

特定基准下的异常位移诊断

独知行¹ 欧吉坤² 柴艳菊² 韩保民²

(1 武汉大学GPS工程技术研究中心, 武汉市珞喻路129号, 430079)

(2 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉市徐东路174号, 430077)

摘要: 针对地壳运动和变形研究中存在的位移资料的参考基准、异常位移等问题, 主要讨论了位移资料特定基准的转换和异常位移诊断的数学模型——特定基准转换模型为七参数相似变换模型, 转换保持了变形体内部相对位置关系不变, 并使转换后的位移矢量更能体现区域内的相对运动信息; 异常位移诊断采用拟准检定法(QUAD), 在选定拟准观测的情况下, 使得位移真误差具有明显的分群性; 模拟算例结果显示, 本文采用的线性变换模型、粗差拟准检定法都表现出很好的效果。

关键词: 特定基准; 异常位移; 相似变换; 粗差拟准检定法

中图法分类号: P227.1; P228.41

由于区域的内部构造、边界条件、驱动力源和受力方式等因素的不同, 在区域内部所表现出的位移基本特征亦具有明显的差异, 这种差异是研究区域构造活动、板块运动规律、块体划分等地形变研究课题的重要基础信息, 有关研究成果见文献[1~18]。本文主要讨论特定基准下的异常位移诊断方法, 为地壳形变研究中的位移数据处理提供一种研究思路。

1 数学模型

空间大地测量所获得的位移数据, 特别是GPS位移数据通常基于全球参考框架或某一较大区域参考基准, 位移数据中除含有框架或基准的影响信息外, 还含有相对运动信息和异常变形信息(如断层、断裂带等构造的局部变形)[14~18], 而地形变研究最关心的是区域内部的相对运动和异常变形, 因此位移资料的参考基准、异常位移等问题的处理是研究区域相对运动和描述位移特征差异性的关键内容[19~21]。

1.1 “特定基准”确定

本文采用七参数相似变换。设原计算参考基准下的研究区域(简称“研究区”)测点的位移为 $D_{c_i} = (D_{cx_i}, D_{cy_i}, D_{cz_i})^T$ ($i=1, 2, \dots, m_1$); “特定基准”区域

(简称“特定基准区”)测点的位移为 $D_{c_j}^{''} = (D_{cx_j}^{''}, D_{cy_j}^{''}, D_{cz_j}^{''})^T$ ($j=1, 2, \dots, m_2$); $m_1+m_2=m$ 为总测点个数;

相似变换到“特定基准区”测点的位移变化量为 $\Delta D_{c_k} = (\Delta D_{cx_k}, \Delta D_{cy_k}, \Delta D_{cz_k})^T$, $k=1, 2, \dots, m_1$ 。利用“研究区”和“特定基准区”的测点位移, 按最小二乘原则计算两区间的线性变换模型为:

$$\begin{bmatrix} \Delta D_{cx_k} \\ \Delta D_{cy_k} \\ \Delta D_{cz_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f & -dr_z & dr_y \\ dr_z & f & -dr_x \\ -dr_y & dr_x & f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, $t_x, t_y, t_z, dr_x, dr_y, dr_z, f$ 分别为“研究区”与“特定基准区”的3个平移参数、3个旋转参数和尺度因子, 它们分别表示3个刚性平动因子、3个旋转变形因子和一个伸缩变形因子, 具有反映形变的物理意义; x_k, y_k, z_k 为“研究区”的测点坐标。

若转换后“特定基准区”测点的位移为 $D_{t_i} = (D_{tx_i}, D_{ty_i}, D_{tz_i})^T$, $i=1, 2, \dots, m_1$, 则有:

$$\begin{bmatrix} D_{tx_i} \\ D_{ty_i} \\ D_{tz_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta D_{cx_i} \\ \Delta D_{cy_i} \\ \Delta D_{cz_i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{cx_i} \\ D_{cy_i} \\ D_{cz_i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

通过式(1)、式(2)变换, 剔除了原计算参考基准对“研究区”测点的位移影响部分, 实现了位移

由原计算参考基准到特定基准下的转换,使研究区域的位移矢量场更具有相对运动特征。

1.2 “异常位移”诊断

研究区内的测点位移势态与研究区边界条件、区内材料性质、构造活动等密切相关,局部构造活动势必造成测点位移在大的分布趋势下的局部异常。异常位移诊断即在研究区内位移分布的大趋势下,探测异常位移点,据此可以揭示隐蔽构造(如隐蔽断层等),描述局部位移场分布规律。

§1.1 得到的“特定基准”下的位移并未改变“研究区”内位移势态及其运动变形的模式,可以采用以下方法进行异常位移定位。

设线性模型^[22]为:

$$\mathbf{D}_{ti} = \mathbf{H}_i \mathbf{t} + \hat{\mathbf{q}},$$

$$E(\mathbf{D}_{ti}) = \mathbf{H}_i \mathbf{t}, E(\hat{\mathbf{q}} \hat{\mathbf{q}}^T) = \sum \mathbf{D}_{ti}^T \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{D}_{ti}^T = (D_{tx_i}, D_{ty_i}, D_{tz_i})^T$$

$$\mathbf{H}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i & -y_i & x_i \\ 0 & 1 & 0 & -z_i & 0 & x_i & y_i \\ 0 & 0 & 1 & y_i & -x_i & 0 & z_i \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{t} = (t'_x, t'_y, t'_z, dr'_x, dr'_y, dr'_z, f')^T$$

$$\hat{\mathbf{q}} = (\hat{q}_x, \hat{q}_y, \hat{q}_z)^T$$

式中, $\hat{\mathbf{q}}$ 为位移 \mathbf{D}_{ti} 的真误差向量, $i=1, 2, \dots, m_1$; \mathbf{t} 为参数向量, \mathbf{t} 中的各元素仅具有 §1.1 七参数相同的物理意义,它们的几何特征(数值大小和方向)已有变化,因为线性模型(3)描述的是基准变换后的位移模式。

若“研究区”内位移模式具有分块性质,则可将式(3)中各矩阵写成分块形式,如

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}_2 & & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathbf{H}_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

k 为分块的个数。

基于线性模型(3),位移描述式为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{H} \mathbf{t} + \Delta$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{H} \mathbf{t} + \mathbf{D}_d + \Delta_a \quad (5)$$

由式(5)可知,用线性模型(3)描述的位移模式实质上是将异常位移中的异常部分 \mathbf{D}_d 当作粗差,因此可认为异常位移是含有粗差的位移。采用粗差的拟准检定法(QUAD 法)作粗差探测^[23~25],即可将异常位移 \mathbf{D}_d (见式(5))定位。为此,令 $n=m_1$, $m=7$, 将式(5)表示成:

$$\mathbf{H} \mathbf{t} = \mathbf{D} + \Delta \quad (6)$$

式(6)是一个线性方程组,上标 m 表示矩阵的秩。令 $\mathbf{J} = \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T$, \mathbf{J} 称为平差因子阵, $\mathbf{R} = \mathbf{I} - \mathbf{J}$ 也是投影矩阵。对式(6)进行变换得:

$$\begin{matrix} n-m \\ n \times n \end{matrix} \mathbf{R} \Delta = -\mathbf{RD} \quad (7)$$

式(7)表示真误差 Δ 与观测值 \mathbf{D} 的确定关系式,可以看成关于 Δ 的线性方程组,它是一个秩亏方程组,秩亏数 $d=n-(n-m)=m$ 。

把基本正常但尚待确认的观测称为拟准观测,相应的真误差数值相对较小是辨识拟准观测的必要条件。设选择了 r 个拟准观测, $r > d = m$, 相应的真误差阵为 Δ , 非拟准观测的真误差阵为 Δ_1 , 在 $\|\Delta\|^2 = \Delta^T \Delta = \min$ 条件下,求解式(7)和式(8)组成的方程组:

$$\mathbf{G}_Q \Delta_Q = (0 \quad \mathbf{H}_r^T) \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta \end{bmatrix} = \mathbf{H}_r^T \Delta = 0 \quad (8)$$

式中, \mathbf{H}_r^T 是系数转置阵 \mathbf{H}^T 中相应于 r 个拟准观测部分的分块矩阵; $\mathbf{G}_Q = (0 \quad \mathbf{H}_r^T)$ 。则真误差的拟准解为:

$$\Delta_Q = \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta \end{bmatrix} = -(\mathbf{R} + \mathbf{G}_Q^T \mathbf{G}_Q)^{-1} \mathbf{R} \mathbf{D} \quad (9)$$

Δ_Q 的权逆阵为:

$$\mathbf{Q}_{\Delta_Q} = (\mathbf{R} + \mathbf{G}_Q^T \mathbf{G}_Q)^{-1} \mathbf{R} (\mathbf{R} + \mathbf{G}_Q^T \mathbf{G}_Q)^{-1} \quad (10)$$

位移观测数据中异常位移的真误差的拟准解 Δ_Q 的分布特征呈明显分群现象, 相应于拟准观测的真误差估值 Δ 明显小于非拟准观测的真误差估值 Δ_1 , 因而为异常位移的辨识和定位提供了可靠的依据。

2 算例及分析

图 1 为一矢量场, A 区为“特定基准”区, B 区为“研究区”; 细线箭头为原模拟位移矢量,粗线箭头为基准转化后的位移矢量; 以虚线将“研究区”分成 I、II 两块; 椭圆内的点为模拟异常点。按方案进行如下处理(二维问题)。

1)“特定基准”确定。从图 1 可以看出, A 区与 B 区中各点位移大小与趋势显著不同,且 A 区各点位移量相对较小。用 QUAD 法确定拟准基准,拟准点的筛选结果如图 2 所示(实心圆为“特定基准”点),最后确定以 A 区 23 个点作为“特定基准”,按式(1)、式(2)得到“特定基准区”各点位移(图 1 中的粗线)。虽然“特定基准”中各点位移量都不是很大,但对“研究区”内各点位移的影响仍不可忽略。

2)“研究区”分块。因“研究区”具有不同的位移变形模式,在异常位移诊断之前,对研究区进行块体划分。依据位移真误差的大小,将研究区分成两个块体,即 I 块和 II 块,分块结果见图 3(实心圆和虚心圆表明属不同块体),模型分块充分体现了两个块体区域的位移趋势的差异性。

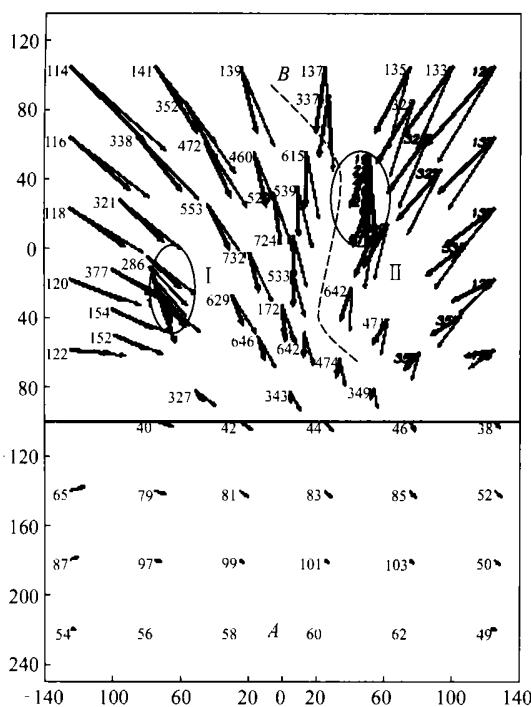


图1 模拟位移矢量场、特定基准及异常变形点
Fig. 1 Simulation of Displacement Field, Special Datum, Abnormal Displacement Points

3) 异常位移定位。分别对两个块体中的异常位移进行定位, 在I块中, 114、4、6、8四个点的真

误差的估值明显大, 剔除边界点114, 因此4、6、8三点确定为异常位移点, 见图4; 同理, 在II块中, 22、24、26三个点被确定为异常位移点, 见图5。异常位移定位结果同模拟结果一致, 显示出异常位移诊断模型的有效性。

图2~图5中, x 、 y 表示点的 x 、 y 方向位移, d 为点位移的真误差估值大小。

3 结语

1) “特定基准”转换模型虽为七参数相似变换模型, 但模型中各参数具有特定的物理和几何意义, 转换保持了变形体内部相对位置关系不变; “特定基准”转换的意义在于使转换后的位移矢量更能体现区域内的相对运动信息, 增加异常位移诊断的有效性。

2) 异常位移诊断采用拟准检定法, 在选定拟准观测的情况下, 使得位移真误差具有明显的分群性, 异常位移的真误差群远离其他位移真误差群, 通常两者具有明显的界限; 异常位移诊断的意义在于它为区域构造活动性、板块运动规律、块体划分等地形变的研究提供定量分析方法。

3) 模拟算例结果显示, 本文采用的线性变换模型、粗差拟准检定法表现出很好的效果。

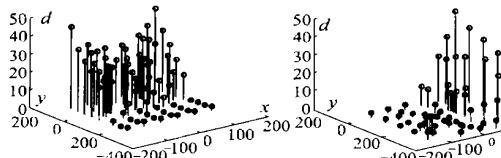


图2 “特定基准”确定

Fig. 2 Determination of Special Datum

图3 块体划分

Fig. 3 Determination of Blocks

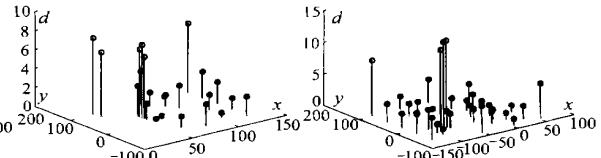


图4 I块中异常位移点确定

Fig. 4 Determination of Abnormal Displacement Point in Block I

Fig. 5 Determination of Abnormal Displacement Point in Block II

1990, 95, 1: 155~1 165

- 7 King R W, Liang H H. Geodetic Measurement of Crustal Motion in Southwest China. *Geology*, 1997, 25(2): 179~182
- 8 Peltzer G, Saucier F. Present-Day Kinematics of Asia Derived from Geological Fault Rates. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101: 27 943~27 956
- 9 Kreemer C, William E H. Active Deformation in Eastern Indonesia and the Philippines from GPS and Seismicity Data. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B1): 663~680
- 10 Hu J G, Yu S B. Active Deformation of Taiwan from GPS Measurements and Numerical Simulations. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B2): 2 265~2 280
- 11 Beavan J, Haines J. Contemporary Horizontal Velocity and Strain Rate Fields of the Pacific-Australian Plate Boundary

参 考 文 献

- 1 丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991. 131~140; 142~153; 163~165
- 2 丁国瑜, 卢演伟. 对我国现代板内运动状况的初步探讨. *科学通报*, 1986(18): 1 412~1 415
- 3 滕吉文, 张中杰, 杨顶辉等. 青藏高原地体划分的地球物理标志研究. *地球物理学报*, 1996, 39(5): 629~641
- 4 曾融生, 丁志峰, 吴庆举. 喜马拉雅-祁连山地壳构造与大陆-大陆碰撞过程. *地球物理学报*, 1998, 41(1): 49~60
- 5 陈炳蔚, 王彦斌, 左国朝. 青藏高原北部地块划分及其构造演化. *地球物理学报*, 1995, 38(增刊): 99~113
- 6 Hanson K M, Mount V S. Smoothing and Extrapolation of Crustal Stress Orientation Measurements. *J. Geophys. Res.*,

- Zone Through New Zealand. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(B1): 741~770
- 12 Larson K M, Burgmann R, Bilham R. Global Plate Velocities from the Global Positioning System. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102(B5): 9 961~9 981
- 13 Larson K M, Burgmann R, Bilham R, et al. Kinematics of the India-Eurasia Collision Zone from GPS Measurements. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104(B1): 1 077~1 093
- 14 顾国华, 朱红叶, 郑贵明, 等. 中国大陆 1998~1999 年地壳运动观测结果. *地震学报*, 2000, 22(6): 561~567
- 15 张强, 朱文耀. 中国地壳各构造块体运动模型的初建. *科学通报*, 2000, 45(9): 967~974
- 16 Biolle P, Rigo A, Lyon-Caen H, et al. Active Deformation of the Corinth Rift, Greece: Results from Repeated Global Positioning System Surveys Between 1990 and 1995. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B11): 25 605~25 625
- 17 Hori M, Kameda T, Kato T. Application of Inversion Method to GPS Network for Estimating Stress Increment in Japan. *Geophys. J. Int.*, 2000, 142: 0~12
- 18 黄立人. 相对于一组稳定点的位移的确定方法. 地壳形变与地震, 2000, 20(2): 38~42
- 19 江在森, 张希, 陈兵, 等. 华北地区近期地壳水
- 平运动与应力应变场特征. *地球物理学报*, 2000, 43(5): 657~665
- 20 刘经南, 许才军, 宋成骅, 等. 精密全球卫星定位系统多期复测研究青藏高原现今地壳运动与应变. *科学通报*, 2000, 45(24): 2 658~2 663
- 21 周硕愚, 吴云, 秦小军, 等. 基于多种 GPS 数据研究福建及其邻近海域 1994~1997 年地壳水平运动. *地球物理学报*, 2000, 43(4): 471~479
- 22 Caspary W F, Haen W, Bonetta H. Deformation Analysis by Statistical Methods. *Technometrics*, 1990, 32(1): 49~57
- 23 欧吉坤. 粗差的拟准检定(QUAD)法. *测绘学报*, 1999, 28(1): 15~20
- 24 Ou J K. Selection of Quasi accurate Observations and "Hive off" Phenomena about the Estimators of Real Errors. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2000, 29(Suppl.): 5~10
- 25 欧吉坤. 一种检测粗差的新方法——拟准检定法. *科学通报*, 1999, 44(16): 1 777~1 781

第一作者简介: 独知行, 博士后。现主要从事形变分析和大地测量反演研究。代表成果: 基于力学模式的大地测量反演理论及应用。在国内外学术刊物及学术会议上发表论文 30 余篇。

E-mail: zhixingdu@sina.com

Diagnosis of Abnormal Displacement Based on Special Datum

DU Zhixing¹ OU Jikun² CHAI Yanju² HAN Baomin²

(1) Research Center of GPS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079

(2) Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 174 Xudong Road, Wuhan, China, 430077

Abstract: The transformation model under special datum employed in this paper is the similarity transformation model with seven transformation parameters; this transformation can keep the steadiness of the relative position in the deformation block and can express the relative movement information of transformed displacement vectors in the block. The diagnosis of abnormal displacements is performed using quasi-accurate detection method (QUAD). After properly selecting the quasi-accurate observations, this method can make the real errors of displacement take on the distinct hive off phenomena. The results of a simulated example show good effect of linear similarity transformation method and QUAD method.

Key words: special datum; abnormal displacement; similarity transformation; QUAD

About the first author: DU Zhixing, post-doctoral fellow. He is engaged in the research on the theory and method of deformation analysis and geodetic inversion. His typical achievement is the theory and application of geodetic inversion based on mechanical models etc. He has published more than 30 papers.

E-mail: zhixingdu@sina.com

(责任编辑: 燕子)