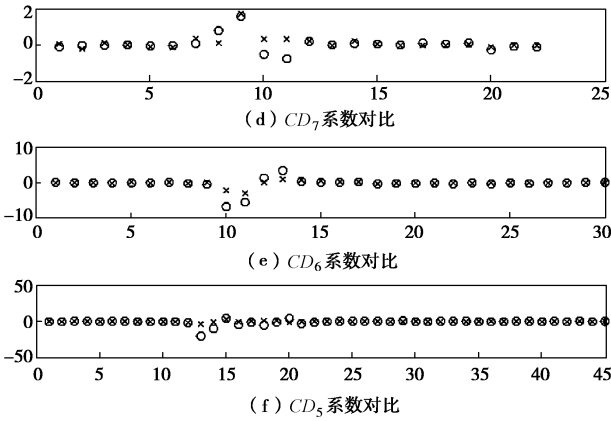


图 6 水平 194 度分量和竖向分量的  $CA_9$  和  $CD_9 - CD_5$  小波系数对比

Fig. 6 Comparison between horizontal (194 degrees) and vertical signals divided into  $CA_9$  and  $CD_9 - CD_5$

通过上述规律, 可以基于小波阈值处理的原理, 并以水平和竖向分量小波系数的相似性和差异性为判别标准, 建立新的阈值处理方法, 从未修正地震动水平分量中获取地震动转动分量, 具体步骤如下:

(1) 未修正的水平 and 竖向分量的离散小波变换。选取一个小波基和分解层数  $N$ , 对水平和竖向分量进行  $N$  层分解。

(2) 对比水平和竖向分量各层小波系数。通过各层分量小波系数的对比, 找出其相似的部分及差异性较大的部分。

(3) 基于小波系数对比差异性的水平分量小波系数阈值量化。

a) 对于低尺度的各层高频系数: 阈值  $\lambda$  取最大值, 即将所有的水平分量高频部分滤掉。

b) 对于高尺度的各层高频系数: 找出水平分量小波系数中绝对值明显高于竖向分量的部分, 并选取一个阈值  $\lambda$ , 尽可能使水平和竖向分量小波系数绝对值在阈值  $\lambda$  之内的较为相似, 而阈值  $\lambda$  之外的小波系数差异性较大。

c) 通过确定的各层阈值, 选取软阈值函数对水平分量小波系数进行阈值处理, 处理后即可重构出受地震动摇摆转角位移时程影响的部分, 而滤出的信号即为去除转动分量后的水平分量。

值得注意的是, 此阈值处理方法是把未修正水平地震动中的高频部分及低频中与竖向分量较为相似部分 (即为真实的地震动水平分量) 通过阈值处理全部滤掉, 从而获取地震动转动分量影响的部分。

根据上述方法, 对 Northridge 地震水平加速度时程进行处理, 其中第 1~4 层阈值  $\lambda$  选取最大值, 5~9 层阈值  $\lambda$  分别选取 7, 2, 0.8, 0.75 和 0.5, 得到的地震动倾斜转角位移时程如图 7 所示, 而滤掉的信号即为滤除倾斜的地震动水平加速度时程, 如图 8 所示。

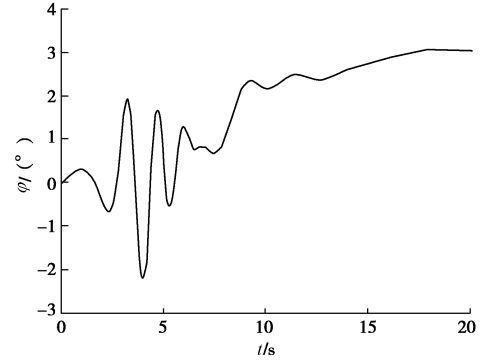


图 7 地震动倾斜转角位移时程

Fig. 7 Time histories of angle displacement of ground motion

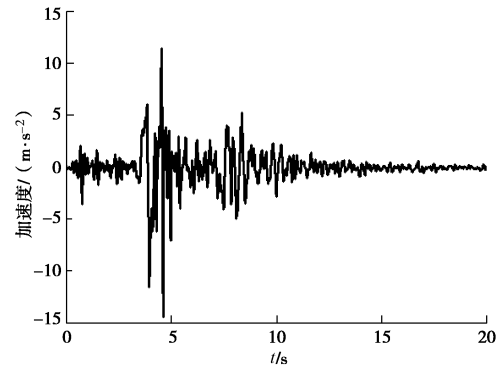


图 8 滤除倾斜的地震动水平加速度时程

Fig. 8 Horizontal accelerations of ground motion without tilt

从图 7 可以看出: ①约  $3^\circ$  的残余倾斜变形与 CSMIP (加州强震观测计划) 的员工在震后测得的相同方向的残余倾斜位移 (约  $3.1^\circ$ ) 基本吻合; ②倾斜从 0 增长到  $3^\circ$  是在记录开始后的 5.0~10.0 s 的时间周期内, 主要的倾斜增加与记录的水平加速度的最大值有关, 这个加速度是在岩土中剪切波的最强相位到达时产生的; ③对滤除摇摆分量后的地震动水平加速度时程进行傅里叶分析, 并求出与竖向加速度傅里叶谱的比值, 如图 9 所示, 发现其低频部分较为相似, 说明水平分量中的原始低频部分被保留了下来。上述研究结果, 很好的证明了基于小波变换实现地震动转动分量获取的方法的可行性, 并且解决了文献[2]中采

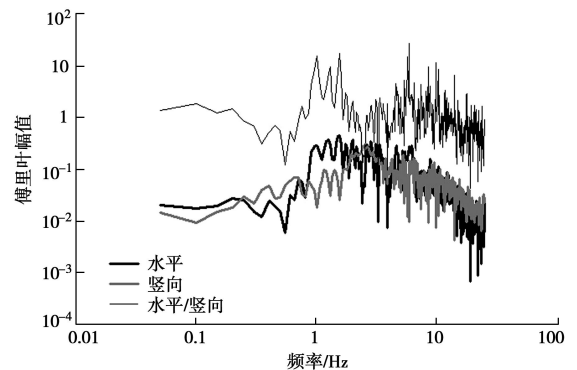


图 9 滤波后的水平和竖向傅里叶谱对比

Fig. 9 Fourier amplitudes of earthquake vertical and horizontal components and spectral ratios of horizontal-to-vertical components

用傅里叶分析和低通滤波的方法所存在的缺陷，得到的地震动转动分量更加符合实际情况。

对得到的地震动倾斜转角位移时程进行两次求导，即得到地震动的摇摆转角加速度时程，如图 10 所示。

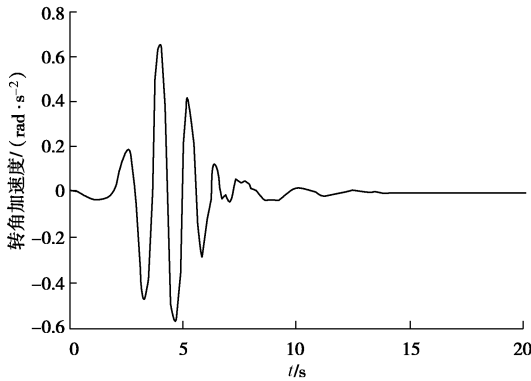


图 10 地震动摇摆转角加速度时程

Fig. 10 Time histories of angle acceleration of ground motion

### 3 振动台试验研究

本次试验在重庆交通科研设计院桥梁工程结构动力学实验室完成的，采用了高性能三轴向地震模拟振动台，台面尺寸为 3 m×6 m，并配备有目前国际上最先进的数字控制系统和软件以及数据采集、振动测试分析系统。主要目的是为了验证基于小波变换提取地震动地震动转动分量方法的正确性和精度。振动台台面的拾振器布置如图 11 所示，其中振动台中心 A 为水平拾振器，两边 B 和 C 为竖向拾振器，分别测量台面的水平和竖向加速度时程，B 和 C 间距为 2.5 m。拾振器采用 891 型拾振器，该拾振器类似单摆式的地震仪，通过读取动圈式往复摆的振动响应来记录地震动时程。试验分两工况进行。

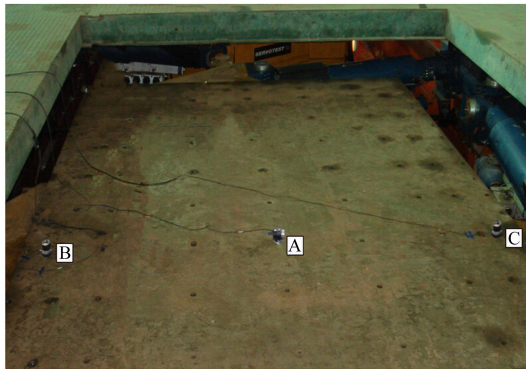


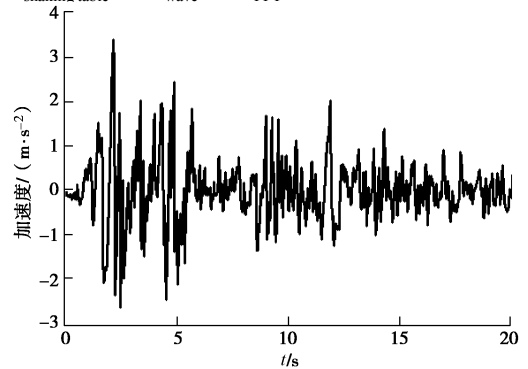
图 11 振动台试验拾振器布置图

Fig. 11 Arrangement of vibration pick-up in shaking table tests

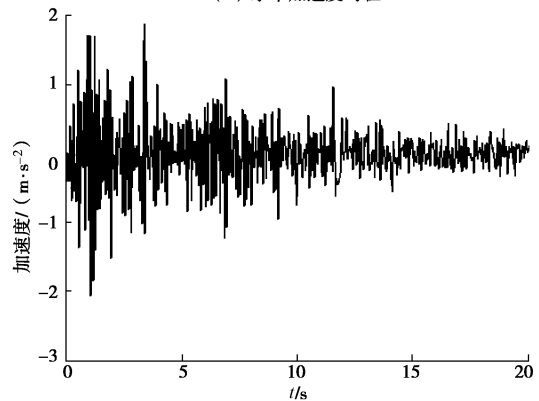
(1) 工况一：水平和竖向地震动为实测的 Elcentro 波，地面转动为人工合成摇摆波

Elcentro 地震水平、竖向加速度时程，如图 12 所

示。人工模拟的地震动转角加速度时程如图 13 所示，该波通过正弦波叠加而成。具体试验步骤为：①在振动台面输入 El-Centro 地震水平、竖向加速度时程以及图 13 人工模拟的转角加速度时程，记录 A, B 和 C 拾振器的数据，分别记为  $a_H$ ,  $a_{V1}$  和  $a_{V2}$ ,  $a_H$  如图 14 所示。②通过两点法计算台面的转角加速度时程<sup>[13]</sup>  $\alpha_{\text{shaking table}} = |a_{V1} - a_{V2}| / 2.5 \text{ m}$ ，并求得台面的转角位移时程  $\varphi_{\text{shaking table}}$ 。③基于小波分析和傅里叶分析的方法分别从  $a_H$  提取出转动分量，得到的地震动位移时程记为  $\varphi_{\text{wave}}$  和  $\varphi_{\text{FFT}}$ ，以及转角加速度时程记为  $\alpha_{\text{wave}}$  和  $\alpha_{\text{FFT}}$ 。对比  $\varphi_{\text{shaking table}}$ ,  $\varphi_{\text{wave}}$  和  $\varphi_{\text{FFT}}$ ，如图 15 所示；对比  $\alpha_{\text{shaking table}}$ ,  $\alpha_{\text{wave}}$  和  $\alpha_{\text{FFT}}$ ，如图 16 所示。



(a) 水平加速度时程



(b) 竖向加速度时程

图 12 Elcentro 地震水平和竖向加速度时程

Fig. 12 Horizontal (NS) and vertical records of El-Centro earthquake

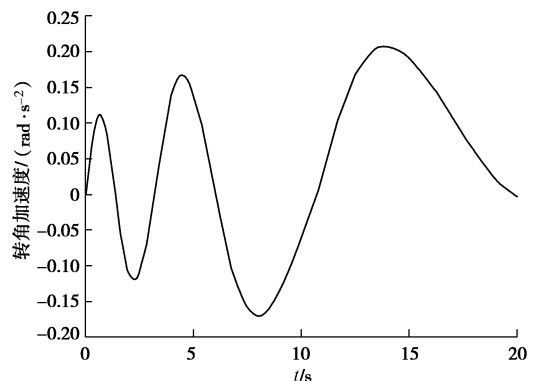


图 13 人工模拟摇摆转角加速度时程

Fig. 13 Artificially simulated time histories of rotating angle

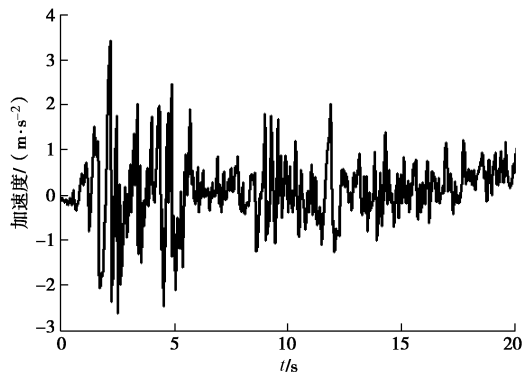


图 14 水平拾振器测得加速度时程  $a_H$

Fig. 14 Acceleration time histories  $a_H$  obtained from horizontal vibration pick-up

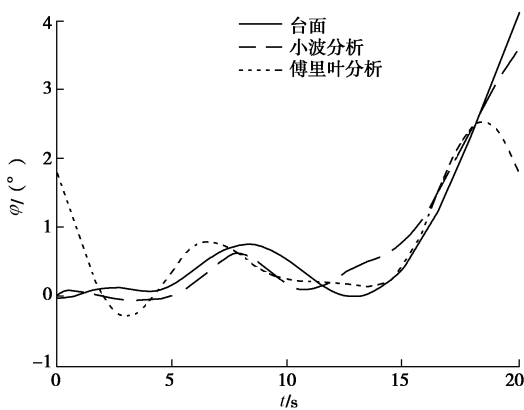


图 15  $\varphi_{shaking\ table}$ 、 $\varphi_{wave}$  和  $\varphi_{FFT}$  对比图

Fig. 15 Comparison among  $\varphi_{shaking\ table}$ ,  $\varphi_{wave}$  and  $\varphi_{FFT}$

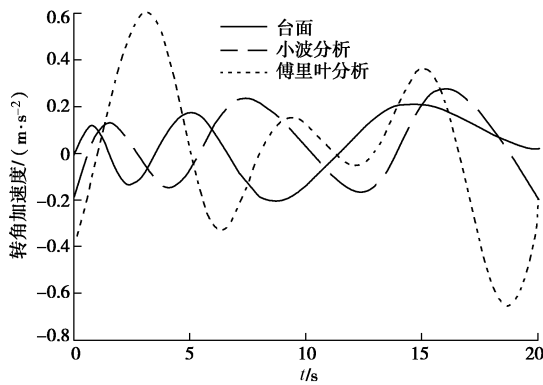


图 16  $\alpha_{shaking\ table}$ 、 $\alpha_{wave}$  和  $\alpha_{FFT}$  对比图

Fig. 16 Comparison among  $\alpha_{shaking\ table}$ ,  $\alpha_{wave}$  and  $\alpha_{FFT}$

由图 15, 16 可以看出, ①基于小波分析获取的转角位移时程与台面转角位移时程形状基本一致, 最终的倾斜角度均达到  $4^\circ$  左右, 且两者获得的转角加速度时程也呈现出相同的趋势, 幅值差别较小, 从而验证了基于小波分析获取地震动转动分量方法的正确性。②相较于基于傅里叶分析, 基于小波分析获取的转角加速度和位移时程与台面测得的更加吻合, 一方面是由于小波基函数相较于傅里叶分析

具有更好的逼近真实信号的能力, 另一方面是由于采用小波分析提取的地震动转动分量滤除了水平分量中的低频部分, 更加接近于真实情况。因此, 基于小波分析的方法在精度上实现较大的提高。

由于振动台设备原因, 输入的地震波与实测的地震波存在着一定的差异, 在数据处理中, 均采用台面实测的实验数据进行分析。另外由于篇幅限制, 摇摆波对竖向地震波的试验分析结果省略。

(2) 工况二: 水平和竖向地震动为修正后的 Northridge 地震波, 转动分量为本文获取的转角加速度时程

修正后的 Northridge 地震水平分量和竖向分量如图 8 和图 4 (b) 所示, 转动分量如图 10 所示, 通过台面拾振器记录的水平加速度时程来验证获取的 Northridge 地震动转动分量的正确性, 具体步骤同工况一。

计算得到的台面的地面转角位移时程为  $\varphi'_{shaking\ table}$ , 基于小波变换和傅里叶分析的方法获取的地面转角位移时程为  $\varphi'_{wave}$  和  $\varphi'_{FFT}$ , 对应的转角加速度时程为  $\alpha'_{shaking\ table}$ ,  $\alpha'_{wave}$  和  $\alpha'_{FFT}$ , 其对比图如图 17, 18 所示。

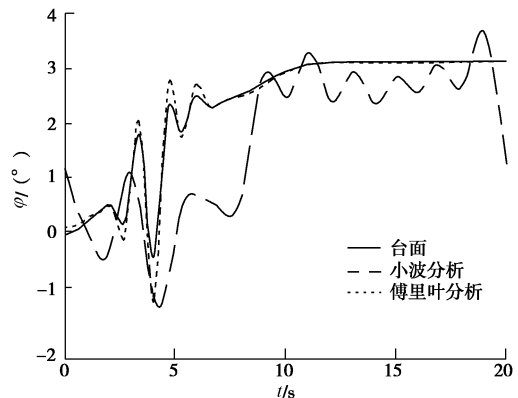


图 17  $\varphi'_{shaking\ table}$ 、 $\varphi'_{wave}$  和  $\varphi'_{FFT}$  对比图

Fig. 17 Comparison among  $\varphi'_{shaking\ table}$ ,  $\varphi'_{wave}$  and  $\varphi'_{FFT}$

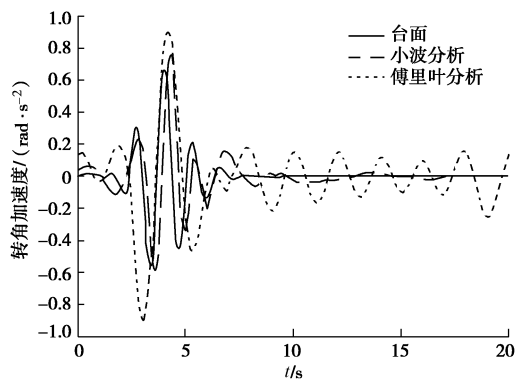


图 18  $\alpha'_{shaking\ table}$ 、 $\alpha'_{wave}$  和  $\alpha'_{FFT}$  对比图

Fig. 18 Comparison among  $\alpha'_{shaking\ table}$ ,  $\alpha'_{wave}$  and  $\alpha'_{FFT}$

由图 17, 18 可以看出: ①基于小波分析获取的地震动转动位移时程与台面的基本吻合, 而基于傅里叶分析的方法获取的地震动转动位移时程由于存在一定的水平分量的低频部分, 在 10 s 之后还存在的明显的振荡, 与实际情况中较平缓的倾斜残余位移不符。②相较于基于傅里叶分析的方法, 基于小波分析获取的地震动转动加速度时程的波形及峰值与台面测得的也更加接近。

## 4 结 语

本文在强震时断层附近地面的地震动转动分量造成的单摆式地震仪响应差异性的基础上, 采用小波分析对未修正的地震动水平和竖向分量频段进行了精细划分及其低频部分的全面对比, 揭示了转动分量会显著影响水平分量的低频小波系数, 从而采用新的小波阈值量化方式建立了获取断层附近地震动转动分量的方法。采用该方法获取了 1994 年 Northridge 地震的地震动转动分量, 其残余倾斜位移与实测的基本一致, 并且滤除转动分量后的地震动水平分量保留了其原始的低频部分, 其傅里叶谱的低频部分与竖向分量的较为相似, 相较于基于傅里叶分析的方法, 其结果更加精确。

利用 El-Centro 地震波和人工合成的转动分量以及本文获取的修正后的 1994 年 Northridge 地震波组合进行多维振动台试验, 试验结果进一步验证了基于小波分析获取地震动转动分量方法的准确性, 且相较于基于傅里叶分析的方法, 结果与实际情况更加吻合, 精度有较大的提高, 更加具有实用价值。

### 参考文献:

- [1] GRAIZER V M, KALKAN E. Prediction of spectral acceleration response ordinates based on PGA attenuation[J]. *Earthquake Spectra*, 2009, **25**(1): 39 - 69.
- [2] GRAIZER V M. Tilts in strong ground motion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of American*, 2006, **96**: 2090 - 2102.
- [3] CHE Wei, LUO Qi-feng. Time-frequency response spectrum of rotational ground motion and its application[J]. *Earthquake Science*, 2010, **23**(1): 71 - 77.
- [4] LEE V W, TRIFUNAC M D. Torsional accelerograms[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1985, **4**: 132 - 142.
- [5] LI Hong-nan, SUN Li-ye, WANG Su-yan. Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2004, **232**(2): 131 - 137.
- [6] GRAIZER V M. Effect of tilt on strong motion data processing[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, **25**: 197 - 204.
- [7] TRIFUNAC M D, TODOROVSKA M I. Duration of strong motion during Northridge, California, earthquake of January 17, 1994[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, **38**: 119 - 127.
- [8] DONGELO D, SIMEONE V. Geomorphometric analysis based on discrete wavelet transform[J]. *Environmental Earth Science*, 2014, **71**(7): 3095 - 3108.
- [9] NAGA P, EATHERTON M R. Analyzing the effect of moving response on seismic response of structures using wavelet transform[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, **43**(5): 759 - 768.
- [10] ANSARI A, NOORZAD A, ZAFARANI H, et al. Correction of highly noisy strong motion records using a modified wavelet de-noising method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, **30**(11): 1168 - 1181.
- [11] 张郁山, 张凤仙. 基于小波函数地震动反应谱拟合法[J]. *土木工程学报*, 2014, **47**(1): 70 - 81. (ZHANG Yu-shan, ZHANG Feng-xian. Matching method of ground-motion response spectrum based on the wavelet function[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, **47**(1): 70 - 81. (in Chinese))
- [12] 郭 杨, 倪焯俊, 柯宅邦. 应用小波分析法检测预应力管桩裂缝的研究与实践[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**: 1224 - 1227. (GUO Yang, NI Huang-jun, KE Zhai-bang. Practical research on detecting cracks in pre-stressed pipe piles by wavelet analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(1): 1224 - 1227. (in Chinese))
- [13] BASU D, WHITTAKER A S, CONSTANTINOU M C. Extracting rotational components of earthquake ground motion using data recorded at multiple stations[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, **42**(3): 451 - 468.