

一种地应变显著性检验方法*

陈光保¹⁾ 陈永奇²⁾ 伍吉仓³⁾ 何秀凤¹⁾

1) 河海大学地球科学与工程学院, 南京 210098
2) 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港 999077
3) 同济大学测量与国土工程学系, 上海 200092

摘要 提出一种检验地应变(率)显著性的统计方法, 并利用该方法分析了华北地区通过 GPS 观测位移场计算得到的显著应变的空间分布, 结果表明, 显著应变主要分布在华北地区现今活动块体边界带上, 而那些地应变不显著的站点集合形成了块体的内部区域。

关键词 应变; GPS 构造块体; 统计检验; 显著性

中图分类号: P227; P553

文献标识码: A

A STATISTICAL METHOD FOR TESTING SIGNIFICANCE OF STRAIN COMPONENTS

Chen Guangbao¹⁾, Chen Yongqi²⁾, Wu Jicang³⁾ and He Xiufeng¹⁾

1) College of Geoscience and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098
2) Dept. of Land Surveying and Geo-Information, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077
3) Dept. of Surveying and Geo-Information, Tongji University, Shanghai 200092

Abstract A statistical method for testing the significance of strain components calculated from geodetic data is proposed. By analyzing the spatial distribution of significant strain, the characteristics of tectonic strain can be properly displayed. The proposed method has been used for determining the spatial strain distribution in North China from GPS data. The results show that the significant strains distribute mainly in the boundary of tectonic blocks. On the other hand, distributions of un-significant strains form the interiors of tectonic blocks, it is helpful for division of active tectonic blocks.

Key words strain; GPS; tectonic block; statistical test; significance

1 概述

随着空间大地测量技术的发展, 尤其是 GPS 观测精度的提高, 连续和分期 GPS 观测已广泛运用于地壳形变监测。通过 GPS 观测可以获得站点之间精确的基线向量或者站点在统一坐标框架中的坐标

以及速度分量^[1,2]。目前 GPS 基线长度测量的精度能达到 10^{-8} 或更高, 水平坐标的测量精度能达到 1 mm ^[3,4]。利用 GPS 观测得到的基线长度变化或站点坐标的变化(即位移)可以计算地应变^[5-7]。地应变通常分单元计算, 前提是假定每个单元是均匀应变。地应变计算单元最常见的是三角形, 也可以

* 收稿日期: 2009-08-18

基金项目: 香港研究资助局项目 (PolyU 5134/06E); 国家自然科学基金 (40674004)

作者简介: 陈光保, 男, 1974 年生, 讲师, 主要从事大地测量、地壳形变研究。E-mail: hhucgl@163.com

是多边形, 三角形或多变形的顶点就是 GPS观测站点。通过这种离散单元法计算得到的地应变精度显然与观测值的精度和单元的几何形状有关。文献 [8]给出了用三角形单元计算地应变时三角形几何形状对计算地应变精度的影响, 建议在地应变计算中舍弃三角形形状因子小于 0.1 的三角形单元, 从而避免计算结果中出现精度较差的地应变。但这种方法只能用于三角形单元, 而且舍弃单元意味着丢失了一些观测信息。文献 [9]指出了应变计算与单元尺度的相关性。建议对存在单元尺度差异较大的计算应变应归化到某一标准尺度, 以便加以比较。另一方面, 如果计算单元位于稳定构造块体的内部, 单元的运动表现为刚体旋转 (欧拉运动), 此时计算得到单元的地应变, 统计意义上应该接近于零。因此, 有必要考虑从统计学的角度对计算得到的地应变的显著性加以检验。为此, 本文提出了一种普适的单元应变显著性检验方法, 该方法可以运用于任何离散单元计算得到的地应变。

2 地应变显著性检验方法

在单元形变为均匀微小变形的假设前提下, 水平应变分量估计值是观测值 (边长变化量或位移) 的线性函数^[6-11]。假定观测值服从正态分布, 根据误差传播定律, 则水平应变分量的估计值也应服从正态分布。不失一般性, 我们用向量 X 表示用单元法计算得到的水平地应变张量的 3 个分量 ε_{00} 、 $\varepsilon_{\lambda\lambda}$ 、 $\varepsilon_{0\lambda}$, 用 Σ_X 表示对应的方差阵, 即:

$$X = (\varepsilon_{00}, \varepsilon_{\lambda\lambda}, \varepsilon_{0\lambda}) = (x_1, x_2, x_3) \quad (1)$$

$$\Sigma_X = \begin{bmatrix} \sigma_{x_1x_1} & \sigma_{x_1x_2} & \sigma_{x_1x_3} \\ \sigma_{x_2x_1} & \sigma_{x_2x_2} & \sigma_{x_2x_3} \\ \sigma_{x_3x_1} & \sigma_{x_3x_2} & \sigma_{x_3x_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

如果计算单元属于刚体运动, 地应变理论上为零。此时, 单元计算得到的应变估计值纯粹来源于观测误差, 估计值 X 均值应该为零, 对应的二次型 $X\Sigma_X^{-1}X^T$ 应该服从自由度为 3 的 χ^2 分布。反之, 如果计算单元存在变形, X 均值不为零, $X\Sigma_X^{-1}X^T$ 不服从中心 χ^2 分布。于是, 我们构造下述假设检验来判别计算单元地应变估计值的显著性。

$$H_0: E(X) = 0; H_1: E(X) \neq 0 \quad (3)$$

构造统计量:

$$\chi^2 = X\Sigma_X^{-1}X^T \quad (4)$$

若原假设成立, 则有,

$$\chi^2 \sim \chi_3^2(3) \quad (5)$$

一般取置信度 $\alpha = 0.01$ 或 0.005 用单尾检验法, 如果

$$\chi^2 < \chi_3^2(3) \quad (6)$$

则接受原假设, 即应变估计值是由于测量误差引起的, 此图形单元的地应变估值不显著。否则, 拒绝原假设, 认为此图形单元的地应变估值是显著的。

对于应变单元尺度差异较大情况, 式 (1) 中的应变可采用文献 [9] 提出的归化到某一标准尺度的值, 对应地式 (2) 的方差阵也采用归化后应变的方差阵。

3 华北地区的显著地应变分布及其分析

华北地震构造区位于中国东部, 北以燕山、阴山近东西向构造与东北构造区相邻, 南界位于秦岭-大别山构造带, 西至贺兰山一带, 东界在郯庐断裂带以东海域。地理位置约为北纬 $35^\circ \sim 42^\circ$, 东经 $108^\circ \sim 120^\circ$ 。华北地震构造区是我国最重要的地震活动区之一, 也是我国开展地壳形变测量最早的地区之一。许才军等学者^[12-15]已经在该地区开展了研究, 得出了一些有益的结论。但他们都没有考虑应变估计值的显著性检验, 分析结果难免受到观测误差的干扰, 不能很好地反映整个地区的真实地壳变形和运动情况。

本文用于单元地应变计算的数据来自国家重大科学工程——中国地壳运动观测网络 1999、2001、2004 3 期 GPS 观测 (包括部分连续 GPS 站观测) 获得的站点速度中的华北地区 GPS 站点速度数据^[16] (其中包括测站的大地坐标、站心坐标系下的位移速率及其误差、误差相关系数)。首先, 根据测站坐标生成 Delaunay 三角形, 然后按照文献 [8] 的方法将图形因子小于 0.1 的三角形并入邻近的三角形组成图形单元; 接着, 按照式文献 [11] 计算每个图形单元的应变估值及其对应的方差矩阵, 然后按上一节介绍的方法进行检验 (χ^2 (置信度 α 取 0.01), 仅保留显著的应变值。采用显著应变值绘制的华北地区应变图如图 1 所示。

文献 [12] 在地质学活动块体划分的基础上, 结合 1995、1996、1999 3 期 GPS 观测速度场结果将华北地区划分成华北块体、鄂尔多斯块体、阴山-燕山块体、太行山块体、冀鲁西块体、胶辽块体等 6 个活动块体, 并且通过计算块体边界点刚体运动速度差的方法分析了块体边界处的相对运动。本文没有参照地质块体, 而是独立地从显著应变分布图中分析华北现今的地壳运动。从图 1 中可以直观地看出, 应变主要集中在图中红框标注出的 5 个区域 A ~ E。

区域 A 位于鄂尔多斯块体南边缘, 即山西断陷带南端 (沿临汾-韩城一线); 该条形区域内应变基本

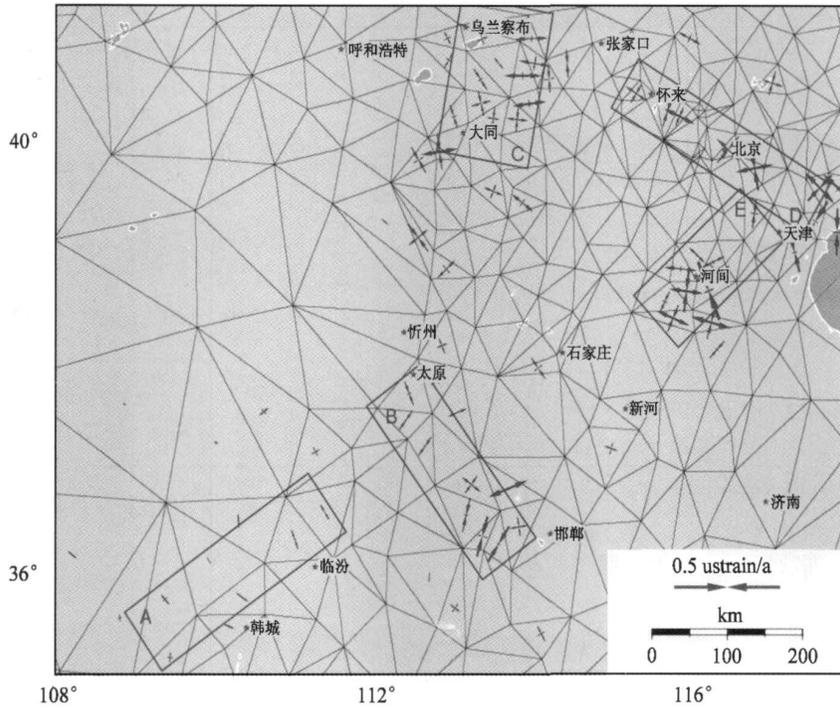


图 1 华北 GPS 监测区主应变分布图

Fig 1 Principal strain distribution in GPS monitoring zones of North China

上垂直于断裂带方向,几乎没有走滑现象,沿着断裂带形成一个拉张活动边界,应变率几乎全部小于 0.1×10^{-6} 。这种活动特征与山西地堑系的近代张性构造活动性质是一致的。

区域 B 在太行山块体南端,太原-邯郸一线;该构造带方向为 NW-SE,以挤压为主,沿断裂带形成一个挤压边界,应变率基本上在 0.2×10^{-6} 。这条断裂段在地质构造图上没有标注,怀疑为隐伏断层。

区域 C 为鄂尔多斯块体、阴山-燕山块体、太行山块体交汇区域,从内蒙古的乌兰察布至山西的大同一线;从图中可以看出:该区域的左边为一条南北走向的挤压带,应变率在 0.1×10^{-6} 左右;右边有一条与其平行的拉张带,应变率在 0.2×10^{-6} 左右。由于该地区 GPS 站密度不够的原因,不能够准确地判断该区域的明确的断层活动情况。

区域 D 位于华北块体、阴山-燕山块体边界带,即张家口-怀来-北京-天津一线;该区域的应变分布正好与张家口-渤海构造带的地壳运动保持一致, NW-SE 走向的活动构造带主要为左旋走滑,不同地段兼有挤压或拉张。

区域 E 在华北块体、冀鲁西块体边界,即天津-河间-石家庄沿线区域,应变率在 0.2×10^{-6} 左右。从总体上看,整个华北地区的断裂带走向是 NNE-SSW 方向。从地质图上可以看出其正好是冀鲁地

块内的一条断裂带,宁河-新乡构造带的北段。

综上所述,通过本文提出的应变显著性统计检验方法能突出显示研究区域的主要应变分布特征,该方法不依赖于地震地质等其他先验信息,独立地用大地测量数据揭示观测区域的地应变分布。从华北地区显著地应变分布的结果来看,用 1999、2001、2004 3 期 GPS 观测得到的显著地应变分布全部集中在活动构造块体的边界带,表明现今大地测量结果与地质调查结果具有较好的一致性。显著应变的大小在 $(0.1 \sim 0.2) \times 10^{-6}$ 。从显著应变分布的大小及特征来看,与文献 [12、13] 的结果基本一致,但本文的结果更突显了显著应变集中分布在块体边界的特性。

4 结语

本文提出了一种对图形单元的应变估值显著性进行检验的方法。通过基于华北 GPS 监测网的显著地应变分析表明,该方法能够有效地避免测量误差引起的干扰,独立地用大地测量观测数据揭示应变的分布和地壳变形特征,对发现隐伏断层、更好的解释地壳运动的动力学机制有一定帮助。从本文分析的结果来看,显著应变呈集中条带分布,并且与地质学划分的活动块体边界具有较好的一致性。另外,如果把应变不显著的图形单元中的测站点组成

若干集合,则这些集合便可以认为是位于同一地块上的稳定点组。

参 考 文 献

- 1 牛之俊,等. 中国地壳运动观测网络 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002, (3): 89- 92 (Ni Zhijun, et al Crustal movement observation network of China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics 2002, (3): 89- 92)
- 2 宋淑丽,朱文耀,廖新浩. GPS应用于地球动力学研究的进展 [J]. 天文学进展, 2003 21(2): 95- 112 (Song Shuli Zhu Wen Yao and Liao Xinhao Recent progress of GPS in geodynamics [J]. Progress in Astronomy 2003 21 (2): 95- 112)
- 3 Zhang J et al Sourthern California permanent GPS geodetic array Error analysis of daily position estimates and site velocities [J]. JGR, 1997, 102(B8): 18 035- 18 055.
- 4 Dong D, et al Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series [J]. JGR, 2002 107(B4): 2075, 10 1029/2001JB000573.
- 5 石耀霖,朱守彪. 用 GPS位移资料计算应变方法的讨论 [J]. 大地测量与地球动力学, 2006 (1): 1- 8 (Shi Yaolin and Zhu Shoubiao Discussion on method of calculating strain with GPS displacement data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics 2006 (1): 1- 8)
- 6 伍吉仓,邓康伟,陈永奇. 用边长变化结果计算地应变及块体划分 [J]. 大地测量与地球动力学, 2002 (4): 35- 38 (Wu Jinchang Conrad Tang and Chen Yongqi Strain calculation based on baseline length changes and division of tectonic blocks [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics 2002 (4): 35- 38)
- 7 Dong D, Herring T A and King R W. Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data [J]. Journal of Geodesy, 1998, 72 200- 214.
- 8 伍吉仓,邓康伟,陈永奇. 三角形形状因子对地壳形变计算精度的影响 [J]. 大地测量与地球动力学, 2003 (3): 26- 30 (Wu Jichang Conrad Tang and Chen Yongqi Effects of triangle shape factor on precision of crustal deformation calculated [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics 2003 (3): 26- 30)
- 9 江在森,等. 地形变资料求解应变值的尺度相对性问题研究 [J]. 地震学报, 2000 22(4): 352- 359. (Jiang Zaisen, et al Study on scale dependence of strain value obtained from crustal deformation data [J]. Acta Seismologica Sinica 2000 22(4): 352- 359)
- 10 Savage JC, Gan W and Svarc JL. Strain accumulation and rotation in the Eastern California Shear Zone [J]. JGR, 2001, 106(B10): 21 995- 22 007.
- 11 孟国杰,等. 球坐标系中图形单元应变与旋转张量及其误差解算 [J]. 地震学报, 2008 30(1): 67- 75. (Meng Guojie et al Computation of strain and rotation tensor and their uncertainty for small arrays in spherical coordinate system [J]. Acta Seismologica Sinica 2008 30(1): 67- 75)
- 12 许才军,李志才. 华北地区活动地块边界带运动及块体内部变形分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2002, 27 (4): 348- 351 (Xu Caijun and LI Zhicai Crustal movement on the boundary zones between active blocks and internal deformation of blocks in North China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(4): 348- 351)
- 13 江在森,等. 华北地区近期水平运动与应力应变场特征 [J]. 地球物理学报, 2000, 43(5): 657- 665. (Jiang Zaisen, et al Characteristics of recent horizontal movement and strain- stress field in the crustal of North China [J]. Chinese Journal of Geophysical 2000, 43(5): 657- 665)
- 14 Shen Z K, et al Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurement [J]. J Geophys Res, 2000, 105 5 721- 5 734.
- 15 Wu J C, Tang H W and Chen Y Q. The current strain distribution in the North China basin of eastern China by least- square collocation [J]. J Geodynamics, 2006, 41 462- 470.
- 16 牛之俊,等. 中国大陆现今地壳运动速度场的最新观测结果 [J]. 科学通报, 2005, 50(8): 839- 849. (Ni Zhijun, et al Newest results of the recent crustal movement velocity in China [J]. China Science Letter 2005 50(8): 839- 849)