

GPS 和电子水准仪在烟台控制网中的应用

王德保, 黄军, 董传胜, 田纪飞, 汤玉兵

(山东省国土测绘院, 山东 济南 250013)

摘要 采用全球卫星定位系统 GPS 施测了三等控制网, 作为首级平面控制网。为提高观测速度、精度和可靠性, 采用 DL-102C 电子水准仪建立了三等水准网作为首级高程控制网, 用三等水准联测过的 GPS 控制点作为起算点进行 GPS 高程拟合。三等 GPS 网的总点数 57 个, 联测国家二等三角点 4 个, 利用旧点 9 个, 新布设 GPS 控制点 44 个, 平均边长 2.46 km, 控制面积约 350 km², 在 1980 西安坐标系下进行平差, 同时在烟台城市坐标系下平差计算, 使开发区与城市建成区的控制网能够紧密地联系起来。三等水准网的总点数为 41 个, 起算点为 2 个国家一等水准点, 往返测水准路线总长为 203.4 km。平面精度和高程拟合精度均达到了国家规定的指标要求。

关键词 控制网; GPS; 数据处理; 高程拟合; 精度; 电子水准仪; 水准网

中图分类号 P228.5; P224.1

文献标识码 A

1 引言

烟台经济技术开发区位于胶东半岛东北部, 面积约 200 km²。受开发区委托, 由山东省第一测绘院建立高精度工程控制网, 施测了三等 GPS 控制网作为首级平面控制网, 因面积大, 且多为山地、丘陵地, 为提高观测速度和可靠性, 采用 DL-102C 电子水准仪建立了三等水准网作为首级高程控制网, 用三等水准联测过的 GPS 控制点(GPS 水准点)作为 GPS 高程拟合的起算点。

测区中央位于 121°07' 子午线附近, 成图范围地势有平地、丘陵地、山地和高山地, 平均高程为 150 m 左右, 大地水准面相对于 1980 西安坐标系参考椭球面的高度约为 9.6 m。按常规的 3°带投影(中央子午线为 120°), 边长投影到高斯平面的长度变形值大于 2.5 cm/km 的规定。故采用任意分带, 中央经线为 121°30', 边长归化到 50 m 城市平均高程面, 再投影到高斯平面, 参考椭球采用 1975 年国际椭球。采用此方法可以满足 CJJ8-99《城市测量规范》投影长度变形值小于 2.5 cm/km 的要求, 又与烟台市城市控制网的分带和投影面选择一致。

三等 GPS 网的总点数为 57 个, 联测国家二等三角点 4 个, 利用旧点 9 个, 新布设 GPS 控制点 44 个。

该网最长边 5.28 km, 最短边 1.24 km, 平均边长 2.46 km, 控制面积约 350 km²。该网在 1980 西安坐标系下进行平差计算, 同时在烟台市城市坐标系下进行平差计算, 使开发区与烟台市建成区的控制网能够紧密地联系起来。

采用编号分别为 0220073425, 0220076105, 0220076310 的 3 台 Trimble 4600ls GPS 接收机进行快速静态定位, 观测时间 ≥ 60 min。PDOP ≤ 6, GDOP ≤ 8, 平均重复设站数为 2.3。数据处理采用原武汉测绘科技大学《Lip GPS 基线解算软件包》和《Poweradj (ver3.0) 数据处理综合软件包》。GPS 控制网观测略图和对起算点的精度检测略图(图 1)。

三等水准网的总点数为 41 个, 包括 2 个起算点(国家一等水准点沙青 45 和沙青 48), 29 个联测三等 GPS 点, 9 个一级导线点和 1 个固定点; 单向水准路线总长为 101.7 km, 往返测水准路线总长为 203.4 km。三等水准网观测略图详见图 2。

2 三等 GPS 控制网对起算点的精度检核

对起算点的检核联测略图详见图 1 的粗长实线部分。用 GPS 对 4 个国家二等三角点(Ⅱ顾家围子山点号为 100, Ⅱ九目山点号为 101, Ⅱ炮山点号为 102, Ⅱ磁山点号为 104)进行内部符合精度的检测。

*收稿日期 2003-11-28; 修订日期 2004-07-02; 编辑 王先起

作者简介: 王德保(1966-), 男, 山东荣成人, 高级工程师, 主要从事 GPS 和 RS 的应用研究工作。

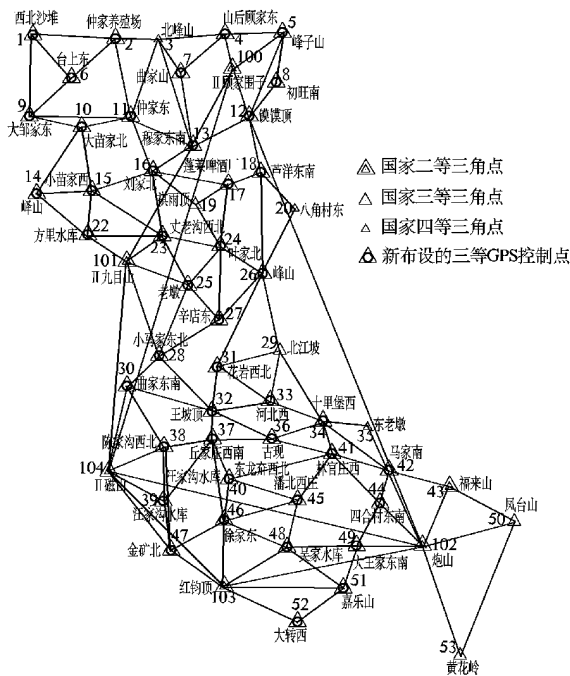


图1 烟台市开发区三等 GPS 控制网观测略图

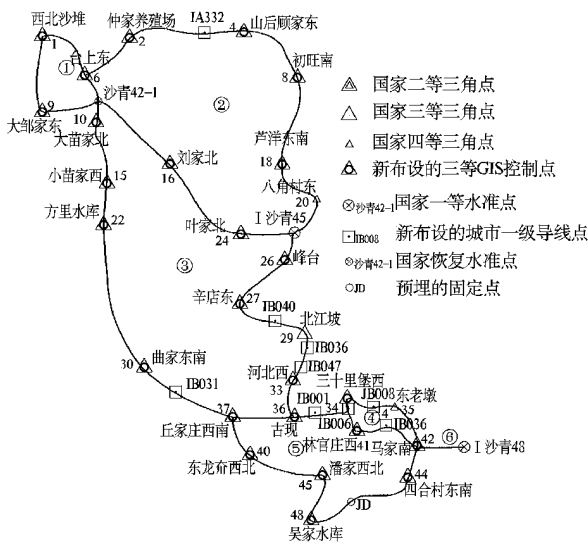


图2 烟台市开发区三等水准网观测略图

固定 100 号点、101 号点、102 号点、104 号点中任意一点平差后的精度统计情况详见表 1。

从表 1 中可以看出 101 号点与 102 号点的点位精度较低,100 号点与 104 号点的内符合精度最高,故选定 100 号点与 104 号点作为全网平差的起算点。

表 1 起算点的精度检测统计

基线边号	理论边长 S1(m)	实测边长 S2(m)	差值 ΔS(m)	相对精度 ΔS/S1
100 - 104	15417.7176	15417.7231	0.0055	1/2803221
100 - 102	18688.2743	18688.0643	0.2113	1/88444
100 - 101	8168.6780	8168.7134	0.0354	1/230754
101 - 104	7636.2675	7636.5426	0.2751	1/27758

3 三等 GPS 控制网基线解算精度统计

3.1 同步环精度统计

烟台开发区三等 GPS 控制网共构成 42 个同步环,同步环精度统计详见表 2。

表 2 同步环精度统计

误差区间(ppm)	0~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.5	0.5~
个数,百分比	37 88.1%	2 4.8%	2 4.8%	1 2.3%	0 0%

最小同步环闭合差为 0 ppm,环号为 44 - 49 - 102 - 44,最大同步环闭合差为 0.446 ppm,环号为 8 - 12 - 5 - 8,远小于 5 ppm 的精度要求^[1]。

3.2 异步环精度统计

烟台开发区三等 GPS 控制网共构成 30 个异步环,异步环精度统计详见表 3。

表 3 异步环精度统计

误差区间(ppm)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~
个数,百分比	8 26.7%	17 56.7%	5 16.6%	0 0%	0 0%

最小闭合差为 0 ppm,最大闭合差为 2.897 ppm,环号为 101-23-25-101,该环平均边长为 S=2 098.0148 m,绝对闭合差允许值 ± 86.96 mm,相对闭合差允许值为 13.82ppm。

3.3 复测基线精度统计

烟台开发区三等 GPS 控制网共构成 9 条复测基线,复测基线精度详见表 4。

表 4 复测基线精度统计

误差区间(ppm)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~
个数,百分比	7 77.8%	1 11.1%	0 0%	1 11.1%	0 0%

最大复测基线较差为 -3.064 ppm,基线号为 17 - 19,该基线边长 S=1 438.1107 m,较差允许值为 ± 34.84 mm,相对闭合差允许值为 24.22 ppm^[1]。

4 三维无约束平差

该网的总基线数为 128 条,基线向量改正数详见表 5,基线相对精度统计详见表 6,点位中误差统计表详见表 7。

最弱边为 34-41,其相对精度为 1/243902,远远小于 1/80000,完全满足精度要求。

在 WGS-84 坐标系下的三维无约束平差的最弱点为 20 号点,其点位中误差为 1.82 cm,最优点点号为 38 号点,其点位中误差为 0.50 cm。

表 5 基线向量改正数精度统计

基线向量改正数	误差区间 (cm)	0~1	1~2	2~3	3~4
		个数,百分比	个数,百分比	个数,百分比	个数,百分比
V _x	个数,百分比	125 97.66%	3 2.34%	0 0%	0 0%
V _y	个数,百分比	126 98.44%	2 1.56%	0 0%	0 0%
V _z	个数,百分比	126 98.44%	2 1.56%	0 0%	0 0%

表 6 基线相对精度统计

误差区间	1/10 万 ~ 1/20 万	1/20 万 ~ 1/50 万	1/50 万 ~
个数,百分比	0 0%	11 8.7%	117 91.3%

表 7 三维无约束平差点位中误差统计表

中误差类别	X 中误差 M _x	Y 中误差 M _y	Z 中误差 M _z	点位中误差 M _p
最大值 (cm)	0.82	1.14	1.15	1.82
点号	20	20	20	20

5 二维约束平差

5.1 平差方案

方案 1 以Ⅲ顾家围子山(点号为 100)、Ⅱ磁山(点号为 104)为起算点,采用 128 条基线成果,在 1980 西安坐标系下进行二维约束平差计算。

方案 2 以Ⅱ凤台山(点号为 50)、Ⅱ黄花岭(点号为 53)点为起算点,在烟台市城市坐标系下进行二维约束平差计算。

5.2 二维约束平差后各种精度统计详见表 8

二维约束平差结果后,各种精度统计详见表示。

表 8 二维约束平差后各种精度统计表

分类统计	方案 1	方案 2
单位权中误差(±cm)	1.00	1.00
最弱点点位中误差(±cm)	1.17	1.35
最弱点号	20	20
基线相对中误差 1/20 万 ~ 1/50 万	19 个,占 14.8%	18 个,占 14.1%
基线相对中误差 < 1/50 万	109 个,占 85.2%	110 个,占 85.9%
最弱边相对中误差	1/263948	1/264272
最弱边号	20~26	20~26
方向中误差最大值(±")	1.16	1.16
方向中误差最大基线边	18~20	18~20
距离中误差最大值(±cm)	1.00	1.00
距离中误差最大基线边	20~26	20~26

5.3 分析

将该 GPS 控制网在烟台市城市坐标系中的平差成果与以前施测的 GPS 控制网成果进行比较,重合点的坐标差值 96% 都在 ±1 cm 之内,最大差值的绝对值为 2.7 cm。这说明烟台开发区三等 GPS 控制网成果精度很高,完全可以与开发区旧区及烟台市城区的控制网高精度、紧密地联系起来,并可使原有规划、地下管线、市政工程等测绘成果得到延续利用。

6 高程拟合

未联测三等水准的 GPS 点求其高程,以联测三等水准的 GPS 点作为固定点,利用 GPS 点的大地高进行高程拟合求定。采用 7 参数模型,利用已知 GPS 水准点求得内部符合精度、协方差阵,并对所确立的模型进行 T 检验,计算模型系数的 GPS 点要均匀分布在控制网的周边和中部。计算模型确立后,利用 GPS 水准点进行外部检验,根据所有检验点的模型误差计算出外部符合精度。为减少粗差对高程拟合结果产生的影响,根据所施测的三等 GPS 网选择 3 种拟合方案,采用曲面拟合法进行拟合,从中找出一种最优拟合方案。

方案 1 选取 1、4、15、20、29、30、36、42、48 作为高程拟合的起算点,选取 16、26、33、37、41 作为检核点。

方案 2 选取 1、2、4、8、18、22、27、30、42、48 作为高程拟合的起算点,选取 16、26、33、37、41 作为检核点。

方案 3 选取 1、4、15、18、27、30、36、42、48 作为高程拟合的起算点,选取 16、26、33、37、41 作为检核点。

所采用的拟合方案对已知 GPS 水准点的拟合精度检核,详见表 9。

表 9 拟合方案对已知点的拟合精度检核统计

方案	起算点数	内部符合 精度(±cm)	外部符合 精度(±cm)	检核点数	检核点属性	拟合高程与已知高程之差值	
						最小值(cm)	最大值(cm)
1	9	0.55	1.1	5	独立	0.4(33 号点)	1.9(41 号点)
2	9	1.49	1.2	5	独立	0.0(33 号点)	2.0(41 号点)
3	9	0.77	1.1	5	独立	0.3(33 号点)	1.8(41 号点)

综合考虑内部符合精度、外部符合精度、拟合高程与已知高程之差值 选定各项精度指标均较高的方案 1 为高程拟合的最优方案。

7 三等水准网

7.1 网形与施测

烟台开发区三等水准网采用 TOPCON DL-102C 电子数字水准仪进行施测,施测前按照 GB12898-91 《国家三、四等水准测量规范》的要求对 TOPCON DL-102C 电子水准仪和玻璃纤维标尺均进行了必要项目的检验,各项精度指标均符合要求。

烟台开发区三等水准网单向路线总长 101.7 km,往返测 203.4 km,联测了 5"导线点 9 个、三等 GPS 控制点 29 个、固定点 1 个、国家一等水准点 2 个,共计 41 点 构成 2 个起算点 5 个独立闭合环和 1 条独立附合水准路线的水准网。

7.2 数据处理及精度统计

(1)对每个测段的观测高差进行了尺长改正 玻璃纤维尺每米真长改正数为 -0.072 mm。

(2)由于测段纬差较小、所联测的测段平均高程并不大。以平均高程最大的“方里水库—小苗家西”为例 $A=1485, H=70.63 \text{ m}, \Delta\Phi=0.871$ 正高改正数 $\epsilon = -AH\Delta\Phi = -0.09 \text{ mm} < \pm 0.1 \text{ mm}$ 。因所有测段 $\epsilon < \pm 0.1 \text{ mm}$ 故该水准网不必进行测段高差的正常水准面不平行性改正^[2]。

(3)往返测精度统计及每千米水准测量偶然中误差详见表 10。

表 10 往返测精度统计及每千米水准测量偶然中误差统计

误差区间	0~1/3 限差	1/3~1/2 限差	1/2~2/3 限差	2/3 限差 —限差	总个数
测段个数	39	6	0	0	45
百分比	86.67%	13.33%	0%	0%	100.0%

$$M_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{1}{4n} \left[\frac{\Delta\Delta}{R} \right] \left[\frac{\Delta\Delta}{R} \right]} = 428.85$$

式中 $n=45, M_{\Delta} = \pm 1.54 \text{ mm}$ 。

每千米水准测量偶然中误差 $M_{\Delta} < \pm 3 \text{ mm}$ 符合规范要求^[2]。

(4)闭合环及附合水准路线精度统计 按环线、路线闭合差 W 计算的水准测量全中误差 M_W ,详见表 11^[2]。

表 11 闭合环及附合水准路线精度统计

环路号、 路线号	高程闭合 差 W(mm)	环路总长 F(km)	陷差(mm)	WW/F
1	-5.1000	11.049	39.89	2.3541
2	6.6000	31.392	67.23	1.3876
3	-16.7000	41.010	76.85	6.8005
4	-5.2000	9.316	36.63	2.9025
5	-11.6000	24.721	59.66	5.4431
(附合 水准路线)	2.8000	22.458	56.87	0.3491
∑[WW/F]				19.2396

$$M_W = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \left[\frac{WW}{F} \right]} = \pm \sqrt{\frac{1}{6} \times 19.2396} = \pm 1.79 \text{ mm}$$

环线、路线闭合差小于 1/3 限差的有 6 个,占 100% 按环线、路线闭合差 W 计算的水准测量全中误差 $M_W = \pm 1.79 \text{ mm}, M_W < \pm 6 \text{ mm}$ 符合规范要求。

(5)用武汉测绘科技大学吴俊昶教授编写的《水准网间接平差程序》进行严密平差计算,平差后水准测量单位权中误差 $M_W = \pm 2.5 \text{ mm/km} < \pm 6 \text{ mm}$,与用环线闭合差 W 计算的水准测量全中误差基本吻合 最弱点高程中误差为 $\pm 6.73 \text{ mm} < \pm 20 \text{ mm}$,最弱点为“西北沙滩”,各项限差均符合规范要求^[2]。

8 结束语

首级 GPS 控制网对高等级起算点的精度检测非常重要,采用相对精度较高的起算点,而舍去精度较低的起算点,可显著提高二维约束平差的整体精度。

采用一定密度和分布均匀的三等水准联测过的

GPS 点作为起算点进行高程拟合,可以达到低于四等水准而优于等外水准的精度,本次高程拟合的精度几乎达到四等水准的精度。

采用多种拟合方案试算后,要综合考虑对已知点的各种精度检核和对所求点的精度检核,使其误差尽量达到最小。一般不应让所有已知点都参与计算,而是舍掉少数已知点后考察拟合后的高程对已知点和未知点的精度检验能否都达到最优,如果各项误差均为最小,那肯定就是最优方案,此时未被选中的已知点不要再当作已知点参与计算,以免降低已知点的内符精度和模型系数的精度,从而影响拟合效果。

DL-102C 具有读数客观、速度快、精度较高、效率较高的特点。烟台开发区三等水准网每千米水准测量偶然中误差很小,整网平差后全中误差也很小,介于 $1/3$ 限差— $1/2$ 限差之间,说明测段高差中数的精度很

高,2 个国家二等水准点之间的内符精度也很高。从各项误差分析可以看出,DL-102C 电子水准仪完全可以满足三、四等水准测量的精度要求^[3]。

在大面积山地和丘陵地区,采用 GPS 和电子水准仪相结合,能够充分发挥各自的优越性,既能获得高精度的平面控制网和高程控制网,又获得了位于山地、高山地或楼顶上的控制点的高精度的 GPS 高程拟合成果,大幅度减轻了劳动强度,提高了工作效率,全面提升工程控制网的使用价值。

参考文献:

- [1] CJJ73-97 全球定位系统城市测量技术规程[S]
- [2] GB12898-91 国家三、四等水准测量规范[S]
- [3] 王德保,陈瑞聪,聂圣庚,等.应用 TOPCON DL-102C 电子水准仪建立胶南市三等水准网[J].山东国土资源,19(6):38-41.

Application of GPS and Electrical Leveller in Yantai Controlling Network

WANG De-Bao, HUANG Jun, DONG Chuan-Sheng, TIAN Ji-Fei, TANG Yu-Bing
(Shandong Land Mapping Institute, Shandong Jinan 250014, China)

Abstract How to establish third grade plane controlling network applying GPS and how to establish third grade level network applying DL-102C electronic level are explained in this paper, data processing ways and precision index which are applied to promote plane precision and elevation simulating and conforming precision are expressed, and checking the conforming precision inside of plane network standard points data is explained in this paper as well. When elevation simulating and conforming was being carried out, precision checking for known GPS level point data would be finished in several simulating and conforming plans. The best simulating and conforming way would be searched by not only considering conforming precision inside, but also considering conforming precision outside.

Key words Engineering controlling network; GPS; data processing; elevation simulating and conforming; precision; electronic level; level network.