第二章 高程测量

第二章 高程测量.....1
§2－1 高程测量概述.....1
§2－2 水准测量的原理.....2
§2－3 水准仪和水准尺.....4
一、微倾式水准仪的构造和使用.....5
二、自动安平水准仪的构造和使用.....11
§2－4 水准测量的方法.....13
一、水准路线的形式.....13
二、水准测量的施测方法.....14
三、水准测量成果的检核.....16
四、闭合差的分配和高程的计算.....17
§2－5 水准仪的检验和校正.....19
一、微倾式水准仪的检验和校正.....19
二、自动安平水准仪的检验和校正.....23
§2－6 水准测量的误差及其消减方法.....24
一、仪器误差.....24
二、观测误差.....25
三、外界环境的影响.....26
§2－7 精密水准仪和精密水准尺.....27
一、精密水准仪.....27
二、因瓦水准尺.....28
习 题.....29

§2－1 高程测量概述

高程是确定地面点位置的基本要素之一，所以高程测量是四种基本测量工作之一。高程测量的目的是要获得点的高程，但一般只能直接测得两点间的高差，然后根据其中一点的已知高程推算出另一点的高程。

进行高程测量的主要方法有**水准测量**和**三角高程测量**。水准测量是利用水平视线来测量两点间的高差。由于水准测量的精度较高，所以是高程测量中最主要的方法。三角高程测量是测量两点间的水平距离或斜距和竖直角(即倾斜角)，然后利用三角公式计算出两点间的高差。三角高程测量一般精度较低，只是在适当的条件下才被采用。除了上述两种方法外，还有利用大气压力的变化，测量高差的气压高程测量；利用液体的物理性质测量高差的液体静力高程测量；以及利用摄影测量的测高等方法，但此方法较少采用。

高程测量的任务是求出点的高程，即求出该点到某一基准面的垂直距离。为了建立一个全国统一的高程系统，必须确定一个统一的高程基准面，通常采用大地水准面即平均海水面作为高程基准面。解放后我国采用青岛验潮站 1950～1956 年观测结果求得的黄海平均海水面作为高程基准面。根据这个基准面得出的高程称为“1956 黄海高程系”。为了确定高程基准面的位置，在青岛建立了一个与验潮站相联系的水准原点，并测得其高程为 72.289m。水准原点作为全国高程测量的基准点。从 1989 年起，国家规定采用青岛验潮站 1952～1979 年的观测资料，计算得出的平均海水面作为新的高程基准面，称为“1985 国家高程基准”。根据新的高程基准面，得出青岛水准原点的高程为 72.260m。所以在使用已有的高程资料时，应注意到高程基准面的差异。

高程测量也是按照“从整体到局部”的原则来进行。就是先在测区内设立一些高程控制点，并精确测出它们的高程，然后根据这些高程控制点测量附近其他点的高程。这些高程控制点称**水准点**，工程上常用 BM 来标记、水准点一般用混凝土标石制成，顶部嵌有金属或瓷质的标志(图 2－1)。标石应埋在地下，埋设地点应选在地质稳定、便于使用和便于保存的地方。在城镇居民区，也可以采用把金属标志嵌在墙上的“墙脚水准点”。临时性的水准点则可用更简便的方法来设立，例如用刻凿在岩石上的或用油漆标记在建筑物上的简易标志。

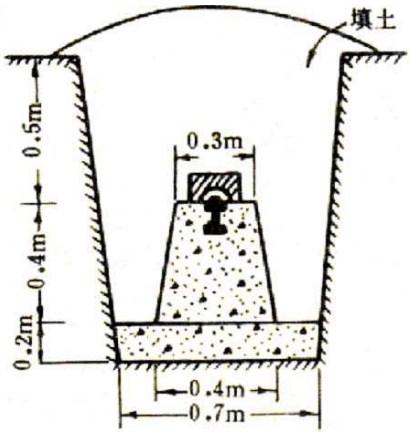


图 2－1

§2－2 水准测量的原理

水准测量是利用水平视线来求得两点的高差。例如图 2－2 中，为了求出 A、B 两点的高差 h_{AB}，在 A、B 两个点上竖立带有分划的标尺——**水准尺**，在 A、B 两点之间安置可提供水平视线的仪器——**水准仪**。当视线水平时，在 A、B 两个点的标尺上分别读得读数 a 和 b，则 A、B 两点的高差等于两个标尺读数之差。即：

$$h_{AB} = a - b \tag{2－1}$$

如果 A 为已知高程的点，B 为待求高程的点，则 B 点的高程为：

$$H_B = H_A + h_{AB} \tag{2－2}$$

读数 a 是在已知高程点上的水准尺读数，称为“后视读数”；b 是在待求高程点上的水准尺读数，称为“前视读数”。高差必须是后视读数减去前视读数。高差 h_{AB} 的值可能是正，也可能是负，正值表示待求点 B 高于已知点 A，负值表示待求点 B 低于已知点 A。此外，

高差的正负号又与测量进行的方向有关，例如图 2－2 中测量由 A 向 B 进行，高差用 h_{AB} 表示，其值为正；反之由 B 向 A 进行，则高差用 h_{BA} 表示，其值为负。所以说明高差时必须标明高差的正负号，同时要说明测量进行的方向。

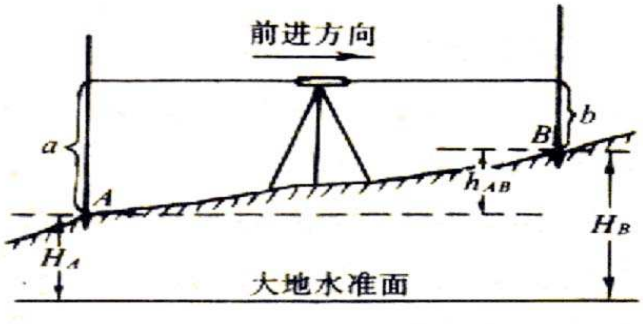


图 2－2

当两点相距较远或高差太大时，则可分段连续进行，从图 2－3 中可得：

$$\begin{aligned} h_1 &= a_1 - b_1 \\ h_2 &= a_2 - b_2 \\ &\cdots\cdots \\ h_n &= a_n - b_n \end{aligned}$$

$$h_{AB} = \sum h = \sum a - \sum b \qquad (2-3)$$

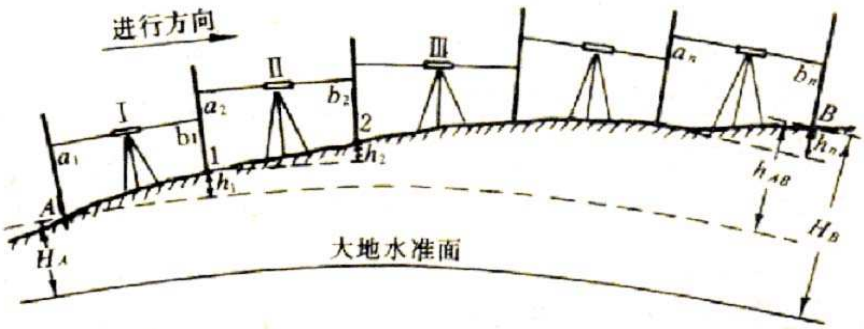


图 2－3

即两点的高差等于连续各段高差的代数和，也等于后视读数之和减去前视读数之和。通常要同时用 $\sum h$ 和 $(\sum a - \sum b)$ 进行计算，用来检核计算是否有误。

图 2－3 中置仪器的点Ⅰ、Ⅱ、…称为**测站**。立标尺的点 1、2、…称为**转点**，它们在前一测站先作为待求高程的点，然后在下一测站再作为已知高程的点，转点起传递高程的作用。转点非常重要，转点上产生的任何差错，都会影响到以后所有点的高程。

从以上可见：水准测量的基本原理是利用水平视线来比较两点的高低，求出两点的高差。

当水准测量的目的不是仅仅为了获得两点的高差，而是要求得一系列点的高程，例如测量沿线的地面起伏情况，水准测量可按图 2－4 进行。此时，水准仪在每一测站上除了要读出后视和前视读数外，同时要对这一测站范围内需要测量高程的点上立尺读取读数，如图中在 P_1、P_2 等点上立尺读出 c_1、c_2 等读数。则各点的高程可按下列方法计算：

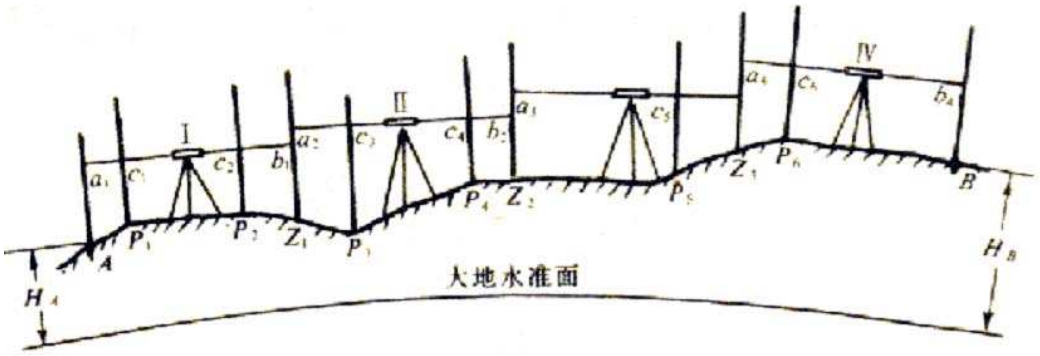


图 2—4

仪器在测站Ⅰ：$H_I = H_A + a_1$ (2—4)

$$\left.\begin{aligned} H_{P_1} &= H_I - c_1 \\ H_{P_2} &= H_I - c_2 \\ H_{Z_1} &= H_I - b_1 \end{aligned}\right\} \quad (2—5)$$

同法，仪器在测站Ⅱ：$H_{II} = H_{Z_1} + a_2$

$$\left.\begin{aligned} H_{P_3} &= H_{II} - c_3 \\ H_{P_4} &= H_{II} - c_4 \\ H_{Z_2} &= H_{II} - b_2 \end{aligned}\right\}$$

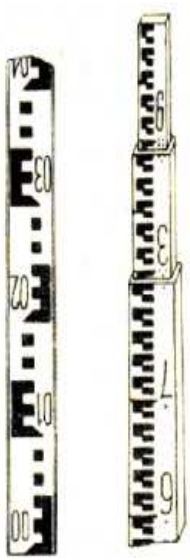
式中H_I、H_{II}为仪器视线的高程，简称**仪器高**。图中Z_I、Z_{II}、…为传递高程的转点，在转点上既有前视读数又有后视读数。图中P_I、P_{II}、…等点称**中间点**，中间点上只有一个前视读数，也称中视读数。计算的检核仍用公式：

$$h_{AB} = \sum a - \sum b = H_B - H_A$$

§2—3 水准仪和水准尺

水准仪是进行水准测量的主要仪器，它可以提供水准测量所必需的水平视线。目前通用的水准仪从构造上可分为两大类：即利用水准管来获得水平视线的水准管水准仪，其主要形式称“微倾式水准仪”；另一类是利用补偿器来获得水平视线的“自动安平水准仪”。此外，尚有一种新型水准仪——电子水准仪，它配合条纹编码尺，利用数字化图像处理的方法，可自动显示高程和距离，使水准测量实现了自动化。

我国的水准仪系列标准分为 DS_{05}、DS_1、DS_3 和 DS_{20} 四个等级。D 是大地测量仪器的代号，S 是水准仪的代号，均取大和水两个字汉语拼音的首字母。角码的数字表示仪器的精度。其中 DS_{05} 和 DS_1 用于精密水准测量，DS_3 用于一般水准测量，DS_{20} 则用于简易水准测量。



(a) (b)

图 2－5

水准尺用优质木材或铝合金制成，最常用的形状有杆式和箱式两种(图 2－5)，长度分别为 3m 和 5m。箱式尺能伸缩携带方便，但接合处容易产生误差，杆式尺比较坚固可靠。水准尺尺面绘有 1cm 或 5mm 黑白相间的分格，米和分米处注有数字，尺底为零。为了便于倒像望远镜读数，注的数字常倒写。双面水准尺是一面为黑色另一面为红色的分划，每两根为一对。两根的黑面都以尺底为零，而红面的尺底分别为 4.687m 和 4.787m。利用双面尺可对读数进行检核。

尺垫是用于转点上的一种工具，用钢板或铸铁制成(图 2－6)。使用时把三个尖脚踩入土中，把水准尺立在突出的圆顶上。尺垫可使转点稳固防止下沉。

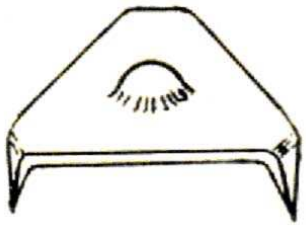


图 2－6

一、微倾式水准仪的构造和使用

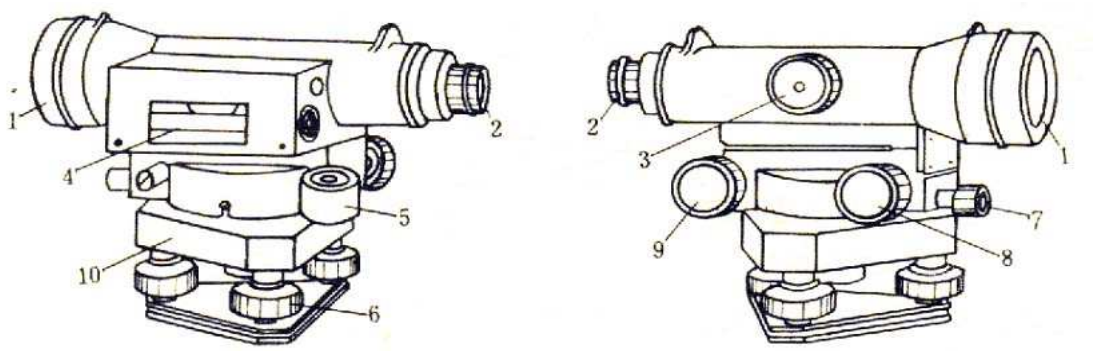
(一) DS_3 微倾式水准仪的构造

图 2－7 为在一般水准测量中使用较广的 DS_3 型微倾式水准仪，它由下列三个主要部分组成：

望远镜 它可以提供视线，并可读出远处水准尺上的读数。

水准器 用于指示仪器或视线是否处于水平位置。

基座 用于置平仪器，它支承仪器的上部并能使仪器的上部在水平方向转动。



(a) (b)

图 2－7

物镜、目镜、调焦螺旋、管水准器、圆水准器、脚螺旋

制动螺旋、微动螺旋、微倾螺旋、基座

水准仪各部分的名称见图 2－7。基座上有三个脚螺旋，调节脚螺旋可使圆水准器的气泡移至中央，使仪器粗略整平。望远镜和管水准器与仪器的竖轴联结成一体，竖轴插入基座的轴套内，可使望远镜和管水准器在基座上绕竖轴旋转。制动螺旋和微动螺旋用来控制望远镜在水平方向的转动。制动螺旋松开时，望远镜能自由旋转；旋紧时望远镜则固定不动。旋转微动螺旋可使望远镜在水平方向作缓慢的转动，但只有在制动螺旋旋紧时，微动螺旋才能起作用。旋转微倾螺旋可使望远镜连同管水准器作俯仰微量的倾斜，从而可使视线精确整平。因此这种水准仪称为**微倾式水准仪**。

下面先说明微倾式水准仪上主要的部件——望远镜和水准器的构造和性能。

1. 望远镜

最简单的望远镜是由物镜和目镜组成。物镜的作用是使物体在物镜的另一侧构成一个倒立的实像，目镜的作用是使这一实像在同一侧形成一个放大的虚像(图 2－8)。为了使物像清晰并消除单透镜的一些缺陷，物镜和目镜都是用两种不同材料的透镜组合而成(图 2－9)。

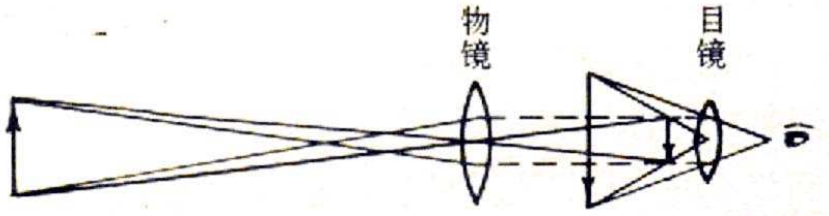


图 2－8

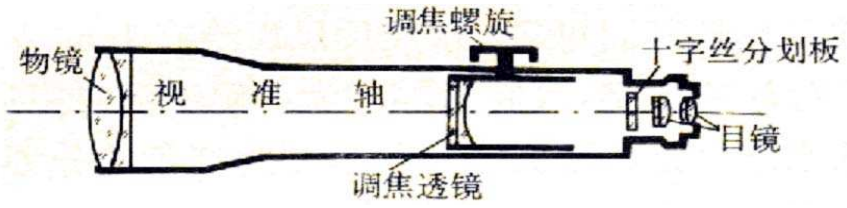
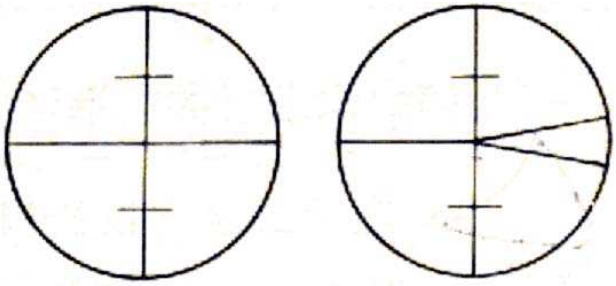


图 2－9

测量仪器上的望远镜还必须有一个十字丝分划板，它是刻在玻璃片上的一组十字丝，被安装在望远镜筒内靠近目镜的一端。水准仪上十字丝的图形如图 2－10 所示，水准测量中用它中间的横丝或楔形丝读取水准尺上的读数。十字丝交点和物镜光心的连线称为**视准轴**，也就是视线。视准轴是水准仪的主要轴线之一。



(a) (b)

图 2－10

为了能准确地照准目标或读数，望远镜内必须同时能看到清晰的物像和十字丝。为此必须使物像落在十字丝分划板平面上。为了使离仪器不同距离的目标能成像于十字丝分划板平面上，望远镜内还必须安装一个调焦透镜(图 2－9)。观测不同距离处的目标，可旋转调焦螺旋改变调焦透镜的位置，从而能在望远镜内清晰地看到十字丝和所要观测的目标。

望远镜的性能由以下几个方面来衡量：

(1)放大率 是通过望远镜所看到物像的视角 β 与肉眼直接看物体的视角 α 之比，它近似地等于物镜焦距与目镜焦距之比。或等于物镜的有效孔径 D 与目镜的有效孔径 d 之比。即放大率为：

$$v=\frac{\beta}{\alpha}=\frac{f_{物}}{f_{目}}=\frac{D}{d} \tag{2－6}$$

(2)分辨率 是望远镜能分辨出两个相邻物点的能力，用光线通过物镜后的最小视角来表示。当小于这最小视角时，在望远镜内就不能分辨出两个物点。分辨率可用下式表示：

$$\varphi=\frac{140}{D}(″) \tag{2－7}$$

D 为物镜的有效孔径以毫米计。

(3)视场角 是表示望远镜内所能看到的视野范围。这个范围是一个圆锥体，所以视场角用圆锥体的顶角来表示。视场角与放大率成反比。

(4)亮度 指通过望远镜所看到物体的明亮程度。它与物镜有效孔径的平方成正比，与放大率的平方成反比。

从以上可以看出，望远镜的各项性能是相互制约的。例如增大放大率也增强了分辨率，可提高观测精度，但减小了视场角和亮度，不利于观测。所以测量仪器上望远镜的放大率有一定的限度，一般在 20 倍至 45 倍之间。

2. 水准器

水准器是用以置平仪器的一种设备，是测量仪器上的重要部件。水准器分为管水准器和圆水准器两种：

(1) **管水准器** 又称**水准管**，是一个封闭的玻璃管，管的内壁在纵向磨成圆弧形，其半径可自 0.2m 至 100m。管内盛酒精或乙醚或两者混合的液体，并留有一气泡(图 2－11)。管面上刻有间隔为 2mm 的分划线，分划的中点称**水准管的零点**。过零点与管内壁在纵向相切的直线称**水准管轴**。当气泡的中心点与零点重合时，称气泡居中，气泡居中时水准管轴位于水平位置。

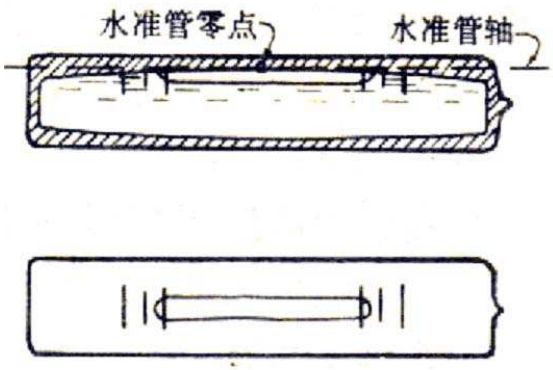


图 2－11

水准管上一格(2mm)所对应的圆心角称为水准管的分划值。根据几何关系可以看出，分划值也是气泡移动一格水准管轴所变动的角值(图 2－12)。水准仪上水准管的分划值为 10″～20″，水准管的分划值愈小，视线置平的精度愈高。但水准管的置平精度还与水准管的研磨质量、液体的性质和气泡的长度有关。在这些因素的综合影响下，使气泡移动 0.1 格时水准管轴所变动的角值称水准管的灵敏度。能够被气泡的移动反映出水准管轴变动的角值愈小，水准管的灵敏度就愈高。

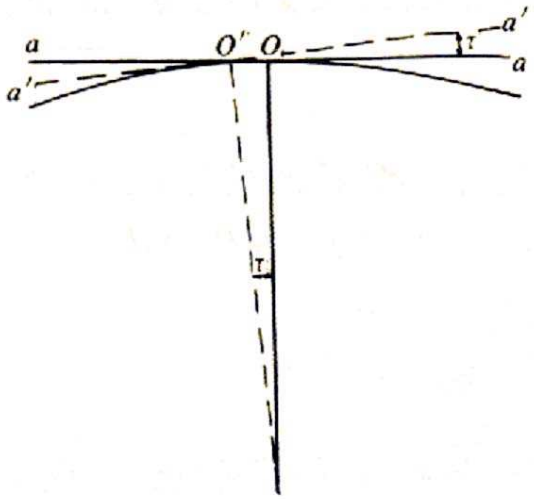


图 2－12

为了提高气泡居中的精度，在水准管的上面安装一套棱镜组(图 2－13)，使两端各有半个气泡的像被反射到一起。当气泡居中时，两端气泡的像就能符合。故这种水准器称为**符合水准器**，是微倾式水准仪上普遍采用的水准器。

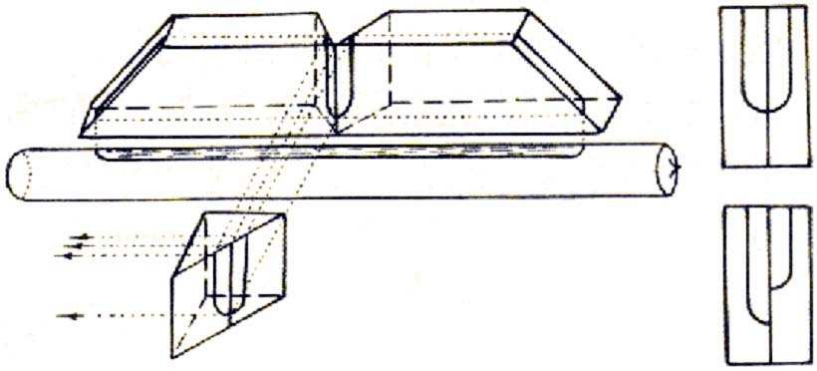


图 2－13

(2)**圆水准器** 是一个封闭的圆形玻璃容器，顶盖的内表面为一球面，半径可自 0.12m 至 0.86m，容器内盛乙醚类液体，留有一小圆气泡(图 2－14)。容器顶盖中央刻有一小圈，小圈的中心是圆水准器的零点。通过零点的球面法线是圆水准器的轴，当圆水准器的气泡居中时，圆水准器的轴位于铅垂位置。圆水准器的分划值，是顶盖球面上 2mm 弧长所对应的圆心角值，水准仪上圆水准器的角值为 8′ 至 15′ 。

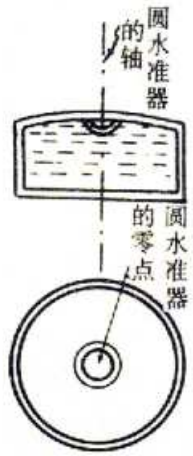


图 2－14

(二) DS_3 微倾式水准仪的使用

使用水准仪的基本作业是：在适当位置安置水准仪，整平视线后读取水准尺上的读数。微倾式水准仪的操作应按下列步骤和方法进行：

1. 安置水准仪

首先打开三脚架，安置三脚架要求高度适当、架头大致水平并牢固稳妥，在山坡上应使三脚架的两脚在坡下一脚在坡上。然后把水准仪用中心连接螺旋连接到三脚架上，取水准仪时必须握住仪器的坚固部位，并确认已牢固地连结在三脚架上之后才可放手。

2. 仪器的粗略整平

仪器的粗略整平是用脚螺旋使圆水准器的气泡居中。不论圆水准器在任何位置，先用任意两个脚螺旋使气泡移到通过圆水准器零点并垂直于这两个脚螺旋连线的方向上，如图 2－15 中气泡自 a 移到 b，如此可使仪器在这两个脚螺旋连线的方向处于水平位置。然后单独用第三个脚螺旋使气泡居中，如此使原两个脚螺旋连线的垂线方向亦处于水平位置，从而使整个仪器置平。如仍有偏差可重复进行。操作时必须记住以下三条要领：

(1)先旋转两个脚螺旋，然后旋转第三个脚螺旋；

(2)旋转两个脚螺旋时必须作相对地转动，即旋转方向应相反。

(3)气泡移动的方向始终和左手大拇指移动的方向一致。

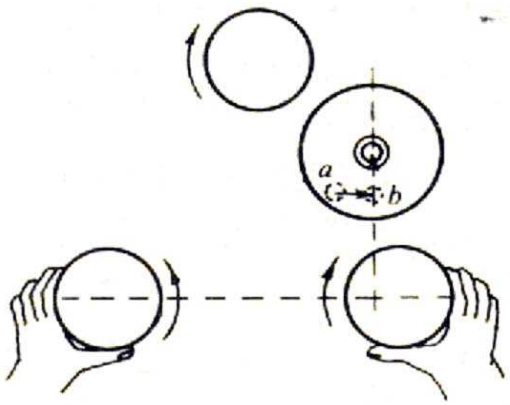
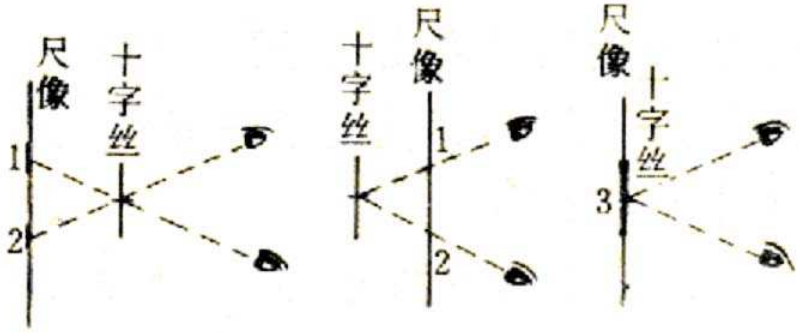


图 2－15

3 照准目标

用望远镜照准目标，必须先调节目镜使十字丝清晰。然后利用望远镜上的准星从外部瞄准水准尺，再旋转调焦螺旋使尺像清晰，也就是使尺像落到十字丝平面上。这两步不可颠倒。最后用微动螺旋使十字丝竖丝照准水准尺，为了便于读数，也可使尺像稍偏离竖丝一些。当照准不同距离处的水准尺时，需重新调节调焦螺旋才能使尺像清晰，但十字丝可不必再调。

照准目标时必须要消除**视差**。当观测时把眼睛稍作上下移动，如果尺像与十字丝有相对的移动，即读数有改变，则表示有视差存在。其原因是尺像没有落在十字丝平面上(图 2－16a、b)。存在视差时不可能得出准确的读数。消除视差的方法是一面稍旋转调焦螺旋一面仔细观察，直到不再出现尺像和十字丝有相对移动为止，即尺像与十字丝在同一平面上(图 2－16c)。



(a) (b) (c)

图 2－16

4. 视线的精确整平

由于圆水准器的灵敏度较低，所以用圆水准器只能使水准仪粗略地整平。因此在每次读数前还必须用微倾螺旋使水准管气泡符合，使视线精确整平。由于微倾螺旋旋转时，经常在改变望远镜和竖轴的关系，当望远镜由一个方向转变到另一个方向时，水准管气泡一般不再符合。所以望远镜每次变动方向后，也就是在每次读数前，都需要用微倾螺旋重新使气泡符合。

5. 读数

用十字丝中间的横丝读取水准尺的读数。从尺上可直接读出米、分米和厘米数，并估读出毫米数，所以每个读数必须有四位数。如果某一位数是零，也必须读出并记录。不可省略，如 1.002m、0.007m、2.100m 等。由于望远镜一般都为倒像，所以从望远镜内读数时应由上

向下读，即由小数向大数读。读数前应先认清水准尺的分划特点，特别应注意与注字相对应的分米分划线的位置。为了保证得出正确的水平视线读数，在读数前和读数后都应该检查气泡是否符合。

二、自动安平水准仪的构造和使用

自动安平水准仪是一种不用水准管而能自动获得水平视线的水准仪(图 2－17)。由于水准管水准仪在用微倾螺旋使气泡符合时要花一定的时间，水准管灵敏度愈高，整平需要的时间愈长。在松软的土地上安置水准仪时，还要随时注意气泡有无变动。而自动安平水准仪在用圆水准器使仪器粗略整平后，经过 1～2s 即可直接读取水平视线读数。当仪器有微小的倾斜变化时，补偿器能随时调整，始终给出正确的水平视线读数。因此它具有观测速度快、精度高的优点，被广泛地应用在各种等级的水准测量中。

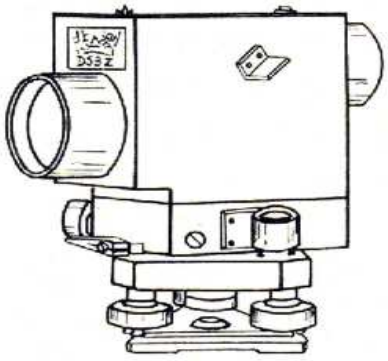


图 2－17

(一) 自动安平原理

自动安平水准仪自 50 年代初问世以来发展很快，现在各国生产的各种不同构造不同型号的自动安平水准仪有几十种之多，但其基本原理可归纳为下列两种：

1. 移动十字丝的方法 在图 2－18 中，当仪器水平时，物镜位于 O，十字丝交点位于 Z_0，水平视线读数为 a_0。若仪器倾斜了一个小角 α，则十字丝交点将从 Z_0 移到 Z，读数将变为 a。如果在望远镜内安装一补偿器 P，并使补偿器轴线 PZ 能相对于原视线反方向摆动一 β 角，从而使十字丝交点从 Z 移到 Z_0。由于 α 和 β 角都很小，故从图中可得：

$$ZZ_0 = \beta \cdot s = f \cdot \alpha$$

故

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{f}{s} = v \qquad (2－8)$$

式 f 为物镜的等效焦距，s 为补偿器到十字丝的距离，v 为补偿器的放大系数。从图 2－18 和公式(2－18)可以看出：只要保持 v 为常数，就能使水平光线经补偿器后始终通过十字丝的交点，获得水平视线读数，从而起到自动安平的作用。

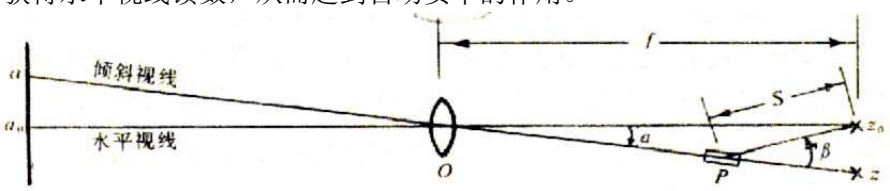


图 2－18

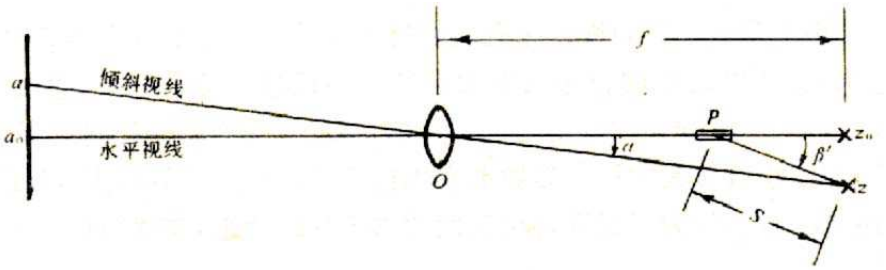


图 2－19

2. 移动像点的方法 按照同样设想，如果当望远镜倾斜 α 角时，水平光线通过补偿器后，能相对于水平线按相同方向摆动一 β' 角，从而使水平方向上的像点从 Z_0 移到 Z。由图 2－19 可得：

$$\frac{\beta'}{\alpha}=\frac{f}{s}v' \qquad (2-9)$$

所以只要保持 v' 为常数，水平方向上的像点就能通过十字丝交点，同样起到自动安平的作。

(二)补偿器的构造和补偿原理

自动安平水准仪的核心部分是**补偿器**。下面介绍国产 DS3-Z 型自动安平水准仪的补偿器，图 2－20 是这种仪器的构造示意图，这种结构属于轴承式补偿器，是采用移动像点的方法实现自动安平的。

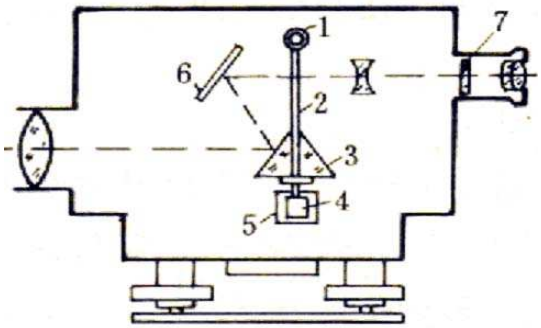


图 2－20

图 2－20 中补偿棱镜 3 被固定在摆臂 2 的下端，摆臂的上端为轴承 1，通过一个小轴被悬挂在仪器的支架上，所以三棱镜和摆臂能在视线方向内自由摆动。三棱镜 3 实际上只起到反射镜的作用。水平光线进入物镜后，经三棱镜 3 和固定在望远镜上的反射镜 6 两次反射后，就能通过十字丝交点 7，起到自动安平的作用。三棱镜下面有一个空气阻尼器，阻尼器由活塞和气缸组成。活塞 4 和三棱镜一样固定在摆臂的下端，气缸 5 则固定在仪器的支架上。阻尼器的作用是使三棱镜的摆动能迅速的稳定。

这种补偿器的原理见图 2－21，O 代表物镜，b 代表三棱镜的反射面，c 为固定的反射镜。当望远镜水平时，三棱镜的反射面位于 b_1b_1' 反射镜位于 c_1c_1'，水平光线经 Ob_1c_1 到达十字丝交点 Z_0(图中细线)、当望远镜倾斜 α 角时，三棱镜反射面移到 b_2b_2' (假定补偿器尚未起作用)，反射镜移到 c_2c_2'，十字丝交点由 z_0 移到 z，十字丝读数将是 α 而不是水平视线读数 a_0(图中虚线)。当补偿器起作用时，摆臂将逆时针旋转 α 角，三棱镜反射面则由 b_2b_2' 移至 b_3b_3'，显然 b_3b_3' 平行于 b_1b_1'，而反射镜仍在 c_2c_2'。由于反射面 c_2c_2' 相对于原来位置变动了 α 角，

所以水平光线经c_2c_2'反射后将变动 2α 角，即$\beta' = 2\alpha$。因此只要把补偿器安装在$\frac{f}{2}$处，就可使水平光线最终通过十字丝交点 z，即经Ob_3c_3而到达 z(图中粗线)，从而在十字丝交点处可以读到水平视线在尺上的读数 a_0达到自动安平的目的。

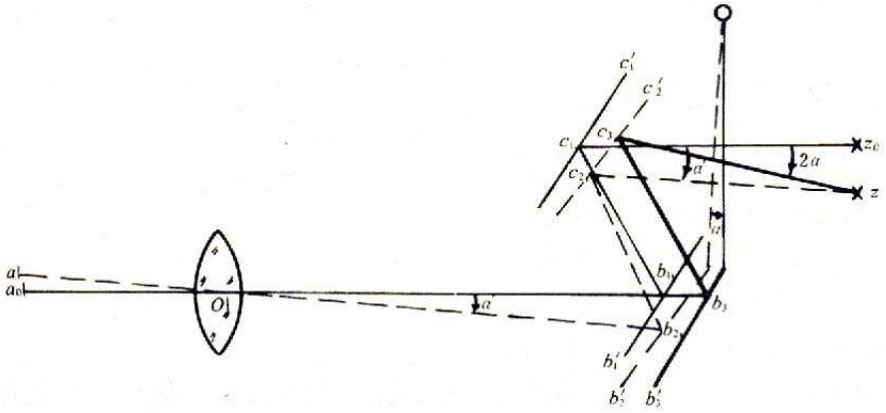


图 2—21

除了上面介绍的轴承式补偿器外，目前在自动安平水准仪上所采用的补偿器尚有吊丝式、簧片式和液体式等几种。

(三) 自动安平水准仪的使用

自动安平水准仪的使用方法较微倾式水准仪简便。首先也是用脚螺旋使圆水准器气泡居中，完成仪器的粗略整平。然后用望远镜照准水准尺，即可用十字丝横丝读取水准尺读数，所得的就是水平视线读数。由于补偿器有一定的工作范围，即能起到补偿作用的范围，所以使用自动安平水准仪时，要防止补偿器贴靠周围的部件，不处于自由悬挂状态。有的仪器在目镜旁有一按钮，它可以直接触动补偿器。读数前可轻按此按钮，以检查补偿器是否处于正常工作状态，也可以消除补偿器有轻微的贴靠现象。如果每次触动按钮后，水准尺读数变动后又能恢复原有读数测表示工作正常。如果仪器上没有这种检查按钮测可用脚螺旋使仪器竖轴在视线方向稍作倾斜，若读数不变则表示补偿器工作正常。由于要确保补偿器处于工作范围内，使用自动安平水准仪时应十分注意圆水准器的气泡居中。

§2—4 水准测量的方法

一、水准路线的形式

水准测量的任务，是从已知高程的水准点开始测量其他水准点或地面点的高程。测量前应根据要求布置并选定水准点的位置，埋设好水准点标石，拟定水准测量进行的路线。水准路线有以下几种形式：

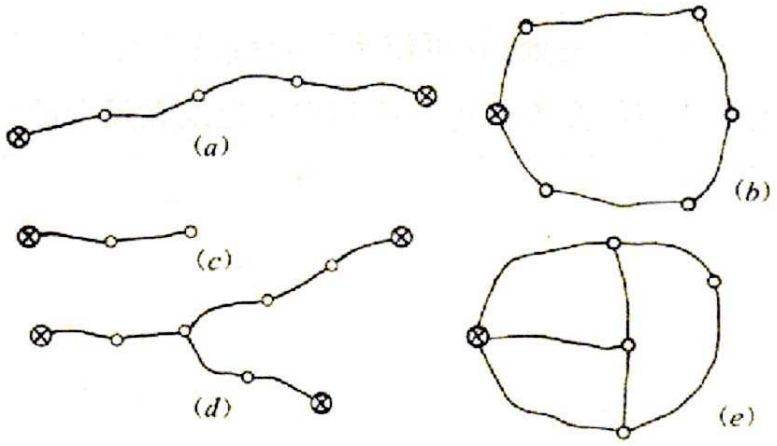


图 2－22

(一) **附合水准路线** 是水准测量从一个高级水准点开始，结束于另一高级水准点的水准路线。这种形式的水准路线，可使测量成果得到可靠的检核(图 2－22a)。

(二) **闭合水准路线** 是水准测量从一已知高程的水准点开始，最后又闭合到起始点上的水准路线。这种形式的水准路线也可以使测量成果得到检核(图 2－22b)。

(三) **水准支线** 是由一已知高程的水准点开始，最后既不附合也不闭合到已知高程的水准点上的一种水准路线。这种形式的水准路线由于不能对测量成果自行检核，因此必须进行往测和返测，或用两组仪器进行并测(图 2－22c)。

(四) **水准网** 当几条附合水准路线或闭合水准路线连接在一起时，就形成了水准网(图 2－22d、e)。水准网可使检核成果的条件增多因而可提高成果的精度。

二、水准测量的施测方法

水准测量施测方法如图 2－23 所示，图中 A 为已知高程的点，B 为待求高程的点。首先在已知高程的起始点 A 上竖立水准尺，在测量前进方向离起点不超过 200m 处设立第一个转点 Z_1，必要时可放置尺垫，并竖立水准尺。在离这两点等距离处 I 安置水准仪。仪器粗略整平后，先照准起始点 A 上的水准尺，用微倾螺旋使气泡符合后，读取 A 点的后视读数。然后照准转点 Z_1 上的水准尺，气泡符合后读取 Z_1 点的前视读数。把读数记入手簿，并计算出这两点间的高差。此后在转点 Z_1 处的水准尺不动，仅把尺面转向前进方向。在 A 点的水准尺和 I 点的水准仪则向前转移，水准尺安置在与第一站有同样间距的转点 Z_2，而水准仪则安置在离 Z_1、Z_2 两转点等距离处的测站 II。按在第 I 站同样的步骤和方法读取后视读数和前视读数，并计算出高差。如此继续进行直到待求高程点 B。

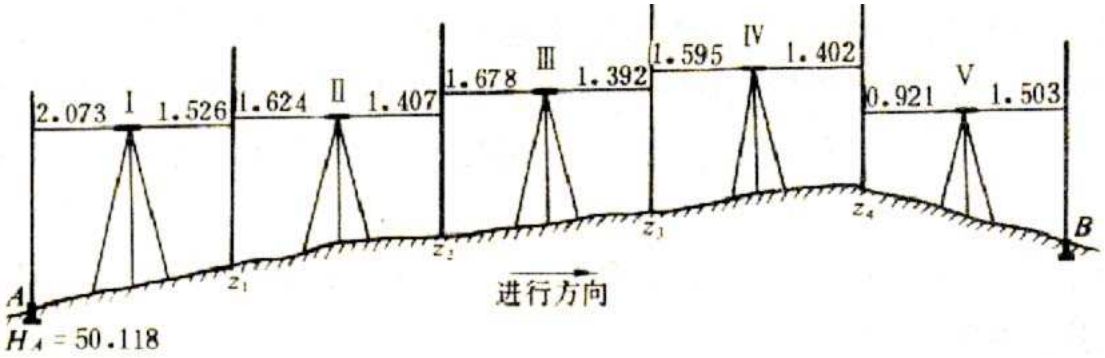


图 2—23

观测所得每一读数应立即记入手簿，水准测量手簿格式见表 2—1。填写时应注意把各个读数正确地填写在相应的行和栏内。例如仪器在测站 I 时，起点 A 上所得水准尺读数 2.073 应记入该点的后视读数栏内，照准转点 Z_1 所得读数 1.526 应记入 Z_1 点的前视读数栏内。后视读数减前视读数得 A、Z_1 两点的高差+0.547 记入高差栏内。以后各测站观测所得均按同样方法记录和计算。各测站所得的高差代数和 $\sum h$，就是从起点 A 到终点 B 总的高差。终点 B 的高程等于起点 A 的高程 A、B 间的高差。因为测量的目的是求 B 点的高程，所以各转点的高程不需计算。

表 2—1 水准测量手簿(一)

测站	测点	后视读数	前视读数	高差		高程	备注
				+	−		
I	A Z_1	2.073	1.526	0.547		50.118	已知 A 点高程=50.118
II	Z_1 Z_2	1.624	1.407	0.217			
III	Z_2 Z_3	1.678	1.392	0.286			
IV	Z_3 Z_4	1.595	1.402	0.193			
V	Z_4 B	0.921	1.503		0.582	50.779	
Σ		7.891	7.230	1.243	0.582		
计算检核	$\sum a - \sum b = +0.661$ $\quad \sum h = +0.661$ $\quad H_B - H_A = +0.661$						

为了节省手簿的篇幅，在实际工作中常把水准手簿格式简化成表 2—2 所示。这种格式实际上是把同一转点的后视读数和前视读数合并填在同一行内，两点间的高差则一律填写在该测站前视读数的同一行内。其他计算和检核均相同。

表 2—2 水难测量手簿(二)

测点	后视读数	前视读数	高差		高程	备注
			＋	－		
A	2.073				50.118	$H_A=50.118$
Z_1	1.624	1.526	0.547			
Z_2	1.678	1.407	0.217			
Z_3	1.595	1.392	0.286			
Z_4	0.921	1.402	0.193			
B		1.503		0.582	50.779	
Σ	7.891	7.230	1.243	0.582		
计算检核	$\sum a-\sum b=+0.661$		$\sum h=+0.661$		$H_B-H_A=+0.661$	

在每一测段结束后或手簿上每一页之末，必须进行计算检核。检查后视读数之和减去前视读数之和$(\sum a-\sum b)$是否等于各站高差之和$(\sum h)$，并等于终点高程减起点高程。如不相等，则计算中必有错误，应进行检查。但应注意这种检核只能检查计算工作有无错误，而不能检查出测量过程中所产生的错误，如读错记错等。检查测量过程中的差错，要采用下面将要叙述的方法。

三、水准测量成果的检核

为了保证水准测量成果的正确可靠，对水准测量的成果必须进行检核。检核方法有测站检核和水准路线检核两种：

(一) 测站检核

为防止在一个测站上发生错误而导致整个水准路线结果的错误，可在每个测站上对观测结果进行检核，方法如下：

1. 两次仪器高法 在每个测站上一次测得两转点间的高差后，改变一下水准仪的高度，再次测量两转点间的高差。对于一般水准测量，当两次所得高差之差小于 5mm 时可认为合格，取其平均值作为该测站所得高差，否则应进行检查或重测。

2. 双面尺法 利用双面水准尺分别由黑面和红面读数得出的高差，扣除一对水准尺的常数差后，两个高差之差小于 5mm 时可认为合格，否则应进行检查或重测。用双面尺进行水准测量的检核方法详见第八章。

(二) 水准路线的检核

1. 附合水准路线 为使测量成果得到可靠的检核，最好把水准路线布设成附合水准路线。对于附合水准路线，理论上在两已知高程水准点间所测得各站高差之和应等于起迄两水准点间高程之差。即

$$\sum h=H_{终}-H_{起}$$

如果它们不能相等，其差值称为**高程闭合差**，用 f_h 表示。所以附合水准路线的高程闭合差为：

$$f_h=\sum h-(H_{终}-H_{起}) \qquad (2-10)$$

高程闭合差的大小在一定程度上反映了测量成果的质量。

2. 闭合水准路线 在闭合水准路线上亦可对测量成果进行检核。对于闭合水准路线，因为它起迄于同一个点，所以理论上全线各站高差之和应等于零。即

$$\sum h = 0$$

如果高差之和不等于零，则其差值即 $\sum h$ 就是闭合水准路线的高程闭合差。即

$$f_h = \sum h \tag{2－11}$$

3. 水准支线 水准支线必须在起终点间用往返测进行检核。理论上往返测所得高差的绝对值应相等，但符号相反，或者是往返测高差的代数和应等于零。即

$$\sum h_{往} = -\sum h_{往}$$

如果往返测高差的代数和不等于零，其值即为水准支线的高程闭合差。即

$$f_h = \sum h_{往} + \sum h_{往} \tag{2－12}$$

有时也可以用两组并测来代替一组的往返测以加快工作进度。两组所得高差应相等，若不等，其差值即为水准支线的高程闭合差。故

$$f_h = \sum h_1 - \sum h_2 \tag{2－13}$$

闭合差的大小反映了测量成果的精度。在各种不同性质的水准测量中，都规定了高程闭合差的限值即**容许高程闭合差**，用 F_h 表示。一般水准测量的容许高程闭合差为：

$$\left.\begin{aligned} 平地 F_h &= \pm 40\sqrt{L}(mm) \\ 山地 F_h &= \pm 12\sqrt{n}(mm) \end{aligned}\right\} \tag{2－14}$$

铁路线路水准测量的容许高程闭合差则为：

$$\left.\begin{aligned} 平地 F_h &= \pm 30\sqrt{L}(mm) \\ 山地 F_h &= \pm 8\sqrt{n}(mm) \end{aligned}\right\} \tag{2－15}$$

式中 L 为附合水准路线或闭合水准路线的长度，在水准支线上，L 为测段的长，均以公里为单位，n 为测站数。

当实际闭合差小于容许闭合差时，表示观测精度满足要求，否则应对外业资料进行检查，甚至返工重测。

四、闭合差的分配和高程的计算

当实际的高程闭合差在容许值以内时，可把闭合差分配到各测段的高差上。显然，高程测量的误差是随水准路线的长度或测站数的增加而增加，所以分配的原则是把闭合差以相反的符号根据各测段路线的长度或测站数按比例分配到各测段的高差上。故各测段高差的改正数为：

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum L} \cdot L_i \tag{2－16}$$

或

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum n} \cdot n_i \tag{2－17}$$

式中 L_i 和 n_i 分别为各测段路线之长和测站数；

$\sum L_i$ 和 $\sum n_i$ 分别为水准路线总长和测站总数。

表 2－3 为一附合水准路线的闭合差检核和分配以及高程计算的实例。附合水准路线上共设置了 5 个水准点，各水准点间的距离和实测高差均列于表中。起点和终点的高程为已知，实际高程闭合差为+0.075m 小于容许高程闭合差±0.105m。表中高差的改正数是按(2－16)式计算的，改正数总和必须等于实际闭合差，但符号相反。实测高差加上高差改正数得各测段改正后的高差。由起点Ⅳ21 的高程累计加上各测段改正后的高差，就得出相应各点的高程。最后计算出终点Ⅳ22 的高程应与该点的已知高程完全符合。

表 2－3 水准路线的高程计算

点号	距离(km)	高差(m)	改正数(mm)	改正后高差(m)	高程(m)
Ⅳ21					63.475
	1.9	+1.241	-12	+1.229	
BM1					64.704
	2.2	+2.781	-14	+2.767	
BM2					67.471
	2.1	+3.244	-13	+3.231	
BM3					70.702
	2.3	+1.078	-14	+1.064	
BM4					71.766
	1.7	-0.062	-10	-0.072	
BM5					71.694
	2.0	-0.155	-12	-0.167	
Ⅳ22					71.527
Σ	12.2	+8.127	-75	+8.052	

$$f_h = \sum h - (H_{终} - H_{起}) = +8.127 - (71.527 - 63.475) = +0.075m$$

$$F_h = \pm 30\sqrt{L} \pm 30\sqrt{12.2} = \pm 105mm \qquad f_h < F_h$$

对于水准支线，应将高程闭合差按相反的符号平均分配在往测和返测所得的高差值上。

【例】在 A、B 两点间进行往返水准测量，已知 H_A=8.475m，$\sum h_{往} = +0.028m$，$\sum h_{返} = -0.018m$，A、B 间线路长 L=3km，求改正后的 B 点高程。

实际高程闭合差 $f_h = \sum h_{往} + \sum h_{返} = 0.028 + 0.018 = +0.046m$

容许高程闭合差 $F_h = \pm 30\sqrt{L} = \pm 30\sqrt{3} = \pm 52mm$，$f_h < F_h$，故精度符合要求。

改正后往测高差 $\sum h'_{往} = \sum h_{往} + \dfrac{-f_h}{2} = +0.028 - \dfrac{0.046}{2} = +0.005m$ 改正后返测高差 $\sum h'_{返} = \sum h_{返} + \dfrac{-f_h}{2} = +0.018 - \dfrac{0.046}{2} = -0.005m$ 故 B 点高程 $H_B = H_A + \sum h'_{往} = 8.475 + 0.005 = 8.480m$。

§2－5 水准仪的检验和校正

为保证测量工作能得出正确的成果，工作前必须对所使用的仪器进行检验和校正。

一、微倾式水准仪的检验和校正

微倾式水准仪的主要轴线见图 2－24，它们之间应满足的几何条件是：

1. 圆水准器轴应平行于仪器的竖轴；
2. 十字丝的横丝应垂直于仪器的竖轴；
3. 水准管轴应平行于视准轴。

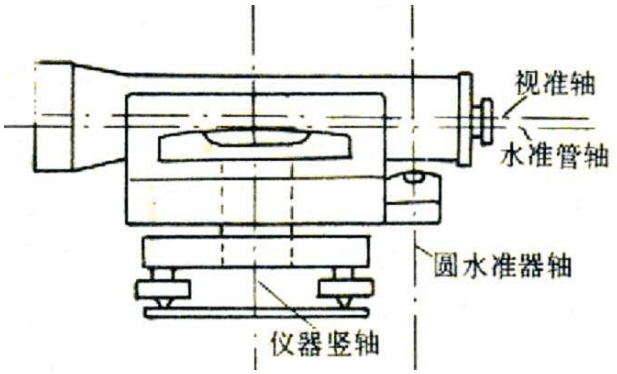


图 2－24

检验校正的步骤和方法如下：

(一) 圆水准器的检验和校正

目的　使圆水准器轴平行于仪器竖轴，圆水准器气泡居中时，竖轴便位于铅垂位置。

检验方法　旋转脚螺旋使圆水准器气泡居中，然后将仪器上部在水平方向绕竖轴旋转 180°，若气泡仍居中，则表示圆水准器轴已平行于竖轴，若气泡偏离中央则需进行校正。

校正方法　用脚螺旋使气泡向中央方向移动偏离量的一半，然后拨圆水准器的校正螺旋使气泡居中。由于一次拨动不易使圆水准器校正得很完善，所以需重复上述的检验和校正，使仪器上部旋转到任何位置气泡都能居中为止。

圆水准器校正装置的构造常见的有两种：一种在圆水准器盒底有三个校正螺旋(图 2－25a)；盒底中央有一球面突出物，它顶着圆水准器的底板，三个校正螺旋则旋入底板拉住圆水准器。当旋紧校正螺旋时，可使水准器该端降低，旋松时则可使该端上升。另一种构造，在盒底可见到四个螺旋(图 2－25b)，中间一个较大的螺旋用于连接圆水准器和盒底，另三个为校正螺旋，它们顶住圆水准器底板。当旋紧某一校正螺旋时，水准器该端升高，旋松时则该端下降，其移动方向与第一种相反。校正时，无论对哪一种构造，当需要旋紧某个校正螺旋时，必须先旋松另两个螺旋，校正完毕时．必须使三个校正螺旋都处于旋紧状态。

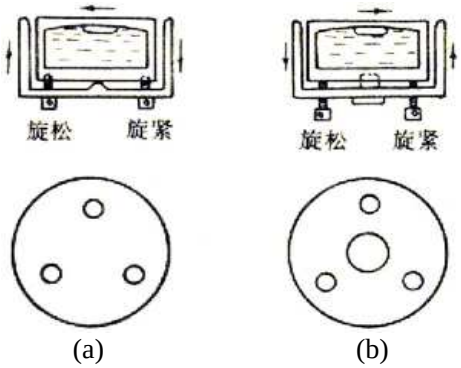


图 2－25

检校原理 若圆水准器轴与竖轴没有平行，构成一α角，当圆水准器的气泡居中时，竖轴与铅垂线成α角(图 2－26a)。若仪器上部绕竖轴旋转 180°，因竖轴位置不变，故圆水准器轴与铅垂线成 2α角(图 2－26b)。当用脚螺旋使气泡向零点移回偏离量的一半，则竖轴将变动一α角而处于铅垂方向，而圆水准器轴与竖轴仍保持α角(图 2－26c)。此时拨圆水准器的校正螺旋，使圆水准器气泡居中则圆水准器轴亦处于铅垂方向，从而使它平行于竖轴(图 2－26d)。

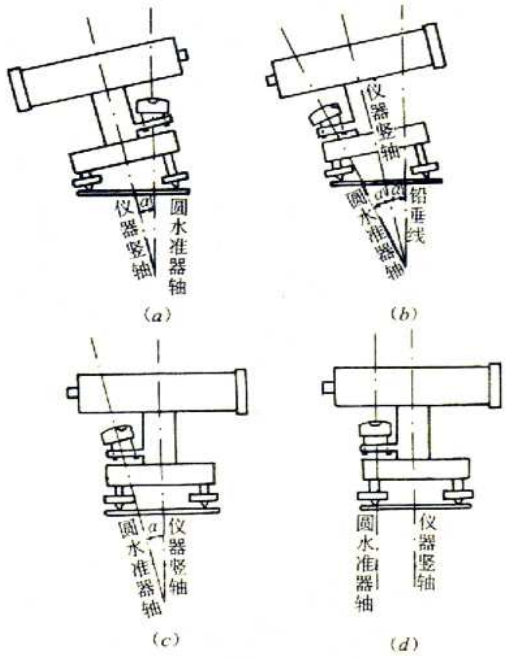


图 2－26

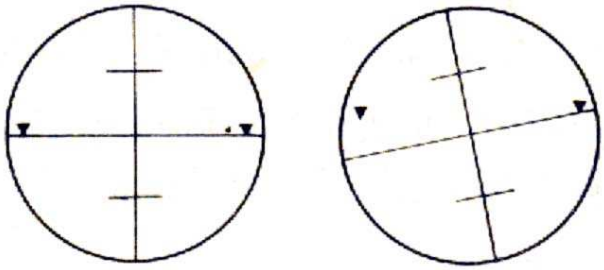
当圆水准器的误差过大，即α角过大时，气泡的移动不能反映出α角的变化。当圆水准器气泡居中后，仪器上部平转 180°，若气泡移至水准器边缘，再按照使气泡向中央移动的方向旋转脚螺旋一至二周，若未见气泡移动，这就属于α角偏大的情况。此时不能按上述正常的情况，用改正气泡偏离量一半的方法来进行校正。首先应以每次相等的量转动脚螺旋，使气泡居中，并记住转动的次数，然后将脚螺旋按相反方向转动原来次数的一半，此时可使竖轴接近铅垂位置。拨圆水准器的校正螺旋使气泡居中，则可使α角迅速减小。然后再按正常的检验和校正方法进行校正。

(二) 十字丝横丝的检验和校正

目的 使十字丝的横丝垂直于竖轴，这样，当仪器粗略整平后，横丝基本水平，用横丝

上任意位置所得读数均相同。

检验方法 先用横丝的一端照准一固定的目标或在水准尺上读一读数，然后用微动螺旋转动望远镜，用横丝的另一端观测同一目标或读数。如果目标仍在横丝上或水准尺上读数不变(图 2－27a)，说明横丝已与竖轴垂直。若目标偏离了横丝或水准尺读数有变化(图 2－27b)，则说明横丝与竖轴没有垂直，应予校正。



(a) (b)

图 2－27

校正方法 打开十字丝分划板的护罩，可见到三个或四个分划板的固定螺丝(图 2－28)。松开这些固定螺丝，用手转动十字丝分划板座，反复试验使横丝的两端都能与目标重合或使横丝两端所得水准尺读数相同，则校正完成。最后旋紧所有固定螺丝。

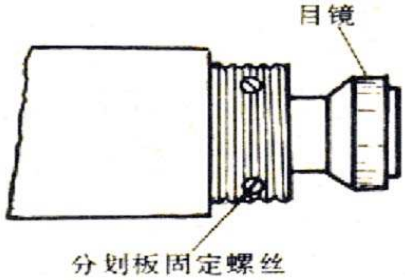
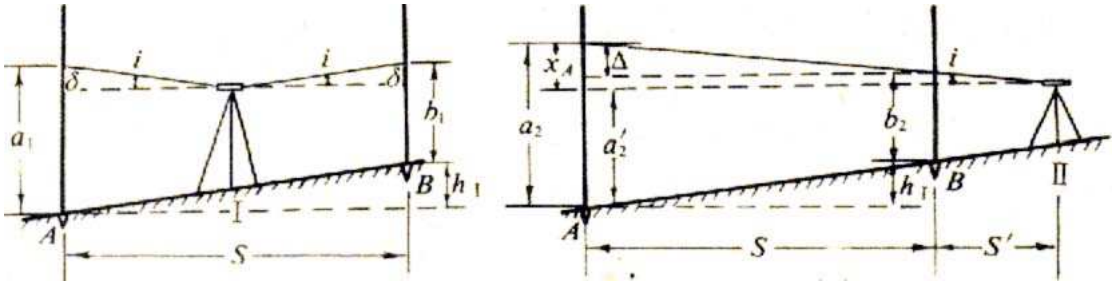


图 2－28

检校原理 若横丝垂直于竖轴，横丝的一端照准目标后，当望远镜绕竖轴旋转时，横丝在垂直于竖轴的平面内移动，所以目标始终与横丝重合。若横丝不垂直于竖轴，望远镜旋转时，横丝上各点不在同一平面内移动，因此目标与横丝的一端重合后，在其他位置的目标将偏离横丝。

(三) 水准管的检验和校正

目的 使水准管轴平行于视准轴，当水准管气泡符合时，视准轴就处于水平位置。



(a) (b)

图 2－29

检验方法 在平坦地面选相距 40～60m 的 A、B 两点，在两点打入木桩或设置尺垫。水准仪首先置于离 A、B 等距的 I 点，测得 A、B 两点的高差 $h_I = a_1 - b_1$(图 2－29。)。重

复测二到三次，当所得各高差之差小于 3mm 时取其平均值。若视准轴与水准管轴不平行而构成 i 角，由于仪器至 A、B 两点的距离相等，因此由于视准轴倾斜，而在前、后视读数所产生的误差 δ 也相等，所以所得的 h_I 是 A、B 两点的正确高差。然后把水准仪移到 AB 延长方向上靠近 B 的Ⅱ点，再次测 A、B 两点的高差(图 2－29b)必须仍把 A 作为后视点，故得高差 $h_{II}=a_2-b_2$。如果 $h_{II}=h_I$，说明在测站Ⅱ所得的高差也是正确的，这也说明在测站Ⅱ观测时视准轴是水平的，故水准管轴与视准轴是平行的，即 $i=0$。如果 $h_{II}\neq h_I$，则说明存在 i 角的误差，由图 2－29(b)可知：

$$i=\frac{\Delta}{S}\cdot\rho \tag{2－18}$$

而

$$\Delta=a_2-b_2-h_I=h_{II}-h_I \tag{2－19}$$

式中 Δ 即为仪器分别在Ⅱ和Ⅰ所测高差之差，S 为 A、B 两点间的距离，对于一般水准测量，要求 i 角不大于 20″，否则应进行校正。

校正方法　当仪器存在 i 角时，在远点 A 的水准尺读数 a_2 将产生误差 x_A，从图 2－29(b)可知：

$$x_A=\Delta\frac{S+S'}{S} \tag{2－20}$$

式中 S' 为测站Ⅱ至 B 点的距离，为使计算方便，通常使 $S'=\frac{1}{10}S$ 或 $S'=S$，则 x_A 相应为 1.1 Δ 或 2 Δ。也可使仪器紧靠 B 点，并假设 $S'=0$，则 $x_A=\Delta$，读数 b_2 可用水准尺直接量取桩顶到仪器目镜中心的距离。计算时应注意 Δ 的正负号，正号表示视线向上倾斜，与图上所示一致，负号表示视线向下倾斜。

为了使水准管轴和视准轴平行，用微倾螺旋使远点 A 的读数从 a_2 改变到 a_2'，$a_2'=a_2-x_A$。此时视准轴由倾斜位置改变到水平位置，但水准管也因随之变动而气泡不再符合。用校正针拨动水准管一端的校正螺旋使气泡符合，则水准管轴也处于水平位置从而使水准管轴平行于视准轴。水准管的校正螺旋如图 2－30 所示，校正时先松动左右两校正螺旋，然后拨上下两校正螺旋使气泡符合。拨动上下校正螺旋时，应先松一个再紧另一个逐渐改正，当最后校正完毕时，所有校正螺旋都应适度旋紧。

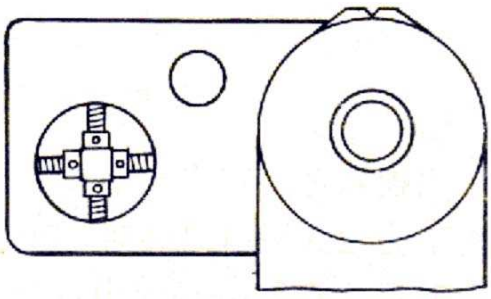


图 2－30

以上检验校正也需要重复进行，直到 i 角小于 20″为止。

(四) 水准管轴和视准轴交叉误差的检验和校正

为使水准管轴和视准轴平行，两轴在水平面和垂直面的投影都应平行。上一步对 i 角的检验实际上是检验两轴在垂直面上的投影是否平行，是水准仪检校中最重要的一项。检验两轴在水平面上投影是否平行称交叉误差的检验。由于交叉误差的影响较小，所以一般工程水

准测量中可不进行此项检验、但对于精密水准测量，则应进行交叉误差的检验。如果需要进行这项检验时，应安排在 i 角检验校正之前进行。因为这两项检校互相有影响，但 i 角的检校最为重要，应在最后进行。交叉误差的检校方法如下：

目的　使水准管轴和视准轴在水平面上的投影相平行。

检验方法　在离水准仪约 50m 处竖立水准尺，仪器安置成如图 2－31 所示的位置，使一个脚螺旋在视线方向上。仪器粗略整平．气泡符合后读出水准尺上读数。然后旋转在视线两侧的两个脚螺旋，按相对的方向各旋转约两周，并使水准尺读数不变，其作用就是使仪器绕视准轴向一侧倾斜。然后再按相反方向旋转位于视线两侧的脚螺旋，使仪器绕视准轴向另一侧倾斜，并保持原读数不变。注意观察仪器向两侧倾斜时气泡移动的情况，可能出现图 2－32 中的四种情况。图中(a)是没有交叉误差，也没有 i 角误差；(b)是没有交叉误差，但有 i 角误差；(c)是有交叉误差，但没有 i 角误差；(d)是有交叉误差，又有 i 角误差。

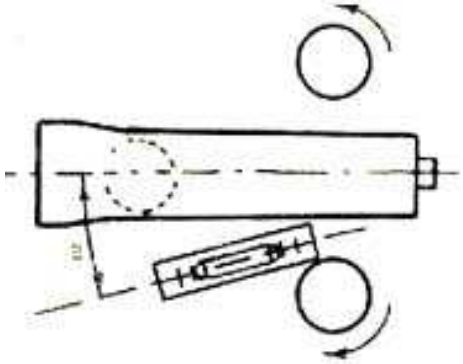


图 2－31

校正方法 拨水准管一端的横向校正螺旋。反复检验和校正，使仪器向两侧倾斜时，气泡的移动只出现图 2－32 中 a、b 两种情况时，说明已没有交叉误差。

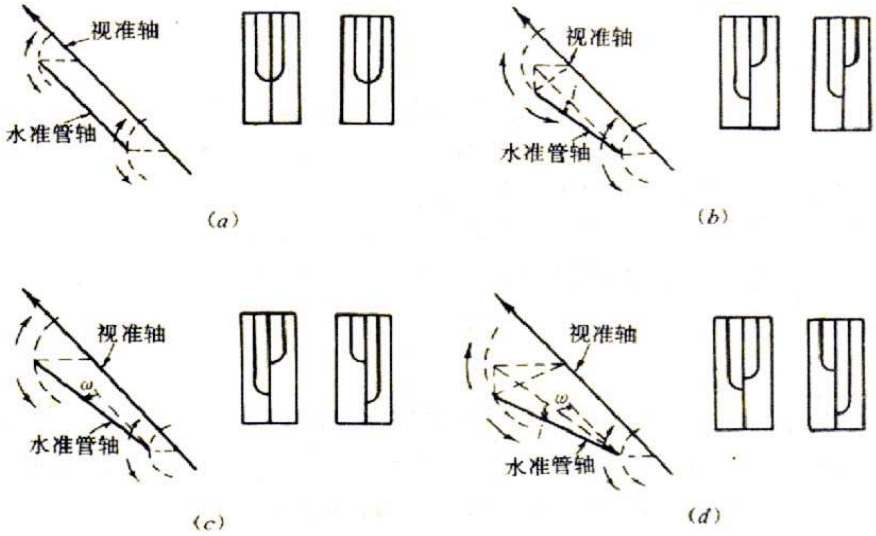


图 2－32

二、自动安平水准仪的检验和校正

自动安平水准仪应满足的条件是：

(一) 圆水准器轴应平行于仪器的竖轴。

(二) 十字丝横丝应垂直于竖轴。

以上两项的检验校正方法与微倾式水准仪相应项目的检校方法完全相同。

(三) 水准仪在补偿范围内，应能起到补偿作用。

检验方法如下：将水准仪安置在一点，在离仪器约 50m 处立一水准尺。安置仪器时使其中两个脚螺旋的连线垂直于仪器到水准尺连线的方向。用圆水准器整平仪器，读取水准尺上读数。旋转视线方向上的第三个脚螺旋，让气泡中心偏离圆水准零点少许，使竖轴向前稍倾斜，读取水准尺上读数。然后再次旋转这个脚螺旋，使气泡中心向相反方向偏离零点并读数、重新整平仪器，用位于垂直于视线方向的两个脚螺旋，先后使仪器向左右两侧倾斜，分别在气泡中心稍偏离零点后读数。如果仪器竖轴向前后左右倾斜时所得读数与仪器整平时所得读数之差不超过 2mm，则可认为补偿器工作正常，否则应检查原因或送工厂修理。检验时圆水准器气泡偏离的大小，应根据补偿器的工作范围及圆水准器的分划值来决定。例如补偿工作范围为±5′，圆水准器的分划值为 8′/2mm 弧长所对之圆心角值。则气泡偏离零点不应超过 5/8×2=1.2mm。补偿器工作范围和圆水准器的分划值在仪器说明书中均可查得。

(四) 视准轴经过补偿后应与水平线一致。

若视准轴经补偿后不能与水平线一致，则也构成 i 角，产生读数误差。这种误差的检验方法与微倾式水准仪 i 角的检验方法相同，但校正时应校正十字丝。拨十字丝的校正螺旋，使图 2－29(b)中 A 点的读数从 a_2 改变到 a_2'，使之得出水平视线的读数。对于一般水准测量也应使 i 角不大于 20″。

§2－6 水准测量的误差及其消减方法

测量工作中由于仪器、人、环境等各种因素的影响，使测量成果中都带有误差。为了保证测量成果的精度，需要分析研究产生误差的原因，并采取措施消除和减小误差的影响。水准测量中误差的主要来源如下：

一、仪器误差

(一) 视准轴与水准管轴不平行引起的误差

仪器虽经过校正，但 i 角仍会有微小的残余误差。当在测量时如能保持前视和后视的距离相等，这种误差就能消除。当因某种原因某一测站的前视(或后视)距离较大，那么就在下一测站上使后视(或前视)距离较大，使误差得到补偿。

(二) 调焦引起的误差

当调焦时，调焦透镜光心移动的轨迹和望远镜光轴不重合，则改变调焦就会引起视准轴的改变，从而改变了视准轴与水准管轴的关系。如果在测量中保持前视后视距离相等，就可在前视和后视读数过程中不改变调焦，避免因调焦而引起的误差。

(三) 水准尺的误差

水准尺的误差包括分划误差和尺身构造上的误差，构造上的误差如零点误差和箱尺的接头误差。所以使用前应对水准尺进行检验。水准尺的主要误差是每米真长的误差，它具有积累性质，高差愈大误差也愈大。对于误差过大的应在成果中加入尺长改正。

二、观测误差

(一) 气泡居中误差

视线水平是以气泡居中或符合为根据的，但气泡的居中或符合都是凭肉眼来判断，不能绝对准确。气泡居中的精度也就是水准管的灵敏度，它主要决定于水准管的分划值。一般认为水准管居中的误差约为 0.1 分划值，它对水准尺读数产生的误差为：

$$m = \frac{0.1\tau''}{\rho} \cdot s \tag{2-21}$$

式中 τ″ 为水准管的分划值，$\rho = 206265''$，s 为视线长。符合水准器气泡居中的误差大约是直接观察气泡居中误差的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{5}$。为了减小气泡居中误差的影响，应对视线长加以限制，观测时应使气泡精确地居中或符合。

(二) 估读水准尺分划的误差

水准尺上的毫米数都是估读的，估读的误差决定于视场中十字丝和厘米分划的宽度，所以估读误差与望远镜的放大率及视线的长度有关。通常在望远镜中十字丝的宽度为厘米分划宽度的十分之一时，能准确估读出毫米数。所以在各种等级的水准测量中，对望远镜的放大率和视线长的限制都有一定的要求。此外，在观测中还应注意消除视差，并避免在成像不清晰时进行观测。

(三) 扶水准尺不直的误差

水准尺没有扶直，无论向哪一侧倾斜都使读数偏大。这种误差随尺的倾斜角和读数的增大而增大。例如尺有 3° 的倾斜，读数为 1.5m 时，可产生 2mm 的误差。为使尺能扶直，水准尺上最好装有水准器。没有水准器时，可采用摇尺法，读数时把尺的上端在视线方向前后来回摆动，当视线水平时，观测到的最小读数就是尺扶直时的读数(图 2－33)。这种误差在前后视读数中均可发生，所以在计算高差时可以抵消一部分。

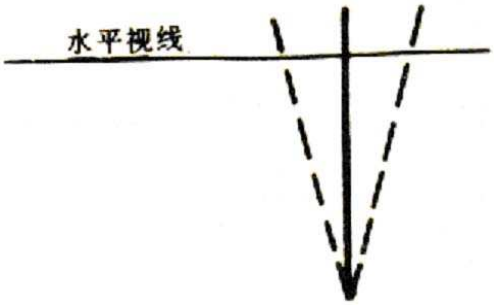


图 2－33

三、外界环境的影响

(一) 仪器下沉和水准尺下沉的误差

1. 仪器下沉的误差 在读取后视读数和前视读数之间若仪器下沉了 Δ，由于前视读数减少了 Δ 从而使高差增大了 Δ(图 2－34)。在松软的土地上，每一测站都可能产生这种误差。当采用双面尺或两次仪器高时，第二次观测可先读前视点 B，然后读后视点 A，则可使所得高差偏小，两次高差的平均值可消除一部分仪器下沉的误差。用往测、返测时，亦因同样的原因可消除部分的误差。

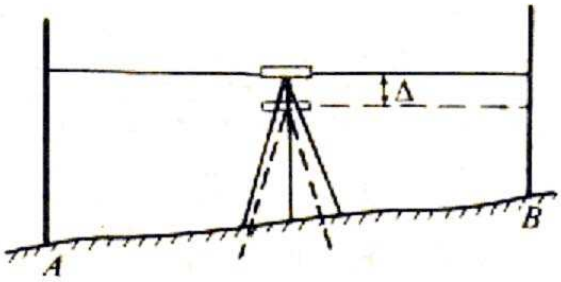


图 2－34

2. 水准尺下沉的误差 在仪器从一个测站迁到下一个测站的过程中，若转点下沉了 Δ，则使下一测站的后视读数偏大，使高差也增大 Δ(图 2－35)。在同样情况下返测，则使高差的绝对值减小。所以取往返测的平均高差，可以减弱水准尺下沉的影响。

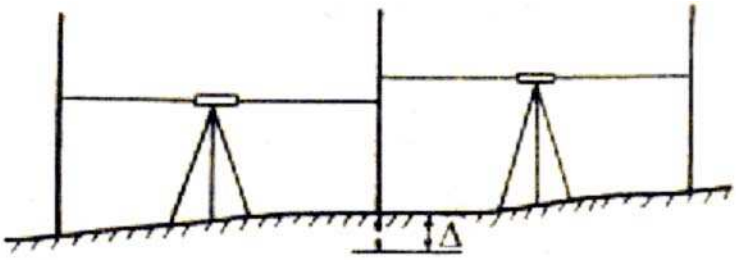


图 2－35

当然，在进行水准测量时，必须选择坚实的地点安置仪器和转点，避免仪器和尺的下沉。

(二) 地球曲率和大气折光的误差

1. 地球曲率引起的误差 理论上水准测量应根据水准面来求出两点的高差(图 2－36)，但视准轴是一直线，因此使读数中含有由地球曲率引起的误差 p，p 可以参照公式(1－5)写出：

$$p=\frac{s^2}{2R}$$

式中 s 为视线长，R 为地球的半径。

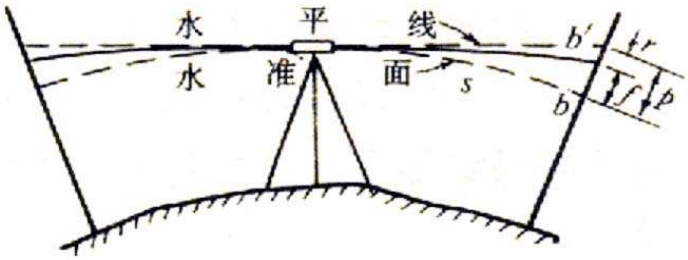


图 2－36

2. 大气折光引起的误差 水平视线经过密度不同的空气层被折射，一般情况下形成一向下弯曲的曲线，它与理论水平线所得读数之差，就是由大气折光引起的误差 r(图 2－36)。实验得出：大气折光误差比地球曲率误差要小，是地球曲率误差的 K 倍，在一般大气情况下，$K=\frac{1}{7}$，故

$$r=K\frac{S^2}{2R}=\frac{S^2}{14R} \tag{2－22}$$

所以水平视线在水准尺上的实际读数位于b'，它与按水准面得出的读数 b 之差，就是地球曲率和大气折光总的影响值 f。

故

$$f=p-r=0.43\frac{S^2}{R} \tag{2－23}$$

当前视后视距离相等时，这种误差在计算高差时可自行消除。但是离近地面的大气折光变化十分复杂，在同一测站的前视和后视距离上就可能不同，所以即使保持前视后视距离相等，大气折光误差也不能完全消除。由于 f 值与距离的平方成正比，所以限制视线的长可以使这种误差大为减小，此外使视线离地面尽可能高些，也可减弱折光变化的影响。

(三) 气候的影响

除了上述各种误差来源外，气候的影响也给水准测量带来误差。如风吹、日晒、温度的变化和地面水分的蒸发等。所以观测时应注意气候带来的影响。为了防止日光曝晒，仪器应打伞保护。无风的阴天是最理想的观测天气。

§2－7 精密水准仪和精密水准尺

一、精密水准仪

我国水准仪系列中 DS_{05}、DS_1 均属精密水准仪，精密水准仪有水准管式也有自动安平式的。精密水准仪除了有较高的置平精度外，构造上主要特点是都附有一个供读数用的光学测微装置，如图 2－37 所示。它包括装在望远镜物镜前的一块平行玻璃板，玻璃板可绕一横轴作俯仰转动；另有一个测微尺通过连杆与平行玻璃板相连。旋转测微螺旋可以使平行玻璃板绕横轴转动，同时也带动了测微尺，从而可以测出平行玻璃板转动的量。

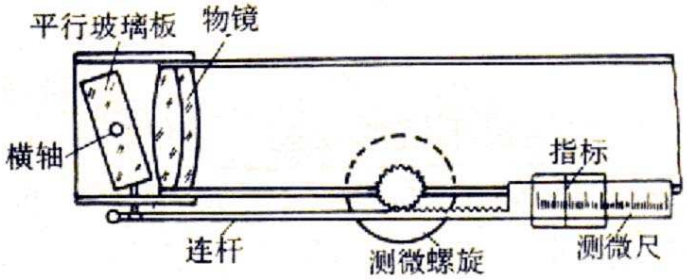


图 2－37

当平行玻璃板与视线垂直时，视线经过玻璃板后不产生位移。但当平行玻璃板不垂直于

视线时，根据折光原理，视线经过玻璃板后将产生平行的位移、这个平行位移的量与玻璃板的倾角成正比。利用与玻璃板相连接的测微尺，可将平移量精确地测量出来。水准仪上视线的最大平移量有 5mm 和 10mm 两种，相当于水准尺上一个分划。测微尺上的最小分划值为最大平移量的$\frac{1}{100}$，即可直接读出 0.05mm 或 0.1mm。测微尺读数为 0 时，视线向上平移水准尺的半个分划(图 2－38a)，这就是测量高差时的视线高。当旋转测微螺旋使楔形横丝精确照准水准尺的分划线时，测微尺上即可精确读出视线平移量 Δ，即水准尺上不足一分划的量。如图 2－38(b)，从水准尺可直接读出厘米以上的值为 152，从测微尺上读出毫米及以下的值为 61，故全部读数为 15261，单位为 0.1mm。

二、因瓦水准尺

与精密水准仪配合使用的是因瓦水准尺，因瓦是一种膨胀系数极小的合金。用因瓦做成一根长 3m 的带尺，安装在木质尺身内，分划为线条式，格值为 5mm 或 10mm。对于格值为 5mm 的尺，它的注记数字是实际长度的二倍，所以得出的高差最后应除以 2，才是实际的高差(图 2－39)。有的因瓦水准尺设有基本分划和辅助分划两排分划，其作用如同双面水准尺，可检核读数用。

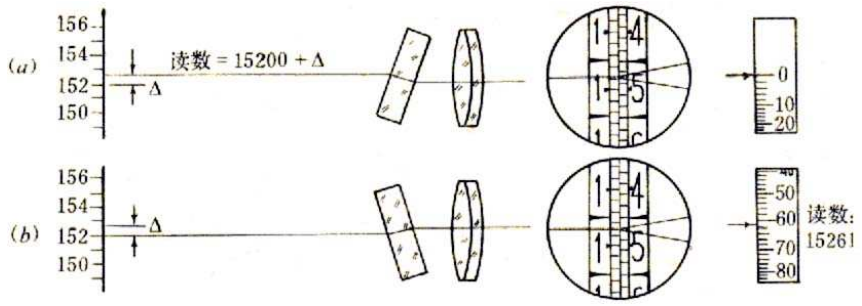


图 2－38

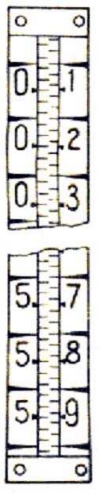


图 2－39

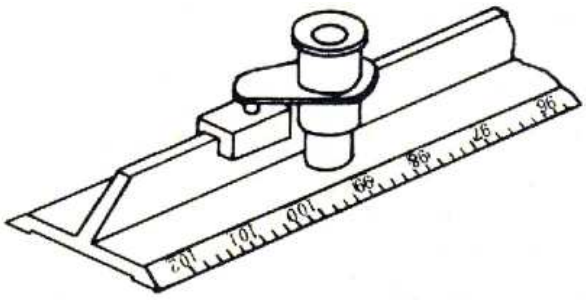


图 2－40

因瓦水准尺使用前应经过检验，检验是用一级线纹米尺进行(图 2－40)。检验的项目和要求有：

1. 每米平均真长的误差≤0.15mm；

2. 每分米分划误差≤0.1mm；

3. 水准尺零点差≤0.1mm。

检验方法和步骤应按规范要求进行。对于木质普通水准尺，也可用同样方法进行，但上述三项误差要求分别小于或等于 0.5、1.0 和 0.5mm。

习　　题

1. 什么是高程基准面、水准点、水准原点？它们在高程测量中的作用是什么？

2. 应该怎样来说明两点的高差？

3. 分别说明微倾式水准仪和自动安平水准仪的构造特点。

4. 什么是视差？产生视差的原因是什么？怎样消除视差？

5. 在水准仪上，当水准管气泡符合时，什么处于水平位置？

6. 水准路线的形式有哪几种？怎样计算它们的高程闭合差？

7. 水准点 1 和 2 之间进行了往返水准测量，施测过程和读数如图 2－41 所示，已知水准点 1 的高程为 37.614m，两水准点间的距离为 640m，容许高程闭合差按$\pm 30\sqrt{L}(mm)$计，试填写手簿并计算水准点 2 的高程。

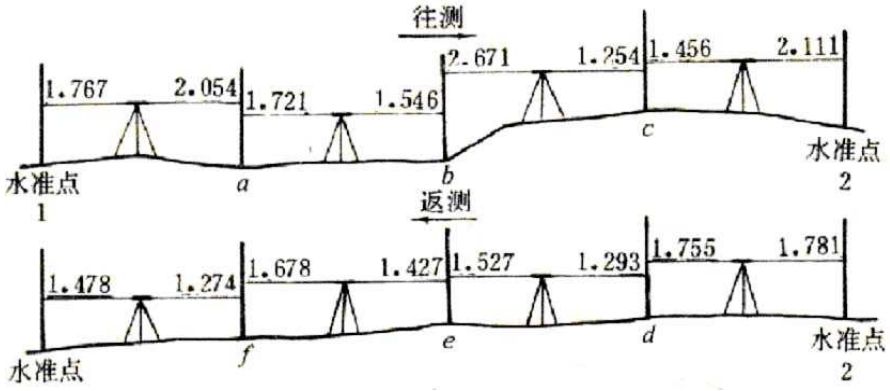


图 2－41

8. 把图 2－42 所示闭合水准路线的高程闭合差进行分配，并求出各水准点的高程。容许高程闭合差按$\pm 12\sqrt{n}(mm)$计。

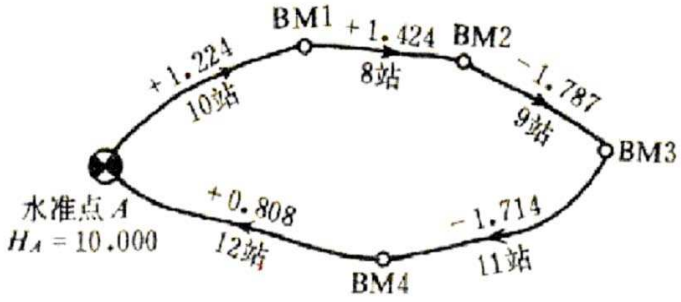


图 2－42

9. 微倾式水准议应满足哪些条件？其中最重要的是哪一条件。

10. 在图 2－29 中当水准仪在 I 时，用两次仪器高法测得 $a_1'=1.723$，$b_1'=1.425$，$a_1''=1.645$，$b_1''=1.1.349$，仪器移到 II 后得 $a_2=1.562$，$b_2=1.247$，已知 $S=50m$，$S'=5m$。试求该仪器的 i 角是多少？校正时视线应照准 A 点的读数 a_2' 是多少？

11. 进行水准测量时应注意哪些事项？为什么？

12. 水准测量应进行哪些检核？有哪些检核方法？