论文

基于地倾斜数据的九寨沟Ms7.0地震旋转运动场构建

周聪^{1,2*}, 曾祥芝³, 王庆良¹, 刘文义¹, 汪翠枝¹

1. 中国地震局第二监测中心, 西安 710054;

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

* E-mail: zhoucong323@126.com

收稿日期: 2018-04-10; 收修改稿日期: 2018-11-30; 接受日期: 2018-12-12; 网络版发表日期: 2019-02-21

国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC1503405)和中国地震局地震科技星火项目(编号: XH17060Y)资助

摘要 过去几十年由于对地面旋转运动认识的不足以及直接测量旋转分量存在实际困难, 所以一直忽视了地震旋转分量的观测和研究. 目前国内尚缺乏地震旋转量直接测量的工作, 文章尝试讨论从地倾斜资料中获得地震旋转量的可能性. 基于均匀全空间弹性波场的位移公式, 推导了剪切位错源在水平面产生的旋转运动场, 对比分析了三分量平移运动和旋转运动近、中、远场的特征. 并根据自由表面旋转量与倾斜量的对应关系, 获得了间接构建分层半空间中旋转运动场的方法. 最后计算出2017年8月8日四川九寨沟Ms7.0地震产生的理论旋转运动场, 结果表明九寨沟Ms7.0地震产生的旋转运动场集中在震中附近约150km范围内, 主要分布在近垂直于断层走向的区域. 自由边界的存在对整个地震旋转运动场有衰减作用, 特别是在旋转分量的能量优势方向衰减剧烈. 通过实际地倾斜数据与理论旋转运动场的对比, 发现特别是在远场区域, 实际资料与理论计算结果的趋势性基本一致. 表明了可以尝试从地倾斜资料中获得地震旋转运动水平分量, 为完整描述地下介质的运动特征提供更丰富的信息.

关键词 地震旋转量, 分层半空间, 九寨沟地震, 地倾斜, 走滑断层

1 引言

地震波在固体介质中传播时, 介质发生的运动通常包括平移运动、旋转运动和体积形变(Lee等, 2009; Trifunac, 2009). 为了完整描述无穷小应变体在指定位置上的运动特征, 需要构建三分量的平移量、六分量的应变量和三分量的旋转量(顾浩鼎和陈运泰, 1997;

Aki和Richards, 2002). 目前主要有两种类型的测量用于监测全球和区域的地震波场: 标准地震计测量三分量的平移地表位移以及形变类仪器测量地壳形变(Igel等, 2005). 虽然观测到由地震引起的旋转效应已有一百多年的历史, 但很多大地震引起的旋转效应被认为是由于构造物体的非对称性产生, 而且当时测量地震旋转量存在实际困难, 所以一直忽视了地面旋转运动

中文引用格式: 周聪, 曾祥芝, 王庆良, 刘文义, 汪翠枝. 2019. 基于地倾斜数据的九寨沟Ms7.0地震旋转运动场构建. 中国科学: 地球科学, 49: 811–821, doi: 10.1360/N072018-00107

英文引用格式: Zhou C, Zeng X, Wang Q, Liu W, Wang C. 2019. Rotational motions of the Ms7.0 Jiuzhaigou earthquake with ground tilt data. Science China Earth Sciences, 62: 832–842, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9320-3>

的测量和研究(Bouchon和Aki, 1982; Cochard等, 2006). 但是随着旋转传感器技术的进步, 例如光纤和激光陀螺仪的发展, 直接观测地震旋转分量的水平在近年来有了很大的提高(Lee等, 2009; 董兴鹏等, 2013; Jaroszewicz等, 2016). 而且Li等(2004)研究发现即使是对称的建筑体, 也会由于地震的触发而产生旋转运动. 旋转在地震学中的意义不仅是理论方面的, 还将推动地震预报的深入研究(顾浩鼎和陈运泰, 1988). 已有研究表明(Takeo和Ito, 1997; Trifunac和Todorovska, 2001), 旋转的观测研究提供了额外的波场信息(如相速度、传播方向、各向异性等). 由于绕垂直轴的旋转分量对SH波敏感, 而对P-SV波不敏感, 所以利用旋转运动的信息可以让我们有更多精确的数据来确定SH波的到时信息(Takeo和Ito, 1997). 同步观测旋转量与平移量能更好获得地壳结构信息, 也能减少震源破裂反演中的非唯一性问题(Bernauer等, 2014; Donner等, 2016; Reinwald等, 2016).

目前国内尚缺乏地震旋转量直接测量方面的工作, 而且由于国家测震台网间距过大, 也无法通过台阵的方法间接获得可靠的地震旋转量. 但基于旋转量与倾斜量之间的对应关系, 且中国地震局在国内布设了大量的地倾斜台站, 有着丰富的地倾斜观测资料, 可以尝试分析直接从地倾斜资料获取地震旋转量的可行性. 本文通过理论推导和数值计算, 建立了均匀全空间和分层半空间中理论地震旋转量的计算方法. 结合四川九寨沟地震震源机制和地倾斜观测资料, 计算并分析了九寨沟地震产生的旋转运动场在地表的分布特征. 这对于完整的地震记录以及研究地震引起的地面运动和介质运动有着重要的意义.

2 剪切位错源产生的旋转效应

2.1 旋转量定义

在经典弹性理论框架下, 当考虑物体的无穷小形变时, 给定点 x 附近的新点 $x+\delta x$ 的介质变形可表示为(Aki和Richards, 2002)

$$\begin{aligned}\mathbf{u}(\mathbf{x}+\delta\mathbf{x}) &= \mathbf{u}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}\delta\mathbf{x} \\ &= \mathbf{u}(\mathbf{x}) + \varepsilon\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\Omega}\delta\mathbf{x} \\ &= \mathbf{u}(\mathbf{x}) + \varepsilon\delta\mathbf{x} + \boldsymbol{\omega} \times \delta\mathbf{x},\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\mathbf{G}$ 、 ε 、 $\boldsymbol{\Omega}$ 分别为梯度、应变以及旋转二阶张量.

刚体旋转量定义为

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

上述公式说明了需要三分量的平移量 $\mathbf{u}$ 、六分量的应变变量 ε 和三分量的旋转量 $\boldsymbol{\omega}$ 才能完整描述 $\mathbf{x}$ 点附近介质的形变.

2.2 水平剪切位错源产生的旋转运动

假设一个剪切位错源位于直角坐标系 x_1 、 x_2 、 x_3 的原点, 断层面位于平面 x_1 - x_2 内, 断层滑动方向沿着 x_1 轴, 如图1所示. 引入以原点为中心的一组球极坐标 $\hat{\phi}$ 、 $\hat{\theta}$ 、 $\hat{r}$. 根据Aki和Richards(2002)给出的均匀全空间位移场 $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ 简洁矢量形式, 利用式(2)可推导获得地震旋转量的表达式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega}(\mathbf{x}, t) &= \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) \\ &= \frac{-A^R}{8\pi\eta} \left[\frac{3}{\beta^2 r^3} \dot{M}_0 \left(t - \frac{r}{\beta} \right) + \frac{3}{\beta^3 r^2} \ddot{M}_0 \left(t - \frac{r}{\beta} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\beta^4 r} \dddot{M}_0 \left(t - \frac{r}{\beta} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $A^R = \cos\theta\sin\phi\hat{\theta} + \cos\phi\cos2\theta\hat{\phi}$ 是三分量旋转量的辐射花样(径向分量为零). 从式(3)可以看出只有横波部分才能产生旋转效应. 在推导过程中发现, 纵波平移分量的近、中、远场项产生的对应旋转量是不为零的, 只是在求取总的旋转量时相互抵消, 使得纵波产生的旋转效应为零. 因此, 对平移位移场近、中和远场的通用分类并不适用于旋转场的分类, 见网络版附录(均

图1 剪切位错源坐标示意图

匀全空间三分量旋转运动公式, <http://earthcn.scichina.com>).

2.3 三分量旋转运动与平移运动

根据2.2节的理论推导, 可以获得水平剪切位错源在空间不同方位产生的理论地震波的平移量和旋转量. 这里定义震源时间函数为

$$M_0(t) = \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left(\frac{t - T_0}{T_0} \right) M_w, \quad (4)$$

式中, M_0 是时间 t 的函数, T_0 是上升时间(rise time). M_w 是衡量地震大小的参数. 根据Aki和Richards(2002), M_w 取值范围从微地震的 10^{12} dyne cm到大地震的 10^{30} dyne cm. 这里地震矩 $M_w = 10^{15}$ N m ($M_w \approx 4.0$), 上升时间 $T_0 = 0.05$ s, 介质密度为 $\rho = 2800$ kg cm $^{-3}$, S波和P波速度分别为 $\beta = 3000$ m s $^{-1}$, $\alpha = \sqrt{3}\beta$ m s $^{-1}$. 震源位于地下10 km处, 接收点位置为 $(r, \theta, \Phi) = (3 \text{ km}, \pi/8, \pi/4)$.

图2为计算出来的水平剪切位错源在均匀全空间产生的三分量平移运动(图2a)和旋转运动(图2b). 图2中从左至右依次为平移运动和旋转运动所产生的近场、中场、远场和总场的运动情况.

从图2b中可以看到所有不同分项的三分量旋转运动中, 径向的旋转运动分量始终为零. 在各个分量的旋转运动中, 只有S波波前有旋转效应(走时1 s附近), 不

存在P波产生的旋转效应. 而且与平移运动一样, 旋转运动的远场项贡献了总的旋转运动的大部分能量. 根据2.2节以及网络版附录, 平移运动与旋转运动的近、中、远场能量不是一一对应的. 例如旋转运动的远场能量不完全是平移运动远场产生, 也与后者的近场和中场能量有关. 同时, 理论计算的旋转量幅值也比较小, 矩震级约4.0的地震理论上只产生 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ rad的旋转量. 这也对旋转地震仪的精度提出了更高的要求.

3 旋转运动场的分布特征

3.1 均匀全空间旋转运动场的分布特征

下面分析均匀全空间中三分量旋转运动在平面上的分布特征. 基于图1中的剪切位错源, 震源时间函数和介质参数同2.3节. 接收点为离震源10 km的 z 平面上 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 区域内的400个观测点(即取 $x = -10 \sim 10 \text{ km}$, $y = -10 \sim 10 \text{ km}$, $z = 10 \text{ km}$), 空间间隔1 km, 空间位置如图3所示.

图4为计算出的地面峰值旋转量等值线图. 可以看到对于横向分量, 最大的峰值旋转量(震中附近)约为 1.5×10^{-5} rad, 而且随距离衰减很快, 在传播10 km左右时最大峰值旋转量减小一个数量级. 然而, 旋转量与加速度和相速度的比值成正比. 当地表的速度足够低时, 旋转效应的幅值也是非常大的(Suryanto, 2006). 因

图2 剪切位错源在点处产生的三分量平移运动(a)和三分量旋转运动(b)

实线表示 r 分量, 点划线表示 ϕ 分量, 虚线表示 θ 分量. 从左至右依次为平移运动和旋转运动的近场项、中场项、远场项和总场. $r = 3 \text{ km}$, $\theta = \pi/8$, $\Phi = \pi/4$

图3 地表峰值旋转量的观测示意图

球坐标系同图1所示

此, 在软或者未固结的沉积层, 或者包含流体渗入的多孔介质中, 地震引发的旋转效应很大, 可能是导致建筑物破坏的重要因素。

根据理论推导以及图2、4的结果, 球坐标系下径向的旋转运动分量始终为零。在实际资料处理和分析中, 常常需要分析波场在直角坐标系下(南北NS、东西EW、垂向Z)的分布特征。因此可以对球坐标系结果进行坐标转换, 获得直角坐标系下旋转运动的分布。转换公式如下:

$$\begin{cases} W(x, t) = W(\theta, t) \cos \theta \cos \phi - W(\phi, t) \sin \phi, \\ W(y, t) = W(\theta, t) \cos \theta \sin \phi + W(\phi, t) \cos \phi, \\ W(z, t) = -W(\theta, t) \sin \theta, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $W(\theta, t)$ 和 $W(\phi, t)$ 分别表示旋转效应在球坐标系下的两个切向分量, $W(x, t)$ 、 $W(y, t)$ 和 $W(z, t)$ 则表示直角坐标系下的EW、NS和Z三个分量。在实际震例中也会遇到近垂直的走滑断层。如2014年8月3日云南发生的鲁甸Ms6.5地震, 发生在走向 162° 、倾角 86° 的近乎垂直于地表的断层面上(张勇等, 2014)。同样基于图3的观

测几何示意图, 震源时间函数和介质参数同2.3节, 接收点为离震源10km的y平面上 $20\text{km} \times 20\text{km}$ 的区域内的400个观测点(即取 $x = -10 \sim 10\text{km}$, $y = 10\text{km}$, $z = -10 \sim 10\text{km}$), 空间间隔1km, 可计算出垂直于断层面的平面上旋转运动场的分布特征。计算结果如图5所示。对于沿EW走向的垂直走滑断层, 其旋转运动在EW、NS和Z三个方向上呈现完全不同的分布特征: 旋转运动场的EW分量(x^*)主要沿着断层走向上分布, 而NS分量(y^*)主要垂直于断层走向上分布, 垂直分量(z^*)则在沿着走向以及垂直走向上都有较强的能量分布, 呈现明显的四象限分布。从图中等值线的密集程度可以看出所有分量的旋转运动场都随着震中距的增加而迅速衰减, 同时衰减速度也在减弱。

在实际地球介质中, 走滑断层更为常见。这里可以基于水平剪切位错源在三维空间产生的旋转运动场(x, y, z), 利用空间坐标旋转获得任意走滑位错源在水平面上产生的理论旋转运动场(x', y', z')。三维空间坐标旋转公式如下:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(R + \pi/2) & \sin(R + \pi/2) & 0 \\ -\sin(R + \pi/2) & \cos(R + \pi/2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos D & 0 & \sin D \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin D & 0 & \cos D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos S & -\sin S & 0 \\ \sin S & \cos S & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, R 为滑动角, D 为倾角, S 为断层走向。图5中垂直剪切位错源产生的地面旋转场也可用该公式获得。

3.2 分层半空间旋转运动场的分布特征

由于实际地球介质存在自由边界, 因此研究弹性半空间或分层半空间中旋转运动分布更具有实际意

图4 球坐标系下水平剪切位错源产生的地表峰值旋转量等值线图

(a)~(c)分别表示旋转量在 r 、 θ 、 ϕ 方向的投影, 单位: rad

图 5 直角坐标系下垂直剪切位错源产生的地表峰值旋转变率等值线图
(a)~(c)分别表示旋转变率的EW、NS和Z分量, 单位: rad

义. Feng和Zhang(2018)在考虑埋深震源的情况下, 理论推导出了三维弹性半空间中地震位移精确解. 但由于解析解过于复杂, 难以通过2.2节的方法获得弹性半空间旋转变率的解析解. 因此本文采用数值解法来获得弹性半空间或分层半空间中旋转运动. 由式(2)可得

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{u} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \partial_y u_z - \partial_z u_y \\ \partial_z u_x - \partial_x u_z \\ \partial_x u_y - \partial_y u_x \end{pmatrix}. \quad (7)$$

根据式(7)可知, 可以对空间多个点的地震平移分量进行差分间接获得其对应的旋转变率.

3.2.1 自由边界条件

假设自由边界为x-y平面, 该边界上的零牵引边界条件使得应力 $\sigma_{iz}=0(i=x, y, z)$. 在均匀各向同性介质中应用胡克定律 $\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}$ 可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial z} &= -\frac{\partial u_z}{\partial x}, \\ \frac{\partial u_y}{\partial z} &= -\frac{\partial u_z}{\partial y}, \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} &= -\frac{\lambda}{\lambda + 2\mu} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

令倾斜量为 I_x 和 I_y , 根据式(7)

$$\begin{cases} I_x = \frac{\partial u_z}{\partial x} = -\omega_y, \\ I_y = \frac{\partial u_z}{\partial y} = \omega_x. \end{cases} \quad (9)$$

因此, 在地球表面, 水平方向的旋转变率与地表观测的倾斜量一致. 东西向的倾斜量对应南北向的旋转变率,

反之亦然. 由式(9)可知, P波能在自由表面上产生水平方向的旋转变率, 而在介质内部却是无旋的. 这是由于自由边界处PS转换波的存在导致. 目前, 利用何种技术手段能适用于不同分量的旋转变率测量仍是一个需要解决的问题(Cochard等, 2006). 传统倾斜仪测量的是相对局部垂向的角度变化, 而该变化可以被重力所影响. 因此, 它们不能分辨真实的旋转效应和由纯粹重力影响导致的倾斜角度的变化(如质量的重新分布也会导致倾斜仪的变化).

3.2.2 分层半空间旋转运动场的分布

分层半空间介质的合成地震图计算有多种方法, 本文采用汪荣江提供的QSEIS程序计算分层半空间的合成理论地震图. 该程序基于正交化传递矩阵方法计算得到格林函数, 解决了传统Haskell传播矩阵法中高频精度损失问题(Haskell, 1953; Wang, 1999). 然后利用式(9)可间接获得水平方向的地震旋转变率.

设置震源为走向90°、倾角90°、滑动角0°的垂直走滑断层, 埋深10km, 地震矩取 M_w 为 10^{15} N m ($M_w \approx 4.0$), 地表观测区域 $0.8^\circ \times 0.8^\circ$, 空间间隔 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$. 采用两层速度模型, 模型参数见表1所示.

计算结果如图6所示. 分层半空间中旋转运动场的EW分量和NS分量呈现类似四象限的分布, EW分量在四个象限分布较均匀, 而NS分量主要沿断层走向分布.

表 1 二层模型的地层参数

层位	层厚(km)	$V_p(\text{km s}^{-1})$	$V_s(\text{km s}^{-1})$	$\rho(\text{g cm}^{-3})$
1	40	6.0	3.46	2.8
半空间	∞	8.0	4.44	3.2

图6 分层半空间垂直剪切位错源产生的地表峰值旋转量等值线图

(a)和(b)分别表示旋转量的EW和NS分量, 单位: rad

与图5弹性全空间中对应分量的结果相比, 看似完全不同的旋转运动场分布, 其实有着一定的相似性: 根据等值线的密度, 可以看出图5a和6a显示的EW分量的地表峰值旋转速率是垂直于断层走向分布, 而图5b和6b的NS分量地表峰值旋转速率沿着断层走向分布. 进一步分析可以看出, 相比于弹性全空间旋转运动场分布, 分层半空间的分布结果可看成前者在其能量优势方向上快速衰减的结果, 如图6中EW分量在沿断层走向、NS分量在垂直断层走向上的能量都较小, 而这两个方向是弹性全空间中旋转运动场对应分量的能量优势方向. 根据两个模型计算结果的幅值差异, 可以推测出自由边界的存在对旋转运动场的能量有衰减作用, 而且在对应旋转分量的能量优势方向影响更大.

4 九寨沟Ms7.0地震旋转运动场分布

4.1 资料收集情况

北京时间2017年8月8日21时19分, 四川九寨沟(33.20°N, 103.82°E)发生Ms7.0地震, 震源深度20km. 随后中国地震台网中心、美国地质调查局(USGS)等相关机构或个人给出了此次地震的震源参数(张旭等, 2017; 谢祖军等, 2018; 房立华等, 2018). 鉴于USGS与张旭等(2017)所给出的震源机制解相近, 而震源深度相差较大, 本文选取USGS给出的震源机制解(走向153°, 倾角84°, 滑动角-33°, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000a5x1#moment-tensor>), 选取台网中心给出的震源深度20km.

九寨沟地震周边地区有丰富的地形变观测资料, 其中倾斜量的观测主要有: 水平摆、垂直摆、水管以及钻孔倾斜仪观测. 本文以九寨沟地震震中为原点建

立直角坐标系(其中x轴为东西向, y轴为南北向, z轴为垂向), 在距震中约450km范围内搜集地形变观测资料, 搜集到台站20个, 共25对实际资料(其中钻孔倾斜资料8对, 水管倾斜资料10对, 水平摆倾斜2对, 垂直摆倾斜5对). 然后统计了九寨沟地震同震倾斜量(即将同震倾斜形变的最大幅值减去震前平静期的幅值), 大致估算了九寨沟地震所造成南北和东西向的倾斜量最大幅值. 具体统计情况见表2所示. 表2中统计了20个台站25对实际资料的南北以及东西向同震倾斜量大小, 其中9个台站共10对资料同震倾斜量的南北分量大于东西分量, 它们分别是宝鸡台、同仁台、乐都台、兰州台、兰州十里店台、临夏台、英鸽台、横梁台和康定台; 同震倾斜量的南北分量小于东西分量有8个台站共9对实际资料, 分别是甘孜台、两水台、宕昌台、武山台、宁强台、汉中台、白银台和海原小山台. 剩下的姑咱台、泾源台和陇县台的两种观测手段不一致.

4.2 九寨沟地震旋转运动场分布

以九寨沟地震作为震源模型, 地震矩取 M_w 为 6.3×10^{18} N·m ($M_w \approx 6.5$), 采用第3节描述的两种方法分别计算弹性全空间和分层半空间地震旋转运动在平面上的分布, 弹性全空间模型参数采用 $V_p = 6.2 \text{ km s}^{-1}$, $V_s = V_p / \sqrt{3} \text{ km s}^{-1}$, $\rho = 2800 \text{ kg cm}^{-3}$ (杨宜海, 2014), 分层半空间模型参数采用IASP91介质模型(Kennett和Engdahl, 1991).

图7和8分别为弹性全空间和分层半空间地震旋转运动场在地表的分布. 对比可以发现两种模型中旋转运动场的宏观分布比较一致, 旋转运动场主要集中在震中附近约150km范围内, 而且主要分布在近垂直于断层走向的区域. 弹性全空间旋转运动场的两个水平

表 2 九寨沟地震周边地区20个地倾斜台站资料统计

地震台	位置	倾斜仪	南北分量(10^{-3} ")	东西分量(10^{-3} ")
两水地震台	104.85°E, 33.42°N	钻孔倾斜	662.5-177.7 = 484.8	631.1-130.1=501
宕昌地震台	104.39°E, 34.00°N	水管倾斜	-26.24-11.31=-37.55	771.7-59.95=711.75
宝鸡上王台	106.00°E, 34.00°N	水管倾斜	-274.1-(-57.18)=-216.92	29.73-140.5=-110.77
武山地震台	105.05°E, 34.64°N	钻孔倾斜	1356-3103=-1747	947.6-3909=-2961.4
汉中地震台 (南郑813厂)	107.08°E, 33.02°N	水管倾斜	-71.67-(-56.11)=-15.45	-162.3-(-134)=-28.3
		垂直摆倾斜	-107.2-(-40.1)=-67.1	-69.75-8.01=-77.76
陇县地震台	106.80°E, 34.76°N	水管倾斜	254.9-263.8=-8.9	-181.3-(-197)=15.7
		垂直摆倾斜	556.3-637.5=-81.2	788.7-814.5=-25.8
泾源地震台	106.35°E, 35.49°N	水管倾斜	-3670-(-3620)=-50	1775-1721=54
		垂直摆倾斜	1454-1296=-158	1429-1579=-150
同仁地震台	102.01°E, 35.52°N	水管倾斜	-833.2-(-348.2)=-485	-724.5-(-257.4)=-467.1
海原小山台	105.36°E, 36.30°N	钻孔倾斜	235-70.85=164.15	362.2-(-448.8)=811
白银地震台	104.10°E, 36.60°N	水管倾斜	279.6-289=-9.4	-51.37-49.09=-100.46
乐都地震台	102.40°E, 36.55°N	水平摆倾斜	-1602-576.1=-2178.1	-284.1-(-584.6)=300.5
甘孜地震台	100.01°E, 31.60°N	钻孔倾斜	46.23-65.42=-19.19	89.66-556=-466.34
姑咱地震台	102.17°E, 30.12°N	水管倾斜	6.94-(-39.28)=46.22	-42.91-(-33.42)=-9.49
		垂直摆倾斜	1.92-17.97=-16.05	-51.92-140.6=-192.52
康定地震台	101.97°E, 30.06°N	垂直摆倾斜	-9.48-(-43.86)=34.38	0.05-(-27.04)=27.09
宁强地震台	106.24°E, 32.92°N	水管倾斜	-30.38-(-38.91)=8.53	47.61-87.83=-40.22
兰州观象台	103.85°E, 36.09°N	钻孔倾斜	124.1-1210=-1085.9	-152.2-455.8=-608
兰州十里店台	103.75°E, 36.08°N	水平摆倾斜	-5022-(-9850)=4828	33.39-(-2180)=2213.39
		水管倾斜	-95.96-(-54.98)=-40.98	53.86-70.18=-16.32
临夏综合(台阵)	103.26°E, 36.63°N	钻孔倾斜	23.35-(-2059)=2082.35	-498.5-(-2527)=2028.5
英鸽(台阵)	103.23°E, 36.91°N	钻孔倾斜	-4.03-(-558.6)=554.57	-193.2-(-741.3)=548.1
横梁(台阵)	103.33°E, 37.30°N	钻孔倾斜	136.8-(-300.4)=437.2	172.4-510.7=-338.3

分量均集中在断层的一侧, 而分层半空间场的能量在断层两侧分布更均匀, 而且幅值相对前者小两个数量级. 可以认为自由边界的存在除了对旋转运动场的整体能量有衰减作用, 在对应旋转分量的能量优势方向的衰减作用更加明显. 接着我们将统计出的20个倾斜台站投影到图7和8中, 其中正方形台站表示同震倾斜量的南北分量小于东西分量(即旋转量南北分量大于东西分量), 三角形台站表示同震倾斜量的南北分量大于东西分量(即旋转量南北分量小于东西分量), 而星形台站表示两种倾斜观测手段不一致的姑咱台、泾源台和陇县台. 大部分倾斜台站分布于断层的东侧. 从图中可以明显的看出两水台、宝鸡台、宁强台、汉中台和甘孜台同时处于南北分量的高能量区和东西分量的

低能量区, 除了宝鸡台, 其他均对应了正方形台站的标识. 由于考虑自由边界效应后地震旋转量随距离衰减更加剧烈, 震中北边的大多数台无法直接从图8中定性分析两个分量之间的相对大小, 因此为了更加清楚的展示旋转运动场与地倾斜之间的对应关系, 将图8中两个分量的旋转运动场绝对值相减, 用白色表示旋转运动场南北大于东西分量, 灰色表示南北小于东西分量, 对比结果如图9所示.

根据前面对台站类型的划分, 正方形台站应该分布于白色区域, 三角形台站应该分布于灰色区域. 通过统计发现, 20个台站中除了三个倾斜观测结果相矛盾的姑咱台、泾源台和陇县台, 只有白银台、海原台、宝鸡台、宕昌台和武山台与理论的旋转运动场明

图7 弹性全空间走滑断层产生的地表峰值旋转量

(a)和(b)分别表示旋转量的EW和NS分量, 单位: rad

图8 分层半空间走滑断层产生的地表峰值旋转量

(a)和(b)分别表示旋转量的EW和NS分量, 单位: rad

显不符合, 其他12个台站共14对测项的南北分量与东西分量的相对大小与理论计算结果相符. 对于两种观测手段相矛盾的姑咱台、涇源台和陇县台, 同时设有水管和垂直摆倾斜观测. 由于水管倾斜测量的是短基线, 而摆式倾斜仪是测量单点倾斜变化量, 熊先保等(2013)通过对这两种仪器的抗干扰能力实验, 发现同一干扰源对摆式倾斜仪的干扰要比水管倾斜仪的干扰大得多. 因此, 在两种测量结果相矛盾的时候, 水管倾斜资料的结果可能更可靠. 当这三个台站只考虑水管倾斜资料时, 它们都能与理论的旋转运动场分布相对应. 此时, 20个倾斜台站中有15个台站地倾斜资料与理论旋转运动场分布相符.

下面尝试从定量的角度做进一步分析. 由于本文所用20个台站分布较广, 不同地区地下速度结构、地

图9 分层半空间走滑断层产生的地表峰值旋转量南北与东西分量幅值相对大小示意图

白色区域表示旋转量的南北分量大于东西分量, 灰色区域表示旋转量的南北分量小于东西分量

形、环境温度也不尽相同, 很难将所有台站的地倾斜资料用同一标准进行处理. 而且各个台站所用的地倾斜测量手段也不都相同(4种测量仪器), 譬如同一地点水管仪与摆式倾斜仪对远震、近震及地方震均有不同程度的同震响应(杨玲英等, 2012). 因此直接将地倾斜资料的绝对数值与理论计算结果进行对比是不可取的. 这里, 我们采用将20个台站地倾斜资料的东与南北分量的比值作为对比的参数. 将地倾斜观测的东西与南北分量的比值投影到图10中(对于观测手段相矛盾的三个台站, 选取更可靠的水管仪观测资料), 台站按照震中距的大小从左至右依次排列. 同时, 计算出对应场点旋转运动场的南北与东西分量的比值, 将其与实际地倾斜资料的比值进行对比. 从图10中可以看到, 地倾斜比值与旋转运动场的比值在整体趋势上有比较好的对应性, 特别是远场区域, 除去个别台站, 理论结果与实际资料能够较好的拟合. 而近场区域的台站, 虽然其曲线趋势与实际倾斜资料类似, 但它们的相对比值与理论计算有较大的差异. 纵然如此, 在国内缺乏地震事件旋转运动直接观测的情况下, 可以尝试利用倾斜仪的观测资料, 来估算地震事件产生的旋转运动水平分量, 继而分析和研究旋转效应对地面建筑物的破坏情况.

5 讨论及结论

5.1 讨论

经过第3节的理论计算和第4节实际震例分析, 发现弹性全空间和分层半空间中地震旋转运动场在地表的宏观分布特征比较类似. 自由边界的存在对整个地震旋转运动场有衰减作用, 特别是在各水平分量的能量优势方向. 通过理论计算分层半空间中九寨沟地震旋转运动场及与实际地倾斜资料的对比, 从整体上看理论计算结果和多数地倾斜台站实际资料能较好符合, 但是对于近场的台站, 地倾斜不同分量的相对比值与理论计算结果有较大的差异. 在日本和台湾地区的地震近场旋转测量结果也比经典弹性理论预测值大10~100倍(Takeo, 1998; Huang等, 2006). 对于远场区域, 除去个别台站, 理论计算结果能与实际资料较好的拟合. 但本文只对比了理论旋转运动场与地倾斜观测不同分量的相对大小以及相对比值, 还需要从旋转运动场的绝对幅值、衰减规律上作进一步分析. 目前也存

图 10 分层半空间走滑断层产生的地表峰值旋转量南北与东西分量比值对比图

圆点表示理论计算的旋转运动场南北与东西分量的比值; 五角星表示地倾斜的东西与南北分量的比值. 台站按照震中距的大小从左向右依次排列

在几个尚需解决的难题.

首先, 很多形变观测台站建立在偏远的山区, 因此需要进一步考虑起伏自由边界条件下的地震旋转运动. 由于第2节公式(2)是地震旋转量的通用表达, 而自由边界无论起伏与否, 都需要满足边界应力为零的情况. 因此, 当地表起伏时, 理论上地表水平分量的旋转与地球物理中的倾斜也是对应的. 但实际测量中, 由于传统倾斜仪测量原理所限, 当地倾斜较大时, 倾斜测量受重力影响也大, 继而影响旋转运动场的间接计算. 这可能是近场理论旋转量与实际地倾斜资料差异较大的原因之一. 而且国内倾斜台站分布稀疏且不均匀, 采样率偏低(大部分为分钟采样), 定点形变台站容易受到局部地下介质及洞体环境、特别是浅表低速层的影响, 不同台站地倾斜数据的一致性远不如测震数据, 很难单独从地倾斜资料准确、完整的勾画出地震事件产生的旋转运动场分布特征, 暂时只能做一些定性或半定量、初步的探索性工作.

其次, 在实际资料的分析中还发现, 对于有些台站, 安装了多套倾斜仪进行同步测量, 但它们对同一地震的激发响应明显不同, 如文中的姑咱、涇源和陇县台的水管倾斜与垂直摆倾斜测量结果矛盾, 这可能是由于不同仪器高频段性能差异以及对平动效应的响应特性不同所影响(崔庆谷等, 2014). 而且倾斜仪测量的是相对局部垂向的角度变化, 该变化可以被重力所影响, 它们不能分辨真实的旋转效应和由纯粹重力影响导致的倾斜角度的变化(如质量的重新分布也会导致倾斜仪的变化). 因此, 可以尝试在定点前兆台网进行地震旋转量的直接观测, 结合地倾斜资料进行地震

前兆信号的探索工作, 开拓地震预报新思路。

最后, 缺少地震旋转量的直接观测和对比工作。地倾斜资料能构建水平的旋转运动场, 但缺少绕垂直轴的旋转量。在速度结构方面, 绕垂直轴的旋转量由于对SH波敏感, 而对P-SV波不敏感, 基于同步测量的平移运动和绕垂直轴的旋转运动, 可以分别在时间域(Cochard等, 2006; Igel等, 2005, 2007)和频率域确定勒夫波相速度(Suryanto, 2006), 也能通过平动和旋转信号的振幅信息引入视剪切波速度, 降低使用走时参数成像中震源深度与结构体之间的折中效应。同时还能从微震背景噪声的旋转运动观测中提取最强噪声源的反方位角, 使得只通过一个点同步测量旋转速率和横向加速度就可以确定噪声源的方向(Hadziioannou等, 2012)。旋转运动测量在提取震源参数信息中也表现出很大潜力(Takeo, 1998; Wang等, 2009)。在保持数据总量一致的前提下, Bernauer等(2014)使用旋转运动记录随机取代一半速度记录, 结果表明旋转运动记录和平动记录的结合能够显著地降低有限源反演中的不唯一性和折中效应。

随着近些年旋转量观测技术的提高, 特别是光纤陀螺仪(观测精度能达到 10^{-9}rad s^{-1})传感器的发展, 使得六分量地震观测越来越受到关注(Jaroszewicz等, 2016)。目前北京大学、中国科学院半导体研究所和中国地震局第二监测中心联合研制的旋转陀螺仪, 目前试验精度可达 10^{-9}rad s^{-1} 。随着国产仪器精度和稳定性的不断提高, 相信国内地震旋转量的直接观测和研究工作也会越来越成熟。

5.2 结论

本文通过理论推导和数值计算, 建立了均匀全空间和分层半空间中地震旋转量的计算方法。基于旋转量与倾斜量的对应关系, 结合实际地倾斜观测资料, 计算出了四川九寨沟Ms7.0地震产生的旋转运动场, 得到如下结论:

(1) 对弹性全空间位移场近、中和远场的通用分类并不适用于旋转运动分量。旋转运动的近、中和远场的径向分量始终为零, 而且只有横波部分才能产生旋转效应。

(2) 经过理论计算和实际震例分析, 发现弹性全空间和分层半空间中地震旋转运动场在地表的宏观分布特征比较类似, 但自由边界的存在对整个地震旋转运

动场有衰减作用, 特别是在水平分量的能量优势方向衰减更大。

(3) 基于IASP91分层模型, 计算了四川九寨沟Ms7.0地震产生的理论旋转运动场, 发现旋转运动场主要集中在震中附近约150km范围内, 而且主要分布在近垂直于断层走向的区域。其中东西分量的旋转场集中在断层的西南方向, 而南北分量的旋转场集中在断层的北东方向。

(4) 统计并分析了九寨沟地震周边20个倾斜台站共25对测项的南北和东西分量同震倾斜量的相对大小和相对比值, 通过与分层半空间理论旋转运动场对比, 发现特别是在远场区域, 大多数台站的南北和东西分量的相对幅值大小和相对比值与理论计算结果趋于一致。因此, 在一定程度上可以尝试利用倾斜仪的观测资料, 来估算地震事件产生的旋转运动场, 继而分析和研究旋转效应对地表建筑物的破坏情况, 同时能为完整描述地下介质的运动特征提供更丰富的信息。

致谢 感谢中国地震局形变数据共享分中心和陕西省地震局为本研究提供地倾斜数据, 同时感谢编委和审稿专家对本文提出的宝贵建议。

参考文献

- 崔庆谷, 杨星, 杨跃文. 2014. 水管仪、垂直摆及水平摆高频段记录数据差异的对比. 大地测量与地球动力学, 34: 175-178
- 董立鹏, 彭愿, 吴阿丹, 王鹏伟. 2013. 日本和台湾近场区地面旋转运动研究. 地球物理学进展, 28: 2300-2308
- 房立华, 吴建平, 苏金蓉, 王毛毛, 蒋策, 范莉萍, 王未来, 王长在, 谭夏露. 2018. 四川九寨沟Ms7.0地震主震及其余震序列精定位. 科学通报, 63: 649-662
- 顾浩鼎, 陈运泰. 1988. 旋转在地震学中的意义. 东北地震研究, 4: 1-9
- 顾浩鼎, 陈运泰. 1997. 旋转运动、旋转矩定律及弹性介质动力学关系. 科学, 49: 37-39
- 谢祖军, 郑勇, 姚华建, 房立华, 张勇, 刘成利, 王毛毛, 单斌, 张会平, 任俊杰, 季灵运, 宋美琴. 2018. 2017年九寨沟Ms7.0地震震源性质及发震构造初步分析. 中国科学: 地球科学, 48: 79-92
- 熊先保, 林立峰, 杨婕. 2013. 水管倾斜仪与摆式倾斜仪抗干扰能力分析. 华南地震, 33: 34-40
- 杨玲英, 崔庆谷, 毛先进, 杨海鹏, 张源, 白世达. 2012. 云龙地震台水管倾斜与水平摆倾斜仪同震响应对比分析. 地震研究, 35: 48-52
- 杨宜海. 2014. 用接收函数方法研究川滇地区地壳上地幔结构. 学位论文. 成都: 成都理工大学

- 张旭, 冯万鹏, 许力生, 李春来. 2017. 2017年九寨沟Ms7.0级地震震源过程反演与烈度估计. *地球物理学报*, 60: 4105–4116
- 张勇, 许力生, 陈运泰, 刘瑞丰. 2014. 2014年8月3日云南鲁甸Mw6.1 (Ms6.5)地震破裂过程. *地球物理学报*, 57: 3052–3059
- Aki K, Richards P G. 2002. *Quantitative Seismology*. 2nd ed. California: University Science Books
- Bernauer M, Fichtner A, Igel H. 2014. Reducing nonuniqueness in finite source inversion using rotational ground motions. *J Geophys Res-Solid Earth*, 119: 4860–4875
- Bouchon M, Aki K. 1982. Strain, Tilt, and rotation associated with strong ground motion in the vicinity of earthquake faults. *Bull Seismol Soc Amer*, 72: 1717–1738
- Cochard A, Igel H, Schuberth B, Suryanto W, Velikoseltsev A, Schreiber U, Wassermann J, Scherbaum F, Vollmer D. 2006. Rotational motions in seismology: Theory, observation, simulation. In: Tesisseyre R, Takeo M, Majewski E, eds. *Earthquake Source Asymmetry, Structural Media and Rotation Effects*. New York: Springer Verlag. 391–412
- Donner S, Bernauer M, Igel H. 2016. Inversion for seismic moment tensors combining translational and rotational ground motions. *Geophys J Int*, 207: 562–570
- Feng X, Zhang H. 2018. Exact closed-form solutions for Lamb's problem. *Geophys J Int*, 214: 444–459
- Hadziioannou C, Gaebler P, Schreiber U, Wassermann J, Igel H. 2012. Examining ambient noise using colocated measurements of rotational and translational motion. *J Seismol*, 16: 787–796
- Haskell N A. 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bull Seismol Soc Amer*, 43: 17–34
- Huang B S, Liu C C, Lin C R, Wu C F, Lee W H. 2006. Measuring mid- and near-field rotational ground motions in Taiwan. *AGU Fall Meeting Abstracts*, San Francisco
- Igel H, Schreiber U, Flaws A, Schuberth B, Velikoseltsev A, Cochard A. 2005. Rotational motions induced by the M8.1 Tokachi-oki earthquake, September 25, 2003. *Geophys Res Lett*, 32: L08309
- Igel H, Cochard A, Wassermann J, Flaws A, Schreiber U, Velikoseltsev A, Pham Dinh N. 2007. Broad-band observations of earthquake-induced rotational ground motions. *Geophys J Int*, 168: 182–196
- Jaroszewicz L R, Kurzych A, Krajewski Z, Marć P, Kowalski J K, Bobra P, Zembaty Z, Sakowicz B, Jankowski R. 2016. Review of the usefulness of various rotational seismometers with laboratory results of Fibre-Optic ones tested for engineering applications. *Sensors*, 16: 2161
- Kennett B L N, Engdahl E R. 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophys J Int*, 105: 429–465
- Lee W H K, Huang B S, Langston C A, Lin C J, Liu C C, Shin T C, Teng T L, Wu C F. 2009. Review: Progress in rotational ground-motion observations from explosions and local earthquakes in Taiwan. *Bull Seismol Soc Am*, 99: 958–967
- Li H N, Sun L Y, Wang S Y. 2004. Improved approach for obtaining rotational components of seismic motion. *Nucl Eng Des*, 232: 131–137
- Reinwald M, Bernauer M, Igel H, Donner S. 2016. Improved finite-source inversion through joint measurements of rotational and translational ground motions: A numerical study. *Solid Earth*, 7: 1467–1477
- Suryanto W. 2006. Rotational motions in seismology, theory and application. Doctoral Dissertation. Munich: University of Munich
- Takeo M. 1998. Ground rotational motions recorded in near-source region of earthquakes. *Geophys Res Lett*, 25: 789–792
- Takeo M, Ito H M. 1997. What can be learned from rotational motions excited by earthquakes? *Geophys J Int*, 129: 319–329
- Trifunac M D, Todorovska M I. 2001. A note on the useable dynamic range of accelerographs recording translation. *Soil Dyn Earthq Eng*, 21: 275–286
- Trifunac M D. 2009. Review: Rotations in structural response. *Bull Seismol Soc Am*, 99: 968–979
- Wang H, Igel H, Galovic F, Cochard A. 2009. Source and basin effects on rotational ground motions: Comparison with translations. *Bull Seismol Soc Am*, 99: 1162–1173
- Wang R. 1999. A simple orthonormalization for stable and efficient computation of Green's function. *Bull Seismol Soc Amer*, 89: 733–741

(责任编辑: 郑勇)