

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.025

GPS 变形监测网网形结构对控制网质量的影响

岳东杰 李红祥

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了分析 GPS 控制网网形结构与控制网质量的关系,在论述衡量 GPS 变形监测网的精度、可靠性、灵敏度、费用 4 个质量标准的基础上,根据 GPS 控制网的特点,分析了基线数及其连接方式等网形结构对 GPS 控制网精度、灵敏度的影响.以一高边坡监测网为例,说明 GPS 控制网基线数不同,控制网的质量不同;基线数相同,不同的连接方式质量也不相同.

关键词:GPS;变形监测网;网形结构

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2008)05-697-05

随着电子技术与空间技术的发展,GPS 定位在精度、可靠性等方面都得到了很大提高,GPS 已日益广泛地应用于监测不同尺度的自然、地质灾害^[1].滑坡是一种常见、世界范围内最严重的灾害之一.对滑坡进行变形监测并建立预警报警系统是滑坡监测的重要内容.对滑坡进行变形监测需要综合多种方法,以往以常规大地测量方法为主.20 世纪 80 年代中期全站仪出现后,监测方法得到一定程度的改善.但这些方法都需要人到现场观测,工作量大.特别在南方山区,树木杂草丛生,作业十分困难,很难实现无人值守的要求.GPS 卫星定位系统由于具有全天候、实时、连续三维位移高精度监测等特点,测站间不需通视,作业效率高,劳动强度低.采用静态相对定位技术,其精度可以达到毫米级,因此更适用于山区滑坡监测.另外,在用 GPS 进行监测时,还可以利用无线通讯实现远距离数据传输和监控,这对于危险地区滑坡监测更为有利.

GPS 变形监测网是建立滑坡监测基准与工作基点的主要方法之一^[2-3].高质量的监测网可以准确地监测变形体的变形.由于监测网的主要作用在于发现变形,因此它是变形观测与分析的基础.如果监测网布设不合理,观测的精度不高,控制网不能有效发现粗差、抵抗粗差,就不可能灵敏地检查出异常信号,也就无法满足安全监测的需要.GPS 控制网的质量可以用网的精度、可靠性、灵敏度、费用等来表示^[4].大量研究分析表明,GPS 控制网的质量与控制点的坐标无关,但与控制网的基线数、基线的连接形式(网形结构)、基线本身的精度密切相关^[5].基线本身的精度与使用的仪器、观测时间的长短、选择的卫星窗口、数据处理技术、模型等有关.滑坡监测中,对观测的时间、环境、技术条件等很难改变.相反,改变 GPS 控制网的网形结构则比较容易.因此研究 GPS 控制网的网形结构十分重要,有助于优化 GPS 控制网的布置,提高其质量.本文针对 GPS 控制网的特点,分析研究 GPS 基线数及其连接方式对控制网精度、灵敏度等质量的影响,为 GPS 控制网的优化设计提供依据.

1 GPS 变形监测网的质量

GPS 控制网的质量可以从精度、可靠性、灵敏度、费用 4 个方面考虑.不同用途的网对不同的质量指标有所侧重.对于 GPS 变形监测网,灵敏度是需要考虑的重要指标之一.

1.1 精度指标

GPS 控制网的精度是描述随机误差对控制网结果的影响程度.一般用未知参数的方差或协方差来描述.根据 GPS 控制网的平差模型^[6-7]:

$$V_{3m \times 1} = A_{3m \times t} \hat{x}_{t \times 1} - l_{3m \times 1} \quad D_{ll} = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (1)$$

收稿日期:2008-05-18

基金项目:国家自然科学基金(50579010)

作者简介:岳东杰(1966—),女,山东梁山人,副教授,博士,主要从事工程变形监测、GPS 定位技术与应用、空间信息数据处理等研究.

式中: l, V ——观测向量与残差(改正数)向量; $\hat{x}$ ——坐标未知参数向量; P ——观测值的权阵; σ_0^2 ——先验方差因子; A ——误差方程系数矩阵,与基线数、基线的连接形式有关; D_{ll} ——观测值的方差-协方差阵。

在最小二乘原则下:

$$x = (A^T P A)^{-1} A^T P l \quad Q_{\hat{x}} = (A^T P A)^{-1} \tag{2}$$

式中 $Q_{\hat{x}}$ 为坐标协因数阵。

精度常用坐标方差-协方差阵或协因数阵的纯量形式来描述,如: A 最优标准,取方差-协方差阵或协因数阵的迹最小; E 最优,取方差-协方差阵或协因数阵的最大特征值最小。

由式(2)可见, GPS 控制网的精度与控制点的坐标无关,与控制网的基线数、基线的连接形式、基线本身的精度有关,因此要使 GPS 控制网达到一定的精度要求,必须优化基线数及基线的连接形式。

1.2 可靠性指标

GPS 基线向量由于周跳修补不完善、整周模糊度参数搜索效果不佳等原因,难免会含有粗差,因此 GPS 控制网的结构必须具有抵抗粗差的能力。GPS 控制网的可靠性指标是描述控制网本身发现某一模型误差能力与抵抗某一模型误差影响能力的指标。

GPS 控制网一般同一个时段的基线向量之间相关,不同时段的基线向量之间不相关,同一基线的 3 个坐标差分量又是相关的。这种相关性使粗差测值对其他观测量的影响作用增大,粗差的隐蔽性也更强。因此在 GPS 控制网的粗差探测和处理时,必须考虑观测量之间的相关性,这使得 GPS 网的可靠性分析在很大程度上不同于常规网^[8-9]。

对于第 i 条基线,其多余观测分量可写为 3×3 阶的矩阵:

$$R_i = (Q_{v_i} P_i) = \begin{bmatrix} R_{\Delta x_i \Delta x_i} & R_{\Delta x_i \Delta y_i} & R_{\Delta x_i \Delta z_i} \\ R_{\Delta y_i \Delta x_i} & R_{\Delta y_i \Delta y_i} & R_{\Delta y_i \Delta z_i} \\ R_{\Delta z_i \Delta x_i} & R_{\Delta z_i \Delta y_i} & R_{\Delta z_i \Delta z_i} \end{bmatrix} \tag{3}$$

R_i 的 3 个主对角线上元素的大小分别反映了基线 i 的 3 个坐标差分量的误差或粗差作用于各自坐标改正数的程度,其值愈大则粗差愈容易被发现,而 R_i 中的非主对角元素的大小则反映某一坐标分量的粗差作用于该基线另一坐标分量改正数的影响大小。依据 GPS 基线多余观测分量的这一特性,同时考虑到多余观测分量在内、外可靠性中起到的作用,也为了研究问题的方便,取 R_i 阵 3 个行向量的二范数平均后,定义一条基线的多余观测分量值代表该基线向量的可靠性:

$$r_{L_i} = \frac{1}{3} \left[\left(\sum_{K=\Delta X}^{\Delta Z} R_{\Delta XK}^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\sum_{K=\Delta X}^{\Delta Z} R_{\Delta YK}^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\sum_{K=\Delta X}^{\Delta Z} R_{\Delta ZK}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \tag{4}$$

1.3 灵敏度指标

在 GPS 变形监测网设计中,灵敏度是一个很重要的质量指标,反映了监测网可监测到的最小变形值及其方向^[10]。设监测网经过 2 期观测后,通过基准变换可得到公共点在同一基准下的变形向量 $\hat{d}$ 及其协因数阵 $Q_{\hat{d}\hat{d}}$,即

$$\hat{d} = \hat{X}_{II} - \hat{X}_I \quad Q_{\hat{d}\hat{d}} = (Q_{\hat{X}_{II}} \hat{X}_{II} + Q_{\hat{X}_I} \hat{X}_I) \tag{5}$$

$H_0: E(\hat{d}) = 0$, 网点没有显著位移,基准网稳定; $H_1: E(\hat{d}) \neq 0$, 网中至少有一点发生显著位移。

建立统计量:

$$t = \frac{\hat{d}^T Q_{\hat{d}\hat{d}}^+ \hat{d}}{hs^2} \sim F(h, f) \quad h = \text{rank}(Q_{\hat{d}\hat{d}}^+) \quad f = u - h \quad s^2 = \frac{s_1^2 f_1 + s_2^2 f_2}{f_1 + f_2}$$

式中: u ——未知数的个数; s^2 ——2 期的综合单位权方差。

对于 GPS 控制网, $h = 3p - 7$, $f = 7$, p 为网点数。若 $t > F_{\alpha}(h, f)$ (α 为显著水平),则说明网中至少有一点发生显著位移。

在进行 GPS 控制网的设计时,往往并不知道单位权方差及其协因数阵,这时可用先验单位权方差 σ_0^2 代替,统计量变为

$$t = \frac{\hat{d}^T Q_{\hat{d}\hat{d}}^+ \hat{d}}{h\sigma_0^2} \sim F(h, \infty)$$

若接受备选假设,则

$$E(\hat{d}) = dA \neq 0$$

t 服从非中心 F 分布,非中心参数为

$$w_A = \frac{\hat{\boldsymbol{d}}^T \boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+ \hat{\boldsymbol{d}}}{\sigma_0^2}$$

在给定的显著水平 α 、检验功效 γ 下,可根据自由度查巴尔达的诺谟图得非中心参数的下界值 w_0 . w_0 是显著水平 α 、检验功效 γ 和自由度 h 的复杂函数

$$w_0 = f(h, \alpha, \gamma)$$

当 w_A 大于 w_0 时,与 w_A 对应的变形可以被检测出来,否则将不能被检测出来.为此定义 w_0 所对应的变形量为灵敏度.

一般设 $\hat{\boldsymbol{d}} = a\boldsymbol{g}$, $\boldsymbol{g}$ 为单位化的向量, a 为变形大小. 设与 w_0 对应的速度比例因子为

$$a_0 = \sigma_0 \sqrt{\frac{w_0}{\boldsymbol{g}^T \boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+ \boldsymbol{g}}}$$

式中 a_0 称为 GPS 变形监测网的灵敏度. 凡变形量大于 a_0 的,即可在给定的显著水平 α 、检验功效 γ 下拒绝 H_0 ,接受 H_1 ,即可以被发现;反之变形量小于 a_0 的,在给定的显著水平 α 、检验功效 γ 下接受 H_0 ,变形不能被发现.

对于网中的任何一点可用局部灵敏度指标,一般用点位灵敏度椭圆来表示,即:

$$E_i = \sigma_0 \sqrt{w_0} / \sqrt{\lambda_1(\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+)} \tag{6}$$

$$F_i = \sigma_0 \sqrt{w_0} / \sqrt{\lambda_2(\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+)} \tag{7}$$

$$G_i = \sigma_0 \sqrt{w_0} / \sqrt{\lambda_3(\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+)} \tag{8}$$

$\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+$ 代表了对角线第 i 子块 (3×3)

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+ = \begin{bmatrix} P_X & P_{XY} & P_{XZ} \\ P_{YX} & P_Y & P_{YZ} \\ P_{ZX} & P_{ZY} & P_Z \end{bmatrix}$$

主轴方向为

$$\cos\alpha_i = M_i/W_i \quad \cos\beta_i = N_i/W_i \quad \cos\gamma_i = T_i/M_i \tag{9}$$

其中

$$M_i = P_{XZ}(P_Y - \lambda_i) - P_{XY}P_{YZ} \tag{10}$$

$$N_i = P_{YZ}(P_X - \lambda_i) - P_{XY}P_{XZ} \tag{11}$$

$$T_i = P_{XY}^2(P_X - \lambda_i)(P_Y - \lambda_i) \tag{12}$$

$$W_i^2 = M_i^2 + N_i^2 + T_i^2 \tag{13}$$

从以上推导不难看出,无论整体灵敏度还是局部灵敏度,都与 $\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+$ 有关,而:

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{\boldsymbol{d}}\hat{\boldsymbol{d}}}^+ = (2\boldsymbol{Q}_{XX})^+ = \left(\frac{\boldsymbol{Q}_{XX}^+}{2}\right)^+ = \frac{1}{2}(N^+)^+ = \frac{1}{2}(N) = \frac{1}{2}(A^T P A) \tag{14}$$

式中 N 为法方程系数矩阵. 因此灵敏度与设计矩阵及权阵密切相关. 对于 GPS 控制网,设计矩阵主要取决于基线数量与网形连接. 同样一组点,网形连接不同,设计矩阵不同. 因此对于 GPS 网的网形设计应该是指网形的连接设计.

1.4 费用标准

GPS 变形监测网与常规变形监测网一样,需要多期观测,因此费用标准也是 GPS 变形监测网考虑的重点之一. GPS 变形监测网的费用主要取决于网点数、仪器数、所测基线数以及测区交通条件等. 其中所测基线数是最主要的,因此 GPS 变形监测网的观测成本可用式(15)描述:

$$s = \sum f_i \delta_i \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{观测} \\ 0 & \text{不观测} \end{cases} \tag{15}$$

2 GPS 控制网网形结构对控制网质量的影响

GPS 控制网的网形主要是指基线的多少与连接方式. 为了说明独立基线数对结果的影响,对某一高边坡监测网进行计算分析. 一般说,独立基线的个数越多, GPS 控制网的精度、可靠性、灵敏度越强,但费用也就越

高.选择合理的基线数,可以节省大量的工作,同时又能满足质量标准.某高边坡的变形监测网采用 Z-SURVEY 接收机观测了 2h.采用不同条数的独立基线组成图 1 所示的图形,采用相同的基准平差后网点的精度与灵敏度椭圆分量见图 2 与表 1.根据表 1 计算整体灵敏度,28 条独立基线与 17 条独立基线分别为 3.0861 mm 与 8.1158 mm,可见独立基线的条数直接影响平差的结果,包括精度、可靠性与灵敏性.不同的独立基线数涉及的工作量不同,选择合适的独立基线数是优化设计的一部分.基线数确定以后,GPS 控制网的连接方式也影响控制网的质量.

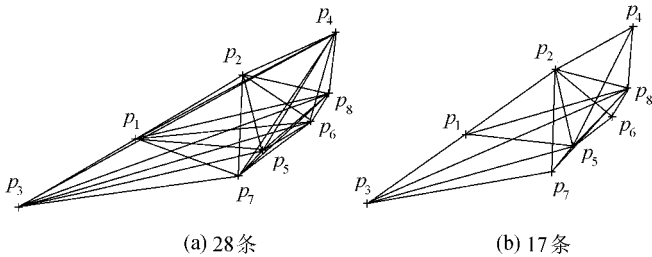


图 1 独立基线组成

Fig.1 Graphics of independent baselines

表 1 不同基线数对应控制网点灵敏度椭圆半轴

Table 1 Sensitivity ellipse semiaxes of control network points for different numbers of baselines mm						
点号	28 条独立基线			17 条独立基线		
	E_i	F_i	G_i	E_i	F_i	G_i
2	0.7730	0.0930	0.1422	1.0739	0.1323	0.1946
3	0.9547	0.1128	0.1910	1.1677	0.1385	0.2338
4	0.9278	0.1105	0.1747	1.2593	0.1534	0.2365
5	0.7452	0.0858	0.1389	1.3569	0.1570	0.2518
6	0.7219	0.0819	0.1386	2.1517	0.3741	0.6004
7	0.7877	0.0910	0.1504	1.4158	0.1619	0.2781
8	0.7358	0.0873	0.1384	3.3693	0.9288	1.3967

以 17 条独立基线为例,采用如图 3 所示的 4 种连接形式,相同的基准平差后,网点的精度与灵敏度椭圆分量见图 4 与表 2.

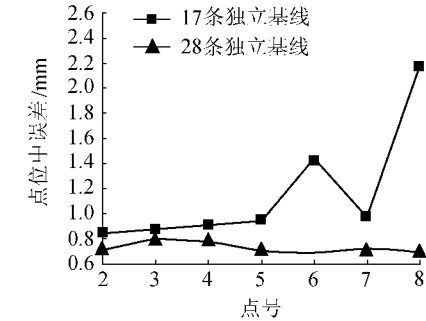


图 2 28 条独立基线与 17 条独立基线点位中误差比较

Fig.2 Comparison of the mean square error of points of 28 independent baselines with 17 independent baselines

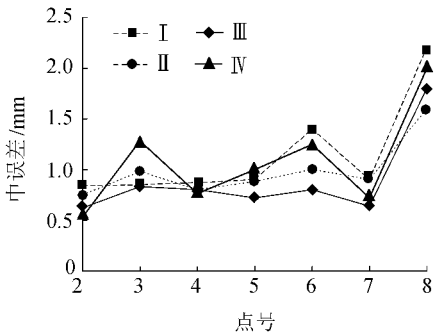


图 4 4 种连接形式对应的点位误差

Fig.4 Point errors of four kinds of connection forms

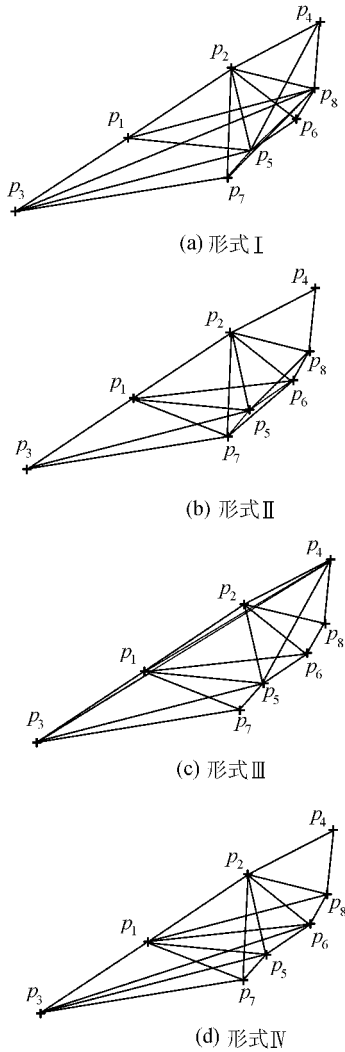


图 3 17 条独立基线连接形式

Fig.3 Different connection forms of 17 independent baselines

上述计算表明,不同的连接方式,形成的网矩阵不同,特别反映了监测变形的灵敏度不同.

表 2 不同连接形式对应控制网点灵敏度椭圆半轴

Table 2 Sensitivity ellipse semiaxes of control network points for different connection forms												mm
椭圆半轴	I			II			III			IV		
	E_i	F_i	G_i	E_i	F_i	G_i	E_i	F_i	G_i	E_i	F_i	G_i
p ₂	1.073 9	0.132 3	0.194 6	1.227 7	0.175 6	0.214 5	1.175 4	0.093 3	0.166 4	1.074 8	0.131 9	0.185 6
p ₃	1.167 7	0.138 5	0.233 8	1.365 5	0.332 8	0.163 9	1.084 5	0.119 9	0.244 8	1.063 7	0.164 8	0.266 7
p ₄	1.259 3	0.153 4	0.236 5	1.397 8	0.243 4	0.369 9	1.125 4	0.255 4	0.243 8	1.326 5	0.177 8	0.242 5
p ₅	1.356 9	0.157 0	0.251 8	1.864 2	0.189 9	0.284 7	1.326 5	0.154 5	0.214 2	1.226 9	0.175 4	0.352 4
p ₆	2.151 7	0.374 1	0.600 4	2.307 7	0.476 5	0.548 8	1.988 7	0.352 9	0.615 2	1.997 8	0.421 4	0.714 5
p ₇	1.415 8	0.161 9	0.278 1	1.516 4	0.224 4	0.235 5	1.255 8	0.234 1	0.265 9	1.552 4	0.234 6	0.265 8
p ₈	3.369 3	0.928 8	1.396 7	3.100 0	1.025 5	1.465 2	2.116 9	0.865 7	1.287 8	2.654 8	0.876 3	1.526 6

3 结 论

为了满足滑坡、高边坡等各种自然灾害监测的需要,需要引进与研究各种先进的技术与方法。GPS 作为空间技术的代表之一,正在安全、灾害监测领域发挥越来越大的作用。GPS 变形监测网作为监测变形的方式之一,研究其影响因素具有重要的意义。GPS 变形监测网相对于常规控制网而言由于测量原理、观测量不同,具有自己的优点与特点,从而使衡量控制网质量的标准表达各不相同。GPS 变形监测网的网形结构是影响质量的主要因素之一,深入研究基线数与连接方式的优化,对提高 GPS 监测网的质量有重要作用。

参考文献:

[1] 丁继新,尚彦军,杨志法,等.天津市市区地面沉降的 GPS 监测分析[J].工程勘察,2004(6):41-44.

[2] 隋立芬,徐杨斌.高精度 GPS 复测网的形变基准解释[J].测绘学院学报,2001,18(2):36-89.

[3] 许斌,何秀凤,岳建平,等.GPS 形变监测技术在天津海河水库坝区的监测网试验[J].水利水电科技进展,2004,24(5):24-26.

[4] EVEN-TZUR, G. Optimal design of GPS based geodetic networks for monitoring deformation[D]. Hebrew: Department of Civil Engineering, 1997.

[5] JANSSEN V. Optimising the number of double-differenced observations for GPS networks in support of deformation monitoring applications [J]. GPS Solutions, 2001, 4(3):41-46.

[6] 张华海,李景芝,余学祥,等.GPS 形变监测网的数据处理模型[J].中国矿业大学学报,2000,29(4):423-427.

[7] 张华海,王爱生.GPS 变形监测网的动态数据处理[J].解放军测绘学院学报,1999,16(1):13-16.

[8] ADLER R, PELZER H, FOPPE K, et al. Geodetic monitoring of recent crustal activity along the Dead Sea Jordan Rift[R]. Haifa: Perelmuter Workshop on Dynamic Deformation Models, 1994.

[9] 李征航,刘志超,王泽民.利用 GPS 定位技术进行大坝变形监测的研究[J].武汉水利电力大学学报,2001,29(6):78-82.

[10] 许斌,何秀凤,岳建平,等.GPS 形变监测技术在天津海河水库坝区的监测网的试验[J].水利水电科技进展,2004,24(5):24-26.

Effect of GPS deformation monitoring network structure
on quality of control network

YUE Dong-jie, LI Hong-xiang

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to better understand the relationship between the structure and quality of a GPS control network in terms of the four quality standards of precision, reliability, sensitivity and cost, the effects of network structure on precision and sensitivity of a GPS deformation monitoring network were analyzed according to the characteristics of the GPS network. Using a high slope monitoring network as an example, the results show that the quality changes with the number of baselines, and that if the number of baselines is the same, the quality changes with the connection type.

Key words: GPS; deformation monitoring network; network structure