

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.265>



差分法计算地震动旋转分量

李栋青, 王 贇*, 孙丽霞

中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083

摘要: 旋转地震学是一门研究由地震、爆破以及工程振动等引起的地球介质运动的新兴学科。旋转运动的研究由来已久, 但是由于缺少高精度的旋转分量地震仪, 所以旋转运动的研究大多仅限于理论方面。差分法作为利用平动分量获取旋转分量的一种计算方法, 在理论研究方面较为成熟, 但是缺乏实际数据的验证。通过对旋转运动研究现状充分调研的基础上, 利用模拟数据和实测的爆炸源数据, 对差分法进行了测试和分析。通过对比差分法计算的旋转分量和实测旋转分量的波形图、振幅谱和相位谱等, 得出了在一定的误差允许范围内, 差分法可以作为求取水平旋转分量(R_x, R_y)的替代方法的结论; 同时, 针对爆炸源的高频特性以及密集台阵观测的特点, 对现有的差分法进行了改进, 提出了一种精度更高的求取旋转分量的差分法。

关键词: 旋转地震学; 差分法; 平动分量; 模拟数据; 爆炸源; 地球物理。

中图分类号: P315.8

文章编号: 1000-2383(2021)01-369-12

收稿日期: 2019-10-21

Calculating Rotational Components of Ground Motions by Finite Difference Method

Li Dongqing, Wang Yun*, Sun Lixia

School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Rotational seismology is a new subject to study the motions of the earth's medium caused by earthquakes, blasting and environmental vibration in an all-round way. The study of rotational components of ground motion has a long history. However, there is no high-precision rotational component seismograph, so the study of rotational motions is usually limited to theoretical aspects. As an alternative method of calculating rotational components by translational components, the finite difference method is relatively mature in theoretical research, but its application in practical data is still less. Based on the full investigation of the research that studying the rotational motions, the finite difference method is tested and analyzed by using the simulated data and the recording explosive source data. By comparing the waveforms, amplitude spectra and phase spectra of the rotational components calculated by the finite difference method with those recorded, it is concluded that the finite difference method can be used as an effective alternative to calculate the horizontal rotational components (R_x, R_y) within an error allowable range. At the same time, in view of the high frequency characteristics of the explosive source and the dense array, we have improved the finite difference method and proposed a higher precision finite difference method for calculating rotational components.

Key words: rotational seismology; finite difference method; translational component; simulated data; explosive source; geophysics.

由地震动引起的地球介质的运动, 不仅包括 3 个平动分量, 而且还包括 3 个旋转分量 (William *et*

al., 2009)。尽管对于强震的观测和分析已经有 60 多年的历史了, 但是大多数还是停留在 3 个正交平动

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. U1839208)。

作者简介: 李栋青 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事地震各向异性方面的研究。ORCID: 0000-0002-9295-9192。E-mail: 2942552318@qq.com

*通讯作者: 王贇, ORCID: 0000-0002-3827-327X。E-mail: yunwang@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 李栋青, 王贇, 孙丽霞, 2021. 差分法计算地震动旋转分量. 地球科学, 46(1): 369-380.

分量的应用上 (Aki and Richards, 2002). 因此, 目前多分量地震数据的采集是不充分的, 缺少旋转运动的记录, 无法完全的描述地震波场 (Barak *et al.*, 2014). 在直接感应旋转运动的仪器出现之前, 很多学者认为研究旋转运动是没有意义的, 例如 Richter *et al.* (1958) 就曾说过, “理论显示, 研究旋转分量的意义并不是很大.”, 然而不应忽视的是: 他的这一结论是在线性弹性均匀各向同性介质模型的假设下获得的 (王赞等, 2017). 随着现代传感技术的发展, 出现了更敏感的直接记录旋转运动信号的地震仪, 推动着旋转分量的研究进入了一个新的阶段. 研究旋转分量对于充分描述地震波场特征、更准确的反演地下空间结构和震源机制 (张佩等, 2018), 以及降低地震动旋转运动对于工程建筑的危害等诸多方面都有重要的意义. 同时, 对于研究宏观的地块变位及其演化历史、运动变化与动力学机制 (万天丰, 2019) 以及研究某一区域内地震发震机理, 理解最新变形动力学等均具有十分重要的科学价值 (徐锡伟等, 2019).

目前获取旋转分量的方法有两种, 一种是利用平动分量间接求取旋转分量, 另一种是利用旋转分量地震仪直接测量 (Spudich *et al.*, 1995; Huang, 2003; Spudich and Fletcher, 2008). 利用平动分量求取旋转分量的方法主要有差分法和行波法, 其中最简单、最易于理解的是差分法. 差分法包括两点差分法和三点差分法 (Sun *et al.*, 2018). 两点差分法用于计算水平方向旋转分量 (R_x, R_y), 三点差分法用于计算竖直方向旋转分量 (R_z).

近年来, 国内外部分学者对旋转分量进行了直接观测 (Lin *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2009) 和间接观测试验 (赖晓玲等, 2017). Suryanto *et al.* (2006) 利用模拟地震台站的数据, 以及天然地震的实测数据, 对利用平动分量求取竖向旋转分量 (R_z) 的方法进行了验证. 由于旋转分量地震仪并未大规模的用于实际生产和科研中, 实际记录的旋转分量数据还是很少 (Langston *et al.*, 2009a, 2009b). 尤其是在国内, 大多数人对于旋转分量的获取还停留在利用平动分量换算旋转分量的理论计算上. 随着旋转分量地震仪的出现, 记录的旋转分量越来越多的出现在实际研究中, 因此有必要从差分法适用性的角度分析理论换算的旋转分量与实际观测旋转分量的差异, 以厘定差分法的适用条件.

本文在总结前人所做工作的基础上, 主要从模拟的六分量地震数据和实测的六分量数据两个方面, 通过时域波形图和频域振幅谱图、相位图等对差分法进行了对比, 重点分析了差分法计算的水平旋转分量 (R_x, R_y); 同时针对天然地震密集台阵的观测特点, 为了进一步提高差分法计算的精度, 尝试了一种改进的差分法.

1 理论计算

差分法求取旋转分量的理论基础是线性弹性介质小变形动力学理论. 理论计算旋转分量, 已经有很多学者做过研究 (Aki and Richards, 2002). 对于处于应变状态下的弹性介质中的任一质点, 其位移由 3 部分组成:

一是平动位移, 它描述的是该质点与其无穷小邻域内的参考点一起做位置的刚性平移, 不改变物体的大小和形状. 在 3 个坐标轴上的分量分别为 u_x, u_y, u_z .

二是应变位移, 它描述的是物体在应力作用下产生了形状的改变而产生的位移, 一般用二阶应变张量表示. 在对称性假设下, 独立的应变分量只有 6 个.

三是旋转位移, 它描述的是物体在应力作用下产生的旋转运动. 而任一质点的旋转运动, 可以分解为 X、Y 和 Z 3 个方向上 $\omega = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}$ 即:

$$\omega = \frac{1}{2} \times \begin{vmatrix} ijk \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u_x & u_y & u_z \end{vmatrix} = \frac{1}{2} \times \nabla \times \vec{u}.$$

在观测台站间距较小的条件下, 将理论计算中的偏微分形式进行必要的简化, 就得到了差分法的理论计算公式. 即 (Lin *et al.*, 2009):

$$\omega_x = \frac{\partial u_z}{\partial y}, \omega_y = -\frac{\partial u_z}{\partial x}, \omega_z = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right).$$

假设有成直角分布的 3 台地震仪, 其中 A 位于直角点, B, C 分别位于两条直角边上. AC 方向为 X 方向, AB 方向为 Y 方向, 分别用 u_x, u_y, u_z 来表示 3 个方向的平动分量. R_x, R_y, R_z 分别代表 3 个方向的旋转分量. 将差分法的理论计算公式改写成差分格式, 就得到了实际利用平动分量来计算旋转分量的差分公式:

$$R_x = \frac{u_z^B - u_z^A}{\Delta y}, R_y = -\frac{u_z^C - u_z^A}{\Delta x}, R_z = \frac{1}{2} \times \left(\frac{u_x^C - u_x^A}{\Delta y} - \frac{u_y^B - u_y^A}{\Delta x} \right),$$

其中, u_z^A 和 u_z^B 分别表示 A 点和 B 点记录的竖向 (Z 方向) 平动分量; u_x^A 和 u_x^C 分别表示 A 点和 C 点记录的横向 (X 方向) 平动分量; u_y^A 和 u_y^B 分别代表 A 点和 B 点记录的横向 (Y 方向) 的平动分量. Δx 和 Δy 分别表示 AB 之间的距离和 AC 之间的距离.

为了探究差分法是否可以作为求取旋转分量的有效替代方法, 本文从模拟数据和实际观测数据两个方面对差分法的有效性进行了分析.

2 理论模拟

由一阶速度应力方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial v_x}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial v_y}{\partial t} \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} \end{cases}$$

和弹性波动方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_y}{\partial y} + \lambda \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial v_y}{\partial y} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \end{cases}$$

得到旋转分量的计算公式:

$$\begin{cases} r_{xx} = 0 \\ r_{yy} = 0 \\ r_{zz} = 0 \\ r_{yx} = -r_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \\ r_{zy} = -r_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \\ r_{zx} = -r_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \end{cases}$$

其中: λ 和 μ 代表拉梅常数, σ 代表应力, v 代表位移, r_{zy} , r_{zx} 和 r_{yx} 则分别代表 x 、 y 和 z 方向的旋转分量.

在对模型进行正演时, 模型的左右边界设置为分裂完美匹配层 (Splitting Perfectly Matched Layer), 以阻止边界反射; 顶界面设置为自由表面. 理论模型设置为三维双层介质, 采用单炮炸药震源, 共模拟了 41 道地震数据. 抽取其中 3 道互为直角六分量地震数据, 对差分法进行验证. 其中, 震源位于三维模型的中间位置, 埋深为 5 m; 接收线位于地表, 以震源为中心成正交分布. 模拟的六分量地震数据各参数如下表所示:

因为直达波相较于反射波有能量强、易识别等优点, 所以本次试验分析的是直达波, 而非反射波. 在线性弹性均匀各向同性小变形的假设下, 模拟的平动分量是速度 (m/s), 旋转分量是角速度 (rad/s). 此时用差分法计算得到的旋转分量和模拟的旋转分量单位是统一的 (即所表达的物理意义是一致的). 因为在实际模拟时, 由于震源机制和纵横波速度、密度等地层参数的影响, 所以模拟得到的平动量一定会比旋转分量要大. 利用本文中的震源函数和地层参数进行正演, 得到的平动分量比旋转分量大 3 个数量级. 因此利用差分法换算得到的旋转分量比理论模拟的旋转分量小 1 000 倍. 而本文的目的, 仅是为了验证差分法计算的旋转分量和模拟记录的旋转分量是否在运动学与动力学特征上存在差异. 因此, 在绘制波形图时, 为了便于对比而对数据进行了归一化处理.

前文已经提到, 只有在观测台站间距较小的前

表 1 正演地震六分量数据模型参数

Table 1 Model parameters of forward six-component simulated array data

介质 物理量	纵波速度 V_p (m/s)	横波速度 V_s (m/s)	密度 ρ (kg/m ³)	层厚 (m)	界面倾斜角度 θ (°)
第一层	2 000	1 400	2 600	50	0
第二层	3 000	2 100	2 700	70	0

提条件下,才可以用差分来代替理论计算的偏微分.观测台站间距由公式 $h < c/f_{\max}$ 计算得到(Spudich *et al.*, 1995).其中, h 表示观测台站之间的间距, c 表示横波或面波的水平相速度(因为横波或者面波的传播速度要比纵波慢,所以利用横波或者面波的传播速度求取的台站间距,相较于利用纵波速

表 2 正演地震六分量数据地震记录参数

Table 2 Seismic record parameters of forward six-component simulated array data

物理参数	地震子波主频(Hz)	采样间隔(ms)	地震记录长度(s)
数值	120	0.1	0.1

表 3 正演地震六分量数据网格参数

Table 3 Grid parameters of forward six-component simulated array data

物理参数	X方向	Y方向	Z方向	X方向网	Y方向网	Z方向网
	网格	网格	网格	网格步长	网格步长	网格步长
数值	100	100	200	1	1	1

表 4 差分法换算与模拟旋转分量波形相关系数(台站间距 1 m)

Table 4 Correlation coefficient of wave forms between the difference method and the simulated array data (1 m interval between stations)

旋转分量	R_x	R_y	R_z
波形相关系数	0.986 8	0.989 1	0.271 3

度求取的台站间距较小.对于差分法求取旋转分量而言,台站间距越小,计算结果就越符合实际的旋转分量), f_{\max} 表示利用平动分量计算旋转分量所用的最大频率.本次模拟的六分量地震数据,台站之间可选的最大间距为 4 m.为了便于对比台站间距对差分法的影响,本次试验模拟数据的选取遵循了同一方向、同一中心台站的原则,选取了台站间隔分别为 1 m 和 4 m 的两套模拟数据进行分析.

首先分析的是台站间距为 1 m 的模拟数据.从波形图可以看出,在模拟六分量地震数据的对比中,差分法计算的水平旋转分量(R_x, R_y)与模拟的水平旋转分量(R_x, R_y)有很高的相似度,而且两者在波形和初至到时上都有很好的一致性.具体表现为,由差分法计算的 R_x 与模拟的 R_x 的相关系数为 0.986 8, 而由差分法计算的 R_y 与模拟的 R_y 的相关系数为 0.989 1.但是,由差分法计算的 R_z 与模拟的 R_z 之间的相似度不高.这两者之间的相关系数为 0.271 3.从两者的波形图中看出,差分法计算的 R_z 与模拟的 R_z 存在时间上的延迟.增大台站间距,再次对差分法进行验证,得到图 2.

对比图 1 和图 2 可以看出,增大台站间距后,差分法计算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)会不同程度的偏离模拟的旋转分量(R_x, R_y, R_z).差分法计算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)与模拟的旋转分量(R_x, R_y, R_z)相关系数变小,即相似度减小.这说明,观测台站间距越小,通过差分法换算得到的旋转分量就越符合实际的旋转分量.

进一步对比图 1 和图 2 可以看出,当台站间距

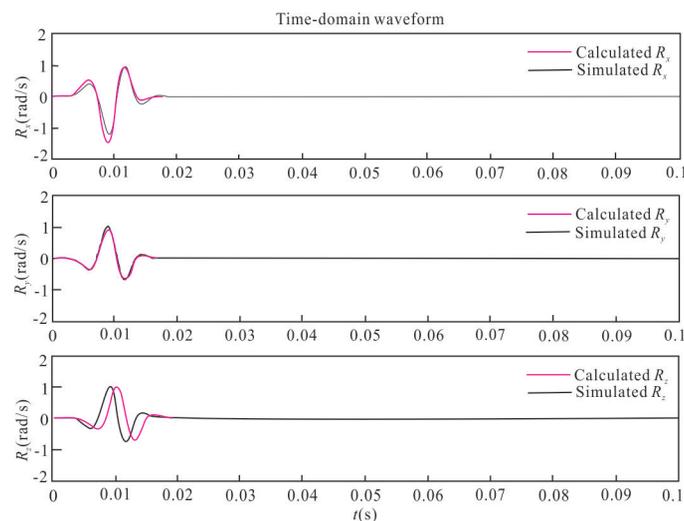


图 1 差分法换算与模拟旋转分量波形对比图(台站间距 1 m)

Fig.1 Comparisons of wave forms between the difference method and the simulated array data (1 m interval between stations)

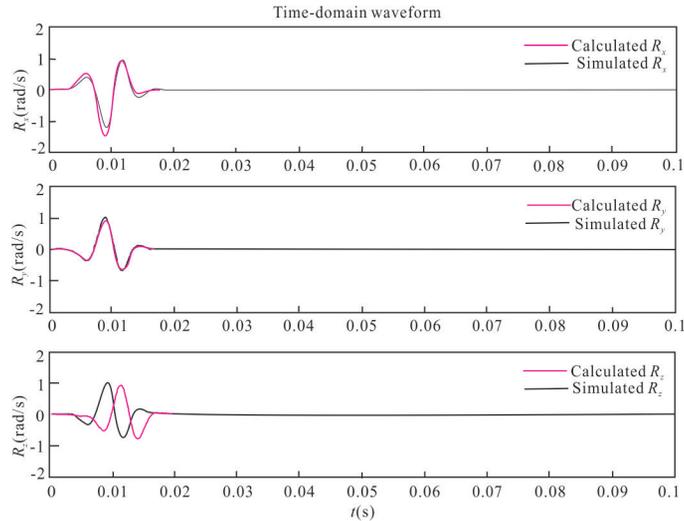


图 2 差分法换算与模拟旋转分量波形对比图(台站间距 4 m)

Fig.2 Comparisons of waveforms between the difference method and the simulated array data (4 m interval between stations)

表 5 差分法换算与模拟旋转分量波形相关系数(台站间距 4 m)

Table 5 Correlation coefficient of wave forms between the difference method and the simulated array data (4 m interval between stations)

旋转分量	R_x	R_y	R_z
波形相关系数	0.976 0	0.917 7	-0.607 3

增大相同的距离时,由差分法计算的竖向旋转分量(R_z)偏离实际的竖向旋转分量(R_z)的现象最明显.这进一步说明了,利用差分法求取竖向旋转分量(R_z)要求台站之间的间距更小,台站分布更密集.为了进一步验证差分法是否可以作为求取旋转分量的一种有效替代方法,增加了振幅谱和相位谱的对比.此时差分法求取旋转分量,用的是台站间距为 1 m 的模拟数据.

在振幅谱上,差分法计算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)与模拟的旋转分量(R_x, R_y, R_z)较波形图表现出更好的相似.由差分法计算的 R_x 与模拟的 R_x 的相关系数为 0.990 9,而由差分法计算的 R_y 与模拟的 R_y 的相关系数为 0.999 7,由差分法计算的 R_z 与模拟的 R_z 之间的相关系数为 0.984 5.这说明差分法换算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)和模拟的旋转分量(R_x, R_y, R_z)在波形振幅的相对变化趋势上有很好的吻合.

在相位谱上,差分法换算的竖向旋转分量(R_z)与实际模拟的竖向旋转分量(R_z)之间存在较低的相关系数.这是因为在模拟数据中,微小的系统误差或噪音都会对差分法换算的竖向旋转分量(R_z)

造成很大的影响(Suryanto *et al.*, 2006).求取竖向旋转分量(R_z)的差分公式比求取水平旋转分量(R_x, R_y)的差分公式更复杂些,中间也增加了更多的近似条件.这些都会引起差分法计算的 R_z 和实际模拟的 R_z 之间的误差.而相位谱上体现出来的不吻合现象更进一步说明了,差分法对于换算竖向旋转分量(R_z)则需要信噪比更高的平动分量.

3 实际数据验证

实际数据是由 Francis T. Wu 领导的 TAIGER 项目于 2008 年 4 月份在台湾地区观测的爆炸源六分量地震数据(Lin *et al.*, 2009).本次分析使用的是 750 kg 药量的震源,所用的六分量地震仪直接记录了旋转运动.爆炸源和地震仪台站之间的距离为 500 m,如图 4 所示.

本次试验共使用了 5 台六分量地震仪,台站中各地震仪之间成正交分布,间距为 5 m.爆炸源所处的位置是图 4 中的 N3 点,其深度为 60 m(偏离位于 +Y 轴上的 N3P_A2 点 27 m);旋转地震仪的敏感带宽为 0.03~50 Hz,但是要想获得更高信噪比的信号,选择的频带范围应该为 0.05~20 Hz(Lin *et al.*, 2009).本次试验分析的是 N06, N07, N09bo 这 3 台地震仪记录的六分量数据.

实际记录的六分量地震数据中,平动分量是加速度分量(m/s^2),旋转分量是角速度分量($mrad/s$).因此,利用原始平动分量经过差分法计算得到的旋转分量,和直接测量得到的旋转分量在单位的量

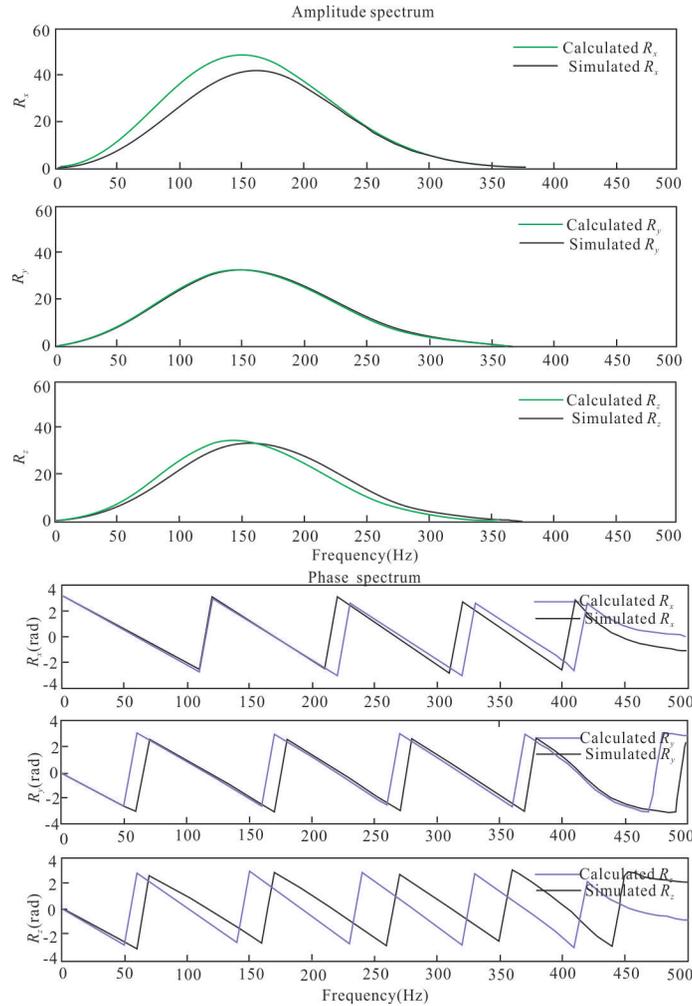


图 3 差分法换算与模拟旋转分量振幅谱和相位谱对比图

Fig.3 Comparisons of amplitude and phase spectra between the difference method and the simulated array data

表 6 差分法换算与模拟旋转分量振幅、相位相关系数

Table 6 Correlation coefficients of amplitude and phase-spectra between the difference method and the simulated array data

旋转分量	R_x	R_y	R_z
振幅谱相关系数	0.990 9	0.999 7	0.984 5
相位谱相关系数	0.750 3	0.157 3	0.016 9

纲(即表达的物理意义)上会有所不同.为了使得差分法换算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)和实测的旋转分量(R_x, R_y, R_z)都表示相同的物理意义,有必要对实测的旋转分量关于时间求偏导数,或者对差分法求取的旋转分量关于时间求积分.本文采用的是对加速度分量关于时间求积分的方法,最后将差分法计算的旋转分量单位统一成角速度分量(mrad/s).通过对实测的旋转分量(R_x, R_y, R_z)和利用差分法计算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)数值对

比,发现实测的旋转分量比差分法计算的旋转分量要大 10~100 倍.这是因为各台仪器的灵敏度有差异,并且受场地等干扰,对不同位置有影响,因此用差分法计算的旋转分量与实测的旋转分量有差异.同样为了在波形图上更准确的表现出波形的相对变化,对数据进行了归一化处理.

因为地震信号的首波在地震记录上有能量强、易识别、信噪比高等优点,所以本次试验分析的是记录的首波.对实测的旋转分量和利用差分法得到的旋转分量进行对比,从波形图中可以看出,只有实际记录的 R_x 和差分法计算的 R_x 有很高的相似度,其相关系数为 0.576 9.而由差分法计算的 R_y 与实际记录的 R_y 的相关系数仅为 0.017 4,差别更大的是差分法计算的 R_z 与实际记录的 R_z ,他们之间的相关系数甚至是负值,为 -0.131 4.但是差分法换算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)和实测的旋转分量($R_x,$

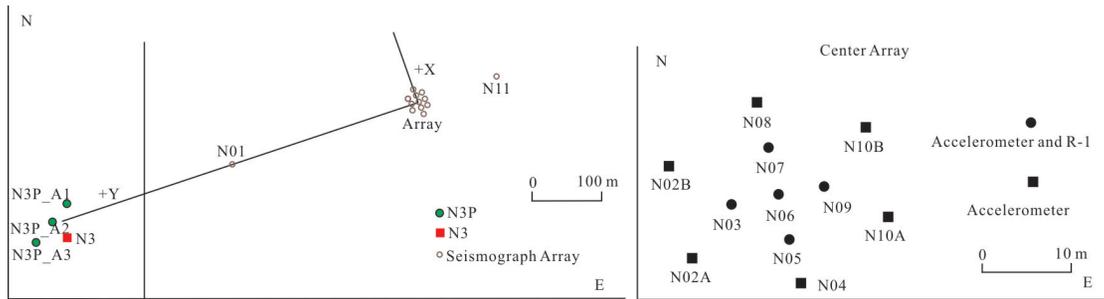


图 4 震源和地震台站分布位置示意图

Fig.4 Sketch map of location of the explosive sources and seismograph stations

据 Lin *et al.*(2009)

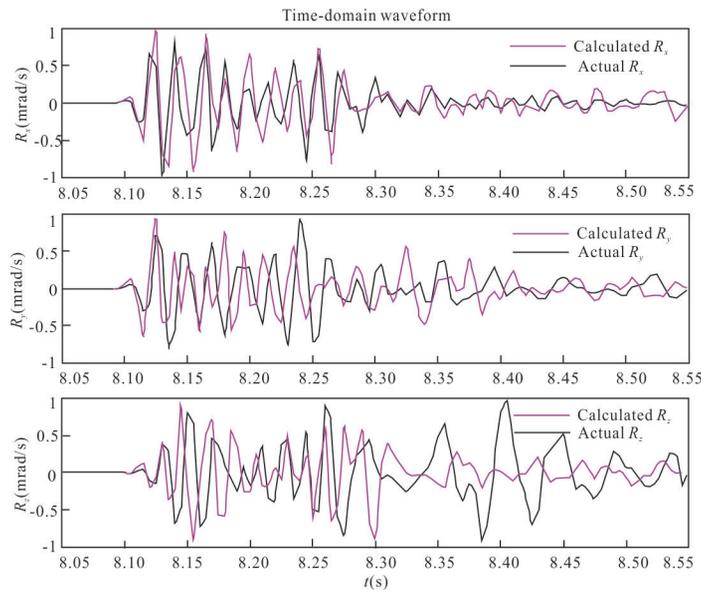


图 5 差分法换算与实测旋转分量波形对比图

Fig.5 Comparisons of wave forms between the difference method and the recording array data

表 7 差分法换算与实测旋转分量的波形相关系数

Table 7 Correlation coefficient of wave forms between the difference method and the recording array data

旋转分量	R_x	R_y	R_z
波形相关系数	0.576 9	0.017 4	-0.131 4

R_y, R_z) 在首波的初至时间上都有很好的吻合。

由于野外环境的复杂性,实际记录的地震数据不可避免的会掺杂有噪音等非有效信号。前文已经提到,微小的干扰信号都会对差分法换算旋转分量造成较大的影响,尤其是求取 R_z 的时候。

为了进一步理解差分法换算旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 的误差来源,在频率域增加了振幅谱和相位谱的信息。

在振幅谱图上,差分法换算的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 与实测的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 相似度有所

提高。振幅谱上的相似性,说明在相同的频段内,差分法换算的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 与实测的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 波形变化的相对振幅上存在较高的相似度。从而说明,时域波形图中,两者相似度不高的原因并不是波形的振幅变化所引起的。

在相位谱图上,差分法换算的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 与实测的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 相似度很小。相位谱图上的低相似性,说明差分法换算的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 与实测的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 在波形的相位上存在较大的差异。说明时域波形图中,两者相似度不高的原因主要是由相位上的差异所引起的。因而,差分法换算的旋转分量 (R_x, R_y, R_z) 不能很好的刻画实际波场的相位信息。

利用模拟的六分量地震数据对差分法进行分析时,差分法计算的旋转分量只有垂直方向旋转分量 (R_z) 的相关性不好,而水平方向旋转分量

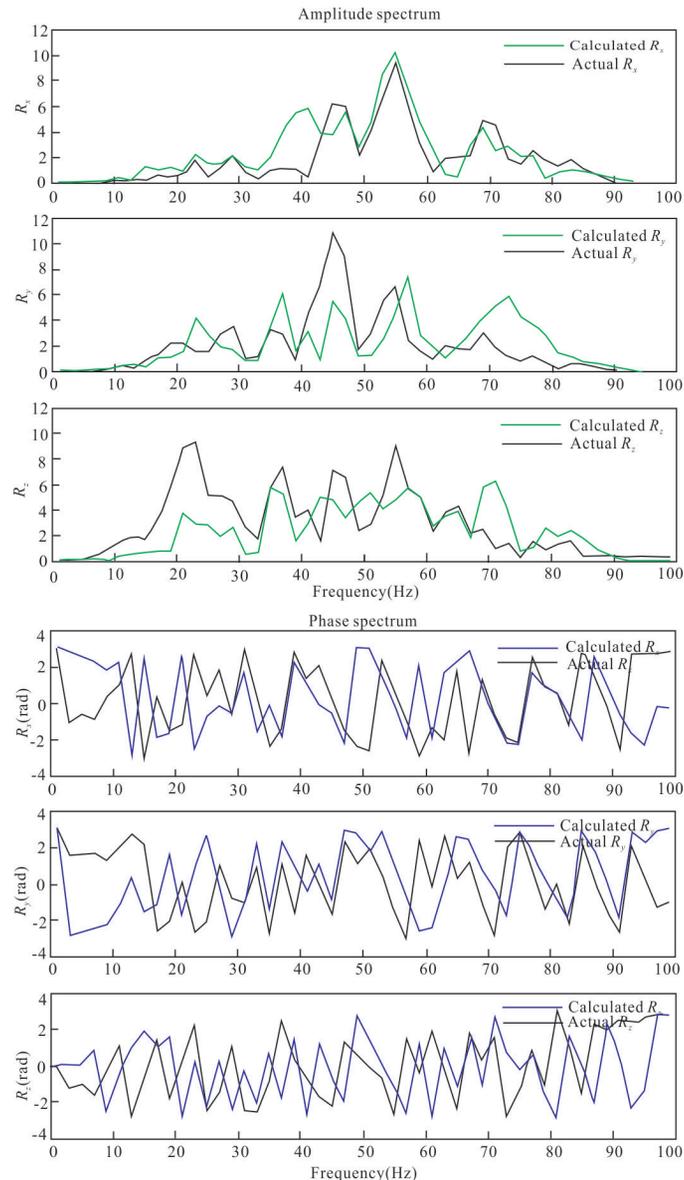


图6 差分法换算与实测旋转分量振幅谱和相位谱对比图

Fig.6 Comparisons of amplitude and phase-spectra between the difference method and the recording array data

(R_x, R_y) 都有较好的吻合, 其中 R_y 的拟合程度要好于 R_x . 分析实测的六分量地震数据时, 也可以得到类似的结论.

通过分析模拟的六分量地震数据和实测的六分量地震数据, 我们可以得到如下结论: 差分法求取水平旋转分量(R_x, R_y)的效果要好于求取的竖向旋转分量(R_z); 而对于水平旋转分量(R_x, R_y)的计算, X 方向和 Y 方向分别求取的旋转分量和实测的旋转分量之间也会有不同的相似程度, 可能于爆炸源的位置及其引爆的方式有关.

从模拟数据和实测数据两方面, 对差分法换算的旋转分量(R_x, R_y, R_z)与实测的旋转分量($R_x,$

表8 差分法换算与实测旋转分量振幅谱和相位谱相关系数
Table 8 Correlation coefficients of amplitude and phase-spectra between the difference method and the recording array data

旋转分量	R_x	R_y	R_z
振幅相关系数	0.823 6	0.508 4	0.581 2
相位相关系数	0.228 6	-0.095 9	-0.024 3

R_y, R_z) 在波形、振幅、相位等方面进行对比, 可以发现: 差分法换算的旋转分量(R_x, R_y, R_z), 更像是实测的旋转分量(R_x, R_y, R_z) 在波形的变化趋势、振幅的相对大小方面的再现; 而在某一时刻旋转运动的具体信息, 却没有很好的刻画出来, 尤其是在求

取竖向旋转分量(R_z)的时候.

4 改进的差分法

最初的差分法是将相邻两台站进行差分,代替偏导出旋转分量.因为本次试验所用的六分量地震数据来自于密集台阵的观测,所以针对这一特点对差分法进行了改进.用所求中心点两侧台站的平动分量以及中心点的平动分量,求取中心点的旋转分量.具体公式为:

在直角坐标系下,坐标原点为 A 点.在 X 方向上,正方向是 C 点,负方向是 E 点.在 Y 方向上,正方向为 B 点,负方向为 D 点. B, C, D, E 关于 A 点对称分布,如图 7 所示:

$$R_x = \frac{u_z^C + u_z^E - 2 \times u_z^A}{\Delta y},$$

其中: Δy 表示 BD 之间的距离, u_z^A, u_z^C 和 u_z^E 分别代表 A 点、C 点和 E 点的竖向(Z 方向)平动分量.

$$R_y = -\frac{u_z^B + u_z^D - 2 \times u_z^A}{\Delta x},$$

其中: Δx 表示 CE 之间的距离, u_z^A, u_z^B 和 u_z^D 分别代表 A 点、B 点和 D 点的竖向(Z 方向)平动分量.

$$R_z = \frac{1}{2} \times \left(\frac{u_x^C + u_x^E - 2 \times u_x^A}{\Delta y} - \frac{u_y^B + u_y^D - 2 \times u_y^A}{\Delta x} \right)$$

其中: Δy 表示 BD 之间的距离, u_x^A, u_x^C 和 u_x^E 分别代表 A 点、C 点和 E 点的横向(X 方向)平动分量. Δx 表示 CE 之间的距离, u_y^A, u_y^B 和 u_y^D 分别代表 A 点、B 点和 D 点的横向(Y 方向)平动分量.

改进的差分法用的是 N03, N05, N06, N07, N09 5 台六分量地震仪获取的地震数据.利用其测得的平动分量换算得到旋转分量,与实测的旋转分量进行对比,并求取相关系数.进而比较改进差分法和差分法之间的优劣.

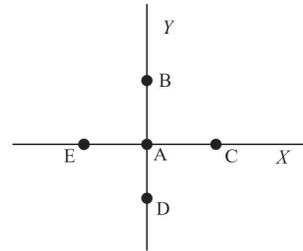


图 7 地震台站分布示意图(改进差分法)

Fig.7 Sketch map of location of the seismograph stations (the improved difference method)

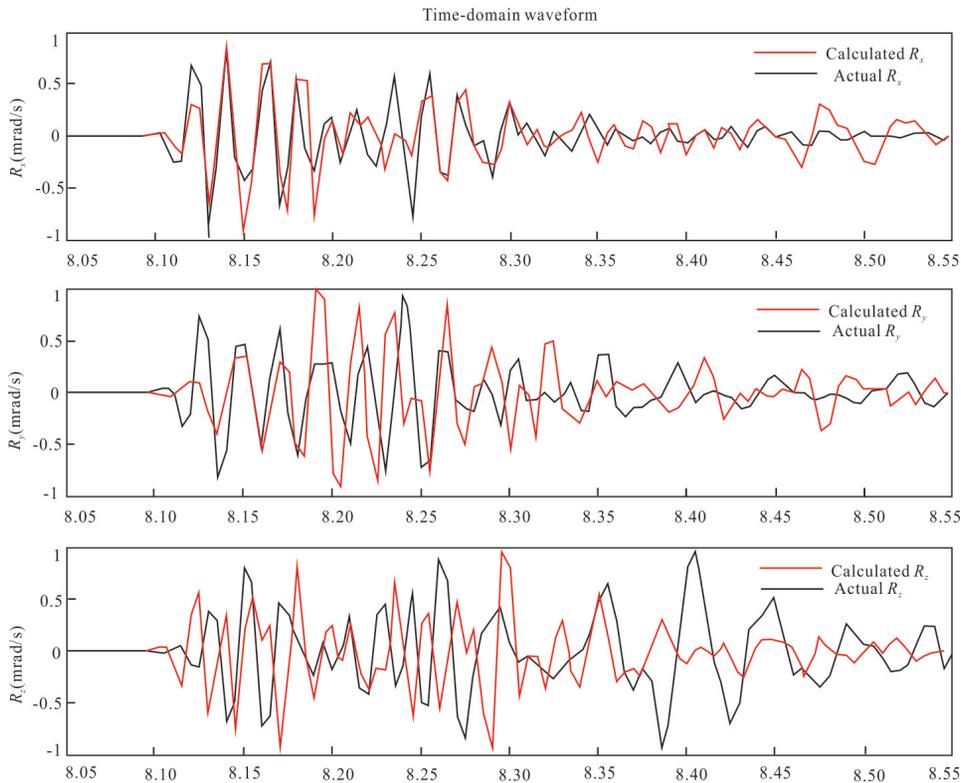


图 8 改进差分法换算与实测旋转分量波形对比图

Fig.8 Comparisons of wave forms between the improved difference method and the recording array data

将改进的差分法换算得到的旋转分量(R_x, R_y, R_z)和差分法换算得到的旋转分量(R_x, R_y, R_z)在波形上进行对比. 发现改进差分法换算得到的旋转分量(R_x, R_y, R_z)较差分法换算得到的旋转分量(R_x, R_y, R_z)与实际记录的旋转分量(R_x, R_y, R_z)相似度

更高. 这进一步说明了改进差分法的有效性.

继续增加对振幅谱和相位谱的分析验证, 所得结果如下图所示.

对比差分法和改进差分法计算的旋转分量与实测旋转分量之间振幅和相位之间的相关系数, 我

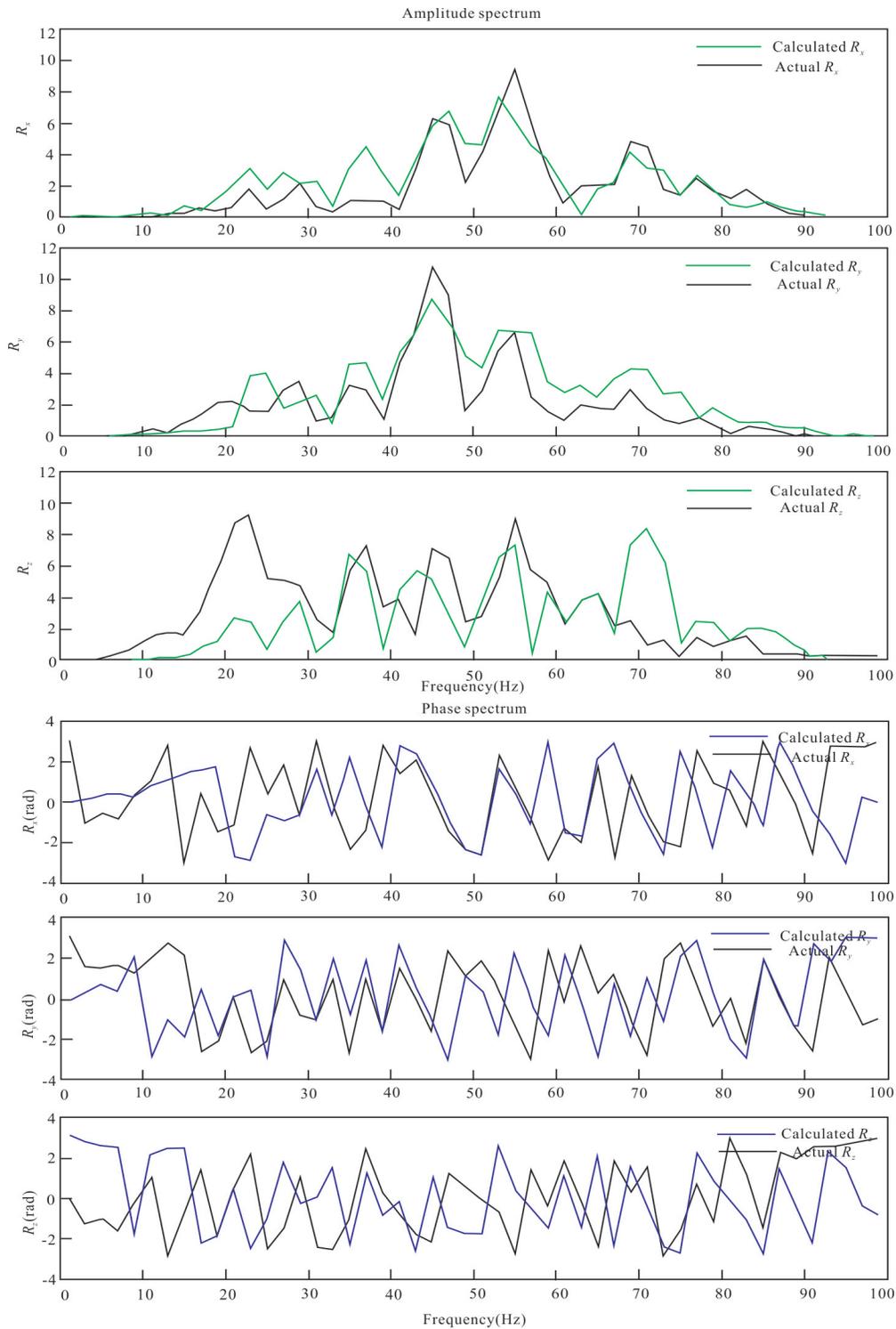


图9 改进差分法换算与实测旋转分量振幅谱和相位谱对比图

Fig.9 Comparison of amplitude and phase spectra between the improved difference method and the recording array data

表 9 改进差分法换算与实测旋转分量波形相关系数

Table 9 Correlation coefficient of wave forms between the improved difference method and the recording array data

旋转分量	R_X	R_Y	R_Z
波形相关系数	0.719 6	0.199 5	-0.010 2

表 10 改进差分法换算与实测旋转分量振幅谱和相位谱相关系数

Table 10 Correlation coefficients of amplitude and phase spectra between the improved difference method and the recording array data

旋转分量	R_X	R_Y	R_Z
振幅相关系数	0.856 6	0.841 4	0.670 2
相位相关系数	0.244 6	0.242 7	0.242 7

们可以得到以下几点认识:

首先,改进差分法确实提高了与实测旋转分量在振幅上的相似程度,这说明改进差分法可以很好的再现实际旋转分量的振幅信息.

其次,改进差分法也提高了与实测旋转分量在相位上的相似程度.但即便是改进差分法计算的旋转分量,其相位谱与实测数据的相位谱吻合程度依旧不高,这进一步说明了差分法换算的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z),更像是对实测的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)在波形的变化趋势、振幅的相对大小方面的再现;而在某一时刻旋转运动的相位信息,却没有很好的刻画出来.

由改进差分法换算得到的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)无论是在振幅谱还是在相位谱上,与差分法相比都有了很大的提高.改进差分法换算得到的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)较差分法换算得到的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)与实际记录的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)相似度更高.这也进一步说明了改进差分法的有效性.

5 分析总结

通过本次研究发现,无论是在模拟数据,还是在实测数据的验证中,差分法在求取水平方向旋转分量(R_X, R_Y)时,会和实际的地震数据有较好的吻合.求取的竖向旋转分量(R_Z)却和实际地震数据存在较大的误差.Suryanto *et al.*(2006)在2006年对差分法拟合竖向旋转分量(R_Z)的研究中就曾指出,微小的噪音都会对计算结果造成很大的误差.实际的地震台站数据,肯定会存在较多的噪音,这可能是

差分法在求取竖向旋转分量(R_Z)表现不好的原因之一;另外,由于利用差分法求取竖向旋转分量(R_Z)要求台站之间的间距更小,稍微增大台站间距就会对求取的竖向旋转分量(R_Z)造成很大的误差.因此笔者认为,这两点是造成差分法求取的竖向旋转分量(R_Z)和实测的竖向旋转分量(R_Z)之间存在较大误差的原因.

在模拟数据中,差分法求取的Y方向旋转分量(R_Y)相比于求取的X方向的旋转分量(R_X),对实际模拟的旋转分量有较好的吻合.然而,这一对比结果在实测数据的验证中却相反.表现为,差分法求取的X方向旋转分量(R_X)相比于求取的Y方向的旋转分量(R_Y),无论是在时域波形图,还是在频域振幅谱、相位谱图上都有更好的吻合.这可能是与震源的位置,实际地下空间结构等因素有关.但是在误差的允许范围内,差分法是可以作为求取水平旋转分量(R_X, R_Y)的有效替代.在模拟数据和实测数据两方面,对差分法换算的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)与实测的旋转分量(R_X, R_Y, R_Z)在波形、振幅、相位进行对比可以发现:差分法换算的旋转分量,更像是对实测的旋转分量在波形的变化趋势、振幅的相对大小等方面的再现;而在某一时刻旋转运动的具体信息,却没有很好的刻画出来.

利用差分法求取旋转分量时,至少需要3个地震台站的数据.如果台站密集,利用更多台站的数据,可以提高换算旋转分量的精度.因为利用更多的实测数据可以提供更为丰富的波场信息,也可以对随机噪音等线性干扰有更好的压制作用.基于此原理,本文提出了改进的差分法.通过实际的验证,改进的差分法确实在时域波形图、频域振幅谱和相位谱等方面和实测旋转分量有了更好的吻合.本文改进差分法的成功,又进一步说明了对于信噪比高的地震数据,差分法可以作为利用平动分量求取水平旋转分量(R_X, R_Y)的一种有效替代方法.

References

- Aki, K., Richards, P. G., 2002. Quantitative Seismology: Theory and Methods, 2nd Ed., Sausalito. University Science Books, California.
- Barak, O., Herkenhoff, F., Dash, R., et al., 2014. Six-Component Seismic Land Data Acquired with Geophones and Rotation Sensors: Wave-Mode Selectivity by Application of Multicomponent Polarization Filtering. *The Leading Edge*, 33(11): 1224–1232. <https://doi.org/>

- org/10.1190/tle33111224.1
- Huang, B. S., 2003. Ground Rotational Motions of the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake as Inferred from Dense Array Observations. *Geophysical Research Letters*, 30(6): 1307–1310. <https://doi.org/10.1029/2002gl015157>
- Lai, X.L., Sun, Y., 2017. Three Component Rotational Ground Motion Obtained from Explosive Source Data. *Earth Science*, 42(4): 645–651 (in Chinese with English abstract).
- Langston, C. A., Chiu, S. C. C., Lawrence, Z., et al., 2009a. Array Observations of Microseismic Noise and the Nature of H/V in the Mississippi Embayment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(5): 2893–2911. <https://doi.org/10.1785/0120080189>
- Langston, C. A., Lee, W. H. K., Lin, C. J., et al., 2009b. Seismic-Wave Strain, Rotation, and Gradiometry for the 4 March 2008 TAIGER Explosions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 1287–1301. <https://doi.org/10.1785/0120080200>
- Lin, C. J., Liu, C. C., Lee, W. H. K., 2009. Recording Rotational and Translational Ground Motions of Two TAIGER Explosions in Northeastern Taiwan on 4 March 2008. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 1237–1250. <https://doi.org/10.1785/0120080176>
- Liu, C. C., Huang, B. S., Lee, W. H. K., et al., 2009. Observing Rotational and Translational Ground Motions at the HGSD Station in Taiwan from 2007 to 2008. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 1228–1236. <https://doi.org/10.1785/0120080156>
- Richter, C. F., 1958. Elementary Seismology W. H. Freeman, San Francisco, California. *Tellus*, 11(2):257–258.
- Spudich, P., Fletcher, J. B., 2008. Observation and Prediction of Dynamic Ground Strains, Tilts, and Torsions Caused by the Mw 6.0 2004 Parkfield, California, Earthquake and Aftershocks, Derived from UPSAR Array Observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(4): 1898–1914. <https://doi.org/10.1785/0120070157>
- Spudich, P., Steck, L. K., Hellweg, M., et al., 1995. Transient Stresses at Parkfield, California, Produced by The M7.4 Landers Earthquake of June 28, 1992: Observations from the UPSAR Dense Seismograph Array. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B1): 675–690. <https://doi.org/10.1029/94jb02477>
- Sun, L., Zhang, Z., Wang, Y., 2018. Six-Component Elastic-Wave Simulation and Analysis. EGU General Assembly Conference Abstracts, London, 14930.
- Suryanto, W., Igel, H., Wassermann, J., et al., 2006. First Comparison of Array-Derived Rotational Ground Motions with Direct Ring Laser Measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(6): 2059–2071. <https://doi.org/10.1785/0120060004>
- Wan, T.F., 2019. A Review of Geotectonics. *Earth Science*, 44(5):1526–1536 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Yang, D. H., Yin, C. C., et al., 2017. Anisotropic Geophysics and Vector Field. *Chinese Science Bulletin*, 62(23):2595–2605 (in Chinese with English abstract).
- William. H. K., Huang, B. S., Langston, C. A., et al., 2009. Review: Progress in Rotational Ground-Motion Observations from Explosions and Local Earthquakes in Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2B): 958–967. <https://doi.org/10.1785/0120080205>
- Xu, X.W., Bai, L.X., Wei, L.M., et al., 2019. Discussion on Initiation Time of the Latest Tectonic Movement in Break-Up Region of the North China Craton. *Earth Science*, 44(5): 1647–1660 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Liu, W.Y., Yuan, Y., et al., 2018. Review of the Application of Rotational Motions in Seismology. *Earthquake Research in China*, 34(1):1–13 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 赖晓玲,孙译,2017.利用爆炸震源资料获得三分量旋转地震动.地球科学,42(4):645–651.
- 王赞,杨顶辉,殷长春,等,2017.各向异性地球物理与矢量场.科学通报,62(23):2595–2605.
- 万天丰,2019.论大地构造学的发展.地球科学,44(5):1526–1536.
- 徐锡伟,白鸾曦,魏雷鸣,等,2019.华北克拉通破坏区最新构造运动起始时间讨论.地球科学,44(5):1647–1660.
- 张佩,刘文义,袁艺,等,2018.旋转运动在震学中的应用概述.中国地震,34(1):1–13.