

项目二 高程测量

项目引入：某单位在修建一条城市道路，在附近已修建的道路上有一已知高程国家水准点，为了便于施工道路高程测量，需要将高程点引测到拟修的道路附近，并以该点作为控制道路高低起伏的控制点，该项与高程有关的测量工作称为高程测量，工程建设中，高程测量工作主要有利用水准路线根据已知点高程求出待求点高程，以及根据施工图纸对高程点进行高程放样。

项目要点：普通水准测量的原理和方法、水准路线的测量、水准测量内业计算。

任务 2.1 水准测量的原理和工具

高程测量是测量的三项基本工作之一，高程测量中常用的测量方法有水准测量、三角高程测量、GPS 高程测量、气压高程测量等方法。其中，水准测量是土建工程测量中最主要的使用方法，它具有精度高，效率快的特点，因此在工程建设中得到了广泛的应用。

2.1.1 水准测量的原理

水准测量的原理是利用水准仪提供一条水平视线，借助带有分划的水准尺，读取两尺子的相应读数，计算出两点间的高差，然后根据已知点高程，推算出待定点。

如图 2-1 所示，在 A 、 B 两测站分别竖立水准尺，利用水准仪提供的水平视线来测出两点间的高差。设水准测量方向是从 A 到 B 进行的， A 称为后视尺，对应的读数 a 称为后视读数， B 称为前视尺，对应的读数 b 称为前视读数，则 AB 之间的高差

$$h_{AB} = a - b \quad (2-1)$$

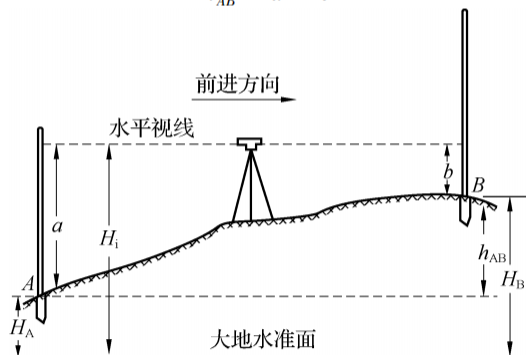


图 2-1

高差计算时有正、负之分,当 h_{AB} 为正值时,即表示前视点 B 比后视点 A 高; h_{AB} 为负值时,表示 B 点比 A 点低。在计算高差 h_{AB} 时,一定要注意 h_{AB} 下标 AB 的写法, h_{AB} 表示 A 点至 B 点的高差, h_{BA} 则表示 B 点至 A 点的高差,两点高差应该是绝对值相同,而符号相反。上述利用高差计算未知点高程的方法,称为高差法。

在测得两点之间的高差 h_{AB} 后,则未知点 B 的高程用 H_B 表示,则 B 点的高程表示为:

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + (a - b) \quad (2-2)$$

【例 2-1】在某道路旁边有一已知水准点 A ,为求出道路某一里程中桩 B 点的高程,现利用水准仪进行测量,测量过程中若后视读数为 1.263 m ,前视读数为 1.780 m ,已知 A 点的高程 H_A 为 32.125 m ,求 B 点的高程 H_B ,根据式(2-2)可求得 B 点的高程

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + (a - b) = 32.125 + (1.263 - 1.780) = 31.608(\text{m})$$

2.1.2 水准测量的仪器和工具

水准测量所使用的仪器为水准仪,工具有水准尺和尺垫等,水准仪按照精度划分为 $DS_{0.5}$ 、 DS_1 、 DS_3 等多种型号, D 表示大地测量, S 表示水准测量, 0.5 , 1 , 3 , 10 等数字表示每千米往返高程中误差,以 mm 为单位。 DS_{05} 、 DS_1 型属于精密水准仪,主要用于国家一、二等水准测量。 DS_3 型为普通水准仪,可用于一般工程建设测量和国家三、四等水准测量,是目前工程上使用最普遍的一种。

1. 普通水准仪的构造

按水准仪结构分类,目前主要有微倾式水准仪、自动安平水准仪和电子水准仪3种。下面以自动安平水准仪为例进行介绍。仪器主要部件的名称如图2-2所示。

水准仪主要由望远镜、水准气泡以及基座三部分组成。

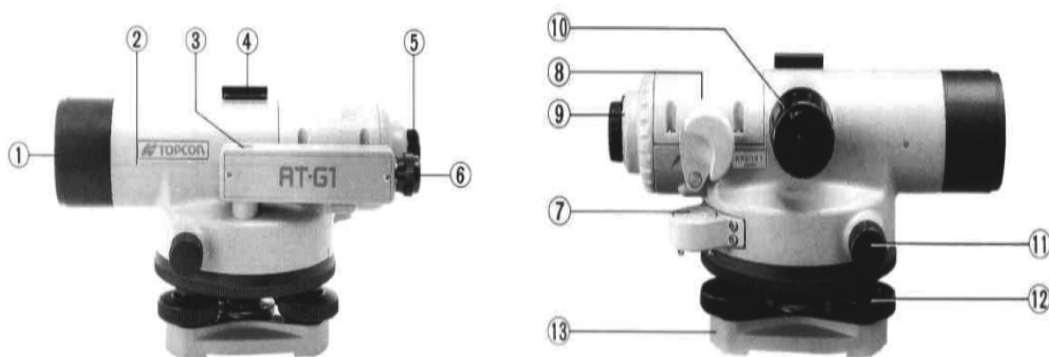


图 2-2 自动安平水准仪

- 1—物镜; 2—光学测微照安装定位指标; 3—分划尺照明窗; 4—瞄准器; 5—望远镜目镜;
6—水平度盘读数目镜; 7—圆水准器; 8—圆水准器观测镜; 9—目镜盖; 10—调焦螺旋;
11—水平微动螺旋; 12—整平脚螺旋; 13—基座底板

(1) 望远镜。望远镜是用来精确瞄准目标并提供一条水平视线的设备，并且刻有进行读数的标志。如图 2-3 所示，它主要由物镜、目镜、调焦透镜及十字丝分划板组成；图 2-3 (b) 是从目镜中看到的经过放大后的十字丝分划板上的像。十字丝分划板的作用是瞄准目标进行读数，中间一根长横丝称为中丝，与中丝平行的上下对称的两根短横丝称为上、下丝（统称为视距丝），与横丝垂直的丝称为竖丝。在水准测量时，读取中丝在水准尺上前、后视读数，用于计算高差；读取上、下丝在水准尺上的读数，用于计算水准仪到水准尺的距离（上丝读数一下丝读数） $\times 100$ 。

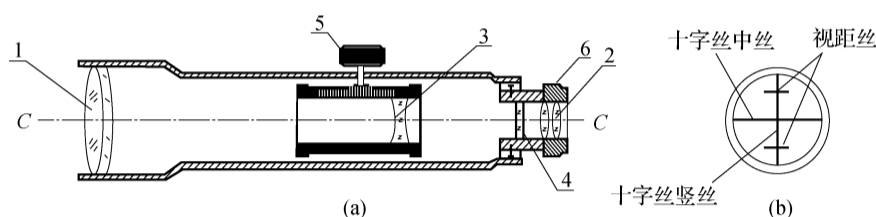


图 2-3 望远镜结构

1—物镜；2—目镜；3—调焦透镜；4—十字丝分划板；5—物镜对光螺旋；6—目镜调焦螺旋；

(2) 水准器。水准器是利用液体受重力作用后使气泡居于最高处的特性，来反映水准器的竖轴是否铅垂或者视准轴是否水平。水准器分为圆水准器和管水准器两类。

圆水准器是供整平仪器用的。如图 2-4 (a) 所示，圆水准器是一封闭的玻璃圆盒，顶面的玻璃内表面研磨成球面，球面的正中刻画有圆圈。圆圈的中心称为零点，通过零点的法线 $L'L'$ 称为圆水准轴。当气泡居中时，就表示圆水准轴处于铅垂位置。指示仪器的竖轴也处于铅垂位置。圆水准器的气泡每移动 2 mm，圆水准轴相应倾斜的角度被称为圆水准器分划值，一般为 $8' \sim 10'$ 。在自动安平水准仪中，圆水准器作为整平使用。

在微倾式水准仪中，圆水准器只作为粗略整平使用，在该水准仪中还存在一个水准管，作为精确整平使用，如图 2-4 (b) 所示。

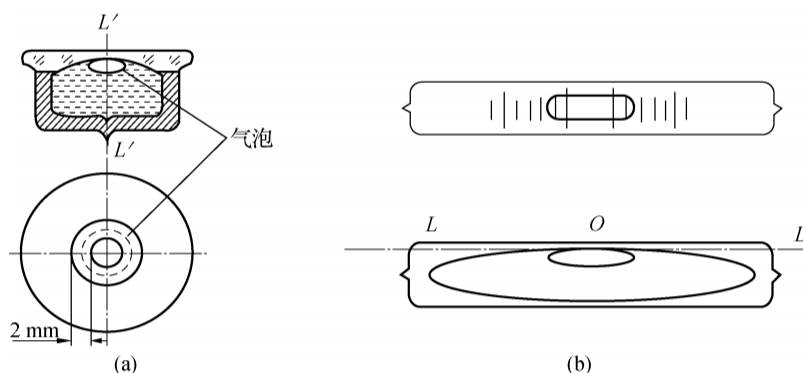


图 2-4 圆水准器和管水准器

(3) 基座。基座的作用是支撑仪器的上部，并通过连接螺旋与三脚架连接，主要由轴座、脚螺旋、底板和三角连接板构成。脚螺旋的作用主要是使圆水准器气泡居中。

2. 水准尺和尺垫

(1) 水准尺。水准尺是水准测量的重要工具，如图 2-5 所示，用优质木料或塑料制成。水准尺的零点一般在尺的底部，尺的刻划是黑（红）白相间，每格是 1 cm 或 0.5 cm，每分米处均注数字。超过 1 m 有的加注红点，如有 2 个红点表示整米数为 2 m；有的米数用数字表示，如 15 则表示 1.5 m。水准尺一般分为双面水准尺和塔尺两种。双面尺尺长 3 m，一面为黑面分划，黑白相间，尺底为零；另一面为红面分划，红白相间，尺底为一常数（如 4.687 m 或 4.787 m）。普通水准测量用黑面读数，三、四等水准测量用黑、红面尺读数进行校核。塔尺可以伸缩，尺长一般为 5 m，适用于普通水准测量。

(2) 尺垫。尺垫由生铁铸成，一般为三角形底板，其下有三个脚，如图 2-6 所示，可以踏入土中，尺垫上方有一凸起的半球体，尺子的底端就放在半球体上。尺垫仅供转点或临时点使用，要求出高程的点上不能放置尺垫。



图 2-5 水准尺

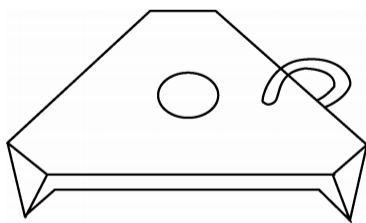


图 2-6 尺垫

任务 2.2 水准仪的使用

水准仪使用的基本程序为安置仪器、粗略整平、对光与照准、精确整平和读数等。

1. 安置仪器

打开三脚架，调节高度适中，架顶面大致水平，三个脚尖在地面的位置大致呈等边三角形。将三脚架踩实，然后将水准仪平稳地安放在三脚架架头上，一手握住仪器，一手将三脚架上的连接螺旋旋紧，使仪器与三脚架连接。

2. 粗略整平（粗平）

粗平是通过调节三个脚螺旋，使圆水准器气泡居中，使仪器的竖轴大致铅垂。具体操作步骤如下：首先用双手按箭头方向转动脚螺旋①，②，使气泡移到这两个脚螺旋连线中间，如图 2-7（a）所示；然后用左手按箭头方向转动脚螺旋③，使气泡居中，如图 2-7（b）所示。在粗平的过程中，气泡移动的方向与左手大拇指转动脚螺旋的方向相同，称为左手大拇指规则。

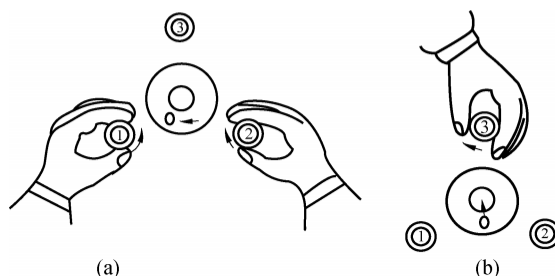


图 2-7

3. 对光与照准

首先调节目镜对光螺旋，使十字丝像达到最清晰；转动望远镜，通过镜筒上的缺口和准星瞄准水准尺，粗略瞄准目标。转动微动螺旋，使十字丝的竖丝对准水准尺，如图 2-8 所示。可检查水准尺在左右方向是否倾斜，再转动物镜调焦螺旋使水准尺的分划像十分清晰，消除视差。

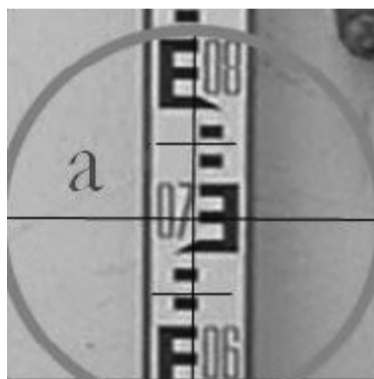


图 2-8

4. 精平和读数

精平工作，就是在读数之前必须转动微倾螺旋，使水准管气泡居中（水准管气泡两边的影像吻合）。然后以十字丝中横丝读出尺上的数值。读数时应注意尺上注字由小到大的顺序，读出米、分米、厘米，估读至毫米。图 2-8 的读数为 1.356 m。这里有必要指出的是：在同一测站，对准另一目标时，水准管气泡会有偏离；每对准一个目标，都必须转动微倾螺旋使水准管气泡居中才能读数。自动安平水准仪无此装置，使圆水准准气泡居后即可调焦、照准读数。

任务 2.3 水准测量的方法

2.3.1 水准点

为了满足测量的需要和全国高程的统一，国家各级测绘部门在各地埋设稳固并通过水准测量测定的高程控制点，称为水准点，水准点用 BM 表示。按埋设时间长短，水准点分为永久性和临时性两种。按照水准测量精度，水准点可分为一等、二等、三等、四等水准点；永久性水准点由石料或混凝土制成，顶面设置半球状标志，在城镇区也有在稳固的建筑物墙上设置墙上水准点。图 2-9（a）所示为国家二、三等水准点，单位为 mm，图 2-9（b）所示为墙上水准点。水准点也可用混凝土制成，中间插入钢筋，或选定在突出的稳固岩石或房屋的勒脚。图 2-9（c）所示为临时性的水准点可打下木桩，桩顶用水泥砂浆保护，一般建筑工地使用临时水准点较多。

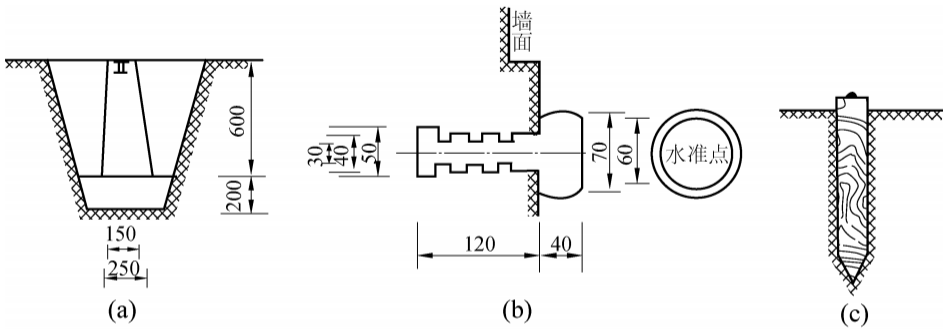


图 2-9 水准点

2.3.2 水准路线

在一系列水准点之间进行水准测量所经过的路线，称为水准路线。在水准测量过程中

已有水准点的情况下，可将水准路线布设为以下 3 种：附和水准路线、闭合水准路线和支水准路线。

1. 附和水准路线

如图 2-10 (a) 所示，从已知水准点 BM_1 出发，沿各待测高程点 1, 2, 3 进行水准测量，最后附和到另一个水准点 BM_2 ，这种在两个已知水准点之间布设的路线，称为附和水准路线。

2. 闭合水准路线

如图 2-10 (b) 所示，从已知水准点 BM_5 出发，沿各待测高程点 1, 2, 3, 4, 5 进行水准测量，最后附和到 BM_5 上，这种环形的路线称为闭合水准路线。

3. 支水准路线

如图 2-10 (c) 所示，从已知水准点 BM_8 出发，沿各待测高程点 1、2 进行水准测量，这种从一个已知水准点出发到另一个未知点的路线，称为支水准路线。

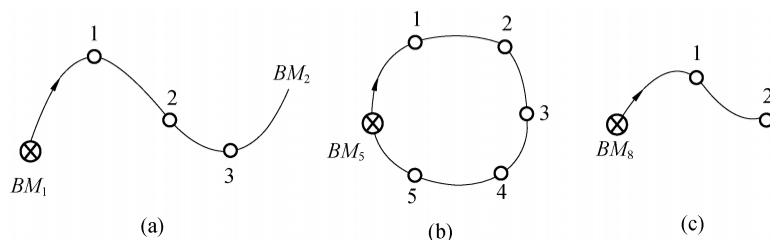


图 2-10 水准路线

2.3.3 普通水准测量

当已知高程点与待测高程点间的距离较远或高差较大时，需要布设多个测站。如图 2-11所示，已知水准点 A 的高程 $H_A = 19.153 \text{ m}$ ，为了测得 B 点高程，需要在 AB 测线上布设 6 个测站，观测步骤如下：

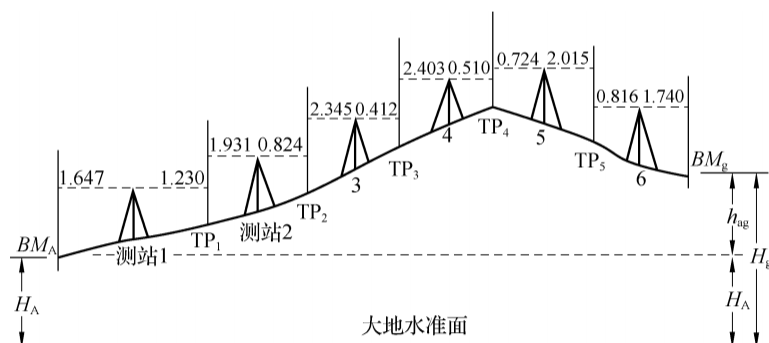


图 2-11 普通水准测量

在距离 A 点适当的位置处布设转点 TP_1 ，在 A 、 TP_1 两点分别竖立水准尺，同时在距离 A 点和 TP_1 点距离大致相等的地方安置水准仪，观测者经过“粗平—瞄准—精平—读数”的操作步骤，读取后视水准尺上的后视读数为 1.647，照准 TP_1 点水准尺，进行精平使水准管气泡居中，读取 TP_1 点前视水准尺上的前视读数为 1.230。记录者将观测数据记录在表 2-1 相应的后视与前视读数栏内，计算求得该站高差为 + 0.417 m，至此完成了第一站的测量工作。然后将 A 点水准尺安放在适当的位置 TP_2 上，保持 TP_1 点不动，将水准仪安置在 TP_1 、 TP_2 之间，同上述方法观测并记录，直至测到 B 点为止。计算时按照高差 $h = a - b$ ，并使用 $h_{AB} = \sum a - \sum b$ ， $h_{AB} = \sum h$ 对测量成果进行校核。

普通水准测量的记录方法如表 2-1 所示。

表 2-1

日期	2016. 2. 10	仪器	苏光 DS3	观测	李一		
天气	晴	地点	大桥	记录	王西		
测站	测点	水准尺读数/m		高差/m		高程	备注
		后视 (a)	前视 (b)	+	-	m	
I	BM_1 TP_1	1. 647	1. 230	+0. 417		19. 153	
II	TP_1 TP_2	1. 931	0. 824	+1. 107			
III	TP_2 TP_3	2. 345	0. 412	+1. 933			
IV	TP_3 TP_4	2. 403	0. 510	+1. 893			
V	TP_4 TP_5	0. 724	2. 015		-1. 291		
VI	TP_5 BM_B	0. 816	1. 740		-0. 924	22. 288	
Σ		9. 866	6. 731	+5. 350	-2. 215		
计算校核		$\sum a - \sum b = 9. 866 - 6. 740 = +3. 135$ $\sum h = 5. 350 - 2. 215 = +3. 135$ $H_B - H_A = 22. 288 - 19. 153 = + 3. 135$					

普通水准测量注意事项：

- (1) 在测量工作之前，应对水准仪进行检验校正。
- (2) 仪器应安置在稳固的地面上，以减少仪器下沉。在光滑地面上安置仪器，应防脚架滑动，采取防滑措施。
- (3) 在水准点（已知点或待定点）上立尺时，不得放尺垫。
- (4) 仪器不能让雨淋或烈日曝晒，应撑伞遮挡。
- (5) 前后视距离应大致相等，以消除或减少仪器有关误差及地球曲率与大气折光的影响。
- (6) 每次读数前，应调节微倾螺旋，使水准管气泡居中，然后读数。读数后还应检查气泡是否居中。
- (7) 在观测员未迁站之前，后视点尺垫不能提动，读数时，记录员要复述，以便核对；记录要整齐、清楚；记录有误不准擦去及涂改，应划去重写。
- (8) 有正、负意义的量，在记录计算时都应带上“+”、“-”号，正号不能省略。
- (9) 作业人员应在手簿的相应栏内签名，并填注作业日期、开始及结束时间、天气及观测情况、使用仪器型号等。

2.3.4 三四等水准测量

我国将高程控制测量分成了一等、二等、三等、四等四个等级，一等、二等是国家高程控制测量的基础，三、四等是工程建设控制测量的基础，因三、四等水准测量在工程建设中应用较多，下面主要介绍三四等水准测量方法。

三、四等水准测量所使用的水准仪，其精度不低于 S_3 的精度指标，其技术要求见表2-2。

表 2-2 三、四等水准测量主要技术要求

等级	视距/m	高差闭合差		视线高度	前后视距差 M	前后视距累积差 M	黑红面读数差/mm	黑红面所测高差之差/mm
		平地	山区					
三等	≤ 75	$\pm 12\sqrt{L}$	$\pm 4\sqrt{n}$	三丝能读数	≤ 2.0	≤ 5.0	± 2.0	± 3.0
四等	≤ 100	$\pm 20\sqrt{L}$	$\pm 6\sqrt{n}$	三丝能读数	≤ 3.0	≤ 10.0	± 3.0	± 5.0

表中 L 为水准路线的长度； n 为测站数。

1. 三、四等水准测量观测程序

三、四等水准测量的观测应在通视条件良好、成像清晰稳定的情况下进行。下面主要以四等水准测量为例介绍双面尺法的观测程序。

四等水准测量一测站的观测顺序如下。

- 1) 安置好水准仪，整平；
 - 2) 瞄准后尺黑面，读取上、下、中丝读数并记录；
 - 3) 瞄准后尺红面，读取中丝读数并记录；
 - 4) 瞄准前尺黑面，读取上、下、中丝读数并记录；
 - 5) 瞄准前尺红面，读取中丝读数并记录。
- 这样的观测顺序简称为“后-后-前-前”或者“黑-红-黑-红”
- 三等水准测量的观测顺序如下。

- 1) 瞄准后尺黑面，读取上、下、中丝读数并记录；
 - 2) 瞄准前尺黑面，读取上、下、中丝读数并记录；
 - 3) 瞄准前尺红面，读取中丝读数并记录；
 - 4) 瞄准后尺红面，读取中丝读数并记录。
- 这样的观测顺序简称为“后-前-前-后”或者“黑-黑-红-红”

2. 三、四等水准测量记录与计算

四等水准测量的记录

三、四等水准测量主要以表格的形式进行记录与计算见表 2-3。表格中为观测记录的原始数据。其中 1, 2, 5, 6 为后、前尺黑面的上下丝读数, 3, 4, 7, 8 为后、前尺黑面和红面中丝读数。

表 2-3 三、四等水准测量记录表

时间： 年 月 日 天气： 成像：

仪器及编号： 观测者： 记录者： 复核： 第 页

测站编号	后尺	上丝	前尺	上丝	方向及 尺号	标尺读数 mm		黑+K-红 mm	高差中 数/m	备 注
		下丝		下丝						
	后视距/m		前视距/m			黑面	红面			
	视距差 d/m		$\sum d/m$							
0	(1)		(5)		后	(3)	(4)	(13)	(18)	$k_1=4\ 687$ $k_2=4\ 787$
	(2)		(6)		前	(7)	(8)	(14)		
	(9)		(10)		后-前	(15)	(16)	(17)		
	(11)		(12)							
1	2 121		2 196		后	1 934	6 621	0	-0.074 5	
	1 747		1 821		前	2 008	6 796	-1		
	37.4		37.5		后-前	-0074	-017 5	+1		
	-0.1		-0.1							

续表

测站编号	后尺	上丝	前尺	上丝	方向及 尺号	标尺读数 mm		黑+K-红 mm	高差中 数/m	备 注
		下丝		下丝						
	后视距/m		前视距/m							
	视距差 d/m		$\sum d/m$							
2	1 571		0 739		后	1 384	6 171	0	+0. 833 0	
	1 197		0 363		前	0 551	5 238	0		
	37. 4		37. 6		后一前	+0 833	+0 933	0		
	+0. 2		+0. 1							
3	1 508		1 473		后	1 276	5 963	0	+0. 041 0	
	1 043		1 002		前	1 236	6 021	+2		
	46. 5		47. 1		后一前	+0 040	-0 058	-2		
	-0. 6		-0. 5							
4	0 625		1 034		后	0 366	5 151	+2	-0. 382 0	
	0 062		0 460		前	0 747	5 434	0		
	56. 3		57. 4		后一前	-0 381	-0. 283	+2		
	-1. 1		-1. 6							
检核	$\sum (9) - \sum (10) = (12)$					$[\sum (15) + \sum (16)]/2 = \sum (18)$			$\sum (18)$	

三、四等水准测量记录表格中对应的 9、10 为后前视距长度，11 为后前视距差，12 为后前视距累积差，13、14 为黑红面读数之差，15、16 为黑、红面所测高差，17 为黑红面高差之差。对于四等水准测量中 9~17 数据对应都有相应的限差要求，具体参见三、四等水准测量施测技术规范表 2-2。主要计算内容如下。

(1) 视距计算。

$$\text{后视距 (9)} = [(1) - (2)] \text{ m} \times 100$$

$$\text{前视距 (10)} = [(5) - (6)] \text{ m} \times 100$$

$$\text{后前视距差 (11)} = (9) - (10)$$

$$\text{后前视距累积差 (12)} = \text{前站的 (12)} + \text{本站的 (11)}$$

(2) 同一水准尺黑红面读数的计算与检核。

$$(13) = (3) + K_1 - (4)$$

$$(14) = (7) + K_2 - (8)$$

(3) 计算黑、红面高差之差。

黑面所测高差 (15) = (3) - (7)

红面所测高差 (16) = (4) - (8)

黑红面所测高差之差 (17) = (15) - [(16) ± 0.1] 检核

(4) 计算平均高差。

测站高差 (即高差中数) (18) = { (15) + [(16) ± 0.1] } ÷ 2

此处计算结果保留三位小数, 即精确到毫米位, 数位的进位按照“奇进偶不进”的原则。如: 若计算高差值为 -0.0545 m 应记为 -0.054; 若计算高差值为 -0.0655 m, 则应记为 -0.0656 m。

测段高差 = Σ (18)

(5) 测段视距计算。

测段视距 = Σ (9) + Σ (10)

任务 2.4 水准测量成果处理

2.4.1 外业工作检查

在进行内业计算之前必须对外业观测的原始数据和计算数据进行认真的检查和核对并进行初步的闭合差计算, 为内业平差奠定基础。

外业数据检查主要是针对规范中规定有限差要求的内容, 主要包括: 视距长度、视距差、视距累计差、黑红面读数之差、黑红面所测高差之差。特别注意的是数据应由不同的人反复检查, 不要盲目进行重测, 绝大部分可能是数据计算错误导致闭合差超限。

2.4.2 高程控制测量平差计算

高程平差计算是在闭合差满足规范要求的前提下, 根据已知点的高程值和观测的高差值, 通过平差处理求出待定点的最值或数值。

平差计算的步骤主要分为三步:

- 1) 闭合差计算: 观测值与理论值的差值;
- 2) 改正数计算: 对闭合差进行调整, 求出观测值对应的改正值;
- 3) 改正观测值: 对观测结果进行改正。

下面详细介绍平差过程

1. 计算高差闭合差 f_h 和高差闭合差的限差值 $f_{h容}$

$$f_h = \sum h_{测} \quad \text{闭合水准路线}$$

$$f_h = \sum h_{\text{测}} - (H_{\text{终}} - H_{\text{始}}) \quad \text{附和水准路线}$$

$$f_h = \sum h_{\text{往}} + \sum h_{\text{返}} \quad \text{支水准路线}$$

$f_{h\text{容}}$ 根据高程控制的等级按照规范要求来计算,例如三等水准测量,平地高差闭合差限差计算公式为 $\pm 12\sqrt{L}$ (见表 2-1)。

当 $|f|_h \leq |f_{h\text{容}}|$, 即闭合差小于限差要求,说明观测数据符合规范要求,可以进行后续平差,否则说明外业观测成果不符合要求,必须进行外业检查或重测。

2. 对高差闭合差进行调整和分配

高差闭合差调整和分配的原则是将高差闭合差按照各测段的测站数或距离成正比反符号分配到各测段观测高差中。

设每一测段高差改正数为 v_i , 则

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum n} n_i \quad (\text{分母为测站总数, } n_i \text{ 为具体测段的测站数})$$

或
$$v_i = -\frac{f_h}{\sum s} s_i \quad (\text{分母为水准路线总长, } s_i \text{ 为具体测段路线长})$$

检核:
$$\sum v = -f_h$$

3. 计算改正后测段的高差值 h_i'

$$\begin{aligned} h_1' &= h_1 + v_1 \\ &\vdots \\ h_i' &= h_i + v_i \end{aligned}$$

4. 计算待定点的高程值 $H_{\text{待}i}$

$$\begin{aligned} H_{\text{待}1} &= H_{\text{起}} + h_1' \\ H_{\text{待}2} &= H_1 + h_2' \\ &\vdots \\ H_{\text{待}n} &= H_{n-1} + h_n' \end{aligned}$$

检核 $H_{\text{终}} = H_{\text{待}n} + h_{n+1}' = H_{\text{终已知}}$

即由待定点推算得到的终点高程值与已知的终点高程值应相等。

2.4.3 水准测量成果计算实例

【例 2-2】附和水准路线的内业计算

下图 2-12 所示,一附和水准路线测量中, BM_1 和 BM_2 为已知水准点,其高程分别为 $H_{BM1} = 39.833\text{m}$, $H_{BM2} = 48.646\text{m}$, 待定点 1, 2, 3 将整个路线分为四个测段。

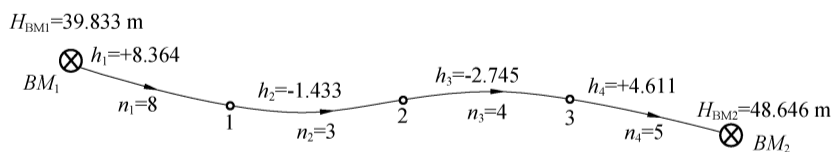


图 2-12 附和水准路线测量成果示意图

解算步骤:

(1) 将点名、各测段测站数、各测段的观测高差 h_i 、已知高程数填入表 2-4 内相应栏目中, 若为平地测量, 则将测站数栏改为公里数栏, 填入各测段公里数。表内加粗字为已知数据。

(2) 进行高差闭合差计算:

$$f_h = \sum h_{\text{测}} - (H_{\text{终}} - H_{\text{始}}) = 8.797 - (48.646 - 39.833) = -16\text{mm}$$

由于图中标注了测段的测站数, 说明是山地观测, 因此依据总测站数 n 计算高差闭合差的容许值为

$$[f_n] = \pm 6\sqrt{n} = \pm 6\sqrt{20} = \pm 27\text{mm}$$

计算的高差闭合差及其容许值填于表 2-4 下方的辅助计算栏。

(3) 高差闭合差的调整。

$f_h \leq f_{h\text{容}}$, 故其精度符合要求。

本例中, 将高差闭合差反符号, 按下式依次计算各测段的高差改正数:

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum n} \cdot n_i$$

式中, $\sum n$ ——测站总数;

n_i ——第 i 测段测站数。

第一测段的高差改正数为:

$$v_1 = -\frac{\Delta h}{\sum n} n_1 = -\frac{-16}{20} \times 8 = 6.4\text{mm}$$

同法算得其余各测段的高差改正数分别为 -2, -3, -3mm, 依次列入表 2-4 中第 5 栏。

注: ① 所算得的高差改正数总和应与高差闭合差的数值相等, 符号相反, 以此对计算进行校核。如因取整误差造成二者出现小的较差可对个别测段高差改正数的尾数适当取舍 1mm, 以满足改正数总和与闭合差数值相等的要求。② 若为平地, 高差改正数按各测

段长度比例分配, 用公式 $v_i = -\frac{f_h}{\sum L} L_i$ 计算, 式中, $\sum L$ 为路线总长; L_i 为第 i 测段长度

(km), ($i = 1、2、3\cdots$)。

(4) 计算待定点的高程。

将高差观测值加上改正数即得各测段改正后高差:

$$h_i' = h_i + v_i, (i = 1, 2, 3, 4)$$

据此, 即可依次推算各待定点的高程。(上例计算结果列入表 2-4 之第 6、7 栏)。

$$H_1 = H_A + h_1'$$

$$H_2 = H_1 + h_2'$$

...

$$H_{B(\text{算})} = H_{B(\text{已知})}$$

注: 改正后的高差代数和, 应等于高差的理论值 ($H_B - H_A$), 即: $\sum h' = H_B - H_A$ 。如不相等, 说明计算中有错误存在。最后推出的终点高程应与其已知的高程相等。

表 2-4 附和水准路线计算

测段号	点 名	测站数	观测高差/m	改正数/mm	改正后高差/m	高程/m	备注
1	2	3	4	5	6	7	8
1	BM_1	8	+8.364	+7	+8.371	39.833	
2	1	3	-1.433	+2	-1.431	48.204	
3	2	4	-2.745	+3	-2.742	46.773	
4	3	5	+4.611	+4	+4.615	44.031	
Σ	BM_2	20	+8.797	+16	+8.813	48.646	
辅助 计算	$f_h = -16\text{mm}$ $[f_n] = \pm 6 \sqrt{20} = \pm 27\text{mm}$						

任务 2.5 水准测量误差分析

在进行水准测量工作中，由于人的感觉器官反映的差异、仪器和自然条件等的影响，使测量成果不可避免地产生误差，因此应对产生的误差进行分析，并采用适当的措施和方法，尽可能减少或消除误差，使测量的精度符合要求。水准测量误差来自下列几个方面。

1. 仪器误差

(1) 仪器误差。测量时，即使已经进行了仪器的检验和校正，但是仍然会存在误差，一方面是因为仪器在制造过程中存在制造缺陷导致误差，这项误差是无法进行消除的；另一方面是检验和校正后的残余误差。在这些误差中，影响最大的就是水准管轴与视准轴不平行的误差，这项误差可通过后视与前视距离相等予以消除。

(2) 水准尺误差。水准尺的尺长变化、尺刻划不准确，都会给水准测量读数带来误差。

2. 观测误差

(1) 水准管气泡居中的误差。水准管气泡居中是用眼睛来判断的。由于眼睛分辨力的限制，气泡可能并没有严格居中，存在着水准管气泡居中的误差。

(2) 读数误差。产生读数误差的原因有：视差的存在和估读毫米产生的误差。存在视差应重新进行目镜和物镜对光，消除视差。水准尺一般为厘米分划，估读毫米产生的误差与望远镜的放大倍数和尺子到仪器的距离有关。望远镜放大倍数大，距离近，尺像就大，估读就准确；反之，估读误差就大。所以，放大率为 20 倍的望远镜，视线距离以不超过 75m 为宜。

(3) 水准尺倾斜误差。水准尺是否竖直，影响到水准测量读数的精度。尺子倾斜，将使读数值增大，其误差值为 $b_1(1 - \cos\alpha)$ ，如图 2-13 所示，式中 b_1 尺倾斜 α 角度的读数值。若尺子倾斜 3° ，在水准尺 1 m 处读数时将产生 1.4 mm 的误差；在 2.5 m 处将产生 3.4 mm。尺子倾斜而引起的误差与尺子倾斜的大小及视线截尺的高度有关。为了减小因扶尺不竖直而产生的读数误差，可在水准尺上安置圆水准器，使尺子竖直与否得以更好的判断。

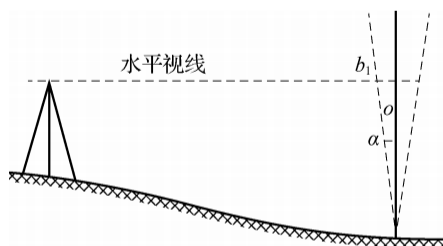


图 2-13 水准尺倾斜误差的误差

3. 外界因素的影响

(1) 仪器下沉和尺垫下沉的误差。如土质疏松，以及由于仪器、尺子的重量，可能会使仪器、尺垫下沉；由于土壤的弹性，也会使仪器、尺垫上升。要消除或减少仪器下沉误差的影响，应选择稳固的地方安置仪器，脚架尖入土稳定，在观测过程中不要用手扶脚架，缩短观测时间也可以减少仪器下沉误差的影响。在精度要求高的测量中，也可以应用双面尺法进行观测，观测的顺序是黑面后视、黑面前视，然后是红面前视、红面后视。计算黑面尺与红面尺的高差，取其平均值，可减少或消除此项误差影响。

转点的位置应放尺垫。当观测转点的前视读数后，仪器搬至下一站，若尺垫下沉（或上升），对该点的后视读数增大，使测量的高差增加。为了减少尺垫下沉误差的影响，应选择坚固稳定的地方作转点，使用尺垫时要用力踏实，在观测过程中保护好转点位置，精度要求高时也可用往返观测平均值来减少误差的影响。

(2) 地球曲率和大气折光的影响。对于地球曲率和大气折光的影响，可采用使后视与前视距离相等的方法，从而减小误差；若视线过低，受折光的影响便有所增加，故一般应使视线离地面的高度不少于 0.2 m。

项目测试

1. 什么是后视、前视？
2. 什么是转点，转点的作用是什么？
3. 水准测量中为什么要求前后视距离相等？
4. 单一水准路线可以布设成哪几种形式，各适用于什么情况？
5. 表 2-5 为四等水准测量的记录手簿，试完成表中各种计算和计算校核。

表 2-5 四等水准测量的记录

测站 编号	后尺	下丝	前尺	下丝	方向及尺号	标尺读数		k 加黑 减红	高差中数	备注			
		上丝		上丝									
	后距		前距			黑	红						
	视距差 d		Σ d										
1	1 842		1 213		后	1 628	6 315			K ₁ = 4687 K ₂ = 4787			
	1 415		0 785		前	0 999	5 787						
					后一前								
2	1 645		2 033		后	1 364	6 150				K ₁ = 4687 K ₂ = 4787		
	1 082		1 459		前	1 746	6 434						
					后一前								
3	1 918		1 839		后	1 620	6 306					K ₁ = 4687 K ₂ = 4787	
	1 322		1 253		前	1 546	6 334						
					后一前								
4	1 774		0 910		后	1 576	6 364						K ₁ = 4687 K ₂ = 4787
	1 388		0 526		前	0 718	5 405						
					后一前								
检核													

6. 闭合水准路线与附和水准路线在内业数据处理时有何异同？
 7. 计算并调整表 2-6 闭合水准路线的观测成果，求出各点的高程。

表 2-6 闭合水准路线高差成果计算表

点号	测站数	实测高差/m	改正数/m	改正后高差/m	高程/m
A					30.666
	2	-2.687			
1					
	1	+0.426			
2					
	3	+3.121			
3					
	1	+0.919			
4					
	2	-1.760			
A					30.666
校核					