

工程测量中 GPS 控制测量平面与高程精度分析

苏志华, 周春柏, 刘晚霞

(湖南省湘南地质勘察院, 湖南 郴州 423000)

The Horizontal/Height Accuracy Analysis of GPS Control Surveying in Engineering Survey

SU Zhihua, ZHOU Chunbai, LIU Wanxia

摘要: GPS 控制测量普遍应用于工程测量中,但其精度不如传统控制测量方法那样直观,且目前的 GPS 商业平差软件所显示出的点位精度也并不可靠。通过 3 个工程测量中的实例,说明在 GPS 控制测量中,在网形条件不是很理想的情况下,平面精度基本能满足精度要求,但高程误差较大,并分析高程误差形成的原因。

关键词: 工程测量; 控制测量; GPS; 平面误差; 高程误差

一、引言

全球卫星导航定位系统是利用在空间飞行的卫星不断向地面广播发送某种频率并加载了某些特殊定位信息的无线电信号来实现定位测量的定位系统。目前,正在运行的全球卫星导航定位系统有美国的全球卫星定位系统(GPS)、俄罗斯的全球卫星导航定位系统(GLONASS)、欧盟的 Galileo 系统和中国的北斗卫星导航定位系统(Compass)等。GPS 控制测量以其精度高、速度快、相邻点间无需通视、费用省、操作简便等优良特性被广泛应用于控制测量中。时至今日,可以说 GPS 定位技术已基本取代了用常规测角、测距手段建立控制网的方法。在大地测量和面积较大的面状城市基础控制网中,如果 GPS 网形比较理想,已知点较多并分布均匀,且有足够多的点进行了水准测量,则基本不存在精度问题。但在相当多的工程测量中,一般存在采用的已知点较少(经常采用 2~3 个已知点)、已知点分布位置不佳、网形呈带状、相对高差大、水准测量困难或不进行水准测量等因素,这些因素都会影响到 GPS 控制网的精度。本文利用 3 个实例来解析工程测量中 GPS 控制测量的平面精度与高程精度。

二、GPS 控制测量实例

1. 某带状 E 级 GPS 网

图 1 为一引水工程施工布设的带状 E 级 GPS 网,其中 JMS、DSX 和 PXC 3 点为已知起算点,平面精度为 D 级,二等水准高程。1~30 号点为新测 E

级 GPS 点, GPS 拟合高程,高程值在 250~380 m 之间。另以 JMS、DSX 和 PXC 3 点为起算高程点,测量了其中 10 个点的水准高程,精度为四等。将 GPS 拟合高程和水准高程相比较,最大误差为 0.029 m。这说明在距离不太远、各点之间高差也不太大的情况下, GPS 拟合高程与四等水准高程较差也不大,最大为 29 mm,亦即 GPS 拟合高程基本可以取代四等水准高程。

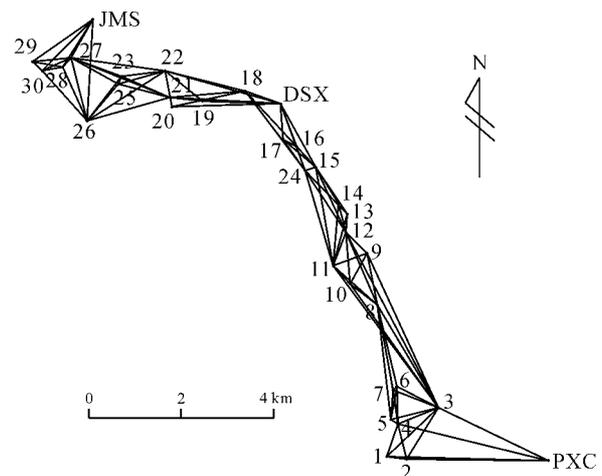


图 1 某带状 E 级 GPS 网略图

2. 某矿区 E 级 GPS 网

图 2 和图 3 为某矿区分别采用不同的已知点施测的 E 级 GPS 网, C_1 — C_4 为 C 级 GPS 点,二等水准高程,并作为起算成果; E_1 — E_4 为 E 级 GPS 点,其中 E_1 和 E_2 为共点。 C_1 和 C_2 高程为 200 多米, C_3 高

收稿日期: 2011-12-12

作者简介: 苏志华(1968—),男,湖南新化人,工程师,主要从事工程测量工作。

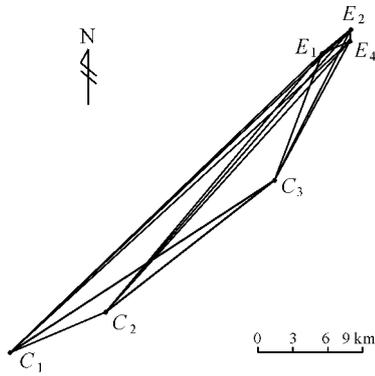


图 2 某矿区 GPS 网略图

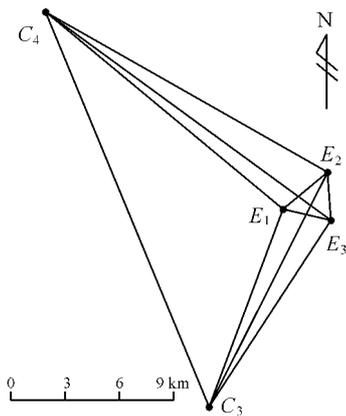


图 3 某矿区 GPS 网略图

程为 441 m, C_4 高程为 572 m, 矿区高程在 700 ~ 900 m 之间。可以看出, 图 2 的网形结构是很差的, 图 3 网形要好些, 但也不理想, 且高差较大。将两次

测量的成果比较可知: 即使网形结构很差, 但其对平面位置影响还是很小, 平面坐标较差最大为 31 mm, 在精度允许范围内; 高程较差就明显加大了, E_1 高程较差为 0.448 m, E_2 高程较差则达到了 0.601 m。虽然在各自的控制网平差报告中高程中误差均在厘米级, 但很明显这仅仅只是假象。

3. 某测区 D 级 GPS 网

图 4 为某测区 D 级 GPS 网略图, $C_4 \sim C_7$ 为 C 级 GPS 点, 坐标系为 1980 西安坐标系, 二等水准高程, 并将其作为起算成果; D_1 和 D_2 为测区内原有的导线点, 坐标系为 1954 北京坐标系, 四等水准高程。用 6 台静态 GPS 同时观测一个时段, 首先采用 4 个 C 级点作为已知点进行平差计算, 然后分别把其中 3 个 C 级点作为已知点, 另外 1 个 C 级点和 D_1 、 D_2 作为未知点进行平差计算, 其平差结果和较差如表 1 所示。

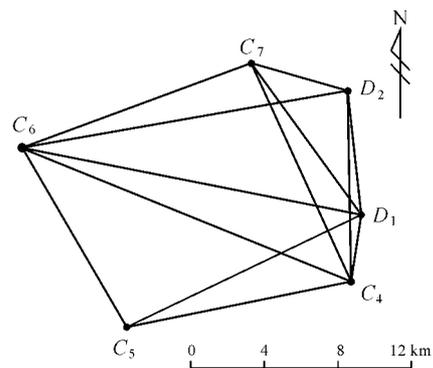


图 4 某测区 D 级 GPS 网略图

表 1 某测区 D 级 GPS 网坐标较差表

序号	点号	已知坐标			解算坐标			差值		
		X	Y	H	X	Y	H	ΔX	ΔY	ΔH
1	C_6	55 336. 719 3	692. 565	199. 322						
	C_7	59 964. 791	16 146. 732	163. 580						
	C_5	45 515. 171	9 377. 846	214. 939						
	C_4	48 005. 000	21 575. 905	578. 635						
	D_1	51 667. 588	22 117. 790	296. 387			296. 494			+0. 107
	D_2	58 452. 860	21 389. 670	180. 019			179. 967			-0. 052
2	C_6	55 336. 719	3 692. 565	199. 322						
	C_7	59 964. 791	16 146. 732	163. 580						
	C_5	45 515. 171	9 377. 846	214. 939						
	C_4	48 005. 000	21 575. 905	578. 635	48 004. 988	21 575. 880	579. 073	-0. 012	-0. 025	+0. 438
	D_1	51 667. 588	22 117. 790	296. 387	51 667. 597	22 117. 799	296. 223	+0. 009	+0. 009	-0. 164
	D_2	58 452. 860	21 389. 670	180. 019	58 452. 866	21 389. 673	179. 808	+0. 006	+0. 003	-0. 211

续表 1

m

序号	点号	已知坐标			解算坐标			差值		
		X	Y	H	X	Y	H	ΔX	ΔY	ΔH
3	C_6	55 336. 719	3 692. 565	199. 322	55 336. 724	3 692. 568	199. 730	+0. 005	+0. 003	+0. 408
	C_7	59 964. 791	16 146. 732	163. 580						
	C_5	45 515. 171	9 377. 846	214. 939						
	C_4	48 005. 000	21 575. 905	578. 635						
	D_1	51 667. 588	22 117. 790	296. 387	51 667. 597	22 117. 799	296. 103	+0. 009	+0. 009	-0. 284
	D_2	58 452. 860	21 389. 670	180. 019	58 452. 866	21 389. 673	179. 731	+0. 006	+0. 003	-0. 288
4	C_6	55 336. 719	3 692. 565	199. 322						
	C_7	59 964. 791	16 146. 732	163. 580	59 964. 805	16146. 731	163. 094	+0. 014	-0. 001	-0. 486
	C_5	45 515. 171	93 77. 846	214. 939						
	C_4	48 005. 000	21 575. 905	578. 635						
	D_1	51 667. 588	22 117. 790	296. 387	51 667. 603	22 117. 801	295. 971	+0. 015	+0. 011	-0. 416
	D_2	58 452. 860	21 389. 670	180. 019	58 452. 879	21 389. 675	179. 341	+0. 019	+0. 005	-0. 678
5	C_6	55 336. 719	3 692. 565	199. 322						
	C_7	59 964. 791	16 146. 732	163. 580						
	C_5	45 515. 171	9 377. 846	214. 939	45 515. 164	9 377. 870	214. 566	-0. 007	+0. 024	-0. 374
	C_4	48 005. 000	21 575. 905	578. 635						
	D_1	51 667. 588	22 117. 790	296. 387	51 667. 598	22 117. 804	296. 165	+0. 010	+0. 014	-0. 222
	D_2	58 452. 860	21 389. 670	180. 019	58 452. 869	21 389. 675	179. 858	+0. 009	+0. 005	-0. 161

从表 1 可以看出,无论采用哪些起算点,在平面位置上较差都不大,坐标较差最大为 25 mm,且在精度允许范围内。而高程较差较大,最小 0.052 m,最大 0.678 m,都超出允许误差要求。平差报告中显示的高程中误差均为 ± 20 mm 以内,仅仅只是假象。

三、GPS 拟合高程误差成因分析

假想海洋处于完全静止和平衡状态时的海水表面并延伸到大陆地面以下所形成的闭合曲面称为大地水准面。大地水准面是一个复杂的曲面,它随着地球地形、深海探测法(即由水体导出的测量)以及地质密度等的不同而存在起伏变化。大地水准面高度大小可以相差几十米,变化范围从印度南端低至 -105 m 到新几内亚高至约 85 m。地面上任意一点沿垂线方向至大地水准面的距离叫该点的正高,正高不能精确求得。而从地面点沿正常重力线量取正常高所得端点构成的封闭曲面称为似大地水准面,它不是水准面,只是用以计算的辅助面。地面点沿正常重力线到似大地水准面的距离称为正常高,正常高可以精确求得。所以,我国规定采用正常高系统作为我国高程的统一系统。平时所说的高程一般指的就是该点的正常高。

GPS 定位测量所获得的是在 WGS-84 椭球大地坐标系上的成果。也就是说 GPS 测得的高程是该

点相对于 WGS-84 椭球的高度,称之为大地高。大地水准面和似大地水准面都是不规则的闭合曲面,而 WGS-84 椭球面是一个规则的椭球面。正常高($H_{\text{正常}}$)和大地高(H)之间有一差值,称之为高程异常,用 ξ 表示

$$\xi = H_{\text{正常}} - H$$

高程异常值的大小与地球内部的质量分布等密切相关。GPS 高程测量的原理就是在建立 GPS 控制网时,除测出平面坐标外,还测量大地高 H 。如果在测区中有一定量的 GPS 点同时具有正常高 $H_{\text{正常}}$,便可求出这些点的高程异常 ξ 。将这些点的高程异常代入到数学拟合方程中,利用最小二乘法求出方程中的各系数,就可以利用相应的拟合方程推算出其他点的高程异常,进而求出其高程。

无论采用哪种数学拟合模型,都是对实际大地水准面的一种逼近,逼近程度的优劣取决于公共点的分布与密度。更重要的是似大地水准面是一个不规则的曲面,用一个规则的平面或曲面逼近它时,不可避免地存在模型误差,这种误差与地区地形复杂程度有很大关系。经过分析认为,高程异常主要是由局部地形引起的。地势平缓地区,高程异常变化比较平稳;地形起伏大的地区,高程异常变化剧烈。

(下转第 62 页)

地区,难以达到满意的精度,从而制约了其实际应用。

2) Kriging 插值算法通过引入以距离为自变量的变异函数来计算权值,同时考虑了区域化变量的随机特性和结构特性,有效地消除了模型误差,提高了精度。改进的 PSO-Kriging 插值算法在应对地面沉降分布不均和局部沉降异常时有了较大的提高,另外在变异函数中引入粒子群(PSO)算法,提高了变异函数的精度,在一定程度上也提高了最终的插值精度。

3) 如何智能地选择合适距离分组是 Kriging 插值提高精度的一个关键问题。目前,一般通过人工对比各种距离分组下的插值结果,根据偏差均差最小确定分组情况,一方面致使工作量增加;另一方面也使得结果具有不确定性。

4) 由于 Kriging 插值立足于区域变化量的空间自相关性,并借助于变异函数描述这种相关程度,因此,变异函数能否准确地表达这种相关性将直接影响到最终的插值结果。然而,目前变异函数模型比较复杂、易失稳且计算量大,对于如何建立简单有效的变异函数模型,也需要进一步研究。

(上接第 58 页)

GPS 测量的基本原理是距离后方交会。利用测点与空中 4 个以上的 GPS 卫星(其位置是已知的)的距离求得其在空间位置,进而利用已知点坐标通过约束平差求得其在相应坐标系统中的平面坐标和大地高,其精度只与 GPS 观测精度和已知点精度有关。因为 GPS 的观测精度已经很高了,在已知点精度满足要求且分布大致合理的情况下,其平面坐标和大地高精度一般都能满足工程测量要求。而在高程测量中,因采用正常高系统,虽然大地高精度一般能达到精度要求,但影响高程测量精度的主要是高程异常。一旦已知点的分布与密度不理想或地形起伏较大,则 GPS 拟合高程就很难达到精度要求,且一般商用平差软件很难将这种误差准确表现出来。

四、结 论

1) GPS 拟合高程的误差主要来源于高程异常模型的确定。在已知点的分布和密度不合理或地形起伏较大时,会大大降低 GPS 拟合高程的精度,在 20~30 km 的范围内,其误差可能会超过 1 m。在地形平缓地区,已知点密度足够且分布合理,则 GPS

参考文献:

- [1] 彭楠峰. 距离反比插值算法与 Kriging 插值算法的比较[J]. 大众科技 2008(5): 57-58.
- [2] 李明,高星伟,文汉江,等. Kriging 方法在 GPS 水准中的应用[J]. 测绘科学 2009,39(1): 106-107.
- [3] 郭炳岐. 基于 Kriging 方法的 GPS 高程模型及其应用研究[D]. 西安: 西安科技大学 2008.
- [4] 陈金环,王冠,王东云. 粒子群算法及特性的研究[J]. 中原工业学报 2007,18(4): 13-15.
- [5] EBERHART R C, SHI Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources [C]// Proc. Congress on Evolutionary Computation 2001. Piscataway, NJ: IEEE, 2001: 81-86.
- [6] 刘承香,阮双琛. 基于 Kriging 插值的数字地图生成算法研究[J]. 深圳大学学报理工版,2004,21(4): 295-299.
- [7] 黄玉琴. 基于 SAR 图像的城市形态时空变化的研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所 2006.
- [8] 欧阳艾嘉,刘利斌,乐光学,等. 求解非线性方程组的混合粒子群算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(9): 33-36.

拟合高程还是可用的,反之,则要相当慎重。

2) 目前我国中东部地区大都已完成了地区大地水准面精化工作,分辨率一般达到 $2.5' \times 2.5'$,精度达到 ± 5 cm 以内,可以满足大部分的工程测量工作。在条件许可的情况下,应尽量收集、利用这方面的资料。

3) GPS 平面测量中对网形要求不甚严,相比于三角网和导线网网形,其要求要低得多,在已知点精度满足要求且分布大致合理的情况下,其平面坐标一般都能满足工程测量要求。

参考文献:

- [1] 宁津生,陈俊勇,李德仁,等. 测绘学概论[M]. 武汉: 武汉大学出版社 2008.
- [2] 张高兴,陈建水,郭达志. 山区城市 GPS 控制测量及其高程精度分析[J]. 测绘通报 2006(11): 29-31.
- [3] 国家测绘局. GB/T 18314—2009 全球定位系统(GPS) 测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社 2009.
- [4] KAPLAN E D, HEGARTY C J. GPS 原理与应用[M]. 寇艳红,译. 北京: 电子工业出版社 2007.
- [5] 孔祥元,郭际明,刘宗泉. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社 2005.