

# 3

## 模块3

# 高程控制测量

### 学习目标

- (1) 掌握精密水准测量仪器的结构、性能及操作方法。
- (2) 掌握精密水准测量技术设计的内容及步骤,精密水准测量外业观测实施的方法、内容及注意事项;清楚精密水准测量内业计算的内容及过程。
- (3) 掌握精密水准测量仪器及高程控制测量数据处理软件的使用方法。
- (4) 了解电磁波测距高程导线测量的原理及方法。

本模块主要介绍常规精密高程控制测量(精密水准测量和电磁波测距高程导线测量)的基本原理、方法、内容及工作过程,包括精密水准仪的结构特点及使用方法,精密水准测量外业观测的误差来源、影响规律及消除(削弱)方法,精密水准测量技术设计、外业实施、内业计算的原理、方法和作业过程,电磁波测距高程导线测量的基本原理和工作过程。

## 3.1 高程控制测量概述

建立高程控制网的目的是为测量地形图和工程建设提供必要的高程控制基础,并为地壳垂直运动和平均海平面变化等科学技术问题的研究提供精确的高程资料。建立高程控制网的基本方法有三种:水准测量、三角高程测量和 GPS 高程测量,而其中水准测量是最常用、精度最高的高程控制测量方法。我国统一的国家高程控制网就是采用水准测量的方法。

为了建立统一的国家高程控制网,首先要选择高程系统和建立水准原点。选择高程系统就是确定表示地面点高程的统一基准面,所有的高程都以这个面为零起算,不同的高程基准面有不同的高程系统。我国经常使用的高程系统有大地高系统、正高系统和正常高系统。建立水准原点,就是确定国家高程控制网中用来计算高程的统一起始点。

### 3.1.1 高程系统

#### 1. 大地高系统

以参考椭球面为高程基准面的高程系统称为大地高系统。这个系统的高程是地面点沿法线方向到参考椭球面的距离,如图 3-1 中的  $AO'$  是地面点 A 的大地高。

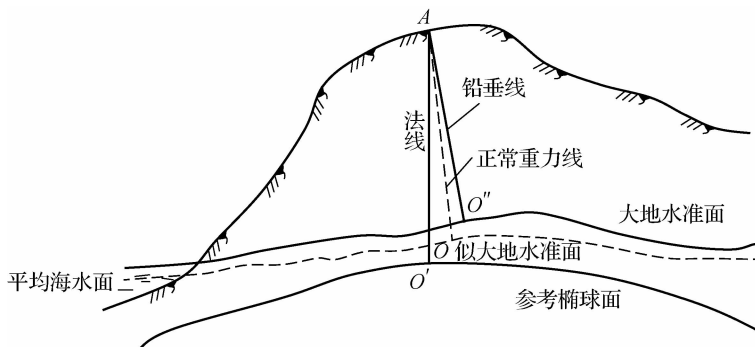


图 3-1 高程系统

#### 2. 正高系统

以大地水准面为高程基准面的高程系统称为正高系统。正高系统的高程是地面点沿铅垂线方向到大地水准面的距离,称为正高,如图 3-1 中的  $AO''$  就是点 A 的正高  $H_{正}$ 。由图 3-1 可以看出,大地水准面将大地高分为两部分,即正高和大地水准面至参考椭球面的距离(大地水准面差距)。严格地测定地面点的正高,需要量测沿水准路线的重力值,以及该点沿铅



垂线至大地水准面的重力平均值。因此,严格地说,地面上任一点的正高是不可能被精确求得的。换句话说,在陆地上无法精确测定大地水准面的形状。

### 3. 正常高系统

正常高是由地面点到一个与大地水准面很接近的基准面的距离,这个基准面称为似大地水准面。似大地水准面是由地面点沿正常重力线向下量取正常高所得到的点形成的连续曲面。换句话说,正常高是以似大地水准面为基准的高程面。在平均海面上,似大地水准面与大地水准面重合,且和平均海面一致。正常高可由水准高差求得,即

$$H_{\text{正常}}^B - H_{\text{正常}}^A = H_{\text{测}}^B - H_{\text{测}}^A + \epsilon + \lambda$$

式中,  $H_{\text{正常}}^B$  为 B 点的正常高程;  $H_{\text{正常}}^A$  为 A 点的正常高程;  $H_{\text{测}}^B$  为 B 点的测量高程;  $H_{\text{测}}^A$  为 A 点的测量高程;  $\epsilon$  为正常重力位水准面不平行改正(简称正常水准面不平行改正);  $\lambda$  为重力异常所引起的改正(简称重力异常改正)。

我国水准测量规范规定采用正常高系统。

### 3.1.2 我国的高程基准面与水准原点

1956年,我国根据基本验潮站应具备的条件,认为青岛验潮站具有位置适中,地处我国海岸线的中部,而且其所在港口是有代表性的规律性半日潮港,又避开了江河入海口,外海海面开阔,无密集岛屿和浅滩,海底平坦,水深在 10 m 以上等有利条件。因此,1957年确定青岛验潮站为我国基本验潮站,验潮井建在地质结构稳定的花岗石基岩上,以该站 1950—1956年的潮汐资料推求的平均海面作为我国的高程基准面。以此高程基准面作为我国统一起算面的高程系统,称为 1956 年黄海高程系统。

1956年黄海高程系统的高程基准面的确立,对统一全国高程有着重要的历史意义,对国防和经济建设、科学研究等方面都起到了重要的作用。但从潮汐变化周期来看,确立 1956 年黄海高程系统的平均海面所采用的验潮资料时间较短,还不到潮汐变化的一个周期(一个周期一般为 18.61 年),同时又发现验潮资料中含有粗差,因此有必要重新确定新的国家高程基准。

新的国家高程基准面是根据青岛验潮站 1952—1979 年的验潮资料计算确定的,将这个高程基准面作为全国高程的统一起算面,称为 1985 国家高程基准。

为了长期、牢固地表示出高程基准面的位置,并作为传递高程的起算点,必须建立稳固的水准原点(标石的构造如图 3-2 所示),用精密水准测量方法将它与验潮站的水准尺进行联测,以高程基准面为零推求水准原点的高程,以此高程作为全国各地推算高程的依据。在 1956 年黄海高程基准系统中,我国水准原点的高程为 72.289 3 m;在 1985 国家高程基准系统中,我国水准原点的高程为 72.260 m。

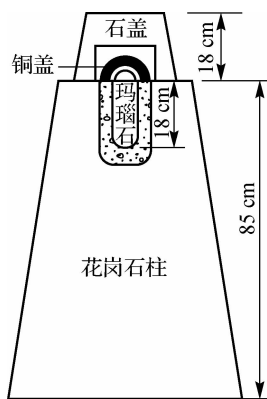


图 3-2 标石的构造

### 3.1.3 高程控制测量的作业流程

城市和工程建设水准测量既是各种大比例尺测图、城市工程测量和城市地面沉降观测

的高程控制基础,又是工程建设施工放样和监测工程建筑物垂直形变的依据,一般按水准测量的方法来建立。为了统一水准测量规格,考虑到城市和工程建设的特点,《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)和《工程测量规范》(GB 50026—2007)规定:水准测量分为二、三、四等三个等级。城市首级高程控制网一般要求布设成闭合环线,加密网可布设成附合路线和结点网。

高程控制测量工作实施的工作流程一般包括图上设计水准路线、踏勘、选点、埋石、绘制点之记和制定作业方案等。

### 1. 图上设计水准路线

水准网的布设应力求做到经济合理,因此,设计水准路线前应先对测区情况进行调查研究,搜集和分析测区已有的水准测量资料,拟定出合理的布设方案。

在图上设计水准路线时应遵循以下原则:

(1)水准路线应尽量沿坡度小的道路布设,尽量避免跨越河流、湖泊、沼泽等障碍物,以削弱前后视折光误差的影响。

(2)水准路线若与高压输电线或地下电缆平行,则应使水准路线在输电线或电缆 50 m 以外布设,以避免电磁场对水准测量的影响。

(3)布设首级高程控制网时,应考虑便于进一步加密。

(4)水准网应尽可能布设成环形网或结点网,个别情况下也可布设成附合路线。水准点间的距离:一般地区为 2~4 km,城市建筑区和工业区为 1~2 km。

(5)应与国家水准点进行联测,以求得高程系统的统一。

(6)注意测区已有水准测量成果的利用。

根据上述要求,首先应在图上初步拟定水准网的布设方案,再到实地选定水准路线和水准点的位置。在实地选线和选点时,还应注意使水准路线避开土质松软地段。确定水准点的位置时,应考虑到水准标石埋设后点位的稳固安全,并能长期保存,便于施测。

### 2. 踏勘、选点、埋石、绘制点之记

踏勘要解决的问题之一是根据图上初步拟定的水准网的布设方案,到实地选定水准路线和水准点的位置。水准点应设置在地质最为可靠的地点,避免设置在水滩、沼泽、沙土、滑坡和地下水位高的地方。当水准点埋设在铁路、公路近旁时,一般要求离铁路的距离应大于 50 m,离公路的距离应大于 20 m。水准点应尽量避免埋设在交通繁忙的道路交叉口,墙上水准点应选在永久性的大型建筑物上。

水准点选定后,就可以进行水准标石的埋设工作。水准点的高程是指嵌设在水准标石上面的水准标志顶面相对于高程基准面的高度。如果水准标石的埋设质量不好,容易产生垂直位移或倾斜,会导致水准点高程不可靠,因此必须重视水准标石的埋设质量。

国家水准点标石的制作材料、规格和埋设要求在《国家一、二等水准测量规范》(GB/T 12897—2006,以下简称水准规范)中都有具体的规定和说明。工程测量中常用的普通水准标石(见图 3-3)是由柱石和磐石两部分组成的,其中,标石可用混凝土浇制或用天然岩石制成。普通水准标石上面嵌设铜材或不锈钢金属标志。

水准标石埋设完成后,要现场绘制水准点点之记。水准点点之记的示例如图 3-4 所示。

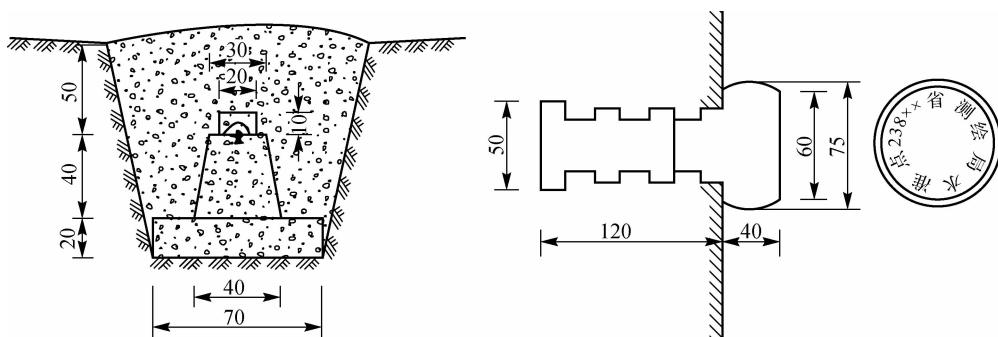


图 3-3 普通水准标石

四阜线		点名: BM007	
详细位置图		标石断面图	
所在图幅	21	标石类型	普通标石
经纬度	$B=42^{\circ}59'$ $L=124^{\circ}10'$	标石质料	混凝土
所在地	昌图县双庙镇贾家屯村	土地使用者	贾家屯村
地别土质	平地、黑土	地下水深度	5 m
交通路线	从双庙镇沿双八线向北行 6.5 km 可到贾家屯村		
点位 详细说明	点位: 在贾家屯通往胡家屯的沙石路东侧 1. 距东北高压线杆 21.50 m 2. 距东南高压线杆 27.60 m		
接管单位	辽宁省交通勘测设计院	保管者	
选点单位	国家测绘局 第二地形测量队	埋石单位	国家测绘局 第二地形测量队
选点者	薛 × ×	埋石者	周 × ×
选点日期	2014 年 12 月 3 日	埋石日期	2014 年 12 月 10 日
备注		维修单位	
		维修者	
		维修日期	

图 3-4 水准点点之记的示例

### 3. 制定作业方案

作业方案的制定要结合任务概况和测区的具体情况,在对已有测绘资料做出认真分析后进行。作业方案主要包括采用的高程基准及高程控制网等级、水准路线的长度及其构网图形、高程点或标志的类型与埋设要求、拟定的观测与联测方案、观测方法及技术要求等。技术要求应遵从测量规范,应起到指导外业实施和内业计算全过程的作用。在编写技术设计书时,应根据要求并结合《测绘技术总结编写规定》(CH/T 1001—2005)的相关规定列出需上交的资料清单。需上交的资料主要包括工程技术设计书、工程技术总结报告、质量检查及质量评定报告、仪器检定资料、水准测量观测手簿、水准测量计算资料(含国家水准点起算数据)、水准点点之记、全部数据光盘、水准路线图和高程控制点成果表。

## 3.2 精密光学水准仪与水准尺

### 3.2.1 精密水准仪的结构特点

为提高水准测量的精度,高等级水准测量必须采用精密水准仪进行观测。常用的精密水准仪有 S0.5 型精密水准仪和 S1 型精密水准仪,它们可用于国家一、二等水准测量和大型工程建筑物的施工测量及变形观测。

对于精密水准测量的精度而言,除受到一些外界因素的影响外,观测仪器——水准仪在结构上的精确性和可靠性对其也会产生重要的影响。为此,精密水准仪必须具备以下一些结构特点:

#### 1. 高质量的望远镜光学系统

为了能在望远镜中获得水准尺上分划线的清晰影像,精密水准仪的望远镜必须具有足够的放大倍率和较大的物镜孔径。一般精密水准仪的放大倍率应大于 40 倍,物镜的孔径应大于 50 mm。

#### 2. 坚固稳定的仪器结构

仪器的结构必须使视准轴与水准轴之间的联系稳定,不因外界条件的变化而改变它们之间的关系。一般精密水准仪的主要构件均用特殊的合金钢制成,并在仪器上套有起隔热作用的防护罩。

#### 3. 高精度的测微器装置

精密水准仪必须有光学测微器装置,用来精确地在水准尺上读数,以提高测量精度。一般精密光学水准仪的光学测微器可以读到 0.1 mm(或 0.05 mm),估读到 0.01 mm(或 0.005 mm)。

#### 4. 高灵敏度的管水准器

一般精密水准仪的管水准器的格值为  $10''/2$  mm。水准器的灵敏度越高,观测时使水准器气泡居中的难度就越大。为此,精密水准仪上必须有微倾螺旋,借以使视准轴与水准轴同时产生微量变化,从而使水准气泡较为容易地精确置中,以达到视准轴的精确整平。



### 5. 高性能的补偿器装置

对于自动安平水准仪,其补偿元件的质量和补偿装置的精密度可以影响补偿器性能的可靠性。如果补偿器不能给出正确的补偿量,或补偿不足,或补偿过量,都会影响精密水准测量观测成果的精度。

## 3.2.2 常用的精密水准仪

精密水准仪的型号有很多,我国目前使用较多的通常有瑞士生产的威特 N3(Wild N3)、德国生产的蔡司 Ni004 和我国生产的 S1 型精密水准仪等。

### 1. Wild N3 精密水准仪

Wild N3 精密水准仪的外形如图 3-5 所示。

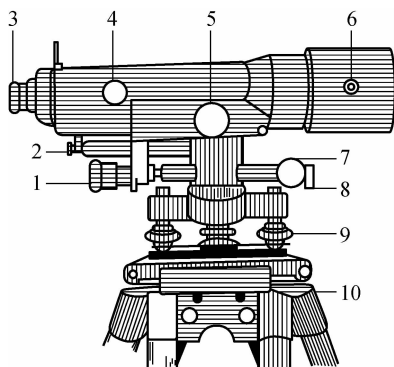


图 3-5 Wild N3 精密水准仪的外形

1—倾斜螺旋; 2—水准气泡反光镜; 3—望远镜目镜; 4—调焦螺旋; 5—平行玻璃板测微螺旋;  
6—平行玻璃板旋转轴; 7—水平微动螺旋; 8—水平制动螺旋; 9—脚螺旋; 10—脚架

望远镜物镜的有效孔径为 50 mm,放大倍率为 40 倍,管状水准器的格值为  $10''/2$  mm。Wild N3 精密水准仪与分格值为 10 mm 的精密因瓦水准尺配套使用,标尺的基辅差为 301.55 cm。在望远镜目镜的左边上下有两个小目镜,它们是符合气泡观察目镜和测微器读数目镜,在 3 个不同的目镜中所见到的影像如图 3-6 所示。

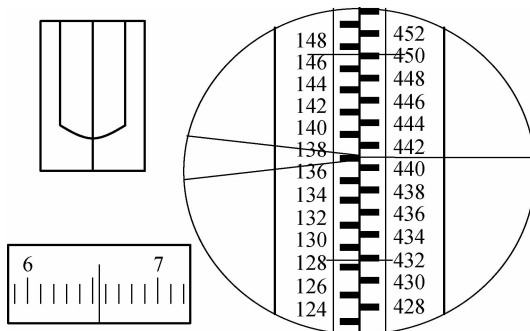


图 3-6 Wild N3 精密水准仪读数视场

### 1) Wild N3 精密水准仪的微倾螺旋装置

图 3-7 所示为 Wild N3 精密水准仪的微倾螺旋装置,它是一种杠杆结构,转动微倾螺旋



时,通过着力点  $D$  可以带动支臂绕支点  $A$  转动,使其对望远镜的作用点  $B$  产生微量升降,从而使望远镜绕转轴  $C$  做微量倾斜。由于望远镜与水准器是紧密相连的,因而微倾螺旋的旋转可以使水准轴和视准轴同时产生微量的倾斜变化,借以迅速而精确地将视准轴整平。

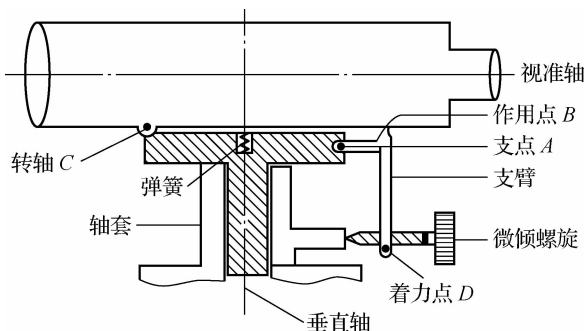


图 3-7 Wild N3 精密水准仪的微倾螺旋装置

### 2) Wild N3 精密水准仪的读数

转动倾斜螺旋,使观察目镜中的符合水准气泡两端符合,则视线精确水平,此时可转动测微螺旋使望远镜目镜中看到的楔形丝夹水准尺上的 138 分划线,也就是使 138 分划线平分楔角,再在测微器目镜中读出测微器读数 654(6.54 mm),故水平视线在水准尺上的全部读数为 138.654 cm。

### 3) Wild N3 精密水准仪的测微器装置

图 3-8 所示为 Wild N3 精密水准仪光学测微器的测微工作原理。由图可见,光学测微器由平行玻璃板、测微分划尺、传动杆和测微螺旋等部件组成。平行玻璃板和传动杆与测微分划尺相连。测微分划尺上有 100 个分格,它与 10 mm 相对应,即每分格为 0.1 mm,可估读至 0.01 mm。每 10 格有较长分划线并注记数字,每两条长分划线间的格值为 1 mm。当平行玻璃板与水平视线正交时,测微分划尺上的初始读数为 5 mm。转动测微螺旋时,传动杆将带动平行玻璃板相对于物镜做前俯后仰,并同时带动测微分划尺做相应的移动。平行玻璃板相对于物镜做前俯后仰,水平视线就会向上或向下做平行移动。若逆转测微螺旋,使平行玻璃板前俯到测微分划尺移至 10 mm 处,则水平视线向下平移 5 mm;反之,顺转测微螺旋,使平行玻璃板后仰到测微分划尺移至 0 mm 处,则水平视线向上平移 5 mm。

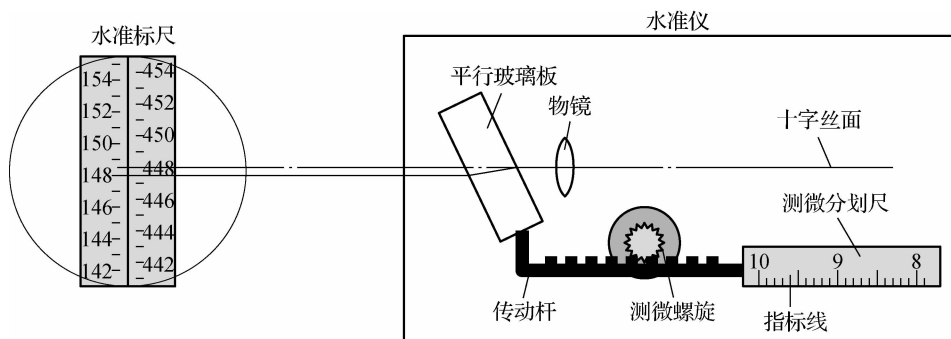


图 3-8 Wild N3 精密水准仪光学测微器的测微工作原理

在图 3-8 中,当平行玻璃板与水平视线正交时,水准尺上的读数应为  $a$ ,  $a$  在两相邻分划 148 与 149 之间,此时测微分划尺上的读数为 5 mm,而不是 0 mm。转动测微螺旋,平行玻





玻璃前俯,使水平视线向下平移与就近的 148 分划重合,这时测微分划尺上的读数为 6.50 mm,而水平视线的平移量应为  $6.50 - 5$  mm,最后读数  $a = 148 \text{ cm} + 6.50 \text{ mm} - 5 \text{ mm}$ ,即  $a = 148.650 \text{ cm} - 5 \text{ mm}$ 。

由上述可知,每次读数中应减去常数(初始读数)5 mm,但因在水准测量中计算高差时能自动抵消这个常数,所以在水准测量作业时,读数、记录、计算过程中都可以不考虑这个常数,但在单向读数时就必须减去这个初始读数。

### 2. 蔡司 Ni004 精密水准仪

蔡司 Ni004 精密水准仪的外形如图 3-9 所示。

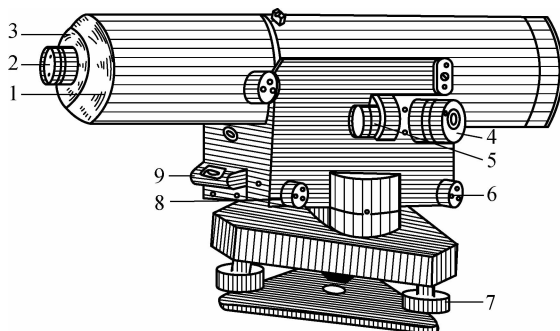


图 3-9 蔡司 Ni004 精密水准仪的外形

- 1—调焦螺旋; 2—望远镜目镜; 3—十字丝调整环; 4—测微鼓; 5—测微鼓读数放大镜;  
6—水平微动螺旋; 7—脚螺旋; 8—倾斜螺旋; 9—概略置平水准器

这种仪器的主要特点是对热影响的感应较小,即当外界温度变化时,水准轴与视准轴之间的交角  $i$  的变化很小,这是因为望远镜、管状水准器和平行玻璃板的倾斜设备等部件都装在一个附有绝热层的金属套筒内,这样就保证了水准仪上这些部件的温度迅速达到平衡。该仪器物镜的有效孔径为 56 mm,望远镜的放大倍率为 44 倍,望远镜目镜视场内有左右两组楔形丝(见图 3-10),右边一组楔形丝交角较小,在视距较远时使用,左边一组楔形丝交角较大,在视距较近时使用,管状水准器的格值为  $10''/2 \text{ mm}$ 。转动测微螺旋可使水平视线在 10 mm 范围内平移,测微分划尺直接与测微螺旋相连,通过放大镜在测微鼓上进行读数,测微鼓上有 100 个分格,所以测微鼓的最小格值为 0.1 mm。从望远镜目镜视场中所看到的影像如图 3-10 所示,视场下部是水准器的符合气泡影像。

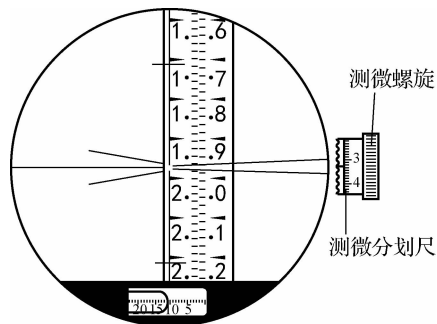


图 3-10 蔡司 Ni004 精密水准仪望远镜视场

蔡司 Ni004 精密水准仪与分格值为 5 mm 的精密因瓦水准尺配套使用。在图 3-10 中,使用测微螺旋使楔形丝夹准水准尺上的 197 分划,在测微分划尺上的读数为 340(3.40 mm),则水准尺上的全部读数为 197.340 cm。

### 3. 国产 S1 型精密水准仪

S1 型精密水准仪是北京测绘仪器厂生产的。仪器物镜的有效孔径为 50 mm,望远镜放大倍率为 40 倍,管状水准器的格值为  $10''/2$  mm。转动测微螺旋可使水平视线在 10 mm 范围内平移,测微分划尺有 100 个分格,故测微分划尺的最小格值为 0.1 mm。S1 型精密水准仪望远镜目镜视场如图 3-11 所示,视场左边是水准器的符合气泡影像,测微器读数显微镜在望远镜目镜的右下方。

国产 S1 型精密水准仪与分格值为 5 mm 的精密水准尺配套使用。

在图 3-11 中,使用测微螺旋使楔形丝夹准 198 分划,在测微器读数显微镜中的读数为 150(1.50 mm),水准尺上的全部读数为 198.150 cm。

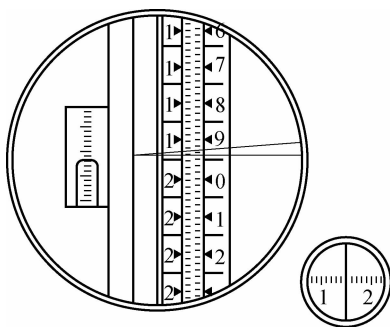


图 3-11 国产 S1 型精密水准仪望远镜目镜视场

### 3.2.3 精密水准尺的构造特点

水准尺是测定高差的长度标准,如果水准尺的长度有误差,将对精密水准测量的观测成果造成系统性的误差影响。为此,对精密水准尺提出以下要求:

#### 1. 水准尺不受温度和湿度的影响

当空气的温度和湿度发生变化时,水准尺分划间的长度必须保持稳定,或仅有微小的变化。一般精密水准尺的分划是漆在因瓦合金带上的,而因瓦合金带则以一定的拉力引张在木质尺身的沟槽中,这样因瓦合金带的长度就不会受木质尺身伸缩变形的影响。水准尺分划的数字是注记在因瓦合金带两旁的木质尺身上的,如图 3-12 所示。

#### 2. 水准尺的分划应正确与精密

水准尺的分划必须十分正确与精密,分划的偶然误差和系统误差都应很小。水准尺分划的偶然误差和系统误差的大小主要取决于分划刻度工艺的水平,当前精密水准尺分划的偶然中误差一般在  $8\sim 11\ \mu\text{m}$ 。由于精密水准尺分划的系统误差可以通过水准尺的平均每米真长加以改正,因而分划的偶然误差就代表了水准尺分划的综合精度。

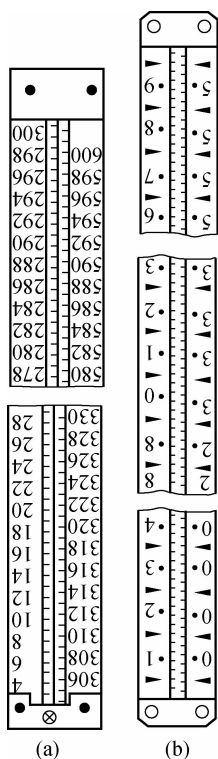


图 3-12 精密水准尺

### 3. 水准尺在构造上不应变形

水准尺在构造上应保证全长笔直,并且尺身不易发生长度和弯扭等变形。一般精密水准尺的木质尺身均应以经过特殊处理的优质木料制作。为了避免水准尺在使用中尺身底部磨损而改变尺身的长度,必须在水准尺的底面钉上坚固耐磨的金属底板。

在精密水准测量作业时,水准尺应竖立于特制的具有一定重量的尺垫或尺桩上。

### 4. 作业时水准尺应保持垂直

在精密水准尺的尺身上应附有圆水准器装置,作业时扶尺者借以使水准尺保持在垂直位置。在尺身上一般还应有扶尺环装置,以便扶尺者使水准尺稳定在垂直位置。

### 5. 水准尺在视觉上必须协调和便于观测

为了提高对水准尺分划的照准精度,水准尺分划的颜色应与水准尺的颜色相协调,一般精密水准尺都为黑色线条分划与浅黄色的尺面相配合,这有利于观测时对水准尺分划的精确照准。

线条分划精密水准尺的分格值有 10 mm 和 5 mm 两种。分格值为 10 mm 的精密水准尺如图 3-12(a)所示,它有两排分划,尺面右边一排的分划注记为 0~300 cm,称为基本分划;左边一排的分划注记为 300~600 cm,称为辅助分划。同一高度的基本分划与辅助分划的读数相差一个常数,称为基辅差,通常又称为尺常数。水准测量作业时可以用尺常数来检查读数的正确性。分格值为 5 mm 的精密水准尺如图 3-12(b)所示,它也有两排分划,但两排分划彼此错开 5 mm,所以实际上左边是单数分划,右边是双数分划,即单数分划和双数分划各占一

排,而没有辅助分划。木质尺面右边注记的是米数,左边注记的是分米数,整个注记为 0.1~5.9 m,实际分格值为 5 mm,分划注记比实际数值大了一倍,所以用这种水准尺所测得的高差值必须除以 2 才是实际的高差值。

### 3.2.4 数字水准仪

数字水准仪是 20 世纪末出现的新型几何水准测量仪器,它的出现解决了水准仪自动读数的问题。数字水准仪克服了传统光学水准仪的诸多弊端,因此得到了广泛的应用。

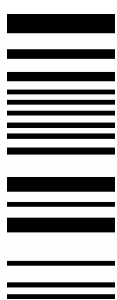


图 3-13 编码标尺

数字水准仪测量系统主要由编码标尺和数字水准仪组成。编码标尺的刻划全部由条构成,如图 3-13 所示。

#### 1. 数字水准仪的一般结构

数字水准仪的望远镜光学部分和机械结构与光学自动安平水准仪基本相同。图 3-14 所示为望远镜光学和主要部件的结构。图中的部件较自动安平水准仪多了调焦发送器、补偿器监视、分光镜和线阵探测器四个部件。调焦发送器的作用是测定调焦透镜的位置,由此计算仪器至水准尺的概略视距值;补偿器监视的作用是监视补偿器在测量时的功能是否正常;分光镜则是将经由物镜进入望远镜的光分离成红外光和可见光两个部分,红外光传送给线阵探测器作为探测标尺图像的光源,可见光穿过十字丝分划板经目镜供观测员观测水准尺;基于电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)摄像原理的线阵探测器是仪器的核心部件之一,其由 256 个光敏二极管组成,每个光敏二极管构成图像的一个像素。

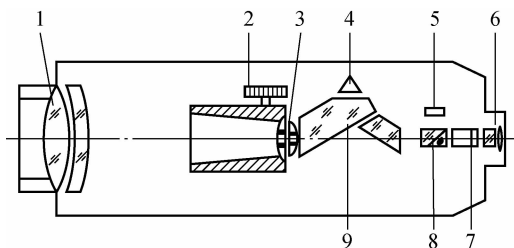


图 3-14 望远镜光学和主要部件的结构

1—物镜; 2—调焦发送器; 3—调焦透镜; 4—补偿器监视; 5—线阵探测器;  
6—目镜; 7—分划板; 8—分光镜; 9—补偿器

#### 2. 徕卡数字水准仪与水准尺

DNA03 是徕卡(Leica)第二代数字水准仪,如图 3-15 所示。1990 年,徕卡测量系统(Leica Geosystem)的前身——瑞士威特厂在世界上率先研制出数字水准仪 NA2000。2002 年 5 月,徕卡公司又推出了新型的 DNA03 数字水准仪,该仪器外形美观,大屏幕中文显示,测量数据可存入内存和 PC 卡,并具有符合我国水准规范的丰富的机载软件。先通过数字水准仪上的探测器来识别水准尺上的条形码,再经过数字影像处理,给出水准尺上的读数,取代了在水准尺上的目视读数。

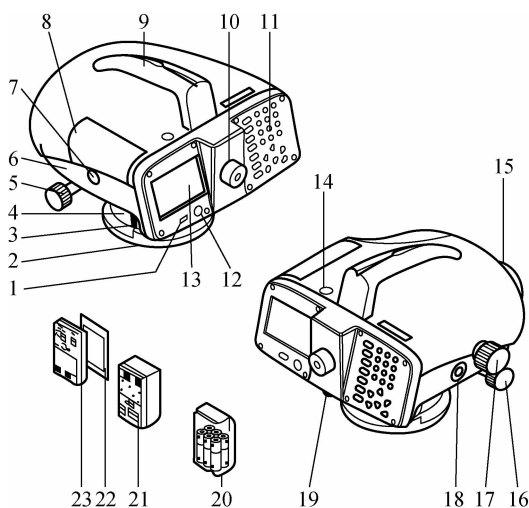


图 3-15 徕卡数字水准仪

- 1—开关；2—底盘；3—脚螺旋；4—水平度盘；5—电池盖操作杆；6—电池仓；7—开 PC 卡仓盖按钮；  
 8—PC 卡仓盖；9—带有粗瞄器的提把；10—目镜；11—键盘；12—圆水准器；13—显示屏；  
 14—圆水准器进光管；15—物镜；16—无限位水平微动螺旋；17—调焦螺旋；  
 18—测量按钮；19—外部供电的 RS232 接口；20—电池适配器 GAD3921；  
 21—GEB121 电池(选件)；22—PCMCIA 卡(选件)；  
 23—GEB111 电池(选件)

徕卡数字水准仪的主要功能是线路测量，在“线路测量”菜单下有“设置作业”“设置线路”和“设置限差”三项。在“设置作业”里可以命名作业名称(Job)、输入观测者姓名(Aper)等。在“设置线路”里输入线路名称(Name)和观测方法(Method)。观测方法有 BF、BFFB、aBF 和 aBFFB 四种方法可供选择，各种观测方法的说明见表 3-1。

表 3-1 各种观测方法的说明

观测方法	奇数站	偶数站
BF	BF(后—前)	BF(后—前)
aBF	BF(后—前)	FB(前—后)
BFFB	BFFB(后—前—前—后)	BFFB(后—前—前—后)
aBFFB	BFFB(后—前—前—后)	FBBF(前—后—后—前)

在“限差设置”里可以设置前后视距差(DistBal)、视线长度(MaxDist)、视线高度(StaLow)、测站高差之差(StaDif)、同一标尺两次读数之差(B-B/F-F)，设置的限差是否要遵守取决于应用需要。仪器设置了可以检查限差也可以不检查限差的功能[用定位键选择检查(on)或不检查(off)限差]，只要检查到测量成果超限，仪器就会立即报警并显示一条信息来说明哪项限差超限，而且允许立即重新测量。

以上参数都设置完后就可按照设置好的观测顺序进行观测了。

### 3. 数字水准仪的特点

#### 1) 数字水准仪的优点

数字水准仪由于省去了报数、听记、现场计算时间以及因人为出错而重测的环节,因而其测量时间与传统仪器的测量时间相比可以节省 1/3 左右。数字水准仪与微倾水准仪相比,具有以下优点:

(1) 读数客观,不存在误读、误记问题,没有人为读数误差;数据自动输出,自动存储。

(2) 视线高和视距读数都是采用大量条码分划图像经处理后取平均值得出来的,因此削弱了标尺分划误差的影响。多数仪器都有进行多次读数取平均值的功能,可以削弱外界条件的影响,使不熟练的作业人员也能进行高精度测量。

(3) 只需调焦和按键就可以自动读数,减轻了劳动强度;视距还能自动记录、检核和处理,并能输入电子计算机进行后处理,可实现内外业一体化;可以建立简便测量模式或多功能测量模式,如取平均值、中间值等。

(4) 能自动进行地球曲率改正,可以自动做  $i$  角改正,并且可以在标尺稍低于零的位置测量。

#### 2) 数字水准仪的缺点

数字水准仪也存在一些不如光学水准仪的地方,主要表现在以下几方面:

(1) 数字水准仪对标尺进行读数不如光学水准仪灵活。数字水准仪只能对其配套标尺进行照准读数,而在有些部门的应用中,使用自制的标尺,甚至是普通的钢板尺,只要有分划线,光学水准仪就能读数,而数字水准仪则无法工作。同时,数字水准仪要求有一定的视场范围,但有些情况下,只能通过一个较窄的狭缝进行照准读数,这时就只能使用光学水准仪。

(2) 数字水准仪受外界条件影响较大。由于数字水准仪是由 CCD 探测器来分辨标尺条码的图像,进而进行电子读数的,而 CCD 只能在有限的亮度范围内将图像转换为用于测量的有效电信号,因此,水准尺的亮度是很重要的,要求标尺亮度均匀且适中。

### 3.2.5 精密水准测量误差的来源及影响

在进行精密水准测量时会受到各种误差的影响,包括仪器误差、观测误差和外界因素的影响而产生的误差等。下面就几种主要误差进行分析,并讨论它们对精密水准观测成果的影响及应采取的措施。

#### 1. 仪器误差

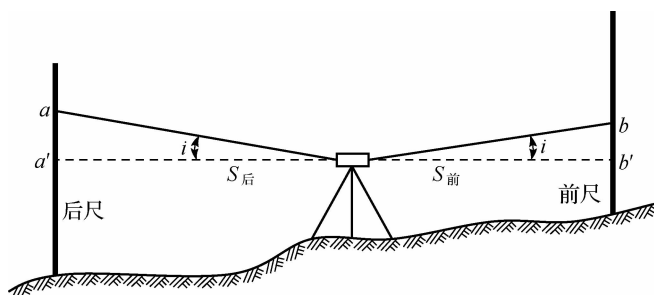
##### 1) $i$ 角的误差影响

虽然经过  $i$  角的检验校正,但是要使两轴完全保持平行是困难的,因此,当水准气泡居中时,视准轴仍不能保持水平,会使水准尺上的读数产生误差,并且该误差与视距成正比。

如图 3-16 所示,  $S_{前}$ 、 $S_{后}$  为前、后视距,由于存在  $i$  角,并假设  $i$  角不变的情况下,在前、后水准尺上的读数误差分别为  $\frac{i''S_{前}}{\rho}$  和  $\frac{i''S_{后}}{\rho}$ ,对高差的误差影响为

$$\delta_s = i''(S_{后} - S_{前}) \frac{1}{\rho} \quad (3-1)$$




 图 3-16  $i$  角的误差影响

对两个水准点之间一个测段的高差总和的误差影响为

$$\sum \delta_s = i'' (\sum S_{\text{后}} - \sum S_{\text{前}}) \frac{1}{\rho''} \quad (3-2)$$

由此可见,在  $i$  角保持不变的情况下,若一个测站上的前、后视距相等或一个测段的前、后视距总和相等,则在观测高差中  $i$  角的误差影响可以得到消除。但在实际作业中,要求前、后视距完全相等是困难的,为此必须规定一个限值。水准规范规定:二等水准测量的前、后视距差应不大于 1 m,前、后视距累积差应不大于 3 m。

#### 2) 交叉误差的影响

当仪器不存在  $i$  角,仪器的垂直轴严格垂直时,交叉误差  $\varphi$  并不影响在水准尺上的读数,因为仪器在水平方向上转动时,视准轴与水准轴在垂直面上的投影仍保持互相平行,所以对水准测量并无不利影响。但当仪器的垂直轴倾斜时,如与视准轴正交的方向倾斜一个角度,那么这时视准轴虽然仍处在水平位置,但是水准轴的两端却产生倾斜,从而使水准气泡偏离居中位置。仪器在水平方向上转动时,水准气泡将移动,当重新调整水准气泡居中进行观测时,视准轴就会偏离水平位置而倾斜,显然它将影响在水准尺上的读数。为了减少这种误差对水准测量成果的影响,应对水准仪上的圆水准器进行检验和校正,对交叉误差  $\varphi$  进行检验和校正。

#### 3) 水准尺每米长度误差的影响

在精密水准测量作业中必须使用经过检验的水准尺。设  $f$  为水准尺每米间隔平均真长误差,则对一个测站的观测高差  $h$  应加的改正数为

$$\delta_f = hf \quad (3-3)$$

对一个测段来说,应加的改正数为

$$\sum \delta_f = f \sum h \quad (3-4)$$

式中,  $\sum h$  为一个测段各测站观测高差之和。

#### 4) 两水准尺零点差的影响

两水准尺的零点误差不同,设  $a$ 、 $b$  水准尺的零点误差分别为  $\Delta a$  和  $\Delta b$ ,它们都会在水准尺上产生误差。

如图 3-17 所示,在测站 I 上顾及两水准尺的零点误差对前、后视水准尺上读数  $b_1$ 、 $a_1$  的影响,则测站 I 的观测高差为

$$h_{12} = (a_1 - \Delta a) - (b_1 - \Delta b) = (a_1 - b_1) - \Delta a + \Delta b \quad (3-5)$$

在测站 II 上,顾及两水准尺的零点误差对前、后视水准尺上读数  $a_2$ 、 $b_2$  的影响,则测站 II 的观测高差为

$$h_{23} = (b_2 - \Delta b) - (a_2 - \Delta a) = (b_2 - a_2) - \Delta b + \Delta a \quad (3-6)$$

则 1、3 点的高差,即 I、II 测站所测高差之和为

$$h_{13} = h_{12} + h_{23} = (a_1 - b_1) + (b_2 - a_2) \quad (3-7)$$

由此可见,尽管两水准尺的零点误差  $\Delta a \neq \Delta b$ ,但在两相邻测站的观测高差之和中抵消了这种误差的影响,故在实际水准测量作业中各测段的测站数目应安排成偶数,且在相邻测站上使两水准尺轮流作为前视尺和后视尺。

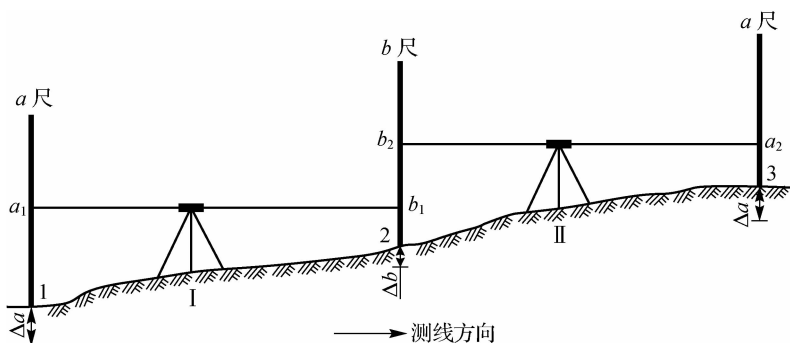


图 3-17 两水准尺零点误差的影响

## 2. 观测误差

精密水准测量的观测误差主要有水准器气泡居中的误差、照准水准尺上分划的误差和读数误差。这些误差都具有偶然误差性质,由于精密水准仪有微倾螺旋和符合水准器,并有光学测微器装置,可以提高水准器气泡居中的精度和读数精度,同时用楔形丝照准标尺上的分划线可以减小照准误差,因此,这些误差影响都可以被有效地控制在很小的范围内。试验结果的分析表明,这些误差对每测站上由基辅分划所得观测高差的平均值的影响还不到 0.1 mm。

## 3. 外界因素影响而产生的误差

### 1) 仪器和水准尺(尺台或尺桩)垂直位移的影响

仪器和水准尺在垂直方向位移所产生的误差是精密水准测量系统误差的重要来源。

按图 3-18 所示的观测程序,当仪器的三脚架随时间的延长而逐渐下沉时,在读完后视基本分划读数转向前视基本分划读数的时间内,视线将有所下降,而使前视基本分划读数偏小。同理,由于仪器的下沉,后视辅助分划读数偏小,如果前视基本分划的读数偏小的量与后视辅助分划相同,则采用“后前前后”观测程序所测得的基辅高差的平均值可以较好地消除这项误差的影响。

水准尺(尺台或尺桩)的垂直位移主要发生在迁站的过程中,由原来的前视尺转为后视尺而产生下沉,使后视读数偏大,使各测站的观测高差偏大,成为系统性的误差影响。这种误差影响在往返测高差的平均值中可以得到有效的抵偿,所以,水准测量一般都要求进行往返测。

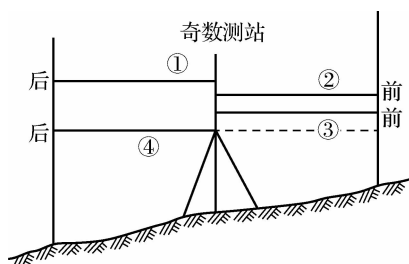


图 3-18 仪器垂直位移的影响

在实际作业中,要尽量减少水准尺的垂直位移,如立尺点要选在坚实的土壤上;水准尺立于尺台后至少 0.5 min 才可进行观测,这样可以减少其垂直位移量,从而减少其误差影响。

有时仪器三脚架和尺台(或尺桩)也会出现上升现象,就是当用力将三脚架或尺台压入地下之后,在不再用力的情况下,土壤的反作用力有时会使三脚架或尺台逐渐上升,如果水准测量路线沿着土壤性质相同的路线布设,而每次都有这种上升现象的发生,那么就会产生系统性的误差影响,根据研究,这种误差可以达到相当大的数值。

#### 2) 大气垂直折光的影响

近地面大气层的密度分布一般随离开地面的高度而变化。也就是说,近地面大气层的密度存在着梯度。因此,光线通过不断按梯度变化的大气层时,会引起折射系数的不断变化,导致视线成为一条各点具有不同曲率的曲线,在垂直方向产生弯曲,并且弯向大气密度较大的一方,这种现象叫作大气垂直折光。

如果在地势较为平坦的地区进行水准测量,前、后视距相等,则折光影响相同,视线弯曲的程度也相同。这样,在观测高差的过程中就可以消除这种误差的影响。但是,由于越接近地面的大气层,大气层密度的梯度越大,因为前、后视线离地面的高度不同,视线所通过大气层的密度也不同,折光影响也就不同,所以,前、后视线在垂直面内的弯曲程度也不同。当水准测量通过一个较长的坡度时,由于前视视线离地面的高度总是大于(或小于)后视视线离地面的高度,上坡时,前视所受的折光影响比后视大,视线弯曲凸向下方。这时,垂直折光对高差将产生系统性的误差影响。为了削弱垂直折光对观测高差的影响,应使前、后视距尽量相等,并使视线离地面有足够的高度;在坡度较大的水准路线上进行作业时,应适当缩短视距。

大气密度的变化还受到温度等因素的影响。上午由于地面吸热,使得地面上的大气层离地面越高、温度越低;中午以后,由于地面逐渐散热,地面温度开始低于大气的温度。因此,垂直折光的影响还与一天内的不同时间有关,在日出后 0.5 h 左右和日落前 0.5 h 左右这两段时间内,由于地表面的吸热和散热,使近地面的大气密度和折光差变化迅速而无规律,因而不宜进行观测;在中午一段时间内,由于太阳强烈照射,使空气对流剧烈,致使目标成像不稳定,也不宜进行观测。

为了削弱垂直折光对观测高差的影响,水准规范规定每个测段的往测和返测应分别在上半或下午,这样在往返测观测高差的平均值中可以削弱垂直折光的影响。折光影响是精密水准测量的一项主要的误差来源,它的影响与观测所处的气象条件、水准路线所处的地理位置和自然环境、观测时间、视线长度、测站高差及视线离地面的高度等诸多因素有关。虽然当前已有一些试图计算折光改正数的公式,但精确的改正值还是难以测算。因此,在精密

水准测量作业时必须严格遵守水准规范中的有关规定。

### 3) 温度变化对 $i$ 角的影响

精密水准仪的水准管框架是同望远镜筒固连的,为了使水准管轴与视准轴的联系比较稳固,这些部件采用因瓦合金钢制造,并把镜筒和框架整体装置在一个隔热性能良好的套筒内,以防止由于温度的变化使仪器有关部件产生不同程度的膨胀或收缩,而引起  $i$  角的变化。

但是当温度变化时,完全避免  $i$  角的变化是不可能的。例如,仪器受热的部位不同,对  $i$  角的影响也不同,当太阳射向物镜和目镜端时,影响最大;旁射水准管一侧时,影响较小;旁射与水准管相对的另一侧时,影响最小。因此,温度的变化对  $i$  角的影响是极其复杂的。试验结果表明,当仪器周围的温度均匀地每变化  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, $i$  角将平均变化约  $0.5''$ ,有时甚至更大些,可达到  $1''\sim 2''$ 。

由于  $i$  角受温度变化的影响很复杂,因而对观测高差的影响是难以用改变观测程序的办法来完全消除的;而且,这种误差的影响在往返测不符值中也不能完全被发现,这就使高差中数受到系统性的误差影响。因此,削弱这种误差影响最有效的方法是减少仪器受辐射热的影响,如观测时打伞,避免日光直接照射仪器,以减小  $i$  角的复杂变化。同时,在观测开始前,应将仪器预先从箱中取出,使仪器的温度与周围空气的温度一致。

如果认为在观测的较短时间段内,由于受温度的影响, $i$  角与时间成正比例地均匀变化,则可以采用改变观测程序的方法在一定程度上来消除或削弱这种误差对观测高差的影响。

两相邻测站 I、II 对于基本分划如果按下列①、②、③、④的程序观测,即在测站 I 上,①后视、②前视;在测站 II 上,③前视、④后视,则由图 3-19 可知,对测站 I、II 观测高差的影响分别为  $-S(i_2 - i_1)$  和  $+S(i_4 - i_3)$ ,其中, $S$  为视距, $i_1, i_2, i_3, i_4$  为相应于每次中丝读数时的  $i$  角。

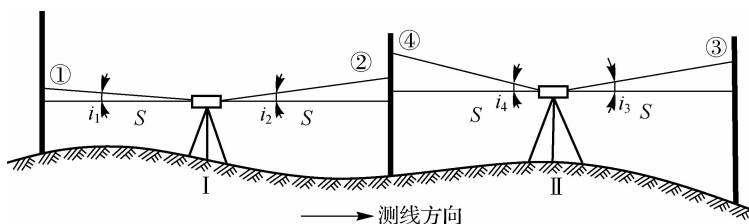


图 3-19 温度变化对  $i$  角的影响

由于在观测的较短时间段内, $i$  角与时间成正比例地均匀变化,因而  $i_2 - i_1 = i_4 - i_3$ ,由此可见,在测站 I、II 的观测高差之和中抵消了由于  $i$  角变化的误差影响。但是,由于  $i$  角的变化不可能完全按照与时间成比例地均匀变化,因此,严格地说,  $(i_2 - i_1)$  与  $(i_4 - i_3)$  不一定完全相等,而且相邻奇偶测站的视距也不一定相等,所以按上述程序进行观测,只能说基本上消除了由于  $i$  角变化的误差影响。

同理,相邻测站 I、II 辅助分划的观测程序应为:在测站 I 上,①前视、②后视;在测站 II 上,③后视、④前视。

综上所述,在相邻两个测站上,基本分划和辅助分划的观测程序可以归纳为:奇数站的观测程序是后(基)一前(基)一前(辅)一后(辅),偶数站的观测程序是前(基)一后(基)一后(辅)一前(辅)。

所以,将测段的测站数安排成偶数,对于削减由于  $i$  角变化对观测高差的误差影响也是必要的。



### 3.2.6 精密水准仪及水准尺的检验

为了保证水准测量成果的精度,在水准测量作业开始前,需对所用的水准仪和水准尺,按国家水准测量规范的规定进行必要的检验。

#### 1. 精密水准仪的检验

精密水准仪的检验项目主要包括水准仪的检验、概略水准器的检校、 $i$ 角误差的检校、光学测微器隙动差和分划值的测定等。

##### 1) 水准仪的检验

水准仪的检验,要求从外观上对水准仪做出评价,并做记录。水准仪的检验项目和内容如下:

- (1) 外观检查,主要检查各部件是否清洁,有无碰伤、划痕、污点、脱胶、镀膜脱落等现象。
- (2) 转动部件检查,主要检查各转动部件、转动轴和调整制动等转动是否灵活、平稳,各部件有无松动、失调、明显晃动,螺纹的磨损程度等。
- (3) 光学性能检查,主要检查望远镜视场是否明亮、清晰、均匀,调焦性能是否正确等。
- (4) 补偿性能检查,对于自动安平水准仪应检查其补偿器是否正常,有无沾摆现象。
- (5) 设备件数清点,主要检查仪器部件及附件和备用零件是否齐全。

##### 2) 概略水准器的检校

先用脚螺旋使概略水准气泡居中,然后旋转仪器  $180^\circ$ 。此时若气泡偏离中央,则用水准器改正螺丝改正其偏差的一半,用脚螺旋改正另一半,使气泡回到中央。

如此反复检校,直到仪器无论转到任何方向气泡中心始终位于中央时为止。

##### 3) $i$ 角误差的检校

测定  $i$ 角的方法有很多,但基本原理是相同的,都是利用  $i$ 角对水准尺上读数的影响与距离成比例这一特点,通过比较不同距离情况下水准尺上读数的差异而求出  $i$ 角。

一般测定  $i$ 角的方法是:距仪器  $s$  和  $2s$  处分别选定  $A$  点和  $B$  点,并在此两点安置水准尺, $A$ 、 $B$  两点的高差是未知数,由于  $i$ 角是未知数,因此要选定两个安置仪器的点  $J_1$  和  $J_2$ ,如图 3-20 所示。在  $J_1$  点和  $J_2$  点分别安置仪器测量  $A$ 、 $B$  两点间的高差,得到两份成果,建立相应的方程式,从而求出  $i$ 角。

在  $J_1$  测站上照准水准尺  $A$  和  $B$ ,读数为  $a_1$  和  $b_1$ ,当  $i=0$  时,水平视线在水准尺上的正确读数应为  $a'_1$  和  $b'_1$ ,所以由于  $i$ 角引起的误差分别为  $\Delta$  和  $2\Delta$ 。同样,在  $J_2$  测站上照准水准尺  $A$  和  $B$ ,读数为  $a_2$  和  $b_2$ ,正确读数应为  $a'_2$  和  $b'_2$ ,其误差分别为  $2\Delta$  和  $\Delta$ 。

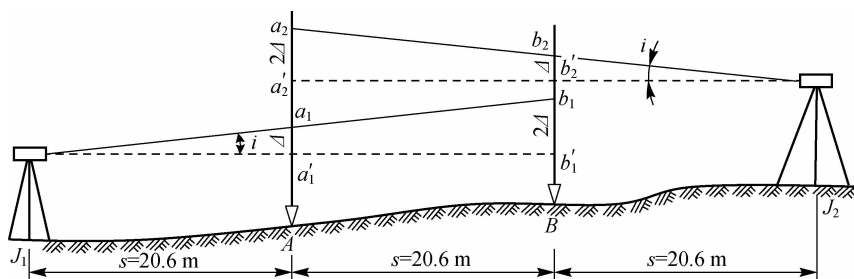


图 3-20  $i$ 角检验

在测站  $J_1$  和  $J_2$  上得到  $A$ 、 $B$  两点的正确(没有  $i$  角影响)高差分别为

$$\left. \begin{aligned} h'_1 &= a'_1 - b'_1 = (a_1 - \Delta) - (b_1 - 2\Delta) = a_1 - b_1 + \Delta \\ h'_2 &= a'_2 - b'_2 = (a_2 - 2\Delta) - (b_2 - \Delta) = a_2 - b_2 - \Delta \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

若不顾及其他误差的影响,则由式(3-8)可得

$$2\Delta = (a_2 - b_2) - (a_1 - b_1) \quad (3-9)$$

式中,  $(a_2 - b_2)$  和  $(a_1 - b_1)$  是仪器存在  $i$  角时分别在测站  $J_2$  和  $J_1$  测得  $A$ 、 $B$  两点间的观测高差,以  $h_2$  和  $h_1$  表示,则式(3-9)可写为

$$\Delta = \frac{1}{2}(h_2 - h_1) \quad (3-10)$$

由图 3-20 可得

$$\Delta = i'' s \frac{1}{\rho}$$

故

$$i'' = \frac{\rho''}{s} \Delta \quad (3-11)$$

为了简化计算,测定  $i$  角时使  $s = 20.6$  m,则

$$i'' = 10\Delta \quad (3-12)$$

式中,  $\Delta$  以 mm 为单位,  $\Delta$  可按式(3-11)计算。

水准规范规定,用于精密水准测量的仪器必须进行检验(见表 3-2)。如果  $i$  角大于  $15''$ ,则需要校正。

表 3-2  $i$  角误差的检验

仪器: N3    No: 777017    标尺: 11687 11688    观测者: 王建  
日期: 2011 年 8 月 25 日    成像: 清晰    记录者: 姜利

测站	观测次序	标尺读数		高差 $a - b / \text{mm}$	$i$ 角计算
		A 尺读数 $a / \text{mm}$	B 尺读数 $b / \text{mm}$		
$J_1$	1	198 712	199 140	-4.38	$s = 20.6 \text{ m}$ $2\Delta = (a_2 - b_2) - (a_1 - b_1)$ $= -0.10 \text{ mm}$ $i'' = 10\Delta = -0.50''$
	2	198 708	199 142		
	3	198 704	199 154		
	4	198 708	199 150		
	中数	198 708	199 146		
$J_2$	1	210 952	211 394	-4.48	
	2	210 956	211 410		
	3	210 944	211 396		
	4	210 958	211 400		
	中数	210 952	211 400		

#### 4) 光学测微器分划值和隙动差的测定

光学测微器是精密测定小于水准尺最小分划线间隔值尾数的设备。测微器本身效用是否正确、测微器分划尺的分划值是否正确都会直接影响到读数的精度。因此,在作业前应进行此项检验和测定。

测定测微器分划值的基本思想是:利用一把分划值经过精密检定的特制分划尺与测微





器分划尺进行比较求得。将特制分划尺竖立在与仪器等高的一定距离处,旋转测微螺旋,使楔形丝先后对准特制分划尺上两相邻的分划线,这时测微器分划尺移动了  $L$  格。若特制分划尺分划线的间隔值为  $d$ ,测得的测微器分划尺的一个分格值为  $g$ ,则

$$g = \frac{d}{L} \quad (3-13)$$

光学测微器隙动差的检验应选择成像清晰且稳定的时间内进行,在距离仪器  $5 \sim 6$  m 处竖立特制分划尺,可以选用三级标准线纹尺或其他同等精度钢尺,用其  $1$  mm 刻划面进行此项检验。

(1) 观测方法。测定时,应使测微器上所有使用的分划线均受到检验,测定应进行 3 组,每组应观测 5 个测回,每测回分往测(旋进或旋出)和返测(旋出或旋进)。

测定开始时,先将仪器整置水平,并将测微器转到零分划附近处,然后取标准尺上 6 条间隔为  $5$  mm 的分划线,使中丝与一条分划线重合。此时,测微器上的读数应在  $0 \sim 3$  格。

每测回的操作如下:

① 往测。旋进(或旋出)光学测微器,依次照准 1 至 6 的每条分划线。每次照准时,使中丝与分划线重合,并读取测微器读数为  $a$ 。

② 返测。往测完后马上进行返测,旋出(或旋进)光学测微器依次以相反方向照准 6 至 1 的每条分划线,读数方法同往测,读数为  $b$ 。

其余各测回的观测方法同上,5 个测回组成一组,以后各组的观测方法与第一组的相同。

(2) 计算方法。

测微器隙动差  $\Delta$  为

$$\Delta = \sum (a_0 - b_0) / 18 \quad (3-14)$$

式中, $a_0$ 、 $b_0$  分别为特制分划尺每条分划线的读数  $a$ 、 $b$  的每组平均值。

测微器分划值为

$$g = \sum d / \sum L \quad (3-15)$$

式中, $d$  为中丝对准标准尺首末分划间隔(mm); $L$  为中丝对准首、末分划时测微器转动量(格)。

水准规范规定,实测格值与名义格值之差(测微器分划线偏差)应小于  $0.001$  mm,否则应送厂修理。

光学测微器隙动差的测定主要是比较旋进测微螺旋和旋出测微螺旋,照准特制分划尺上同一分划线在测微器分划尺上的读数,如果读数差  $\Delta$  超过 2 格,表明测微器效用不正确,其主要原因是测微器装置不完善。为了避免这种误差的影响,在作业时只采用旋进测微螺旋进行读数。当  $\Delta$  过大时,光学测微器应送厂修理。

## 2. 精密水准尺的检验

水准规范规定在精密水准测量作业前需要对水准尺进行检验,检验项目包括水准尺的检视、水准尺圆水准器的检校、水准尺分划面弯曲差的测定、一对水准尺每米分划真长的测定、一对水准尺零点不等差及基辅分划读数差的测定等。对于新购置的水准尺,还需进行水准尺中轴线和水准尺底面垂直性等项目的检验。

### 1) 水准尺的检视

此项检验,要求从外观上对水准尺做出评价,并做记录。检查内容如下:

- (1) 标尺有无凹陷、裂缝、碰伤、划痕、脱漆等现象。
- (2) 标尺刻划线和注记是否粗细均匀、清晰,有无异常伤痕,能否读数。

### 2) 水准尺上圆水准器的检校

(1) 在距水准仪约 50 m 处的尺桩上安置水准尺,使水准尺的中线(或边缘)与望远镜竖丝精密重合。若水准尺上的气泡偏离,则用改针将水准尺圆形水准气泡调至中央。

(2) 将水准尺旋转 180°,使水准尺的中线(或边缘)与望远镜竖丝精密重合,观察气泡,若气泡居中,则表示水准尺此面已经垂直,否则应重新对水准仪十字丝进行检校。

(3) 旋转水准尺 90°,检查水准尺的另一面是否垂直,其检验方法同(1)、(2)两项。

(4) 如此反复检校多次,使水准尺能按圆水准器准确地定位于垂直位置。

### 3) 标尺分划面弯曲差的测定

水准尺分划面如果有弯曲,观测时将使读数过大。水准尺分划面的弯曲程度用弯曲差来表示。弯曲差是指通过分划面两端点的直线中点至分划面的距离。弯曲差越大,水准尺越弯曲。

设弯曲的分划面长度为  $l$ ,分划面两端点间的直线长度为  $L$ ,则尺长变化  $\Delta l = l - L$ 。若测得分划面的弯曲差为  $f$ ,可导出尺长变化  $\Delta l$  与弯曲差  $f$  的关系式为

$$\Delta l = l - L = \frac{8f^2}{l}$$

尺长一般为 3 m,每米改正数为

$$\Delta l = \frac{8f^2}{3l} \quad (3-16)$$

分划面的弯曲所引起的尺长改正数  $\Delta l$  可按式(3-16)计算。设标尺的名义长度  $l = 3$  m,测得  $f = 4$  mm,则  $\Delta l = 0.014$  mm,影响每米分划平均真长为 0.005 mm,对高差的影响是系统性的。水准规范规定,线条式因瓦水准尺的弯曲差  $f$  不得大于 4 mm,当超过此限值时,应对水准尺施加尺长改正。

弯曲差的测定方法是:在水准尺的两端点引张一条细线,量取细线中点至分划面的距离,即为标尺的弯曲差。

### 4) 一对水准尺每米分划真长的测定

按水准规范规定,精密水准尺在作业开始前和作业结束后应送专门的检定部门进行每米真长的检验,取一对水准尺的检定成果的中数作为一对水准尺平均每米真长。一对水准尺的平均每米真长与名义长度 1 m 之差称为平均米真长误差,以  $f$  表示,即

$$f = \text{平均米真长} - 1 \quad (3-17)$$

用于精密水准测量的水准尺,水准规范规定,如果一对水准尺的平均米真长误差大于 0.1 mm 就不能用于作业。若一对水准尺平均米真长误差大于 0.02 mm,则应对水准测量的观测高差施加每米真长改正  $\delta$ ,从而得到改正后的高差  $h'$ ,即

$$h' = h + \delta = h + fh \quad (3-18)$$

式中, $h$  以 m 为单位; $f$  以 mm/m 为单位。



#### 5) 一对水准尺零点不等差及基辅分划读数差的测定

水准尺的注记是从底面算起的,对于分格值为 10 mm 的精密因瓦水准尺,如果从底面至第一分划线中线的距离不是 10 mm,其差数叫作零点误差。一对水准尺的零点误差之差,叫作一对水准尺的零点不等差。当水准尺存在这种误差时,在水准测量一个测站的观测高差中就含有这种误差的影响。在相邻两测站所得观测高差之和,这种误差的影响可以得到抵消,因此,水准规范规定水准路线的每个测段应安排成偶数测站。

在同一视线高度上,水准尺上的基本分划与辅助分划的读数差称为基辅差,也称为尺常数,如 1 cm 分格的水准尺(如 Wild N3 精密水准尺)的尺常数为 3.015 50 m。若检定结果与名义值相差过大,则在水准测量检核计算时应考虑这一误差。

基辅差的检定方法是:在距仪器 20~30 m 处竖立水准尺,整平仪器后,分别对水准尺的基本分划和辅助分划各读数 3 次;再竖立另一水准尺,读数方法如前。为了提高检定的精度,需检定三测回,每测回都要将水准尺分别竖立在三个木桩上进行读数。

## 3.3 精密水准测量的实施

精密水准测量一般指国家一、二等水准测量,因在各项工程的不同建设阶段的高程控制测量中极少进行一等水准测量,故在《工程测量规范》(GB 50026—2007)中将水准测量分为二、三、四等三个等级,其精度指标与国家水准测量的相应等级一致。

下面以二等水准测量为例来说明精密水准测量的实施。

### 3.3.1 精密水准测量作业的一般规定

根据各种误差的性质及其影响规律,水准规范中对精密水准测量的实施做出了各种相应的规定,目的在于尽可能消除或削弱各种误差对观测成果的影响。

(1) 观测前 30 min,应将仪器置于露天阴影处,使仪器与外界气温趋于一致;观测时,应用测伞遮蔽阳光;迁站时,应罩以仪器罩。

(2) 仪器距前、后视水准尺的距离应尽量相等,其差应小于规定的限值。二等水准测量中规定,一测站前、后视距差应小于 1.0 m,前、后视距累积差应小于 3 m。这样,可以消除或削弱与距离有关的各种误差对观测高差的影响,如  $i$  角误差和垂直折光等的影响。

(3) 对于气泡式水准仪,观测前应测出倾斜螺旋的置平零点并做标记,随着气温的变化,应随时调整置平零点的位置。对于自动安平水准仪的圆水准器,须严格置平。

(4) 在同一测站上观测时,不得两次调焦;转动仪器的倾斜螺旋和测微螺旋,其最后旋转方向均应为旋进,以避免倾斜螺旋和测微器隙动差对观测成果的影响。

(5) 在两相邻测站上,应按奇、偶数测站的观测程序进行观测,对于往测奇数测站按“后—前—前—后”、偶数测站按“前—后—后—前”的观测程序在相邻测站上交替进行。返测时,奇数测站和偶数测站的观测程序与往测时相反,即奇数测站由前视开始,偶数测站由后视开始。这样的观测程序可以消除或削弱与时间成比例均匀变化的误差对观测高差的影响,如  $i$  角的变化和仪器的垂直位移等的影响。

(6)在连续各测站上安置水准仪时,应使其中的两个脚螺旋与水准路线的方向平行,而第三个脚螺旋轮换置于路线方向的左侧和右侧。

(7)每一测段的往测和返测,其测站数均应为偶数,由往测转向返测时,两水准尺应互换位置,并应重新整置仪器。在水准路线上,每一测段的测站应安排成偶数,以削弱两水准尺零点不等差等误差对观测高差的影响。

(8)每一测段的水准测量路线应进行往测和返测,这样可以消除或削弱性质相同、正负号也相同的误差影响,如水准尺垂直位移的误差影响。

(9)一个测段的水准测量路线的往测和返测应在不同的气象条件下进行,如分别在上午和下午观测。

(10)使用补偿式自动安平水准仪观测的操作程序与使用水准器水准仪相同。观测前,应对圆水准器进行严格的检验和校正;观测时,应严格使圆水准器气泡居中。

(11)水准测量的观测工作间歇时,最好能结束在固定的水准点上,否则,应选择两个坚固可靠、光滑突出、便于放置水准尺的固定点,作为间歇点加以标记;间歇后,应对两个间歇点的高差进行检测,检测结果如果符合限差要求(对于二等水准测量,规定检测间歇点高差之差应不大于 1.0 mm),就可以从间歇点起测。若仅能选定一个固定点作为间歇点,则在间歇后应仔细检视,确认没有发生任何位移,才可由间歇点起测。

### 3.3.2 精密水准测量观测

#### 1. 测站观测程序

往测时,奇数测站照准水准尺分划的顺序为:后视标尺的基本分划—前视标尺的基本分划—前视标尺的辅助分划—后视标尺的辅助分划。

往测时,偶数测站照准水准尺分划的顺序为:前视标尺的基本分划—后视标尺的基本分划—后视标尺的辅助分划—前视标尺的辅助分划。

返测时,奇、偶数测站照准水准尺的顺序分别与往测偶、奇数测站相同。

按光学测微法进行观测,以往测奇数测站为例,一测站的操作程序如下:

(1)置平仪器。气泡式水准仪望远镜绕垂直轴旋转时,水准气泡两端影像的分离不得超过 1 cm;对于自动安平水准仪,要求圆气泡位于指标圆环中央。

(2)将望远镜照准后视水准尺,使符合水准气泡两端影像近于符合(双摆位自动安平水准仪应置于第Ⅰ摆位)。随后用上、下丝分别照准水准尺基本分划进行视距读数[如表 3-3 中的(1)和(2)]。视距读取 4 位,第四位数由测微器直接读得。然后,使符合水准气泡两端影像精确符合,使用测微螺旋用楔形平分线精确照准水准尺的基本分划,并读取水准尺基本分划和测微分划的读数(3)。测微分划读数取至测微器最小分划。

(3)旋转望远镜,照准前视标尺,并使符合水准气泡两端影像精确符合(双摆位自动安平水准仪仍在第Ⅰ摆位),用楔形平分线照准水准尺基本分划,并读取水准尺基本分划和测微分划的读数(4)。然后用上、下丝分别照准水准尺基本分划进行视距读数(5)和(6)。

(4)用水平微动螺旋使望远镜照准前视标尺的辅助分划,并使符合气泡两端影像精确符合(双摆位自动安平水准仪置于第Ⅱ摆位),用楔形平分线精确照准并进行水准尺辅助分划与测微分划的读数(7)。

(5)旋转望远镜,照准后视标尺的辅助分划,并使符合水准气泡两端影像精确符合(双摆



位自动安平水准仪仍在第Ⅱ摆位),用楔形平分线精确照准并进行水准尺辅助分划与测微分划的读数(8)。

表 3-3 一、二等水准观测记录样表

测自 \_\_\_\_\_ 至 \_\_\_\_\_ 年 月 日  
 时间 始 时 分 末 时 分 成像 \_\_\_\_\_  
 温度 \_\_\_\_\_ 云量 \_\_\_\_\_ 风向风速 \_\_\_\_\_  
 天气 \_\_\_\_\_ 土质 \_\_\_\_\_ 太阳方向 \_\_\_\_\_

测站 编号	后尺	下丝	前尺	下丝	方向及 尺号	标尺读数		基+K-辅 (一减二)	备注
		上丝		上丝		基本分划 (一次)	辅助分划 (二次)		
	后距		前距						
	视距差 $d$		视距差 $\sum d$						
		(1)		(5)	后	(3)	(8)	(14)	
		(2)		(6)	前	(4)	(7)	(13)	
		(9)		(10)	后-前	(15)	(16)	(17)	
		(11)		(12)	$h$	—		(18)	
					后				
					前				
					后-前				
					$h$				

2. 精密水准测量的测站检核计算

1) 精密水准测站计算

表 3-3 中的第(1)栏至第(8)栏是读数的记录部分,第(9)栏至第(18)栏是计算部分,现以往测奇数站的观测程序为例,说明计算内容和计算步骤。

视距部分的计算:(9)=(1)-(2),(10)=(5)-(6),(11)=(9)-(10),(12)=(11)+前站(12)。

高差部分的计算:(14)=(3)+K-(8),(13)=(4)+K-(7),(15)=(3)-(4),(16)=(8)-(7),(17)=(14)-(13)=(15)-(16)。式中,K为基辅差。

高差部分的检核:(18)=[(15)+(16)]/2。

以上即一测站全部操作和观测过程。

一、二等精密水准测量外业计算尾数取位应符合表 3-4 的规定。

表 3-4 一、二等精密水准测量外业计算尾数取位

等 级	项 目					
	往(返)测 距离总和/km	测段距离 中数/km	各测站高差 /mm	往(返)测 高差总和/mm	测段高差 中数/mm	水准点 高程/mm
一	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	1
二	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1	1



表 3-3 中的观测数据是用 N3 精密水准仪测得的,当用 S1 型或 Ni004 精密水准仪进行观测时,由于与这种水准仪配套的水准尺无辅助分划,因而在记录表格的基本分划与辅助分划的记录栏内分别记入第一次读数和第二次读数。

### 2) 水准测量限差

一、二等水准测量限差的技术要求见表 3-5。

表 3-5 一、二等水准测量限差的技术要求

等级	仪器类型	视线长度 /m	前后视距差/m	任一测站上前后视距差累积 /m	视线高度(下丝读数)/m	基辅分划读数的差/mm	基辅分划所测高差的差/mm	上下丝读数平均值与中丝读数的差		水准路线测段往返测高差不符值 /mm
								0.5 cm 刻划标尺 /mm	1 cm 刻划标尺 /mm	
一等	DS05	≤30	≤0.5	≤1.5	≥0.5	≤0.3	≤0.4	≤1.5	≤3.0	≤±2√K
二等	DS1	≤50	≤1.0	≤3.0	≥0.3	≤0.4	≤0.6	≤1.5	≤3.0	≤±4√K

注:K 为往返测段、附和、闭合或环线的长度(km)。

测段路线往返测高差不符值、附和路线和环线闭合差及检测已测测段高差之差的限差应不超过表 3-6 的规定。

表 3-6 水准测量的主要技术要求

单位:mm

等级	测段、区段、路线往返测高差不符值	附和路线闭合差	环线闭合差	检测已测测段高差之差
一等	$1.8\sqrt{K}$	—	$2\sqrt{F}$	$3\sqrt{R}$
二等	$4\sqrt{K}$	$4\sqrt{L}$	$4\sqrt{F}$	$6\sqrt{R}$

注:K 为测段、区段或路线长度(km),当测段长度小于 0.1 km 时,按 0.1 km 计算;L 为附和路线长度(km);F 为环线长度(km);R 为检测测段长度(km)。

若测段路线往返测高差不符值超限,则应先就可靠程度较小的往测或返测进行整测段重测;若附和路线和环线闭合差超限,则应就路线上可靠程度较小(往返测高差不符值较大或观测条件较差)的某些测段进行重测,如果重测后仍不符合限差,则应重测其他测段。

### 3. 水准测量的精度

水准测量的精度根据往返测的高差不符值来评定,因为往返测的高差不符值集中反映了水准测量各种误差的共同影响。这些误差对水准测量精度的影响,不论其性质或变化规律都是极其复杂的,其中有偶然误差的影响,也有系统误差的影响。

根据研究和分析可知,在短距离内,在一个测段的往返测高差不符值中,偶然误差是可以得到反映的,虽然不排除有系统误差的影响,但毕竟由于距离短,影响很微弱,因而用测段的往返高差不符值  $\Delta$  来估计偶然中误差还是合理的。在长的水准线路中,如一个闭合环,影响观测的除了有偶然误差外还有系统误差,而且这种系统误差在很长的路线上也表现出偶然性质。环形闭合差表现为真误差的性质,因而可以利用环形闭合差  $W$  来估计含有偶然误差和系统误差在内的全中误差。水准规范中所采用的计算水准测量精度的公式,就是以这种基本思想为基础而导得的。





由  $n$  个测段往返测的高差不符值  $\Delta$  计算每千米单程高差的偶然中误差(相当于单位权观测中误差)的公式为

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta\Delta}{R} \right]} \quad (3-19)$$

往返测高差平均值的每千米偶然中误差为

$$M_{\Delta} = \frac{1}{2} \mu = \pm \sqrt{\frac{1}{4n} \left[ \frac{\Delta\Delta}{R} \right]} \quad (3-20)$$

式中,  $\Delta$  为各测段往返测的高差不符值(mm);  $R$  为各测段的长度(km);  $n$  为测段数。

式(3-20)是不严密的,因为在计算偶然误差时,该式完全没有顾及系统误差的影响。但顾及系统误差的严密公式,形式比较复杂,计算也比较麻烦,而且所得结果与式(3-20)所算得的结果相差甚微,所以式(3-20)虽然不够严密,但可以认为是具有足够可靠性的。

按水准规范规定,一、二等水准路线须以测段往返高差不符值按式(3-20)计算每千米水准测量往返高差中数的偶然中误差  $M_{\Delta}$ 。当水准路线构成水准网的水准环超过 20 个时,还需按水准环闭合差  $W$  计算每千米水准测量高差中数的全中误差  $M_w$ 。

计算每千米水准测量的全中误差  $M_w$  的公式为

$$M_w = \pm \sqrt{\frac{[WW/F]}{N}} \quad (3-21)$$

式中,  $W$  为经过各项改正后的水准环闭合差(mm);  $F$  为水准环线周长(km);  $N$  为水准环数。

每千米水准测量的偶然中误差  $M_{\Delta}$  和每千米水准测量的全中误差  $M_w$  的限值列于表 3-7 中。

表 3-7  $M_{\Delta}$  和  $M_w$  的限值

单位:mm

测量等级	一等	二等
$M_{\Delta}$	$\leq 0.45$	$\leq 1.0$
$M_w$	$\leq 1.0$	$\leq 2.0$

当偶然中误差  $M_{\Delta}$  和全中误差  $M_w$  超限时,应分析原因,重测有关测段或路线。

## 3.4 精密水准测量的内业计算

精密水准测量外业结束后需进行内业工作。内业计算是在对外业观测资料进行严格检查,确认正确无误,各项限差都符合要求后,才可进行的工作。精密水准测量的内业计算主要包括水准测量的概算和水准网的平差计算。

### 3.4.1 水准测量的概算

水准测量概算的主要内容有水准尺每米长度误差的改正数计算、正常水准面不平行的改正数计算、水准测量路线闭合差计算和高差改正数的计算等。

1. 水准尺每米长度误差的改正数计算

水准尺每米长度误差对高差的影响是系统性质的。根据规定,当一对水准尺每米长度的平均误差  $f > \pm 0.02 \text{ mm}$  时,就要对观测高差进行改正,对于一个测段的改正数  $\sum \delta_f$  可按式(3-22)计算,即

$$\sum \delta_f = f \sum h \quad (3-22)$$

由于往返测观测高差的符号相反,所以往返测观测高差的改正数也将有不同的正负号。

设一对水准尺经检定得一米间隔的平均真长为  $999.96 \text{ mm}$ ,则  $f = (999.96 - 1000) = -0.04 \text{ mm}$ 。在表 3-8 中第一测段,即从 I 柳宝 35<sub>基</sub> 到 II 宜柳 1 水准点的往返测高差  $h' = 20.345 \text{ m}$ ,则该测段往返测高差的改正数  $\sum \delta_f$  为

$$\sum \delta_f = -0.04 \times 20.345 = -0.81(\text{mm})$$

表 3-8 正常水准面不平行改正与路线闭合差的计算

二等水准路线:自 宜州 至 柳城

水准点编号	纬度 $\varphi / (^\circ ')$	观测高差 $h' / \text{m}$	近似高程 /m	平均高程 $H / \text{m}$	纬差 $\Delta\varphi / (')$	$H\Delta\varphi$	正常水准面不平行改正 $\varepsilon = -AH\Delta\varphi / \text{mm}$	附 记
I 柳宝 35 <sub>基</sub>	24 28	+20.345	425	435	-3	-1 305	+1.5	已知: I 柳宝 35 <sub>基</sub> 高程为 424.876 m, I 宜柳 1 <sub>基</sub> 高程为 573.128 m, 本例的 A 按平均纬度 $\varphi_m = 24^\circ 18'$ 查表为 $1.153 \times 10^{-9}$
II 宜柳 1	25	+77.304	445	484	-3	-1 452	+1.7	
II 宜柳 2	22	+55.577	523	550	-3	-1 650	+1.9	
II 宜柳 3	19	+73.451	578	615	-3	-1 845	+2.1	
II 宜柳 4	16	+17.094	652	660	-2	-1 320	+1.5	
II 宜柳 5	14	+32.772	669	686	-3	-2 058	+2.4	
II 宜柳 6	11	+80.548	702	742	-2	-1 484	+1.7	
II 宜柳 7	9	+11.745	782	788	-1	-788	+0.9	
II 宜柳 8	8	-18.073	794	785	+1	+785	-0.9	
II 宜柳 9	9	-10.146	776	771	+1	+771	-0.9	
II 宜柳 10	10	-101.098	766	716	+1	+716	-0.8	
II 宜柳 11	11	-61.960	665	634	+2	+1 268	-1.5	
II 宜柳 12	13	-54.996	603	576	+2	+1 152	-1.3	
II 宜柳 13	15	+10.051	548	553	+2	+1 106	-2.0	
II 宜柳 14	17	+15.649	558	566	+3	+1 698		
I 宜柳 1 <sub>基</sub>	20		573					
							+5.0	

2. 正常水准面不平行的改正数计算

如果假定不同高程的水准面是互相平行的,那么水准测量所测定的高差就是水准面之



间的垂直距离,这种假定在较短距离的情况下与实际相差不大,但在较长距离的情况下,是不正确的。

在空间重力场中的任何物质都受到重力的作用而使其具有位能。对水准面上的单位质点而言,它的位能大小与质点所处高度及该点重力加速度有关。我们把这种随着位置和重力加速度大小而变化的位能称为重力位能,并以  $W$  表示,则有

$$W = gh \tag{3-23}$$

式中,  $g$  为重力加速度;  $h$  为单位质点所处的高度。

由于同一水准面上各点的重力位能相等,因而,水准面又称为重力等位面,或称正常水准面。如果将单位质点从一个正常水准面提高到相距  $\Delta h$  的另一个正常水准面,其所做的功就等于两正常水准面的位能差,即  $\Delta W = g\Delta h$ 。在图 3-21 中,设  $\Delta h_A$ 、 $\Delta h_B$  分别表示两个非常接近的正常水准面在  $A$ 、 $B$  两点的垂直距离,  $g_A$ 、 $g_B$  分别为  $A$ 、 $B$  两点的重力加速度,由于正常水准面具有重力位能相等的性质,因此,  $A$ 、 $B$  两点所在水准面的位能差  $\Delta W$  应有下列关系:

$$\Delta W = g_A \Delta h_A = g_B \Delta h_B \tag{3-24}$$

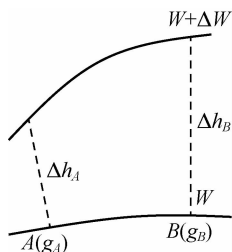


图 3-21 正常水准面的不平行性

由于同一水准面上不同点的重力加速度  $g$  值是不同的,因而由式(3-24)可知,  $\Delta h_A$  与  $\Delta h_B$  必定不相等。也就是说,任何两邻近的正常水准面之间的距离在不同的点上是不相等的,并且与作用在这些点上的重力成反比。以上的分析说明,正常水准面不是相互平行的,这是水准面的一个重要特性,称为水准面不平行性。

重力加速度  $g$  值是随纬度的不同而变化的,在赤道处有较小的  $g$  值,而在两极处  $g$  值较大,因此,水准面是相互不平行的且向两极收敛的、接近椭圆形的曲面。

水准面的不平行性对水准测量将产生什么影响呢?

水准测量所测定的高程是由水准路线上各测站所得高差求和而得到的,在图 3-22 中,地面点  $B$  的高程可以沿水准路线  $OAB$  按各测站测得的高差  $\Delta h_1$ 、 $\Delta h_2$ 、 $\dots$  之和求得,即

$$H_{\text{测}}^B = \sum_{OAB} \Delta h \tag{3-25}$$

如果沿另一条水准路线  $ONB$  施测,则  $B$  点的高程应为水准路线  $ONB$  各测站测得的高差  $\Delta h'_1$ 、 $\Delta h'_2$ 、 $\dots$  之和,即

$$H'^B_{\text{测}} = \sum_{ONB} \Delta h' \tag{3-26}$$

由水准面的不平行性可知  $\sum_{OAB} \Delta h \neq \sum_{ONB} \Delta h'$ ,因此  $H_{\text{测}}^B$  与  $H'^B_{\text{测}}$  必定不相等,也就是说,用水准测量测得的两点间的高差随测量所循水准路线的不同而不同。

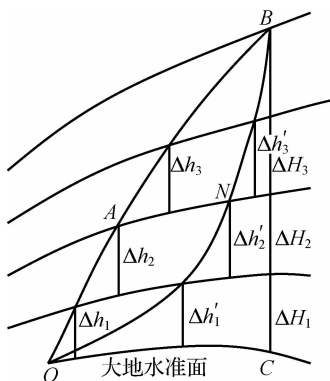


图 3-22 正常水准面不平行性对水准测量的影响

由此可见,即使水准路线完全没有误差,但由于  $H_{测}^B \neq H'^B_{测}$ ,因而水准路线构成的闭合环形 OABNO 的闭合差也不为零。在闭合环形水准路线中,水准面不平行性所产生的闭合差称为理论闭合差。

水准面的不平行性,使得两高程控制点间的高差沿不同的水准测量路线所测得的结果不一致。为了使点的高程有唯一确定的数值,就必须在观测高差中加入正常水准面不平行改正数,这也就是采用统一高程系统的问题。我国采用的统一的高程系统是正常高高程系统,在这个高程系统中,地面点的正常高高程是以似大地水准面为基准面的高程。

将观测高差归算为正常高高差,应加入正常水准面不平行改正数,即

$$\begin{aligned} \epsilon_i &= -AH_i\Delta\varphi'_i & (3-27) \\ \Delta\varphi'_i &= \varphi_2 - \varphi_1 \end{aligned}$$

式中,  $\epsilon_i$  为水准测量路线中第  $i$  测段的正常水准面不平行改正数 (mm);  $A$  为常系数,  $A = 0.000\ 001\ 537\ 1\sin\ 2\varphi$ ,  $\varphi$  为水准路线的纬度中数;  $H_i$  为第  $i$  测段始末点的近似高程平均值 (m);  $\Delta\varphi'_i$  为第  $i$  测段始末点的纬度差 ( $'$ ), 其值从水准点点之记或水准测量路线图中查取。

正常水准面不平行改正数  $\epsilon$  的计算见表 3-8。在表中,  $\varphi_m = 24^\circ 18'$ ,  $A = 1\ 153 \times 10^{-9}$ , 第一测段 (I 柳宝 35<sub>基</sub> 到 II 宜柳 1 水准测量路线) 始末点近似高程的平均值  $H = (425 + 445) \div 2 = 435$ , 纬度差  $\Delta\varphi = -3'$ , 则第一测段的正常水准面不平行改正数  $\epsilon_1$  为

$$\epsilon_1 = -1\ 153 \times 10^{-9} \times 435 \times (-3) = +1.5 (\text{mm})$$

### 3. 水准测量路线闭合差计算

水准测量路线闭合差  $W$  的计算公式为

$$W = (H_0 - H_n) + \sum h' + \sum \epsilon \quad (3-28)$$

式中,  $H_0$ 、 $H_n$  分别为水准测量路线两端点的已知高程;  $\sum h'$  为水准测量路线中各测段观测高差加入尺长改正数  $\delta_f$  后的往返测高差中数之和;  $\sum \epsilon$  为水准测量路线中各测段的正常水准面不平行改正数之和。根据表 3-8 和表 3-9 中的数据按式 (3-28) 计算水准路线的闭合差为

$$W = (424.876 - 573.128)\text{m} + 148.256\ 5\ \text{m} + 5.0\ \text{mm} = 9.5 (\text{mm})$$

### 4. 高差改正数的计算

水准测量路线中每个测段的高差改正数  $v$  可按式 (3-29) 计算, 即



$$v = -\frac{R}{\sum R}W \quad (3-29)$$

即将水准测量路线闭合差  $W$  按与测段距离成正比的比例配赋到各测段的高差中。在表 3-9 中,水准测量路线的全长  $\sum R=80.5 \text{ km}$ ,第一测段的长度  $R=5.8 \text{ km}$ ,则第一测段的高差改正数为

$$v = -\frac{5.8}{80.5} \times 9.5 = -0.68(\text{mm})$$

最后根据已知点高程及改正后的高差计算水准点的概略高程,即

$$H = H_0 + \sum h' + \sum \epsilon + \sum v \quad (3-30)$$

例如,II 宜柳 1 的概略高程为

$$H_1 = 424\ 876 + 20\ 344.5 + 1.5 - 0.68 = 445\ 221.32(\text{mm})$$

表 3-9 二等水准测量外业高差和概略高程计算

水准点编号	测段编号	测段距离/km		往返测段距离中数 R/km	测站数 n		观测高差 h/m		标尺长度改正 δ/mm		往返测高差不符值 Δ/mm	ΔΔ/R /mm	加 δ 后往返测高差中数 h'/m
		往测	返测		往测	返测	往测	返测	往测	返测			
I 柳宝 35 <sub>基</sub>	1	5.75	5.85	5.8	98	96	20.344 42	-20.346 28	-0.81	0.81	-1.86	0.6	20.344 5
II 宜柳 1	2	5.61	5.59	5.6	100	98	77.304 18	-77.302 85	-3.09	3.09	1.33	0.3	77.300 4
II 宜柳 2	3	4.98	5.02	5.0	74	72	55.576 08	-55.577 65	-2.22	2.22	-1.57	0.5	55.574 6
II 宜柳 3	4	5.61	5.59	5.6	98	96	73.450 18	-73.451 80	-2.94	2.94	-1.62	0.5	73.448 1
II 宜柳 4	5	5.41	5.39	5.4	94	94	17.094 70	-17.094 10	-0.68	0.68	0.60	0.1	17.093 7
II 宜柳 5	6	5.71	5.69	5.7	82	80	32.770 58	-32.772 95	-1.31	1.31	-2.37	1.0	32.770 5
II 宜柳 6	7	5.89	5.91	5.9	94	92	80.548 52	-80.547 05	-3.22	3.22	1.47	0.4	80.544 6
II 宜柳 7	8	4.88	4.92	4.9	94	94	11.745 28	-11.745 02	-0.47	0.47	0.26	0.0	11.744 7
II 宜柳 8	9	5.29	5.31	5.3	78	76	-18.074 48	18.071 82	0.72	-0.72	-2.66	1.3	-18.072 4
II 宜柳 9	10	4.79	4.81	4.8	80	74	-10.145 55	10.146 12	0.41	-0.41	0.57	0.1	-10.145 4
II 宜柳 10	11	5.57	5.63	5.6	102	93	-101.097 35	101.099 32	4.04	-4.04	1.97	0.7	-101.094 3
II 宜柳 11	12	5.00	5.40	5.2	96	96	-61.959 32	61.959 85	2.48	-2.48	0.53	0.1	-61.957 1
II 宜柳 12	13	4.67	4.73	4.7	74	72	-54.996 60	54.996 18	2.20	-2.20	-0.42	0.0	-54.994 2
II 宜柳 13	14	5.89	5.91	5.9	102	98	10.050 25	-10.051 68	-0.40	0.40	-1.43	0.3	10.050 6
II 宜柳 14	15	5.00	5.20	5.1	86	82	15.648 22	-15.649 72	-0.63	0.63	-1.50	0.4	15.648 3
I 宜柳 1 <sub>基</sub>													
Σ		80.05	80.95	80.5	1 352	1 313	148.259 11	-148.265 81				6.3	148.256 5

续表

水准点号	测段编号	近似高程 $H_0/m$	平均高程 $H_m/m$	纬度 $\varphi$	纬差 $\Delta\varphi / (')$	平均纬度 $\varphi_m$	水准面不平行改正 $\varepsilon/mm$	加 $\varepsilon$ 后往返测高差中数 $/m$	高差改正数 $v/mm$	改正后高差 $/m$	概略高程 $H/m$
I 柳宝 35基	1	424.876 0	435.048 3	24°28'00"	-3.00	24°26'30"	1.5	20.346 0	-0.69	20.345 4	424.876 0
II 宜柳 1	2	445.220 5	483.870 7	24°25'00"	-3.00	24°23'30"	1.7	77.302 1	-0.67	77.301 4	445.221 4
II 宜柳 2	3	522.521 0	550.308 3	24°22'00"	-3.00	24°20'30"	1.9	55.576 6	-0.60	55.576 0	522.522 8
II 宜柳 3	4	578.095 6	614.819 6	24°19'00"	-3.00	24°17'30"	2.1	73.450 2	-0.67	73.449 5	578.098 7
II 宜柳 4	5	651.543 7	660.090 5	24°16'00"	-2.00	24°15'00"	1.5	17.095 2	-0.65	17.094 6	651.548 3
II 宜柳 5	6	668.637 4	685.022 6	24°14'00"	-3.00	24°12'30"	2.4	32.772 8	-0.68	32.772 1	668.642 8
II 宜柳 6	7	701.407 8	741.680 1	24°11'00"	-2.00	24°10'00"	1.7	80.546 3	-0.71	80.545 6	701.415 0
II 宜柳 7	8	781.952 4	787.824 7	24°09'00"	-1.00	24°08'30"	0.9	11.745 6	-0.59	11.745 0	781.960 5
II 宜柳 8	9	793.697 1	784.660 9	24°08'00"	1.00	24°08'30"	-0.9	-18.073 3	-0.63	-18.074 0	793.705 5
II 宜柳 9	10	775.624 6	770.551 9	24°09'00"	1.00	24°09'30"	-0.9	-10.146 3	-0.57	-10.146 9	775.631 6
II 宜柳 10	11	765.479 2	714.932 1	24°10'00"	1.00	24°10'30"	-0.8	-101.095 1	-0.67	-101.095 8	765.484 7
II 宜柳 11	12	664.384 9	633.406 4	24°11'00"	2.00	24°12'00"	-1.5	-61.958 6	-0.62	-61.959 2	664.388 9
II 宜柳 12	13	602.427 8	574.930 7	24°13'00"	2.00	24°14'00"	-1.3	-54.995 5	-0.56	-54.996 1	602.429 7
II 宜柳 13	14	547.433 6	552.458 9	24°15'00"	2.00	24°16'00"	-1.3	10.049 3	-0.71	10.048 6	547.433 6
II 宜柳 14	15	557.484 2	565.306 1	24°17'00"	3.00	24°18'30"	-2.0	15.646 4	-0.61	15.645 8	557.482 2
I 柳南 1基		573.128 0		24°20'00"							573.128 0
$\Sigma$							5.1	148.261 6			(检核)

### 3.4.2 水准网的平差计算

水准网的平差计算工作可采用专用测绘数据处理软件完成,如北京南方测绘仪器公司开发的平差易、清华山维等。

图 3-23 所示为一条四等附和水准路线,A、B 为已知点,2、3、4 为未知点,具体数据见表 3-10。

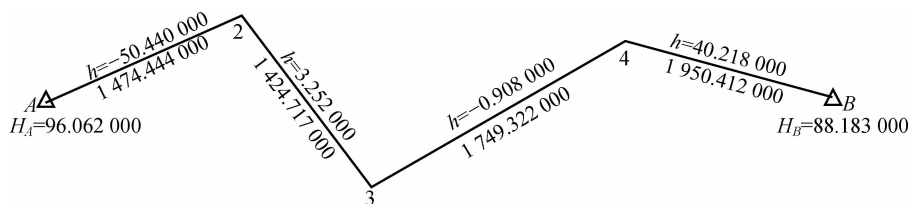


图 3-23 四等附和水准路线





表 3-10 四等附和水准路线的起算数据及观测数据

测 站 点	高差/m	距离/m	高程/m
A	-50.440 000	1 474.444 000	96.062 000
2	3.252 000	1 424.717 000	
3	-0.908 000	1 749.322 000	
4	40.218 000	1 950.412 000	
B			88.183 000

下面利用平差易软件进行平差。

1. 控制网数据的录入

在平差易软件中录入表 3-10 中的水准数据,如图 3-24 所示。

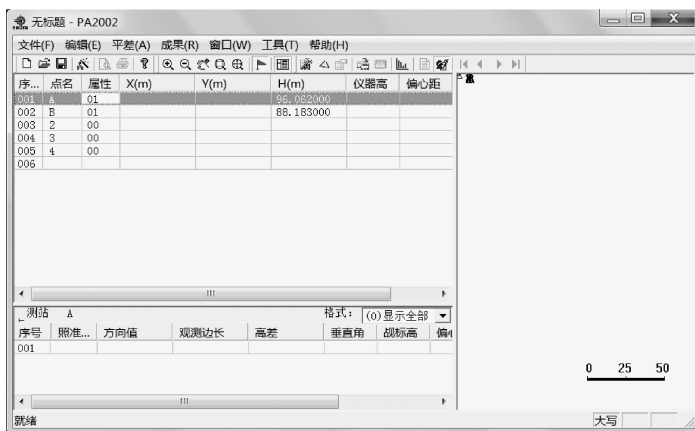


图 3-24 水准数据的录入

在测站信息区中输入 A、B、2、3 和 4 号测站点,其中,A、B 为已知高程点,其属性为 01; 2、3、4 点为待测高程点,其属性为 00,其他信息为空。因没有平面坐标数据,故在平差易软件中没有网图显示。

根据控制网的类型选择数据输入格式,此控制网为水准网,故在“格式”下拉列表框中选择“(4)水准”,如图 3-25 所示。



图 3-25 选择格式

**注意:**若在一般水准的观测数据中录入了测段高差,则必须录入相对应的观测边长,否则,平差计算时该测段的权为零,将导致计算结果错误。

在观测信息区中录入每组水准观测数据。测段 A 点至 2 号点的观测数据录入(观测边长为平距)如图 3-26 所示。

测站点: A		格式: (4)水准	
序号	照准名	观测边长	高差
001	2	1474.444000	-50.440000

图 3-26 测段 A 点至 2 号点的观测数据录入

将所有的测站信息及观测数据录入软件,执行“文件”→“另存为”命令,将输入的数据保存为平差易数据格式文件。

### 2. 近似坐标推算

测站信息和观测数据输入结束后,执行“平差”→“坐标推算”命令,完成近似高程的推算。

### 3. 选择计算方案

执行“平差”→“计算方案”命令,进行计算方案的设置,如图 3-27 所示。



图 3-27 设置计算方案

**注意:**(1)在“高程平差”选项组中要选中“一般水准测量”单选按钮,而不是“三角高程测量”单选按钮。“一般水准测量”所要输入的观测数据为观测边长和高差;“三角高程测量”所要输入的观测数据为观测边长、垂直角、站标高和仪器高。

(2)在“控制网等级”选项组中选择水准网等级为“国家四等”。

(3)在“限差”选项组中,选择水准高差闭合差限差为  $20\sqrt{L}$ 。

### 4. 闭合差的计算与检查

执行“平差”→“闭合差计算”命令,计算水准网的闭合差,结果如图 3-28 所示。

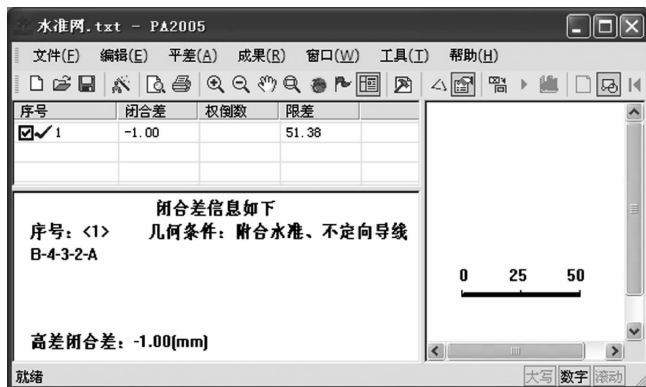


图 3-28 水准网闭合差的计算



由图 3-28 所示的计算结果可知, 闭合水准路线中只有一个符合条件, 即闭合差为  $-1.00\text{ mm}$ , 限差为  $51.38\text{ mm}$ 。

### 5. 平差计算

执行“平差”→“平差计算”命令, 将在测站信息区中显示未知点的最终平差高程, 如图 3-29 所示。

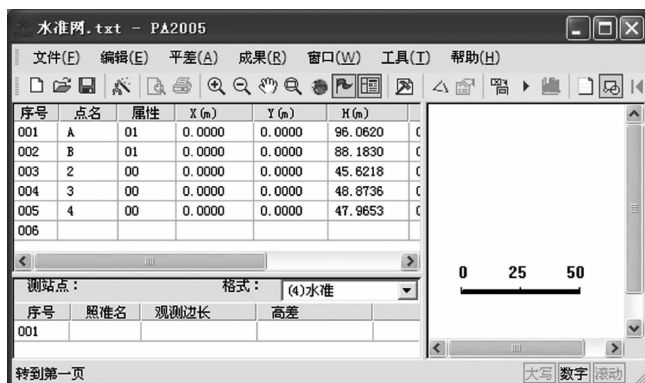


图 3-29 平差结果

### 6. 平差报告的生成与输出

执行“窗口”→“平差报告”命令, 系统将生成平差报告, 报告中包括控制网概况、误差统计报告等, 如图 3-30 所示。

#### 控制网平差报告

[控制网概况]

计算软件: 南方平差易2005

网名: 柳宝四等水准路线

计算日期: 2014-12-01

观测人: 王刚

记录人: 陆兵

计算者: 刘利

检查者:

测量单位: \*\*市勘察测绘研究院

备注:

高程控制网等级: 国家四等

已知高程点个数: 2

未知高程点个数: 3

每公里高差中误差 =  $0.39\text{ (mm)}$

最大高程中误差[3] =  $0.35\text{ (mm)}$

最小高程中误差[2] =  $0.29\text{ (mm)}$

平均高程中误差 =  $0.32\text{ (mm)}$

规范允许每公里高差中误差 =  $10\text{ (mm)}$

[边长统计] 总边长:  $6598.800\text{ (m)}$ , 平均边长:  $1649.700\text{ (m)}$ , 最小边长:  $1424.700\text{ (m)}$ , 最大边长:  $1950.400\text{ (m)}$

观测测回数: 4

图 3-30 平差报告

## 3.5 电磁波测距高程导线测量

电磁波测距高程导线(以下简称高程导线)测量就是在三角高程测量中利用电磁波测距仪精确测量距离,从而获得高差的测量方式。在地形起伏大的山地、跨越河流沟谷等进行几何水准测量有困难的地区,可用高程导线代替四等及以下的水准测量。

三角高程测量是通过两点间的距离和垂直角计算两点间的高差的。事实上,高程导线测量就是利用了三角高程测量的方法。

### 3.5.1 三角高程观测原理

如图 3-31 所示,欲在地面上的 A、B 两点之间采用三角高程测量的方法测定高差  $h_{AB}$ ,在 A 点安置仪器(对中、整平),在 B 点安置照准目标。仪器安置好后,用小钢卷尺量取望远镜旋转轴(横轴)中心至地面点 A 的高度(仪器高) $i$ ;观测 A 点至 B 点的垂直角  $\alpha_{AB}$ ,若用望远镜中的十字丝的横丝(水平中丝)照准 B 点目标的顶端,该目标立直(B 点目标的中心线与过 B 点处的铅垂线重合)后,用钢卷尺量取自其底端至其顶端的长度(目标高) $v$ ,则 A、B 之间的高差为

$$h_{AB} = BF = MC + CE + EF - MN - NB \quad (3-31)$$

式中,EF 为仪器高  $i$ ;NB 为照准点标高  $v$ ;CE 为地球弯曲差,  $CE = s_0^2/2R$ ,R 为地球平均曲率半径,采用 6 369 km;MN 为大气垂直折光差,  $MN = K s_0^2/2R$ 。

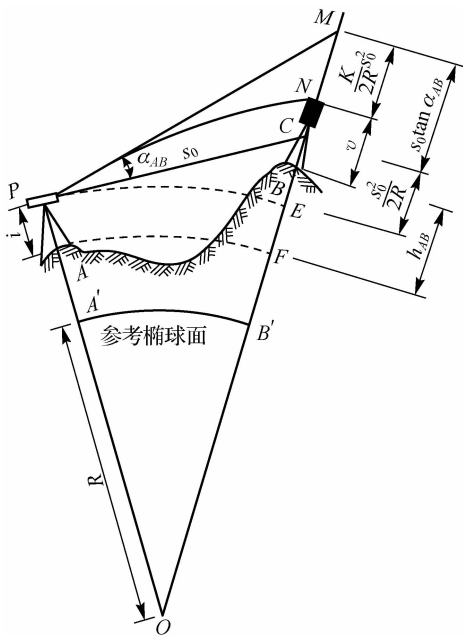


图 3-31 三角高程观测原理



由于水平距离  $s_0$  相对于地球半径  $R$  甚小,当  $s_0=10$  km 时,它所对的圆心角仅为  $5'$ ,故可认为  $\angle PCM \approx 90^\circ$ 。因此,在直角三角形  $PCM$  中,  $MC = s_0 \tan \alpha_{AB}$ 。将  $CE$ 、 $MN$ 、 $MC$  代入式(3-31)中得

$$h_{AB} = s_0 \tan \alpha_{AB} + \frac{1-K}{2R} s_0^2 + i - v \quad (3-32)$$

如果观测中,水平距离采用电磁波测得的斜距为  $D$ ,则高差为

$$h_{AB} = D \sin \alpha_{AB} + \frac{1-K}{2R} D^2 \cos^2 \alpha_{AB} + i - v \quad (3-33)$$

式中, $D$  为经过各项改正以后的斜距; $\frac{1-K}{2R} D^2 \cos^2 \alpha_{AB}$  为大气垂直折光和地球弯曲差对高差的综合影响。

通常  $K$  值接近 0.1,对其高差计算的影响仅为地球曲率差的 1/10 左右,若将其影响忽略,则式(3-33)可写为

$$h_{AB} = D \sin \alpha_{AB} + \frac{D^2}{2R} \cos^2 \alpha_{AB} + i - v \quad (3-34)$$

### 3.5.2 高程导线观测方法

高程导线施测前应沿路线选定测站,视线长度一般不大于 700 m,视线垂直角一般不得超过  $15^\circ$ ,视线高度和离开障碍物的距离不得小于 1.5 m。

高程导线既可布设在每一个照准点安置仪器进行对向观测(以下简称每点设站)的路线,也可布设成每隔一个照准点安置仪器(以下简称隔点设站)的路线。隔点设站时,应采用单程双测法,即每个测站变换仪器高度或位置进行两次观测。前后视线长度之差不得超过 100 m。

采用电磁波测距仪测距时,测距的准备工作、观测方法、作业要求、气象元素的测定、成果记录及重测取舍、气象的改正、加常数的改正、乘常数的改正及边长归算等可参阅模块 2 中的电磁波测距内容。

电磁波测距的技术要求和注意事项如下:

- (1)斜距和垂直角要在成像清晰、信号稳定的情况下观测。
  - (2)斜距观测两测回(每测回照准一次,读四次数),各次读数互差和测回中数之间的互差为 10 mm 和 15 mm,每测回均需量取气温和气压值。
  - (3)垂直角采用中丝法观测四个测回,测回差和指标差互差均不得超过  $5''$ 。
  - (4)测距仪、反射棱镜应在测前、测后各量取一次仪器高和棱镜高,两次互差不得超过 3 mm。
  - (5)当进行对向观测有困难时,可进行单向观测,但总的观测测回数不变。
- 各项观测读数和计算数值的取位应按表 3-11 的规定执行。

表 3-11 观测读数和计算数值的取位

项 目	斜距/mm	垂直角 /(")	仪器高、观 标高/mm	气温/ $^\circ\text{C}$	气压/Pa	测站高差 /mm	测段高差 /mm
观测值	1	1	1	0.1	100	—	—
计算值	1	0.1	0.1	—	—	0.1	1

### 3.5.3 高差计算

观测斜距应加入乘常数、加常数及气象改正。测站高差的计算步骤如下：

(1) 每点设站时，相邻测站间单向观测高差  $h$  按式(3-34)计算。相邻测站间对向观测的高差中数  $h_{12}$  为

$$h_{12} = \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (3-35)$$

式中，下标 1、2 分别为相邻测站的序号。

(2) 隔点设站时，相邻照准点间的高差  $h_{12}$  为

$$h_{12} = D_2 \sin \alpha_2 - D_1 \sin \alpha_1 + v_1 - v_2 + \frac{1}{2R} [(D_2 \cos \alpha_2)^2 - (D_1 \cos \alpha_1)^2] \quad (3-36)$$

式中，下标 1、2 分别为后视标号和前视标号； $D_1$ 、 $D_2$  为经过各项改正后的斜距； $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  为观测的垂直角； $v_1$ 、 $v_2$  为反射棱镜中心至地面点的高度。

### 3.5.4 高程导线的观测限差

高程导线的观测限差应不超过表 3-12 的规定。

表 3-12 高程导线的观测限差

观测方法	两测站对向观测高差不符值	两照准点间两次观测高差不符值	附和路线或环线闭合差	检测已测测段的高差之差
每点设站	$\pm 45 \sqrt{D}$	—	与四等水准测量限差相同	
隔点设站	—	$\pm 14 \sqrt{D}$		

注： $D$  为测站间或照准点间的观测水平距离(km)。

当观测结果超出限差时，应按规定进行重测或取舍。

## 思考与练习

### 一、名词解释

正高系统 正常高系统 高程异常 水准原点  $i$ 角误差 似大地水准面

### 二、填空题

1. 设想静止平均海面向陆地延伸所包含的形体是\_\_\_\_\_。
2. 国家水准网分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
3. 地面点的高程有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
4. 在二等水准测量中，视线离地面最低高度不大于\_\_\_\_\_，基辅分划读数较差不大于\_\_\_\_\_。
5. 我国现用的高程系统有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
6. 以大地水准面为基准面的高程系统称为\_\_\_\_\_。





7. 四等水准测量奇数测站可以采用\_\_\_\_\_的观测程序,而精密水准测量奇数测站必须采用\_\_\_\_\_的观测程序。
8. 水准测量前、后视距相等可以消除\_\_\_\_\_的影响。
9. 地面起伏较大时,高程控制网采用\_\_\_\_\_;精度要求低时,高程控制网采用\_\_\_\_\_。
10. 以似大地水准面为基准面的高程系统称为\_\_\_\_\_。

### 三、选择题

- 水准线路设置成偶数站可以消除( )的影响。
  - $i$ 角误差
  - 仪器下沉误差
  - 标尺零点差
  - 大气折光差
- 水准测量时,一条线路采用往、返测取中数可以消除( )的影响。
  - $i$ 角误差
  - 仪器下沉误差
  - 标尺零点差
  - 标尺下沉误差
- 消除视差的正确方法是( )。
  - 仔细调节目镜
  - 仔细进行物镜对光
  - 仔细进行目镜对光,然后进行物镜对光
  - 仔细进行物镜对光,然后进行目镜对光
- 水准测量要求视线离地面一定的高度,可以削弱( )的影响。
  - $i$ 角误差
  - 标尺零点差
  - 大气垂直折光
  - 仪器下沉误差
- 水准仪  $i$  角误差是指水平视线( )与水准管轴之间的夹角。
  - 在垂直面上投影的交角
  - 在水平面上投影的交角
  - 在空间的交角
  - 任意夹角
- 使用测微螺旋和照准部微动螺旋时,要求最后旋转方向为“旋进”,是为了消除( )的影响。
  - 照准部旋转引起底座位移
  - 照准部旋转引起底座弹性扭转
  - 微动螺旋间隙差
  - 度盘中心差
- 用水准仪望远镜在标尺上读数时,应首先消除视差,产生视差的原因是( )。
  - 外界亮度不够
  - 标尺不稳
  - 标尺的成像面与十字丝平面没能重合
  - 成像不稳定





11. 以二等水准测量为例,试述一个测站、一个测段、一条路线的各项工作及主要规定。
12. 水准面不平行性的结论是如何得到的?它会对水准测量产生什么影响?
13. 控制测量概算的主要目的是什么?其包括哪些内容?
14. 简述水准概算的主要内容。
15. 精密水准测量的误差来源包括哪些?怎么消除或削弱这些误差?