GPS 城区地籍控制网的精度分析及高程拟合研究

高　伟[1,2],齐建国[2]
(1. 武汉大学测绘学院,武汉　430079;2. 山东农业大学信息科学与工程学院,泰安　271018)

摘要:对某县城 GPS 城区地籍控制网进行了数据处理和精度分析,采用二次多项式曲面拟合函数,获得测区的高程异常模型,把 GPS 控制点的大地高转换为正常高,最后拟合点和检核点的精度达到了 4 等水准测量的精度要求,满足了地籍测量工作的需要。

关键词:GPS;地籍控制网;精度分析;高程拟合
中图分类号:TP 75:F 301.2　文献标识码:A　　文章编号:1001-070X(2003)04-0042-04

0　引言

GPS 卫星定位技术可以快速、准确地确定点的三维空间位置,并且具有布网迅速灵活、观测自动化程度高、观测周期短、不受气候影响以及测站间无需通视等优点,越来越受到广泛应用[1]。在城区进行地籍测量,用全站仪进行常规导线测量和水准测量,由于受到通视条件差、人为因素和其它因素干扰以及工作强度大等影响,现在首级控制测量更多的是采用 GPS 技术进行。通过 GPS 观测可以在 WGS-84 坐标系下计算控制点的三维空间坐标,并且与已知的控制点(具有北京 54 坐标或者西安 80 坐标)进行联测,联合平差计算出控制点在 54 坐标系或者 80 坐标系里的二维平面坐标,便于进行地籍碎部测量和地籍调查工作。对于地籍测量来说,不像地形测量对高程分量的要求精度那样高,可以采用 3 等或者 4 等水准测量联测部分控制点,通过拟合转换的方法获得满足地籍测量规范和精度要求的高程值[2,3],这样可以减轻水准测量的难度和强度,减少野外作业时间,降低观测费用,是非常可行的措施。

1　GPS 城区地籍控制网建立和数据采集

为了进行地籍调查和土地管理,在山东省某县城区布设了 GPS 控制网,该网由 16 个 GPS 控制点组成(图 1),其中 1 和 2 点为已知控制点,分别为具有北京 54 坐标的一等点和三等点。除了 1 和 2 点稍远外(其中边长 2 至 10 点超过 5 km,2 至 3 点、1 至 5 点、1 点至 9 点和 2 至 14 点在 4 km 以上),其它点之间的距离都小于 2 km,平均边长不到 2 km。

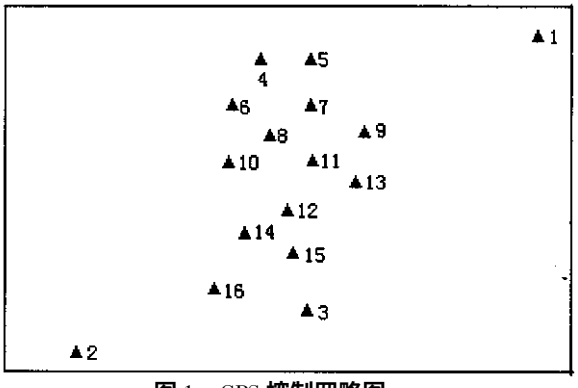

图 1　GPS 控制网略图

图 1 中 GPS 控制点,在点位选择时,应按照地籍测量规范要求选择在地质条件好、土质坚硬的地方,并且点的上方视野开阔,点位四周高度角 10°以上无遮挡物,便于 GPS 信号接收,同时也便于加密控制网,进行碎部测量,然后埋桩建立 GPS 控制点标志。

数据采集以 1 和 2 点为基准站,采用静态观测,使用双频接收机,每个点观测 1 个时段,时段长度为 30 min,卫星的截止高度角为 15°,采样间隔为 15s。

与此同时,进行了联测。由于许多控制点被布设在楼顶或者水准不方便到达的地方,所以从一个已知的 2 等水准点上,用 3 等水准联测了容易进行水准测量的 7 个点(3、5、6、8、9、13 和 14 点),便于以

收稿日期:2003-04-30;修订日期:2003-06-12
万方数据

后用高程拟合转换方法解算其余控制点的正常高。

2　GPS 控制网的数据处理和精度分析

基线解算采用 LEICA 公司的随机软件 SKI 软件包,控制网平差采用武汉测绘科技大学研制的 PowerADJ,先进行三维无约束平差,再进行二维约束平差,获得 54 坐标系里的坐标。

2.1　三维无约束平差

三维无约束平差是为了进行粗差检测,消除劣质基线观测值,生成三维无约束平差结果文件,并形成高程转换程序所需要的数据文件。表 1 给出了 GPS 基线向量观测值残差分布统计。

表 1　基线向量残差分布统计

区间	0 ~ 5/mm	5 ~ 10/mm	最大值/mm
DX/个	39	0	4
DY/个	32	7	9
DZ/个	33	6	9

坐标平差值是各个点在 WGS - 84 中的坐标,其平差后的中误差统计见表 2。

表 2　坐标中误差统计

中误差	*Mx*/mm	*My*/mm	*Mz*/mm
最大值/mm	5.1	5.2	5.2
平均值/mm	3.8	4.4	4.1

平差后基线边长的相对精度见表 3。

表 3　基线边长的相对中误差统计

区间	1∶40 万 ~ 1∶50 万	1∶50 万 ~ 1∶100 万	1∶100 万 ~ 1∶150 万	≤1∶150 万
个数	12	20	4	3

从上面统计中可以看出,三维无约束平差后的基线和点位精度可以满足地籍控制测量规范要求,其中最大的坐标分量误差不超过 6 mm,最弱边长的相对精度不到 1/40 万。

2.2　二维约束平差

二维约束平差在 1954 年北京坐标系里进行,中央经线为 117°,边长归算到参考椭球面,再投影到高斯平面上,起算点采用 1 和 2 点。平差后获得每个点在 54 北京坐标系里的坐标值,坐标中误差统计见表 4。

万方数据

表 4　坐标中误差统计

中误差	点位中误差/mm	方向中误差/(″)	距离中误差/mm
最优	5.6	0.19	2.1
最差	7.0	0.70	3.7

GPS 二维约束平差后,基线改正数不大,相对精度满足规范要求,点位精度和方位角精度也很高。

3　GPS 高程的拟合转换

3.1　高程拟合模型选择

GPS 观测计算直接获得的是大地高 H,而碎部测量需要的是正常高 h,两者之间相差了一个高程异常值 ξ

$$H = h + \xi \tag{1}$$

高程异常可以通过综合应用水准测量和重力测量资料确定。一般情况下,通过高程拟合转换的方法就能满足一定工程建设的精度需要[1]。

目前,用于拟合转换的数学模型很多,如多项式曲线、三次样条、二次多项式曲面和 Hardy 多面函数等。不同的模型有不同的适应区域和地形情况。

根据 GPS 测量某县城区实际地形比较平坦的情况 ,参考全国高程异常图中高程异常的分布,并经过反复试算和比较,选择了二次多项式曲面拟合法,更能逼真的拟合高程异常变化,其精度符合设计和规范要求。

3.2　二次多项式曲面拟合法

通常采用一个二次曲面来逼近小区域的似大地水准面,用二次曲面函数对高程异常进行曲面拟合,对于 GPS 水准联测点 P_k,拟合模型为

$$\xi_k = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta x_k + \alpha_2 \Delta y_k + \alpha_3 \Delta x_k^2 + \alpha_4 \Delta y_k^2 + \alpha_5 \Delta x_k \cdot \Delta y_k + \varepsilon_k \tag{2}$$

式中,$\Delta x_k = x_k - x_0$,$\Delta y_k = y_k - y_0$;(x_0, y_0) 是选取的基准点坐标,一般取为重心坐标;(x_k, y_k) 是 P_k 点的平面坐标,也可以是大地坐标,ε_k 为拟合残差。如果该区域内有 6 个 GPS 水准联测点,可通过解方程组,解出 6 个参数值$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \cdots, \alpha_5)$。如果有 6 个以上的 *GPS* 水准联测点,可按最小二乘法求解拟合的未知参数$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2 \cdots, \alpha_5)$:

$$\alpha = (A^{\mathrm{T}} A)^{-1} A^{\mathrm{T}} \xi \tag{3}$$

式中,$\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \cdots, \alpha_5)^{\mathrm{T}}$,$\xi = (\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_N)^{\mathrm{T}}$ 此处 $N \geqslant 6$。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta x_1 & \Delta y_1 & \Delta x_1^2 & \Delta y_1^2 & \Delta x_1 \Delta y_1 \\ 1 & \Delta x_1 & \Delta y_1 & \Delta x_1^2 & \Delta y_1^2 & \Delta x_1 \Delta y_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta x_N & \Delta y_N & \Delta x_N^2 & \Delta y_N^2 & \Delta x_N \Delta y_N \end{bmatrix}$$

可以看到,在采用二次曲面拟合时,至少应有 6 个 GPS 水准联测点。

由(3)式求得拟合系数后,任意点 P_i 的高程异常为

$$\xi_i = \alpha_0 + \alpha_1 \Delta x_i + \alpha_2 \Delta y_i + \alpha_3 \Delta x_i^2 + \alpha_4 \Delta y_i^2 + \alpha_5 \Delta x_i \cdot \Delta y_i \quad (4)$$

3.3 拟合精度评定

拟合转换后,对拟合函数的拟合精度评定可按下式

$$m_{拟} = \pm \left([\varepsilon_i \varepsilon_i] / n \right)^{1/2}, i = 1, 2, \cdots, n \quad (5)$$

计算该区域 GPS 水准联测点的拟合残差有无异常值存在。

式中,ε_i 为参加拟合的 GPS 水准联测点的拟合残差,n 为参与的拟合点个数。

按下式

$$m_{检} = \pm \left([\varepsilon_j \varepsilon_j] / m \right)^{1/2}, i = 1, 2, \cdots, m \quad (6)$$

计算检核点(未参与拟合的 GPS 水准联测点)的拟合中误差。

式中,ε_j 为检核点的 GPS 水准高程异常与拟合后计算出的高程异常之差,m 为检核点个数。

按下式

$$\varepsilon_{限} = \pm m_0 \sqrt{L} \quad (7)$$

计算水准测量的限差,比较每个检核点的 ε_j 是否超限,即 $\varepsilon_j \geqslant \varepsilon_{限}$ 或者 $\varepsilon_j \leqslant \varepsilon_{限}$。

式中,L 是检核点到最近的拟合点的距离,单位为 km;m_0 为规范规定的确定限差的单位中误差,可根据所要求的水准测量等级赋值,如该测区要求达到 4 等水准测量的精度要求,m_0 取 20 mm。

4 GPS 地籍控制点高程拟合和精度分析

根据实际情况和水准联测点的分布形状,选取同时具有正常高和大地高的 8 个点(分别为 1、2、3、5、6、13、14 和 15 点)作为拟合点,采用上述二次多项式曲面拟合模型,对整个测区的高程异常进行拟合,拟合后各拟合点的拟合残差统计见表 5。

需要说明的是,通过对相关文献和实际算例进行分析,对于二次多项式曲面至少需要 6 个拟合点,拟合点个数达到一定数量后,如若再增加个数,拟合精度的提高非常小。因此,仅靠增加拟合点个数来提高拟合后的精度,效率并不高。在高程拟合时,只要拟合点个数能满足拟合精度要求,便于拟合即可。

万方数据

表 5 拟合点的拟合残差统计

拟合点	1	2	3	5	6	13	14	15	$m_{拟}$
拟合残差/mm	2.1	−2.7	1.2	−0.5	0.2	0.7	−0.1	−1.1	±1.4

为了比较其拟合精度,将 GPS 水准联测点 8、9 和 16 点作为检核点,拟合后检核点的残差中误差的结果统计见表 6。

表 6 检核点的残差中误差统计

检核点	8	9	16	$m_{检}$
L/km	1.03	1.95	1.72	
检核残差/mm	4.3	−5.2	4.9	±4.8
四等水准限差/mm	±20.3	±27.9	±26.2	

从表 5 和表 6 中可以看出,拟合点和检核点的残差均远远小于规范所要求的限差,$m_{拟}$ 和 $m_{检}$ 分别为:±1.4 mm 和 ±4.8 mm,已经达到了 4 等水准测量的精度要求。这样,拟合后整个测区内的高程异常就可以用二次多项式曲面确定了,其它的 GPS 控制点,利用平面坐标或者大地坐标,就可以在所拟合出的二次多项式曲面上进行内插,求得相应的高程异常值,使用公式(1)就可以将大地高转换成正常高。

5 结论

通过对某县城 GPS 城区地籍控制网的数据处理和精度分析表明:

(1)三维无约束平差后的基线和点位精度满足了地籍控制测量规范要求,该测区内最大坐标分量中误差不超过 6 mm,最弱边长相对精度不到 1/40 万。

(2)GPS 二维约束平差后,相对精度满足规范要求,点位精度和方位角精度也很高。如果在基线解算上,能采用高精度的科研软件,GPS 控制点的三维坐标精度会更高。

(3)由于地籍测量要求的特殊性,观测中对部分 GPS 控制点进行了 3 等水准联测,通过研究和分析,采用了二次多项式曲面拟合模型,对测区似大地水准面进行了拟合,得到了高程异常模型,拟合点和检核点的精度均远远高于 4 等水准测量的精度要求。

研究表明,采用高程拟合方法,加快了地籍测量的速度,减少了测量费用,降低了工作强度。

参考文献

[1] 徐绍铨,张华海,杨志强,等. GPS 测量原理及应用[M]. 武汉：武汉测绘科技大学出版社,1998.

[2] 李征航,包满泰,叶乐安. 利用 GPS 测量和水准精确确定局部地区似大地水准面[J]. 测绘通报,1994(6)：7 – 12.

[3] 徐绍铨. GPS 水准的实验与研究[J]. 工程勘察,1994(3)：45 – 48.

[4] 高 伟,卢秀山. GPS 高程区域似大地水准面的分区拟合与平滑连接[J]. 测绘通报,2000(7)：11 – 16.

A PRECISION ANALYSIS OF GPS CADASTRATION CONTROLLING NETWORK AND A STUDY OF HEIGHT FITTING

GAO Wei[1,2], QI Jian – guo[2]

(1. *School of Geodesy and Geomatics*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430079, *China*；2. *School of Information Science and Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Tai 'an* 271018, *China*)

Abstract: In this paper, data processing and precision analysis of GPS urban cadastration controlling network were carried out. In order to transform the geoid height into the normal height, the authors employed the dual polynomial curved surface function and constructed a height anomaly model for local area surveying. The final precisions of fitting points and checking points can attain the Grade – 4 precision requirement and meet the needs of the cadastration work.

Key words: GPS；Cadastration controlling network；Precision analysis；Height fitting

第一作者简介：高 伟(1968 –),男,讲师,武汉大学在读博士,主要从事 GPS 定位技术的研究与应用。

(责任编辑：周树英)

(上接第 41 页)

THE APPLICATION OF REMOTE SENSING TECHNIQUE TO MONITORING AND EVALUATING WATER POLLUTION IN THE SHIYANG RIVER VALLEY

QIAO Ping – lin[1,2], ZHANG Ji – xian[2], LIN Zong – jian[2]

(1. *College of Geoscience*, *Shandong University of Science and Technology*, *Taian* 271019, *China*；2. *Chinese Academy of Surveying & Mapping*, *Beijing* 100039, *China*)

Abstract: Due to the fast social and economic development in its valley, the Shiyang River has experienced tremendous environmental changes, especially in the past decade. It is rather difficult to detect the long – period and complex changes of water quality merely by means of traditional measurements. In this paper, the remote sensing technology was used to monitor and evaluate the water quality in the Shiyang river. Combining the TM data with the pollutant in the water, the authors developed an inversion model, with which one can easily evaluate the content of pollution in the water by using the TM data. The historical Landsat (TM) data obtained in four consecutive years were employed to extract the changing information of the river water. The results show an alarming fast increasing trend of pollution in the river. The method was used to extract the water pollution information in the river, and the results show its good performance with a monitoring accuracy of 84%, suggesting a great potential of this method in this field .

Key words: Remote sensing monitor and evaluate；Shiyang river. Valley；TM image；Water quality

第一作者简介：乔平林(1965 –),男,副教授,山东科技大学博士生,中国测绘科学研究院客座博士生,研究方向为摄影测量与遥感,已发表论文 28 篇。

万方数据

(责任编辑：肖继春)