

GPS 水准高程测量方法研究与探讨

陈永勤, 吴尔林

(江苏省工程勘测研究院, 江苏 扬州 225002)

摘要:以南水北调东线应急工程解台二站 GPS 高程控制网的布设为例, 根据测量中获取的详实数据, 对 GPS 水准高程进行试验和比较, 得出利用多项式曲面拟合法解算平原地区高程异常值的方法, 确定小型水利工程 GPS 高程控制网的布设形式。

关键词: 高程测量; GPS; 高程拟合; 几何水准; 中误差

中图分类号: P228.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)07-0145-03

解台二站属于南水北调东线工程中向北输水的关键泵站之一, 工程位于江苏省徐州市, 东经 $117^{\circ}20'$ 、北纬 $34^{\circ}19'$, 占地 15 km^2 , 测区地势平缓, 平均正常高 31.5 m , 最大高差 8 m 。由于工期紧, 精度要求高, 为保证工程初步设计阶段的用图精度, 工程区在布设首级 D 级 GPS 网时考虑利用 GPS 进行四等高程测量, 通过对待求点利用 GPS 多项式曲面拟合法和几何水准测量方式分别联测获取的高程进行比较及精度分析后, 得出了地势平缓区的小型工程使用 GPS 曲面拟合高程网完全可以代替四等几何水准网的结论。

1 GPS 高程拟合原理

1.1 高程系统转换

生产中应用的是正常高 H , 而 GPS 观测平差后精确得到的是地面点在 WGS-84 坐标系中的三维坐标 B, L, H (或 X, Y, Z), 其中 H 是地面点到参考椭球面的大地高, 两者间存在的差异值即为高程异常 ζ , 是因似大地水准面与参考椭球面不重合引起的。根据高程理论, H, h, ζ 间的换算关系为

$$H_r = H - \zeta \quad (1)$$

由式(1)可以看出, 地面点正常高 H 的解算精度取决于高程异常值 ζ 的求解精度。

1.2 高程异常求解

a. 高程异常理论上是由选取的地球重力位模型异常、地面重力异常、地面高程异常三部分组成, 由于本工程区最大高差 ΔH 只有 8 m , 地面高程引起的高程异常 $\zeta_{\Delta h}$ 可以忽略不计, 在地势平缓的小工程中, 地球、地面重力异常是影响 GPS 高程精度的

主要因素。

b. 多项式曲面拟合法的选用。解台二站工程区范围只有 15 km^2 , 高差小, 离工程区 20 km 范围内有 8 个国家一、二、三等水准点, 且本次 GPS 按区域布设成网状, 按 GPS 高程拟合法的选用原则, 本区选择多项式曲面拟合法作为 GPS 高程测量拟合的方法。

多项式曲面拟合法数学模型为

$$\zeta = f(x, y) + \varepsilon \quad (2)$$

将式(2)按二次多项式展开原则分解后得

$$\zeta_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + a_3 x_i^2 + a_4 y_i^2 + a_5 x_i y_i + \dots + \varepsilon_i \quad (3)$$

用矩阵形式表示为

$$\zeta = XB + \varepsilon \quad (4)$$

式中: $\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3, \dots, \zeta_n)^T$;

$\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_n)^T$;

$B = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)^T$;

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & y_1^2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_n & y_n & x_n^2 & y_n^2 & \dots \end{pmatrix}$$

由式(3)可以分析得出对于任意一个已知点 (x, y, H_r) 均可计算出一个 ζ 值与之对应, 当已知点足够多时, 采用最小二乘法在满足 $\sum \varepsilon^2 = \min$ 条件下解出待定系数 a_i , 从而拟合出工程区似大地水准面的高程模型; 根据待定点的坐标代入式(4)求出各待定点的高程异常值, 再由式(1)求解出各点的正常高。

由解算的过程知, 拟合大地水准高程的精度取决于已知点数量、精度和点位分布的均匀性。

2 高程控制网

2.1 GPS 高程拟合及其精度分析

a. 在进行 D 级 GPS 网观测的同时联测了Ⅱ徐宿 2、Ⅱ徐宿 5、Ⅰ徐柳 3、Ⅰ徐柳 5、Ⅲ解台支 1、Ⅲ解台支 2、Ⅲ解台支 3、解台 BM 等 8 个国家一、二、三等水准点,并测定出这些点的三维坐标(X, Y, H);其中距工程区最近点为解台 BM,约 1.0 km,最远点为Ⅱ徐宿 2,距测区约 17.5 km。线路如图 1 所示。

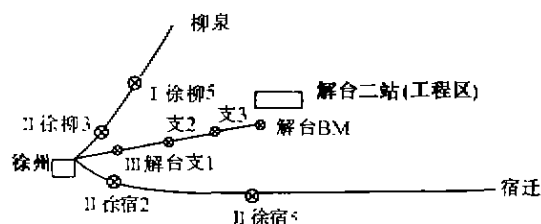


图 1 8 个国家水准点联测线路

b. 观测数据经预处理分析后,选用多项式曲面拟合作为本工程的拟合函数,以上述 8 个等级水准点中 3 点、4 点、5 点作为高程起算点(重合点),经三维约束平差后对另 5 个、4 个、3 个校核点的拟合高程与理论高程进行比较分析,结果列于表 1。从表 1 中可以看出,3 点约束拟合的高程异常 ξ 残差较大,4 点、5 点约束拟合的高程异常 ξ 残差较小且均匀。

c. 校核点外符合精度估算,估算公式为

$$M = \pm \sqrt{[VV]/(n-1)} \quad (5)$$

由式(5)分别计算出 3 点、4 点、5 点约束拟合后的外符合精度为: $M_3 = 20.86 \text{ mm}$, $M_4 = 13.89 \text{ mm}$, $M_5 = 17.06 \text{ mm}$;从校核点的高程拟合精度分析 GPS 高程能满足四等水准的精度要求。

2.2 四等几何水准联测

以测区附近的国家水准点Ⅰ徐柳 5、Ⅱ徐宿 5 为起讫点,使用 S1 型 Ni2 自动安平水准仪按四等水准要求联测测区内的 D 级 GPS 点及次级网级点,联测共分 19 段,线路长 33.16 km,线路闭合差

表 1 3 点、4 点、5 点 GPS 曲面拟合高程与几何水准比较

点名	几何水准 /m	3 点		4 点		5 点		至已知点 最近距离 /km	残差限差 /mm
		GPS 高程 /m	差值 ^① /mm	GPS 高程 /m	差值 ^① /mm	GPS 高程 /m	差值 ^① /mm		
Ⅲ解台支 1	39.309	39.322 2	+13.2	39.318 3	+9.3	39.320 2	+11.2	10.7	±65.4
Ⅲ解台支 2	39.189	39.210 6	+21.6	39.202 5	+13.5	39.199 7	+10.7	8.3	±57.6
Ⅲ解台支 3	31.559								
解台 BM	32.316	32.323 1	+7.3					1.0	±20.0
Ⅱ徐宿 2	40.407	40.380 6	-26.4	40.393 5	-13.5	40.388 5	-18.5	17.5	±83.6
Ⅱ徐宿 5	29.972								
Ⅰ徐柳 3	40.002	40.020 7	+18.7	40.013 3	+11.3			10.2	±63.8
Ⅰ徐柳 5	34.148								

注:①差值等于几何水准高程减 GPS 高程。

-45 mm,允许限差 $\pm 115.1 \text{ mm}$,符合四等水准测量的规范要求,严密平差后推算出各个待定点高程值,并以这些数值作为基准值,用于拟合高程的中误差计算及拟合精度分析。

2.3 拟合高程与几何水准联测高程精度分析

a. 由分析比较表 2 中各点拟合高程与水准联测的高程差值 Δ_H ,可以求得拟合高程中误差 $M_H = \pm \sqrt{[\Delta_H \Delta_H]/(2N)} = \pm 8.25 \text{ mm}$ (式中 N 为参与计算的特定点数, $N = 18$),符合施工对高程控制要求。

表 2 拟合高程及几何水准测量高程分析比较

点名	拟合 高程 /m	水准测 量高程 /m	拟合值与 水准值的 差值/mm	点名	拟合 高程 /m	水准测 量高程 /m	拟合值与 水准值的 差值/mm
I 5	34.148	34.148		F15	32.108	32.100	-8
D1	31.784	31.800	+16	F11	29.800	29.787	-13
D2	31.931	31.942	+11	F1	32.955	32.938	-17
D3	31.234	31.240	+6	F14	30.306	30.293	-13
F5	31.758	31.754	-4	F12	30.576	30.568	-8
F6	29.365	29.378	+13	F16	33.673	33.681	+8
F8	30.867	30.888	+21	F20	29.303	29.297	-6
F19	29.498	29.494	-4	F17	32.456	32.446	-10
D7	32.562	32.566	+4	D6	29.334	29.316	-18
D8	31.981	31.971	-10	II 5	29.972	29.972	
				Σ			-32

注: I 5 为Ⅰ徐柳 5 点; II 5 为Ⅱ徐宿 5 点。

b. 根据拟合高程及水准测量的高程推算拟合点间高差及相应点的几何水准高差,然后将水准线路看作往测线路, GPS 拟合线路看作为返测线路,水准联测高差与拟合高差的差值作为线路往、返测段的不符值 Δ ;线路观测的不符值 Δ 见表 3。

c. 根据每千米水准测量偶然中误差计算公式 $M_\Delta = \pm \sqrt{[\Delta\Delta/R]/(4n)}$ (其中 R 为测段长,测段长以水准测量的距离为准,不足 0.5 km 以 0.5 km 计, n 为测段数,本次测量的测段数 $n = 19$)推算出每千米水准测量偶然中误差 $M_\Delta = \pm 4.44 \text{ mm/km}$,小于四等水准规定的 $\pm 5.0 \text{ mm/km}$ 的限差要求;由此可见,在保证观测条件满足规范要求以及有足够已知点高程已知点的条件下,采用 GPS 高程曲面拟合法测定

表3 每千米水准测量偶然中误差分析比较

点名	测段长 /km	拟合高差 (返测)/m	水准高差 (往测)/m	不符值 /mm	点名	测段长 /km	拟合高差 (返测)/m	水准高差 (往测)/m	不符值 /mm
I 徐柳5	5.31	-2.364	-2.348	+16	F15	0.86	-2.308	-2.313	-5
D1	1.57	+0.147	+0.142	-5	F11	0.61	+3.155	+3.151	-4
D2	1.63	-0.697	-0.702	-5	F1	1.03	-2.649	-2.645	+4
D3	1.54	+0.524	+0.514	-10	F14	0.89	+0.270	+0.275	+5
F5	1.23	-2.393	-2.376	+17	F12	1.83	+3.097	+3.113	+16
F6	1.47	+1.502	+1.510	+8	F16	2.17	-4.370	-4.384	-14
F8	1.78	-1.369	-1.394	-25	F20	1.32	+3.153	+3.149	-4
F19	1.63	+3.064	+3.072	+8	F17	0.98	-3.122	-3.130	-8
D7	0.90	-0.581	-0.595	-14	D6	5.67	+0.638	+0.656	+18
D8	0.74	+0.127	+0.129	+2	II 徐宿5				
					Σ	33.16			0

注:表中测段长为几何水准测量的长度。

的未知点高程能够满足四等水准的精度。

由以上分析可知,在解台二站工程中 GPS 的曲面拟合高程精度完全达到了四等水准测量的精度要求,可作为高程控制网使用。

4 结 语

由于采集的数据量有限,故只能根据现有的数据和成果进行分析,提出以下建议:

a. 实践证明,在地势平缓、经纬度相差较小的小型水利水电工程区,在保证观测质量的情况下,同时联测多于4个三等以上等级水准点时采用GPS高

程曲面拟合法可以代替四等几何水准。

b. 已知高等级水准点在GPS网中的位置很重要,距离工程区越近,则通过已知点拟合的似大地水准面越接近工程区似大地水准面的现状,从而提高各待定点的拟合高程精度。

c. 在高差较大的工程区应考虑因地形引起的高程异常改正;在大面积的工程区或高等级水准点较远时应通过其它途径在测区内加密等级水准点或将等级水准点引测至测区,并尽量使点位均匀分布整个测区,以保证拟合的似大地水准面具有代表性。

(收稿日期:2001-08-22 编辑:马敏峰)

(上接第132页)只能由潜水员水下人工清理;由于第⑬层壤土含钙质结核较多,水下空气吸泥无法带出钙质结核,也只能由潜水员水下人工清理,工作效率不高。后经分析,我们采取了以下有效措施:①在井外四周压入减阻泥浆,减小下沉阻力;②在井顶压重1500kN,增加下沉系数,使刃脚插入土体内,再清除锅底到刃脚土体,再抽水,经过三次重复,才使接收井下沉到设计高程,保证了顶管工程正常进行。

钢管顶进是工程的主体,根据设计,从黄河南岸工作井向北岸接收井顶进,管顶覆土厚度23m左右;沿管线主要为第⑤层含钙质结核壤土或粘土及中粗砂夹层,且含有大量钙质结核。施工中,根据实际工程地质情况,为使土中的大多数钙质结核能由水力机械吸管中吸走,将水力机械吸管从通常的75mm改为100mm,结果60%以上的钙质结核都能由水力机械排除。钢管顶进700m以后,由于水力机械出泥量达到了极限,我们又使用了第二套水力机械,排成串联,并使用180kW高压泵与65kW增压泵串联供水,解决了管内出土问题。

在以往长距离顶管工程中,中继环布置一般按粘性土5~8kN/m²,砂性土10~12kN/m²考虑其摩

阻力。但本次施工中,从开始到顶进1000m,顶进速度正常,平均每天顶进10m左右,但整个管段总顶力9000kN左右,在顶进1000m以后,正面进入第⑤层中粗砂夹层,正面阻力明显增加,整个管段总顶力1300MN左右,顶进速度由原来每天顶进10m减少到每天5m左右,砂层中摩阻力达到10kN/m²。在使用中继环时,顶力越大,管段压缩量也越大,而有效顶进长度则越短,所以在钢管顶进时,中继环的顶力必须按不超过管段的压缩量加以控制。

3 结 语

针对鹊山水库输水穿黄工程中存在的主要工程地质问题,我们在施工过程中采取了积极有效的措施,目前该工程已成功实施,并已投入运行。运行情况表明,该工程达到了预期目标,取得了显著的经济效益和社会效益。

(收稿日期:2001-08-10 编辑:马敏峰)

