

# 变形监测网稳定性检验与灵敏度分析

严丽娟<sup>1</sup> 郝传才<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川成都 610059; 2. 广州地铁设计院, 广东广州 510000)

## Analysis for Sensitivity and Test for Stability of the Deformation Monitoring Network

Yan Lijuan Hao Chuancai

**摘 要** 变形监测是一种监测变形体安全性的重要手段,因此确定变形体的稳定性就尤为重要。设计了一个水平位移监测实验网,人为改变某点的水平位移量,得到两组观测数据,利用平均间隙法原理,判断所设计的水平位移监测实验网中点的稳定性,进而确定变形模型,对该模型进行灵敏度分析,结果达到了设计要求。

**关键词** 变形监测 平均间隙法 稳定性 灵敏度

在测量工作的实践和科学研究活动中,变形监测占有很重要的位置。在过去,国内外学者对变形监测做了大量的研究,取得了可喜的成果,但是也出现了一些新的问题。如变形监测网质量标准和变形监测网平差基准的合理确定,在多期观测数据中如何合理地判断点的稳定性和计算位移量等。

在多期观测中,由于变形监测时间长,监测点很容易被破坏,变形监测网的网型也可能发生变化,本文提出用平均间隙法来判断点的稳定性,确定变形模型,分析多点发生位移时变形监测网的局部灵敏度。

### 1 分析方法

#### 1.1 平均间隙法

平均间隙法的思路:假设在两个观测周期间,网中所有基准点均未发生变化,可以把两个观测周期的观测看成是对同一网进行的两次连续观测,由这两次观测资料所求得的两组基准点坐标可以看成是一组双观测值,则利用由双观测值之差求方差的方法计算观测值的单位权方差估计值。在求出  $d$  和  $Q_d$  以后,先进行两周期图形一致性检验(整体检验)。如果通过检验,则所有参考点是稳定的;否则,就要找出不稳定点。寻找不稳定点的方法是“尝试法”,依次去掉 1 个点,计算图形不一致性减少的程度,图形不一致性减少最大的点视为不稳定点。排除不稳定点后,再重复上述过

收稿日期:2005-06-01

第一作者简介:严丽娟(1978—),女,2003年毕业于西南交通大学大地测量学与测量工程专业,工学硕士,在读博士生。

化过程中,其他机器动作均正常,故只能把故障范围缩小到电源箱。关机,拔掉电源箱联接电缆,取出电源箱,单独对电源箱供电,经检测,其 24 V 电源模块电压输出正常;更换灯泡,开机故障依旧;最后只剩下频闪电源箱未做检查,用同型号频闪电源箱替换,试机,故障排除。说明此故障是频闪电源箱引起。

例 4: DSW 300 电源灯不亮。

同上例检查方法,经检查,电源箱输出电压均正常,灯泡也没问题,最后怀疑是高压电源模块有问题,找同型号的高压电源模块代换后故障排除。说明此故障是高压电源模块损坏引起。本例可用 DSW 200 高压

电源模块代换,但须做跳线处理。

### 4 结束语

DSW 系列数字扫描仪是精密的光机电一体化高级仪器,要真正做好该仪器的维护与检修,仍须专业的仪修工程师或厂家维修人员进行。经过本人这几年来经验积累,DSW 系列数字扫描仪故障率较高的部位便是其高压电源箱部位。只要了解该仪器的结构及工作原理,再加上平时的认真观察与总结,对 DSW 系列扫描仪的维护并不困难。日常的维护以及简单的故障分析,一般的维修人员经过一些培训便可胜任。

程,直到图形一致性(指去掉不稳定点后的图形)通过检验为止<sup>[1,2]</sup>。

## 1.2 灵敏度分析

为监测工程建筑物或地壳的变形而建立的控制网,必须了解其监测变形的能力。为此,要对所布设的控制网进行识别变形的可监测分析,即预期该网可能监测到的最小变形量和方向,这种预期是与概率相联系的。研究以多大的显著水平和检验功效去发现可能变形的大小,是可监测性分析的内容,即控制网灵敏度问题<sup>[3,4]</sup>。

## 2 水平位移监测网观测实验及其稳定性分析

### 2.1 实验方案设计

实验目的是验证用平均间隙法判断点的稳定性,进而确定变形模型,分析变形监测网的灵敏度。在外业观测中,首先按照常规测边网方法对实验网进行第1次观测,然后利用精确辅助设备,人为地改变网中部分点的水平位置,对该变形监测网进行第2次观测,以此来模拟水平位移监测网中监测点的位移变化情况。在内业数据处理中,利用平均间隙法判断发生位移的点,进而确定该网的变形模型。在已知变形模型的情况下,分析该变形监测网的整体灵敏度和局部灵敏度。其设计网型见图1。

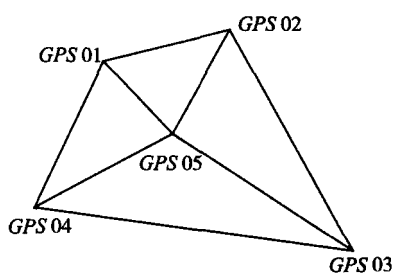


图1 水平位移监测网实验网型

实验过程设计如下:

第一期观测时,除GPS03点外,对各边进行往返观测。在GPS03点上安置能精确测定位移值的活动棱镜(用百分表测定位移值),对于GPS03-GPS04、GPS03-GPS02、GPS03-GPS05三边进行单程观测。第一期观测时,活动棱镜的位移量设计为4.50mm,方向为尽量接近GPS05-GPS03方向。

第二期观测时,除与GPS03相关边外,其他边的观测与第一期观测相同。利用GPS03点上的活动棱镜调整移动量,位移值为7.50mm,再次单程观测GPS03-GPS04、GPS03-GPS02、GPS03-GPS05三条

边长。

### 2.2 外业观测数据采集及精度评定

(1)外业精度评定的计算公式

仪器的标称精度表达式

$$m_D = (a + b \cdot D) \quad (1)$$

式中  $m_D$ ——测距中误差 /mm;

$a$ ——标称精度的固定误差 /mm;

$b$ ——标称精度的比例误差系数 / (mm/km);

$D$ ——测距长度 /km。

测距精度的评定

单位权中误差按(2)式计算

$$u = \frac{\sqrt{[pdd]}}{\sqrt{2n}} \quad (2)$$

式中  $u$ ——单位权中误差 /mm;

$d$ ——各边往、返测距离较差 /mm;

$n$ ——测距边数;

$p$ ——各边距离测量的先验权,其值为 $\frac{1}{2D}$ ;

为测距的先验中误差,可按距离的标称精度计算。

任意边的实际中误差可按(3)计算

$$m_{Di} = u \sqrt{\frac{1}{p_i}} \quad (3)$$

式中  $m_{Di}$ ——第*i*边的实际测距中误差 /mm;

$p_i$ ——第*i*边距离测量的先验权。

(2)外业观测数据及外业精度评定

使用标称精度为 $\pm(2+2 \times 10^{-6} \cdot D)$ mm的全站仪,根据前面设计的实验方案对本实验网进行了外业观测,外业观测数据及计算结果见表1和表2。

表1 观测值统计表(第一期)

测段名	观测距离				
	往测 /m	返测 /m	较差 /mm	均值 /m	单位权中误差 /mm
GPS04 - GPS01	370.718 9	370.719 1	- 0.2	370.719	2.13
GPS04 - GPS05	319.476	319.476	0	319.476	2.10
GPS04 - GPS03	461.999 2			461.999 2	2.20
GPS02 - GPS03	707.665			707.665	2.45
GPS03 - GPS05		457.450 5		457.450 5	2.19
GPS02 - GPS05	272.124			272.124	2.07
GPS02 - GPS01	229.614 8	229.621 2	- 6.4	229.618	2.05
GPS05 - GPS01	221.614 1	221.617 4	- 3.3	221.615 8	2.05
外业精度评定	仪器标称精度: $m_D = 2.828$ mm 测距单位权中误差: $u = 1.02$ mm				

表 2 观测值统计表 (第二期)

测段名	观测距离				
	往测 /m	返测 /m	较差 /mm	均值 /m	单位权中误差 /mm
GPS04 - GPS01	370.718 9	370.719 1	- 0.2	370.719	2.13
GPS04 - GPS05	319.476	319.476	0	319.476	2.10
GPS04 - GPS03	461.999 1			461.999 1	2.20
GPS02 - GPS03	707.658 3		- 2.1	707.658 3	2.45
GPS03 - GPS05		457.446 6	0.2	457.446 6	2.19
GPS02 - GPS05	272.124			272.124	2.07
GPS02 - GPS01	229.614 8	229.621 2	- 6.4	229.618	2.05
GPS05 - GPS01	221.614 1	221.617 4	- 3.3	221.615 8	2.05
外业精度评定	仪器标称精度: $m_D = 2.828$ mm 测距单位权中误差: $u = 1.02$ mm				

由表 1、表 2 对比可知:该水平位移实验网边长观测之外业精度相同。由于辅助设备不能安置仪器,使得与 GPS03 点相关的 3 个测段都是进行的单向观测,在利用外业精度评定公式评定精度时没有考虑该 3 个测段。而其余测段两期观测值相同。

### 2.3 内业数据处理及稳定性分析

在本实验中,观测数据的内业处理包括以下几部分工作:对两期观测数据分别进行自由网平差,计算各点的坐标值、单位权中误差、各点的单位权、各观测边改正数、改正后边长、两期观测期间各点的坐标差及其协因数阵;利用平均间隙法原理来判断发生位移的点;计算整个变形监测网的整体灵敏度(主要计算整个变形监测网的变形下界值);在已知位移点的情况下计算变形监测网的局部灵敏度(计算任意方向的变形下界值)。

#### (1) 位移点的判断

根据平均间隙法的计算原理<sup>[1]</sup>,计算结果见表 3。

表 3 平均间隙法二次型统计表

点名	$\bar{X}_M^T P_{MM} \bar{X}_M$	$\frac{\bar{X}_F^T \bar{P}_{FF} \bar{X}_F}{u^2 f_h}$
GPS01	957.918 2	8.654
GPS02	987.613 4	4.668
GPS03	1 022.134	0.034
GPS04	964.457 5	7.776
GPS05	934.901 7	11.743
整体检验	$\frac{X^T P_X X}{f_X} = 146.055, F_{31} = 98.024,$ $\frac{(V^T P V)^1 + (V^T P V)^2}{f_1 + f_2} = 1.49, F_{0.1}(52) = 9.29$	

由表 3 可知,用平均间隙法对变形监测网水平位移点进行判断时,整体检验出实验网中有位移点存在,又因为点 GPS03 其二次型  $\bar{X}_M^T P_{MM} \bar{X}_M$  最大,根据平均间隙法的基本原理,可以认为点 GPS03 发生了位移。当剔除点 GPS03 后,整体平差的  $F$  统计量很小,小于查表所得  $F$  统计量,可以认为除点 GPS03 外,其他点没有发生位移,这与实际相符。同时,计算出的位移量与实际位移量也相近。

### 3 灵敏度分析

计算思路和计算公式参照文献 [5~7]。

#### 3.1 整体灵敏度计算

首先取显著水平  $\alpha = 0.05$ , 检验功效  $\beta = 0.8$ , 查洛莫图,可得  $\lambda = 2.80$ ; 计算得两期观测的联合单位权中误差为  $\sigma_0 = 1.49$ 。利用水平位移量协因数阵  $Q_d$  的逆阵,进行谱分解并得出分解后的对角阵  $\Lambda$  和特征向量矩阵。其值为

$$\Lambda = \text{diag} \{ -8.505 \ 0.656 \ 1.92 \ 1.357 \ 1.04 \\ -1.2 \ 2.276 \ 0.51 \ 2.719 \ 0.404 \}$$

对应于最大特征值 ( $\lambda_{\max} = 2.719$ ) 的特征向量如下:

$$g^T = (0.354 \ -0.007 \ -0.329 \ -0.408 \ 0.567 \\ -0.212 \ 0.2 \ 0.081 \ 0.431 \ 0.016)$$

因此,整体灵敏度下界值为

$$a_d = \sigma_0 / \sqrt{\lambda_{\max}} = 2.8 \times 1.49 / 2.719 = 2.530 \text{ mm} \quad (4)$$

#### 3.2 局部灵敏度计算

局部灵敏度的计算在变形模型已知的情况下进行,在本实验中通过平均间隙法判断 GPS03 发生位移,从而确定变形模型(计算过程略)。

计算出 GPS03 点在 3 个方向上的位移下界值为

$$a_{GPS03}(GPS03 - GPS02) = 2.91 \text{ mm}$$

$$a_{GPS03}(GPS03 - GPS04) = 4.98 \text{ mm}$$

$$a_{GPS03}(GPS03 - GPS05) = 3.15 \text{ mm}$$

对 3 个方向的位移下界值用误差椭圆表示(如图 2),同时将 GPS03 点的实际位移量投影到 3 个方向做

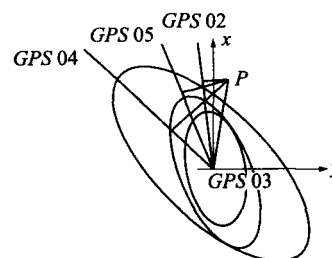


图 2 实验网变形下界值示意

比较。图2中,  $P$ 点表示GPS03点的位移点。从示意图可知:GPS04方向计算下界值大于本次实验计算位移量在该方向投影值,其他两个方向的下界值都小于相应方向的投影值。

#### 4 结论

(1)当水平位移实验网中单点发生位移时,用平均间隙法判断位移点效果较好。在该实验中,用平均间隙法对点稳定性分析的结果和整体灵敏度计算结果一致。平均间隙法判断出GPS03点发生位移,计算出的整体灵敏度变形下界值为2.53 mm,实际GPS03点的位移量为3.0 mm,整体灵敏度判断与平均间隙法一致。

(2)当位移点存在时,实际位移量在任意方向的投影有可能小于该方向局部灵敏度计算的变形下界值。

(3)在分析变形监测网的灵敏度过程中,本文采用了平均间隙法来确定局部灵敏度分析时的变形模型。之所以采用平均间隙法来确定局部灵敏度的变形模型,主要考虑两个方面的原因:一是变形监测网的变形模型确定不容易;二是平均间隙法本身就是判断发生变形的点,有了变形点就可以近似确定变形模型,这是不考虑多个变形点位于同一变形模块上的情况。用

平均间隙法确定变形模型这种思路本身不需要考虑太多的地质信息,能从测量观测数据中分析出近似变形模型,在工程上有一定的实用性。

(4)通过图2显示了变形下界值和实际位移量的关系。当实际位移量大于局部灵敏度的最小变形下界值时,其实际位移量在有些方向上的投影可能小于该方向的变形下界值。工程应用中分析变形下界值和位移量的关系时要考虑具体的方向,对整体灵敏度的最小可发现下界值和实际位移量的关系不能只做简单的分析。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴子安. 工程建筑物变形监测数据处理 [M]. 北京:测绘出版社, 1998: 82~86
- [2] 李青岳. 工程测量学 [M]. 北京:测绘出版社, 1984: 310~343
- [3] 陶本藻. 自由网平差与变形分析 [M]. 北京:测绘出版社, 1984: 34~56
- [4] 卓建成. 工程控制测量建网理论 [M]. 成都:西南交通大学出版社, 1996: 92~98
- [5] 周世健, 陈永奇, 吴子安. 变形监测网的整体与局部灵敏度标准 [J]. 华东地质学院学报, 19(2): 183~188
- [6] 黄维彬. 近代平差原理 [M]. 北京:解放军出版社, 1992: 154~160
- [7] 於宗涛, 于正林. 测量平差原理 [M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 1990: 256~265

(上接第18页)

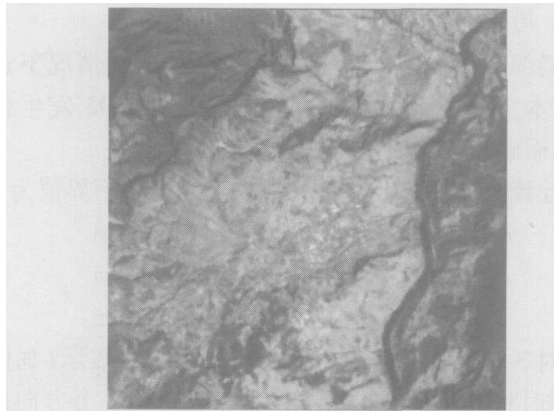


图6 该地区三次多项式纠正结果

一般采用多项式纠正,该方法的精度与所用纠正多项式的次数有关,多项式的次数越高,位置拟合误差越小,所获取的图像精度越高。但次数增加到一定程度后,精度的提高很小,而需要计算的时间呈几何级数增加。因此,选择合适的次数很关键。

扫描地形图做几何纠正时要视具体情况选用不同

的纠正方法(线性或非线性),如扫描图像畸变比较小,用线性变换做几何纠正即可,若扫描地形图畸变很大,就要考虑用非线性变换来代替线性变换。

在做跨带影像的几何纠正时,可以考虑用线性变换来代替严格高斯投影变换,但前提是小范围内,也即必须选足够的控制点进行转化,才能满足精度要求。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵帮元, 荆小峰. TM卫星影像几何纠正技术方法浅探 [J]. 中国水土保持, 2000(6): 30~32
- [2] 唐海蓉, 向茂生, 朱敏. Landsat7 图像系统级几何校正算法研究 [J]. 中国图像图形学报, 2003, 8(9): 1008~1014
- [3] 郭德方. 遥感图像的计算机处理和模式识别 [M]. 北京:电子工业出版社, 1987: 167~170
- [4] 刘彦花, 叶国华. 基于扫描地形图的几何纠正算法研究 [J]. 地矿测绘, 2001, 17(3): 1~3
- [5] 李华蓉, 艾及熙, 吴斌. 纸质地形图扫描影像的几何校正 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27(7): 131~134
- [6] 王密, 龚健雅, 李德仁. 大型遥感影像数据库的空间无缝数据组织 [J]. 武汉大学学报, 2001, 26(5): 419~424