

文章编号: 1674—8247(2021)06—0012—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.06.003

轨道控制网(CPⅢ)三角高程测量精度研究

刘 明

(中国铁路成都局集团有限责任公司, 成都 610051)

摘 要:在 CPⅢ 高程控制网测量中,全站仪三角高程测量具有效率高、成本低的优势,但因同边高差较差往往无法满足规范要求,其在 CPⅢ 高程控制测量中的应用受到了限制。本文通过对 CPⅢ 三角高程测量方法的研究及全站仪竖轴倾斜误差对高差影响的分析,提出了通过三角高程同边多次观测高差取平均消除误差影响的方法。并通过工程实测数据对比了全站仪三角高程与水准高程,统计了全站仪高程平差精度,验证了采用本文数据处理方法的全站仪三角高程测量成果能够满足规范要求。同时,本文根据 CPⅢ 三角高程测量方法和成果,对现有规范提出了放宽同边高差较差指标的建议,以期能促进三角高程测量技术在 CPⅢ 测量中的应用。

关键词:三角高程;自由设站;竖轴偏角;CPⅢ;平差

中图分类号:U212.24 **文献标志码:**A

12

A Study on the Precision of Trigonometric Leveling for Track Control Network (CPⅢ)

LIU Ming

(China Railway Chengdu Group Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: In the CPⅢ vertical control network survey, trigonometric leveling by the total station is of high efficiency and low cost, but its application in the CPⅢ vertical control survey is limited because of the poor elevation difference on the same side, which often cannot meet the specification requirements. Based on the study of CPⅢ trigonometric leveling method and the analysis of the influence of the vertical axis tilt error of total station on the elevation difference, this paper puts forward a method to eliminate the influence of error by averaging the elevation difference observed by using trigonometric leveling many times on the same side. The trigonometric leveling by the total station is compared with level elevation by engineering measured data, and the adjustment accuracy of total station elevation is counted, which proves that the trigonometric leveling results of the total station using the data processing method in this paper can meet the specification requirements. At the same time, according to the methods and achievements of CPⅢ trigonometric leveling, this paper puts forward some suggestions to relax the difference index of the same side elevation difference for the existing specifications, in order to promote the application of trigonometric leveling technology in CPⅢ surveying.

Key words: triangle elevation; free stationing; vertical axis deviation angle; CPⅢ; adjustment

铁路施工过程中,CPⅢ 高程控制测量主要有常规水准测量和三角高程测量两种方法。目前常使用精密水准等级矩形法测量,该方法具有探测粗差能力强、可靠性高、精度高、测量简单等优点,但测量过程耗时耗

收稿日期:2021-07-16

作者简介:刘明(1987-),男,工程师。

引文格式:刘明. 轨道控制网(CPⅢ)三角高程测量精度研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(6):12-15.

LIU Ming. A Study on the Precision of Trigonometric Leveling for Track Control Network (CPⅢ) [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(6):12-15.

力,增加了工程成本。三角高程测量可与CPⅢ平面控制测量同步,测量效率高,但现有规范对相邻点多次观测高差较差限差要求较高,使得CPⅢ三角高程测量结果不易满足规范要求。为此,本文重点研究由全站仪竖轴偏角引起CPⅢ三角高程相邻点高差多次测量的不同程度较差对平差结果造成的影响,通过对数据进行分析研究,更合理地指导CPⅢ高程测量工作。

1 CPⅢ三角高程方法研究

1.1 CPⅢ三角高程测量原理

CPⅢ控制点高程测量采用中间法三角高程基本原理,可利用CPⅢ平面网测量的边角观测值,采用CPⅢ控制网自由测站三角高程测量方法与CPⅢ平面控制测量合并进行^[1-3],得出测站点到各CPⅢ点之间的高差,三角高程测量网型示意如图1所示。通过设站可得到测站点和CPⅢ点间的高差,如 $h_{C_2B_2}$ 、 $h_{C_2A_2}$,通过进一步计算就可得B2到A2的高差 $h_{B_2A_2} = h_{C_2B_2} - h_{C_2A_2}$,同公式就可得到该测站所测CPⅢ相邻点高差,构成和使用常规水准测量方法一样的高差矩形网型,如图2所示。

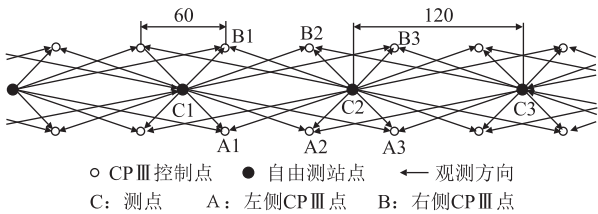


图1 三角高程观测示意图(m)

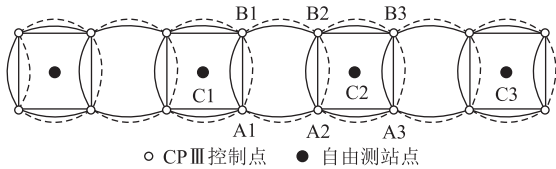


图2 三角高程计算示意图

CPⅢ三角高程测量要采用CPⅢ平面网的观测值,外业观测除满足CPⅢ平面的观测要求,还需满足TB 10101-2018《铁路工程测量规范》规定的光电测距中间设站测量三角高程外业观测技术要求,包括测回数以及竖盘指标差和竖盘指标互差的相关技术要求更高。所测的三角高程网应每2 km 与水准基点进行高程联测,当水准基点为强制对中固定桩时,使用三角高程方法联测已知点;其余类型的水准基点使用独立往返水准测量的方法进行联测,精度需达到精密水准

测量的等级要求。

1.2 CPⅢ三角高程测量精度分析

从图2可以看出,CPⅢ点对横向高差都能被测量3次,如 $h_{A_1B_1}$ 、 $h_{A_2B_2}$ 、 $h_{A_3B_3}$;当CPⅢ纵向点对间设有自由观测站时,该点对高差能被测量2次,如 $h_{A_2A_3}$ 、 $h_{B_2B_3}$;当CPⅢ纵向点对间没有自由观测站时,该点对高差只能被测量2次,如 $h_{A_1A_2}$ 、 $h_{B_1B_2}$,因此,CPⅢ相邻点高差都有2次以上的观测,均有多余观测值能计算高差较差。

TB 10101-2018《铁路工程测量规范》对不同测站测量的两相邻CPⅢ点高差限差做了明确要求,其中城际铁路不同测站测量的两相邻CPⅢ点高差限差^[4]如表1所示。

表1 不同测站测量的两相邻CPⅢ点高差限差表

铁路类型	轨道结构	列车设计速度 $v/(km/h)$	不同测站测量的 高差互差/mm
城际铁路	无砟	160、200	≤ 2.0
		120	≤ 3.0
	有砟	200	≤ 3.0
		160	≤ 3.5
		120	≤ 4.0

若设站点为C,照准点为A,考虑大气折光和地球曲率的影响,那么C、A两点间的高差为:

$$h_{CA} = D\cos\alpha + \frac{1-k}{2R}S^2 \tag{1}$$

式中: D ——C、A两点间经气象改正后的斜距;

S ——水平距离;

α ——仪器实际测得的天顶距;

$\frac{1-K}{2R}S^2$ ——球气差改正;

K ——大气折光系数^[5-6]。

当CPⅢ纵向点对之间有自由观测站时,根据式(1)可知的高差,从测站 C_1 、 C_2 和 C_3 都有直接观测,该高差取平均值计算时,大气折光和地球曲率的影响公式为 $\frac{1-k}{2R}(S_{C_1A_2}^2 - S_{C_1A_3}^2 + S_{C_2A_2}^2 - S_{C_2A_3}^2 + S_{C_3A_2}^2 - S_{C_3A_3}^2)$ 。由CPⅢ观测的特性可知, $S_{C_1A_2}^2 \approx S_{C_3A_3}^2$, $S_{C_2A_2}^2 \approx S_{C_2A_3}^2$, $S_{C_1A_3}^2 \approx S_{C_3A_2}^2$,从而可知当三角高程相邻点高差取平均值时,大气折光和地球曲率对CPⅢ三角高程的影响基本可以抵消^[7]。

从式(1)可知,影响三角高程测量两点间高差较差的主要因素为测量距离和天顶距,规范对测量CPⅢ的全站仪测角测距精度都有较高的要求,使用合规的全站仪测量结果的高差较差满足表1限差要求。在实际工程中,全站仪测角精度高,但有时竖轴会存在偏角

误差^[8-9],从而使得外业测量的天顶距有系统误差,且高差受偏角误差的影响随距离的增加而增大。

从图 1 可以看出,假设 C1 测站至各 CPⅢ 点的高差为 0 mm,那么 C1 测站测量天顶距理论上为 90°,当测量全站仪的竖轴偏角为 4"时,C1 测站至 CPⅢ 测点 A3 的距离为 150 m,对高差 h_{C1A3} 的影响值为 2.9 mm;C1 测站至 CPⅢ 测点 A2 的距离为 90 m,对 h_{C1A2} 高差的影响值为 1.7 mm,计算可知对相邻点 A2、A3 的高差 h_{A2A3} 的影响值为 1.2 mm,同理可计算 4"偏角对 C2 测站的高差 h_{A2A3} 的影响值为 0 mm,对 C3 测站的高差 h_{A2A3} 的影响值为 -1.2 mm,那么偏角对相邻点高差较差影响最大的 C1 测站和 C3 测站的高差 h_{A2A3} 的互差,影响值为 2.4 mm,具体计算如表 2 和表 3 所示。

表 2 测边高差受竖轴偏角影响值统计表

测站号	测点号	边长/m	竖轴偏角影响值/mm	
			全站仪(4")	全站仪(8")
C1	A1	30	0.6	1.2
	A2	90	1.7	3.5
	A3	150	2.9	5.8
C2	A1	90	1.7	3.5
	A2	30	0.6	1.2
	A3	30	0.6	1.2
C3	A2	150	2.9	5.8
	A3	90	1.7	3.5

表 3 相邻边高差受竖轴偏角影响值统计表

相邻 编号	测站号	竖轴偏角影响值/mm		互差最大值/mm	
		全站仪(4")	全站仪(8")	全站仪(4")	全站仪(8")
A1A2	C1	1.2	2.3	2.4	4.6
	C2	-1.2	-2.3		
A2A3	C1	1.2	2.3	2.4	4.6
	C2	0.0	0.0		
	C3	-1.2	-2.3		

由表 2 和表 3 可知,当全站仪竖轴偏角超过 4"时,CPⅢ 三角高程不同测站测量的高差互差易超过城际铁路 $V=200\text{ km/h}$ 无砟轨道 2 mm 限差的要求;当全站仪竖轴偏角超过 8"时,CPⅢ 三角高程不同测站测量的高差互差易超过城际铁路 $V=120\text{ km/h}$ 有砟轨道 4 mm 限差的要求。

目前,全站仪厂家在仪器出厂时对竖轴偏角检校不严格,导致部分全站仪的竖轴偏角数值较大,这对一般的平面测量影响不大,但对三角高程测量的影响较大,易引起外业数据不合格,进一步影响测量结果。全站仪的竖轴偏角误差不能通过自带校正程序校准,只能通过返厂维修校准,维修费用高、时间成本也高,易耽误工程进度。

在 CPⅢ 的三角高程测量中,测量方法是固定的,

测量按照图 1 所示的构网方式进行观测。在平差计算时,由于全网所有的相邻点高差都有 2 次以上的观测,都有多余观测值,通过按距离加权法计算出三角高程相邻点高差,把多个观测值转化为一个平差计算值参与平差计算。当测量全站仪的竖轴偏角为 4"时,对 C1 测站相邻点 A2A3 的高差 h_{A2A3} 的影响值为 1.2 mm,对 C2 测站的高差 h_{A2A3} 的影响值为 0 mm,对 C3 测站的高差 h_{A2A3} 的影响值为 -1.2 mm,通过距离加权平均计算得到竖轴偏角对 \bar{h}_{A2A3} 的影响为 0 mm。由此可知,通过这种方法计算得到的平差高差能抵消全站仪竖轴偏角的大部分影响。

2 现场实验及数据分析比较

2.1 现场实验测量及效率

为验证全站仪竖轴偏角对 CPⅢ 三角高程测量的影响,现场使用 3 台标称精度一致、同一型号的全站仪,检测得出仪器竖轴偏角分别为 1"、7"和 18",共同测量了某城际铁路 1 km 左右的 CPⅢ 三角高程数据,同时使用水准仪测量同测段 CPⅢ 高程,具体测量数据如表 4 所示。

表 4 测量数据统计表

起点	终点	高差/mm			
		全站仪(1")	全站仪(7")	全站仪(18")	水准测量
535 301	535 302	0.026 59	0.026 94	0.026 53	0.026 49
535 301	535 303	0.230 77	0.230 18	0.231 14	0.230 79
535 304	535 302	-0.186 32	-0.186 30	-0.187 30	-0.186 80
...
535 314	535 312	0.16198	0.16186	0.162 05	0.161 62
535 313	535 314	-0.012 13	-0.012 08	-0.012 78	-0.012 25
...
535 328	535 326	0.167 64	0.167 47	0.167 46	0.167 36
...

根据测量实验和以往工程测量经验,对常规水准测量方法和三角高程测量法的测量时间做了相关统计,具体如表 5 所示。在测量相邻点对高差大的测段时,水准仪必须架设 2 站才能观测完成相邻点的高差,此时三角高程测量的优势更加明显。

表 5 测量 CPⅢ 高程 1 km 时间统计表

测量条件	花费时间/min		提高效率值/倍
	常规水准	三角高程	
一般高差	80	8	9
高差较大	140	8	17

2.2 实验数据对比

根据表 4 统计出水准测量高差和 3 台全站仪测量的三角高程测量高差距离加权平均值的较差绝对值如

图3所示,统计3台全站仪测量的三角高程测量CPⅢ的平差计算结果所表6所示。

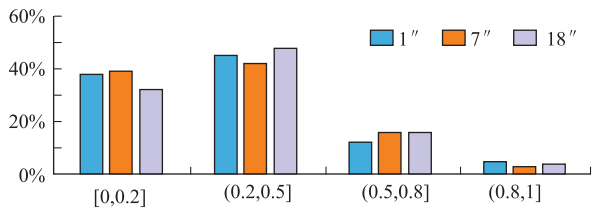


图3 高差差值绝对值区间统计图

TB 10101-2018《铁路工程测量规范》对CPⅢ三角高程平差后的计算精度指标如表7所示。

表6 不同全站仪测量数据比较表

仪器竖轴误差偏角	往返测较差最大值/mm	水准环闭合环最大值/mm	高差改正数最大值/mm	高程中误差最大值/mm	相邻点高差中误差最大值/mm	平差结果差异最大值/mm
1''	1.44	0.77	0.63	0.44	0.36	0.97
7''	5.65	0.69	-0.73	0.53	0.39	
18''	14.33	0.89	-0.82	0.55	0.41	

表7 CPⅢ高程网平差后的精度指标表

铁路类型	轨道结构	列车设计速度 $v/(km/h)$	水准环闭合环 /mm	高差改正数 /mm	高程中误差 /mm	相邻点高差中误差 /mm
城际铁路	无砟	160,200	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 0.5
		120	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 4.0	≤ 1.0
		200	≤ 2.0	≤ 2.0	≤ 4.0	≤ 1.0
	有砟	160	≤ 3.0	≤ 3.0	≤ 5.0	≤ 2.0
		120	≤ 3.5	≤ 3.5	≤ 6.0	≤ 2.5

程和正常水准仪精密测量水准精度相当,两种方法都可用于CPⅢ高程的外业观测。

(2)竖轴误差偏角1''的全站仪测量平差结果全部能满足规范(城际铁路、无砟、 $v=200\text{ km/h}$)往返测较差、水准环闭合差、高差改正数、高程中误差及相邻点高差中误差的要求;竖轴误差偏角7''和18''的全站仪测量数据的平差结果中往返测较差不能满足规范(城际铁路、无砟、 $v=200\text{ km/h}$)规范要求,但每个水准环闭合差均能满足规范要求,可验证经过距离加权平均计算后的CPⅢ相邻点高差,能够基本抵消全站仪竖轴偏角的观测影响,平差结果和全站仪偏角值的相关性不强。其余的平差指标均满足规范要求,CPⅢ点高程平差结果差异较小,可满足下一步的施工建设和维护的要求。

2.4 现有规范修改建议

上述实验分析结果表明,CPⅢ的三角高程测量能够极大地提高工作效率,其精度也能满足施工建设和维护要求,放宽或取消TB 10101-2018《铁路工程测

2.3 数据结论分析

(1)3台带有竖轴系统误差的全站仪测量的三角高程高差距离加权平差值与水准测量高差较差的值95%都小于0.8 mm,最大的高差较差值也小于1 mm。TB 10101-2018按照《铁路工程测量规范》精密水准测量的要求,高差往返测的限差为 $\pm 8\sqrt{K}$ (K 为距离,单位为km),按照距离30 m(测站至CPⅢ点的距离)计算限差为 $\pm 1.38\text{ mm}$ 。表6中,竖轴偏角不同的全站仪通过高差距离加权计算后的相邻点高差值与水准测量高差较差都小于精密水准等级计算的限差,说明经过计算的三角高程距离加权平差值和水准测量的观测值一致,带有竖轴偏角的全站仪测量的CPⅢ三角高

量规范》对CPⅢ三角高程测量不同测站测量的高差互差指标要求,对CPⅢ三角高程内业数据处理和实际工程应用具有重要的指导意义。

3 结论

本文详细介绍了CPⅢ三角高程的原理和计算过程。通过理论分析和实例计算得到以下主要结论:

(1)全站仪竖轴偏角对该测站的目标点的高差有影响,但根据CPⅢ特定观测的方法,当相同测段的多次高差取距离加权平均值时,可抵消竖轴偏角影响。

(2)TB 10101-2018《铁路工程测量规范》中矩形闭合环的限差指标能检核构成矩形环的相邻点高差测量精度,建议规范放宽或取消CPⅢ三角高程测量不同测站测量的高差互差指标要求。

(3)轨道控制网CPⅢ的高程测量建议多采用效率更高的三角高程测量,特别是CPⅢ复测项目。

(下转第31页)