

文章编号: 0253-3782(2002)06-0579-08

拟准检定法用于划分不同运动趋势块体*

柴艳菊 欧吉坤 独知行

(中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量学开放研究实验室)

摘要 利用位移观测数据区分不同形变趋势块体一般分三步进行: 基准检测、块体范围区分和各块体内异常形变检测。本文提出用拟准检定法来实现这三步。前两步初选拟准观测是关键。对于基准检测, 按形变位移量大小; 对于块体范围区分, 则按形变方向。最后, 通过一个模拟算例, 简单介绍了每一步的实施步骤, 并比较了拟准检定法与抗差估计(Huber)法、假设检验法的检测效果。结果表明, 拟准检定法可以将上述三步成功实现, 而抗差估计法只能检测出块体内的异常形变, 对稳定基准检测和块体范围划分是失败的; 假设检验法在该三步检测中均为失败。从而验证了拟准检定法具有粗差定位准确、崩溃污染率高的优越性。

关键词 拟准检定法 异常形变 基准检测 块体区分 假设检验

中图分类号: P315.72⁺⁵ **文献标识码:** A

引言

高精度 GPS 观测数据的不断积累, 对于深入理解和正确解释现代地壳运动, 并建立地球动力学模型具有重要意义, 而用位移观测资料研究块体运动情况是其中一项重要的基础工作。位移观测数据中除含有基准的影响信息外, 还有块体的形变信息和块体内的异常形变信息(如断层、断裂带等构造的局部形变)。首先, 必须找到稳定或相对稳定的点作为基准, 将其它的位移观测量转换到该基准下; 其次, 根据位移变化趋势及坐标关系进行块体范围划分; 最后, 剔除块体内的异常形变信息, 从而得到各块体真实的形变信息。只有将不同形变趋势的块体分开, 并对每一块体建立合适的模型, 才能正确反演各块体的形变参数, 了解各块体的运动情况。利用大地测量资料对不同趋势块体的划分研究近几年刚刚开始, 杨国华等(2001)和李延兴等(2001)进行了一些不同活动地块边界划分的尝试。

块体划分的实质是以具有同一运动趋势的点为准, 不符合该运动趋势的点看作异常形变, 在形变模型中相当于模型误差(如粗差), 可利用粗差检测方法来处理。粗差检测方法比较有代表性的有两种: 一种是 Baarda 教授提出的假设检验方法(Caspary *et al.*, 1990; Baarda, 1968)。这种方法实质上仍以 LS 残差为研究对象, 当观测值中有多个异常时, 容易发生粗差的转移(Caspary *et al.*, 1990; Baarda, 1968; 杨国华等, 2001); 另一种是抗差估计方法。这种方法对于检测设计矩阵结构比较好, 且只有少数观测有异常时(如块体内的异常形变检测)是比较有效的。但对于异常观测比较多(如基准检测和块体区分), 超过 50% 时, 则该方法的估计结果将产生破坏性影响(周江文等, 1997), 所以, 这种方法对块体划

* 国家自然科学基金(40074003)和中国科学院重要方向项目(KZCX2-106)资助。

2001-12-14 收到初稿, 2002-04-12 收到最后修改稿, 2002-06-06 决定采用。

分也不合适。为此，一种高崩溃污染率的检测方法是块体区分成功的关键。

拟准检定法是一种新的粗差检测方法(欧吉坤, 1997; 柴艳菊, 2000)。本文尝试用其进行块体边界划分。它直接从观测值的真误差入手，避免了以 LS 残差及其函数为研究对象容易发生粗差转移的缺点。该方法在基准检测、块体区分和块体内异常形变检测等三步实施过程中，每一步的初选拟准观测指标都不同，尽可能使初选的拟准观测是正确的，这也是该方法成功的关键。新方法是一种高崩溃污染率的粗差检测方法，从理论上讲，能同时检测出 $(n-m-1)$ 个粗差(n 为总观测数， m 为待求参数个数)，对区分不同运动趋势的块体具有比较好的应用前景。

1 块体区分的形变模型

根据实际情况，选择合适的形变模型是进行块体区分的重要一步。在形变分析中，采用最多的是相似变换模型，因为该模型变换参数有明确的物理意义，比较容易进行形变解释。但对于块体区分，情况比较复杂，需要根据具体情况选择合适的模型。下面给出上述三步检测中每一步的形变模型。

1.1 基准检测模型

基准检测就是找到稳定的点或相对稳定的点作为基准，分析其它点的形变情况。这一步一般采用相似变换模型：

$$\Delta = Ht + \delta \quad P \quad (1)$$

其中， $\Delta = (\Delta_1 \cdots \Delta_i \cdots \Delta_n)^T$ 为计算位移量，又称为形变观测量； $H = (H_1^T \cdots H_i^T \cdots H_n^T)^T$ 为相似变换系数， n 为总点数； δ 为真误差，包括随机误差和异常形变； t 为形变参数矢量。以平面二维为例， $t = (t_x, t_y, r, s)^T$ 。其中， t_x, t_y 为平移参数， r 为旋转参数， s 为尺度参数。 P 为相应的观测权阵。对第*i*点，元素 Δ_i 和 H_i 分别为

$$\Delta_i = (dx_i \quad dy_i)^T \quad (2)$$

$$H_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -y_i & x_i \\ 0 & 1 & x_i & y_i \end{pmatrix} \quad (3)$$

dx_i, dy_i 为第*i*点的位移观测值。 x_i, y_i 为第*i*点在整个区域重心坐标系下的坐标。

1.2 块体区分模型

块体的形变趋势受多种因素的影响，一般是比较复杂的，因此采用的模型也不统一。如果块体内点的形变与点的位置有明显的函数关系，则用多项式拟合模型，否则，可用相似变换模型来区分。

由本文算例图 1 可见，形变块体中点的位移量与点的坐标有明显的函数关系，适于采用多项式拟合模型来区分。为了叙述方便，仍用式(1)表示。其中， Δ, δ 的意义与式(1)相同，但 H 和 t 与式(1)不同。这里， H 的元素为

$$H_i = \begin{pmatrix} 1 & x_i^2 & y_i^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_i^2 & y_i^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

(x_i, y_i) 是以 $(0, -250)$ 为坐标原点的直角坐标系下的坐标， $t = (a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)^T$ 为

多项式拟合系数.

1.3 块体内异常形变检测模型

块体内异常形变检测模型与基准检测模型相同, 只是 x_i, y_i 为第*i*点在相应块体重心坐标系下的坐标.

2 拓展拟准检定法用于块体划分

拟准检定法是一种检测粗差的新方法, 本文将其拓展用来检测异常形变. 将位移观测量中的异常位移看成观测值的粗差, 仍用模型(1). 根据位移观测值与真误差的确定关系式

$$\underset{nn}{\mathbf{R}} \underset{n-m}{\boldsymbol{\delta}} = \underset{nn}{\mathbf{R}} \Delta \quad (5)$$

其中, $\mathbf{R}=\mathbf{I}-\mathbf{H}(\mathbf{H}^T\mathbf{P}\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{P}$, 为平差因子阵, 下标表示矩阵维数, 上标表示矩阵的秩. 可知上式是秩亏的, 要求真误差 $\boldsymbol{\delta}$ 的解, 可采用附加约束条件法. 假设依据一定的信息设想将没有异常形变的观测选出来作为拟准观测. 假设选择了 $r>m$ 个拟准观测, 相应的真误差为 $\boldsymbol{\delta}_r$, 在条件

$$\|\boldsymbol{\delta}_r\|_P^2 = \boldsymbol{\delta}_r^T \mathbf{P}_r \boldsymbol{\delta}_r = \min \quad (6)$$

下可求解方程(5), 得到真误差估值为

$$\hat{\boldsymbol{\delta}} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R} + \mathbf{P}_Q \mathbf{G}_Q^T \mathbf{G}_Q \mathbf{P}_Q)^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{R} \Delta \quad (7)$$

其中, $\mathbf{G}_Q = (0 \quad \mathbf{H}_r^T)$, \mathbf{H}_r^T 为系数阵 \mathbf{H} 的转置矩阵对应于拟准观测的分块矩阵,

$$\mathbf{P}_Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{P}_r \end{pmatrix}, \quad \mathbf{P}_r \text{为拟准观测对应的权阵.}$$

当形变观测值中有异常位移时, 如果拟准观测选择正确, 通过附加条件(6), 求得真误差估值的绝对值 $|\hat{\boldsymbol{\delta}}_i|$ 呈现分群现象, 依此可判定真误差估值明显大的观测为异常位移. 但是我们事先并不知道哪些观测有异常, 需通过初选和复选来实现. 首先初选有把握的少数正常观测作为拟准观测, 再根据 $|\hat{\boldsymbol{\delta}}_i|$ 的分群现象, 复选 $|\hat{\boldsymbol{\delta}}_i|$ 比较小的观测为拟准观测. 重复上步求 $|\hat{\boldsymbol{\delta}}_i|$, 直到 $|\hat{\boldsymbol{\delta}}_i|$ 的分群规律不变为止.

3 其它检测模型

为了与拟准检定法进行比较, 下面简单介绍以往常用的抗差估计模型和假设检验模型.

3.1 Huber 估计

目前抗差估计模型比较多, 这里只简单介绍Huber估计模型(Caspary, borutta, 1987; 周江文等, 1997). 该方法构造的等价权为 $\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{P} * \mathbf{w}$. 其中, \mathbf{P} 为原观测权, $\mathbf{w}=diag(w_1, \dots, w_{2n})$ 为等价权因子阵, 其元素为

$$w_i = \begin{cases} 1 & |v_i| \leq k \\ \frac{k}{|v_i|} & |v_i| > k \end{cases} \quad (8)$$

式中, k 是一个与污染率有关的常数,一般取 $1.0\sim2.5$ 的常数。 v_i 为标准化残差。当观测值落在正常段时, $\bar{\mathbf{P}}=\mathbf{P}$, 即保持原观测权, 否则, 对原观测采用降权处理。

3.2 假设检验模型

该方法(陈永奇, 1988; Caspary *et al.*, 1987; Baarda, 1968)的检验统计量为 $w_i=v_i/[\sigma_0\sqrt{\mathbf{Q}_v(i,i)}]$ 。其中, v_i 为最小二乘残差值, σ_0 为先验单位权中误差, $\mathbf{Q}_v(i,i)$ 为 v_i 的协因数。一般取显著水平为 $\alpha=0.001$, 则界值为3.29。每次找出统计量最大的与界值相比, 大于界值, 则认为有异常形变, 剔除后再进行检验, 直到全部通过为止。

4 算例分析

图1为用有限元计算得到的模拟矢量场, 该形变情况是通过分别在上半区域的上方和两侧施加压力产生的。由于下半区域的点受力小, 相对上半区域形变量很小, 可以认为是稳定点。对于上半区域, 由于两侧受力方向不同, 产生趋势不同的块体I和II。在块体内

又分别模拟了断层(图中椭圆内的部分)。下面简单介绍拟准检定法在三步检测过程中的实施步骤以及与其它方法检测结果的比较。

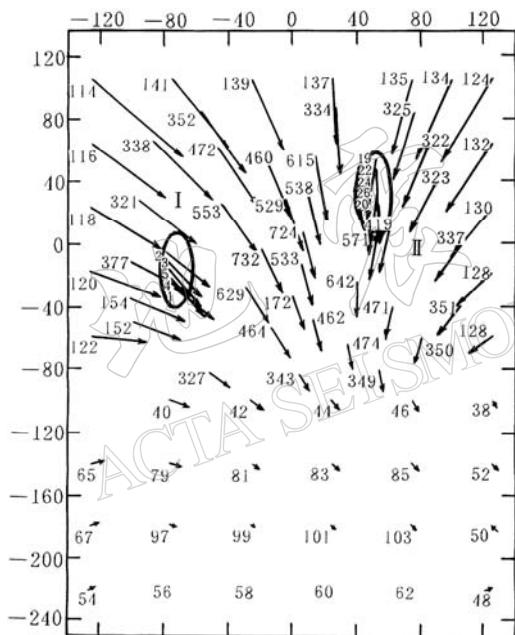


表 1 拟准检定法、Huber 法及假设检验法进行基准检测结果

拟准检定法结果				Huber 估计结果				假设检验结果			
No.	点号	d/mm	No.	点号	dδ/mm	No.	点号	dδ/mm	No.	点号	dδ/mm
1	48	0.81	1	101	0.49	1	462	0.12	1	101	1.64
2	54	2.71	2	85	0.80	2	464	0.32	2	615	2.14
3	56	0.00	3	103	0.84	3	172	0.34	3	724	2.48
4	58	0.00	4	67	0.85	4	629	0.43	4	533	2.56
5	60	0.00	5	46	0.94	5	724	0.68	5	529	2.62
6	62	0.00	6	83	1.01	6	533	0.70	6	26	2.64
7	97	2.66	7	79	1.15	7	615	0.78	7	642	2.66
8	99	2.45	8	99	1.21	8	538	0.84	8	20	2.79
9	101	2.39	9	97	1.35	9	471	0.91	9	334	2.83
10	103	2.41	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	10	137	3.03
11	38	3.60	20	58	2.41	75	65	14.47	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	21	48	2.53	76	38	14.75	76	50	14.48
22	83	4.41	22	56	3.16	77	52	14.97	77	67	14.96
23	85	4.22	23	40	3.20	78	50	15.02	78	52	15.60
24	1	23.49	24	343	5.14	79	48	15.35	79	124	15.98
25	2	26.53	25	349	5.36	80	56	16.44	80	38	16.50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	81	67	16.84	81	54	16.75
82	642	18.34	82	114	45.61	82	114	17.00	82	114	18.78

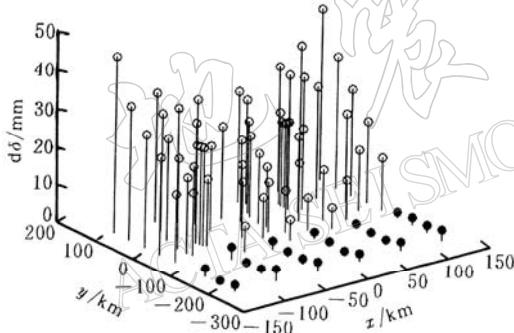
 $r=10$ 个点 $r=23$ 个点

图 2 稳定基准检测图

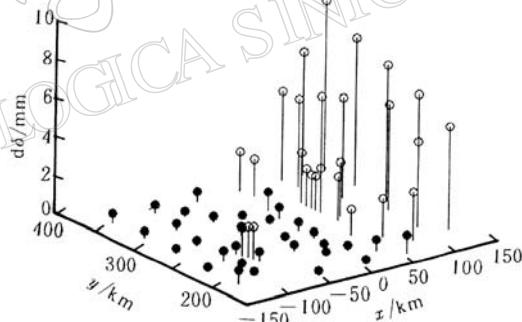


图 3 区分不同形变趋势的块体

3) 各块体的异常形变检测. 对于各块体, 首先要找出不符合研究块体趋势的异常形变点, 将其剔除, 才能得到各块体的形变规律, 这一步与粗差检测相同. ①初选: 用拟准检定法检测块体内异常形变时, 首先将每个点的观测值按一定标准分成 4 类: “0”类为初步判断含异常形变可能性比较大的观测; “1”类为结构不好的观测; “3”类为含粗差可能性比较小的观测; “2”类为除上述 3 类外的其它观测(欧吉坤, 1999; 柴艳菊, 2000). 初选时, 将“3”类和“2”类中标准化残差比较小的点对应的观测选作拟准观测; ②复选: 重复 1) 中②.

3 种方法检测块体 I, II 中的异常形变结果见表 3 和表 4. 拟准检定法检测块体 I, II 中的异常形变结果也可分别用图 4 和图 5 表示.

从表 1 可看出, 拟准检定法可以将基准正确检测出来, 而抗差估计法和假设检验法则均不成功, 这是因为整个块体中形变点比较多(超过 50%). 这两种方法的最高崩溃污染率

等于或小于 50%，因而使检测失败。

从表 2 可知，用拟准检定法可以将两个形变趋势不同的块体正确区分开。

表 2 用拟准检定法区分不同形变块体

No.	点号	$d\alpha/\text{mm}$	No.	点号	$d\delta/\text{mm}$	No.	点号	$d\delta/\text{mm}$	No.	点号	$d\delta/\text{mm}$
1	114	41.16	1	120	0.08	1	460	0.05	1	462	0.05
2	116	34.13	2	343	0.13	2	120	0.11	2	460	0.07
3	118	31.66	3	118	0.20	3	462	0.14	3	529	0.08
4	120	30.51	4	152	0.20	4	529	0.14	4	172	0.09
5	122	23.99	5	327	0.21	5	172	0.17	5	533	0.13
6	139	14.54	6	116	0.26	6	152	0.18	6	120	0.22
7	141	26.13	7	460	0.31	7	533	0.23	7	724	0.24
8	152	21.16	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	154	24.20	29	538	0.59	32	615	0.88	32	615	0.74
10	172	5.96	30	377	0.67	33	642	1.25	33	642	1.04
11	321	26.65	31	349	0.92	34	8	1.44	34	8	1.12
12	327	9.07	32	615	0.95	35	6	1.56	35	6	1.22
⋮	⋮	⋮	33	642	1.32	36	4	1.63	36	4	1.27
40	26	1.60	34	8	1.68	37	24	1.67	37	24	1.43
41	642	-0.47	35	24	1.73	38	26	1.72	38	26	1.47
42	19	-3.49	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	58	132	7.64	58	132	7.63	58	132	6.70
59	511	-3.77	59	124	8.76	59	124	8.73	59	124	7.68
$r=10$ 个点			$r=32$ 个点			$r=36$ 个点			$r=36$ 个点		

注：阴影部分为块体 I 对应的点，非阴影部分对应于块体 II 中的点。

表 3 用拟准检定法、Huber 估计法及假设检验法探测块体 I 中的异常形变结果

拟准检定法结果			Huber 估计结果			假设检验结果		
No.	点号	d/mm	No.	点号	d/mm	No.	点号	d/mm
1	2	0.23	1	2	0.26	1	4	0.86
2	472	0.48	2	553	0.38	2	8	1.99
3	553	0.83	3	462	0.77	3	6	2.26
4	152	0.91	4	152	0.78	4	321	2.53
⋮	⋮	⋮	5	642	0.95	5	338	5.05
29	615	3.22	6	472	1.01	6	118	7.71
30	122	3.45	⋮	⋮	⋮	7	116	8.32
31	327	4.26	31	139	4.29	⋮	⋮	⋮
32	349	5.62	32	349	6.26	32	462	28.06
33	114	8.89	33	114	8.43	33	343	31.86
34	8*	12.10	34	8	11.81	34	642	31.97
35	6*	13.47	35	6	13.18	35	474	33.79
36	4*	13.83	36	4	13.54	36	349	40.22
$\hat{\sigma}_0 = 1.72$			$\hat{\sigma}_0 = 1.50$			$\hat{\sigma}_0 = 2.83$		

从表 3 可知，拟准检定法和抗差估计法可以将块体 I 中的异常形变点探测出来，共有 4 个异常形变点，其中 4, 6, 8 号点正是我们模拟的断裂带上的点；114 号点是一边界点。这也比较符合实际情况。假设检验法则未能检测出模拟的异常形变点。

从表 4 可知，拟准检定法和抗差估计法可以将块体 II 中的异常形变点探测出来，共有 6 个异常形变点，其中 22, 26, 24 号点是我们模拟的断裂带上的点；334, 124 和 137 号点

是边界点。这也比较符合实际情况。而假设检验法则未能检测出模拟的异常形变点。

表4 用拟准检定法、Huber估计法及假设检验法探测块体II中的异常形变结果

拟准检定法结果			Huber估计结果			假设检验结果		
No.	点号	d/mm	No.	点号	d/mm	No.	点号	d/mm
1	134	0.16	1	351	0.87	1	134	0.35
2	511	0.35	2	511	0.89	2	135	2.16
3	449	0.35	3	449	1.00	3	325	2.22
4	351	0.50	4	20	1.09	4	22	3.36
:	:	:	:	:	:	5	124	4.82
16	19	3.19	16	323	2.94	6	19	5.10
17	135	3.40	17	132	3.03	:	:	:
18	26*	6.51	18	334	5.61	18	511	13.15
19	334	6.76	19	26*	5.77	19	128	14.24
20	22*	7.12	20	22*	6.22	20	351	17.78
21	124	7.32	21	24*	6.88	21	471	19.19
22	24*	7.72	22	137	6.93	22	126	19.51
23	137	8.13	23	124	7.56	23	350	21.65

$$\hat{\sigma}_0 = 1.44$$

$$\hat{\sigma}_0 = 1.72$$

$$\hat{\sigma}_0 = 4.09$$

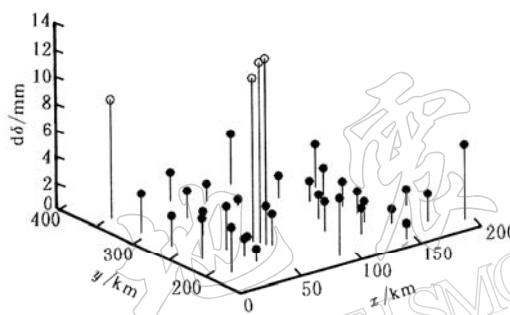


图4 块体I中的异常形变检测

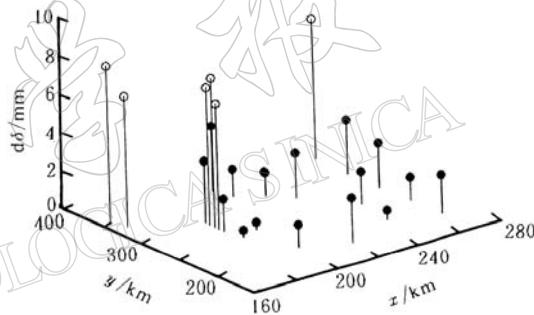


图5 块体II中的异常形变检测

5 结论

1) 用拟准检定法区分不同形变趋势的块体分三步进行,每一步采用不同的模型而初选拟准观测是关键。可以根据实际情况,确定选取对策。如果初选拟准观测正确,则真误差估值会出现正确的分群现象。

2) 通过比较拟准检定法与其它两种方法的区分结果可知,拟准检定法可以将该三步成功实现,而Huber估计只能检测出块体内的异常形变,对其它两步都失败了。假设检验法在该三步检测中都失败了,这也说明以真误差为研究对象的新方法具有定位异常形变准确且崩溃污染率高的优点。在研究大地测量反演中,不同形变趋势的块体划分具有比较好的应用前景。

本算例模拟情况比较简单,目的是说明用拟准检定法划分不同形变趋势块体的可行性。由于大地测量反演研究的是整个地球或特定的局部,各块体的大小、边界条件及材料性质都比较复杂,所以,实测位移资料受多种因素的影响也呈现比较复杂的规律性。利用实测位移资料来进行不同形变趋势的块体划分尚需进一步研究。

参考文献

- 柴艳菊. 2000. 粗差拟准检定法的实施方案设计[J]. 测绘工程, 10(1): 19~22
- 陈永奇. 1988. 变形观测数据处理[M]. 北京: 测绘出版社, 94~223
- 李延兴, 杨国华, 等. 2001. 根据现代地壳垂直运动划分中国大陆活动地块边界的尝试[J]. 地震学报, 23(1): 11~16
- 欧吉坤. 1999. 粗差的拟准检定法(QUAD 法)[A], 见: 周江文、欧吉坤、杨元喜等编. 测量误差理论新探[C]. 北京: 地震出版社, 6~18
- 杨国华, 韩月萍, 张凤兰. 2001. 利用 GPS 复测结果确定华北不同运动性质单元及活动方式[J]. 地震学报, 23(1): 1~10
- 周江文, 黄幼才, 杨元喜, 等. 1997. 抗差最小二乘法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 71~95, 104~118
- Baarda W. 1968. A testing procedure for use in geodesy networks[A]. In: Netherlands Geodesy Committee edit. *New Series*[C]. Delft: Neth Geod Comm Pub On Geodesy, 2(5): 20~47
- Caspary W F, Haen W, Borutta H. 1990. Deformation analysis by statistical methods[J]. *Technometrics*, 32(1): 49~57
- Caspary W, Borutta H. 1987. Robust estimation in deformation models[J]. *Survey Review*, 29(223): 29~45

A NEW APPROACH FOR DISTINGUISHING DIFFERENT DEFORMATION TREND BLOCKS WITH DISPLACEMENT OBSERVATIONS

Chai Yanju Ou Jikun Du Zhixing

(Laboratory of Dynamical Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China)

Abstract: A new approach by use of that the different deformation trend blocks could be distinguished with displacement observations includes three steps, which are datum detection, block scope told part and anomalous deformations detection in blocks. The three steps are implemented by quasi-accurate detection in the paper. Because the number of anomalous displacements is big in the previous two steps, the first selection for quasi-accurate observations is key. The first selection is according to the size of deformation displacement for datum detection and according to the direction of deformation for block scope told part. At last through an example, each implementation process is introduced simply and the detection effect of quasi-accurate detection is compared with that of the robust estimation (Huber) and the hypothesis test. The result indicates that the three steps can be implemented successfully with quasi-accurate detection and that the anomalous deformations in blocks can be detected but the steps of the datum detection and block scope told part are failed by robust method. The detections of three steps are failure by hypothesis test. The results show that the quasi-accurate detection has the virtues that the location is much accurate and the breakdown pollution rate is high compared with the other two methods.

Keywords: quasi-accurate detection; anomalous deformations; datum detection; block distinguished; hypothesis test