

测量学的基础知识

知识目标

- 理解铅垂线、大地水准面、参考椭球面及法线的基本概念及相互关系。
- 掌握高斯平面直角坐标系的原理及表示方法。
- 了解我国的大地坐标系和国家高程系。
- 掌握测量的基本工作和测量的基本观测量。
- 掌握测量工作的基本程序与原则。
- 掌握测定与测设的原理。
- 理解高斯平面直角坐标系与数学上的平面直角坐标系的关系及区别。

1.1 测量学简介

测量学是研究地球的形状、大小,以及如何测定地面的平面位置和高程,将地球表面的地形及其他信息测绘成图,并将设计图上的建筑物测设到实地的科学。它主要包括以下两方面内容:

(1)测定。测定是指使用测量仪器和工具,通过测量和计算得到一些测量数据或成果,将地球表面的地形按一定比例尺缩绘成地形图,供科学研究、国防和工程建设规划设计使用。

(2)测设。测设是指用一定的测量方法,按要求的精度把设计图样上规划设计好的建(构)筑物的平面位置和高程在实地标定出来,作为施工的依据。

1.1.1 测量学的分类

测量学按照研究范围、对象及所采用的技术方法的不同,分为以下 5 门学科:

1. 大地测量学

大地测量学(geodesy)是研究和测定地球形状、大小及地球重力场,以及建立广大区域控制网的理论、技术和方法的学科。大地测量学分为常规大地工程测量学和卫星大地工程

测量学。该学科在研究中考考虑地球曲率的影响。

2. 普通测量学

普通测量学(elementary)是研究小区域地球局部表面的形状和大小的学科。该学科在研究中不考虑地球曲率的影响。

3. 摄影测量学

摄影测量学(photogrammetry)是研究利用摄影或遥感技术获取被测物体的信息,以确定其形状、大小和空间位置的学科。摄影测量学分为地面摄影工程测量、航天摄影工程测量、水下摄影工程测量和航空摄影工程测量等几个学科。

4. 工程测量学

工程测量学(engineering surveying)是研究工程建设在规划、设计、施工和管理各阶段进行测量工作的理论与方法的学科。

5. 地图制图学

地图制图学(cartography)是利用测量、采集和计算所得的成果资料,研究各种地图的制图理论、原理、工艺技术和应用的学科。其研究内容包括地图编制、地图投影学、地图整饰、印刷等。

1.1.2 土木工程测量的意义和任务

测量工作对于我国的社会主义经济建设和国防建设具有重要的意义。任何工程建设都离不开测量工作。对于工程中的各个阶段,无论是勘察设计、施工管理还是运营管理,测量数据和地形图都是先导,都将为下一步工作提供精确的测量数据,如图 1-1 所示。从事工程建设的技术人员必须了解和掌握测量学的基础知识及基本技能。

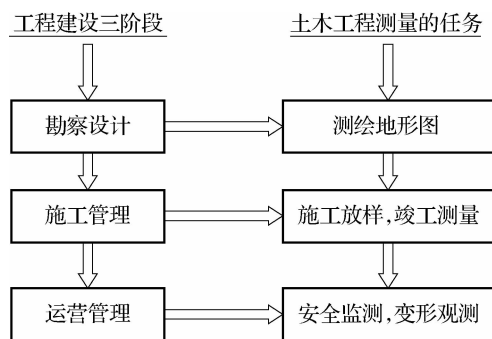


图 1-1 土木工程测量与工程建设的关系

根据不同的施测对象和阶段,土木工程测量的任务主要有以下几项:

1. 测图

在勘察设计阶段,测绘各种大比例尺地形图,供规划设计使用。对于公路、铁路、管线和特殊构造物的设计,需测绘沿某方向地面起伏变化的纵断面图和横断面图。建筑工程竣工后,还需测绘竣工图。

2. 用图

在设计阶段,要求充分利用地形,合理使用土地,正确处理拟建物与周围环境的关系进行设计。因此,用图(地形图、地物图和断面图)贯穿于设计阶段的全过程。用图的过程实质上是识图、量图和判图的过程。

3. 放样

放样(测设)是指,在施工阶段,须将图纸上规划设计的建(构)筑物在现场标定出来,以作为施工的依据,以便指导施工的进行。因此,在施工阶段,土木工程测量的任务主要是建立具有合适精度的施工控制网,以满足施工放样的需要。在此基础上,施工测量的具体任务因不同工程的需要而异。例如,隧道施工测量的主要任务是保证对向开挖的隧道能够按照规定的精度正确贯通,并使各项建筑物按照设计的位置修建。

4. 变形观测

在工程施工过程中和竣工后,为了检测建筑物在各种应力作用下的安全性和稳定性,需要对它进行变形观测,以确保工程安全。这种观测是指在建筑物上设置若干观测点,按照测量的观测程序与周期,测定建筑物及其基础随时间产生的位移。

1.2 地面点位的确定

无论是测定还是测设,都需要通过确定地面点的空间位置来实现。空间是三维的,所以表示地面点在某个坐标系统中的位置需要 3 个参数,确定地面点位置的实质就是确定其三维坐标。例如,建筑施工测量是按施工图上的设计数据将建筑物测设到地面上,其根本工作是在施工现场地面上或施工层上确定工程施工标志点的高程和平面位置。

1.2.1 基准线与基准面

地球是一个南北极稍扁、赤道稍长、平均半径约为 6 371 km 的椭球体。由于地球的自转,其表面的质点除受万有引力的作用外,还受到离心力的影响。质点所受的万有引力与离心力的合力称为重力,重力的方向称为铅垂线方向。铅垂线为测量工作的基准线。

为了表示地球表面的高低起伏,还需要选择一个统一的度量起算面,即基准面。由于地球表面的海水表面积占据了地球表面积的 71%,若假设静止的平均海水面延伸将地球表面围住,则会形成封闭的海水表面,故将它选为基准面是较为理想的。

假想静止的平均海水面延伸穿越陆地将地球整个围住,形成封闭曲面,这个封闭曲面称为水准面。它是受地球重力影响形成的重力等势面,是一个处处与铅垂线正交的曲面。水准面有无限多个,其中与平均海水面重合的水准面,称为大地水准面。大地水准面是统一高程的起算面,是测量的基准面。不同国家、不同时期采用的大地水准面不同。1987 年,我国规定以青岛验潮站 1952—1979 年所测定的黄海平均海水面作为全国高程的基准面。以这个基准面确定的高程系统称为“1985 国家高程基准”,简称“85 高程基准”,其水准原点的高程为 72.260 m,如图 1-2 所示。

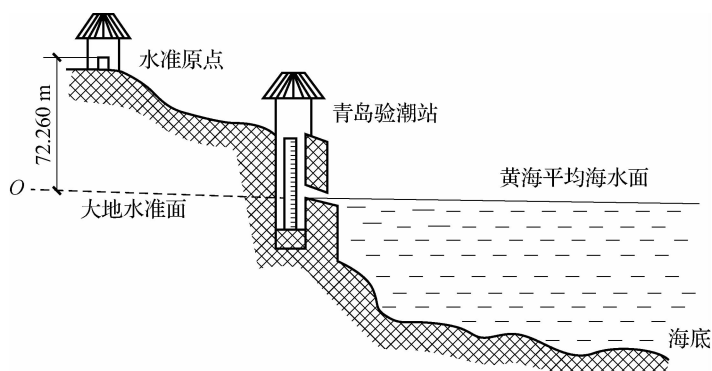


图 1-2 水准原点图

大地水准面包围的实体称为大地体。大地水准面同地球表面形状十分接近,又具有明确的物理意义,所以把大地水准面作为地球形状的研究对象。然而,由于地球内部质量分布不均匀,引起铅垂线方向的不规则变化,致使大地水准面成为一个复杂的曲面,不便于在其上直接进行测量和数据处理。为了解决投影计算问题,通常是选择一个与大地水准面十分接近的能用数学方程表示的椭球面作为投影的基准面,即用旋转椭球体代替大地体。我国规定 GPS 测量采用世界大地坐标系 WGS-84。当要求采用 1954 北京坐标系或 1980 西安坐标系时,应进行坐标转换。各坐标系的地球椭球和参考椭球的基本参数见表 1-1。

表 1-1 各坐标系的地球椭球和参考椭球的基本参数

项 目	地球椭球	参考椭球	
	WGS-84	1980 西安坐标系	1954 北京坐标系
长半轴 a/m	6 378 137	6 378 140	6 378 245
短半轴 b/m	6 356 752.314 2	6 356 755.288 2	6 356 863.018 8
扁率 $\alpha = \frac{(a-b)}{a}$	$\frac{1}{298.257\ 2}$	$\frac{1}{298.257}$	$\frac{1}{298.3}$

1.2.2 高程与高差

1. 绝对高程

地面上一点到大地水准面的铅垂距离称为该点的绝对高程,也称为海拔,通常以 H 表示。例如,图 1-3 中 A、C 两点分别位于大地水准面以上 100.000 m 和 54.000 m,即称 A 点的绝对高程为 100.000 m,C 点的绝对高程为 54.000 m,分别记作 $H_A=100.000\text{ m}$, $H_C=54.000\text{ m}$ 。

2. 相对高程

为了方便,有时在局部地区可以假定某一个水准面为基准面。那么,地面上一点到这个假定基准面的铅垂距离称为该点的相对高程,如图 1-3 所示的 H'_A 和 H'_C 。在建筑施工图中

一般均给出首层室内地面的绝对高程,并以此面为假定基准面(相对高程为 $\pm 0.000\text{ m}$)标注整个建筑物的相对高程,如某基础垫层顶面的相对高程(标高)为 -13.500 m 。

3. 高差

地面上两点的绝对(或相对)高程之差称为两点间的高差。 C 点对 A 点的高差记作 h_{AC} ,高差 $h_{AC} = H_C - H_A = 54.000\text{ m} - 100.000\text{ m} = -46.000\text{ m}$ 。结果中的负号表示 C 点的高程低于 A 点的高程。同理, A 点对 C 点的高差记作 h_{CA} ,则 $h_{CA} = H_A - H_C = 100.000\text{ m} - 54.000\text{ m} = 46.000\text{ m}$ 。

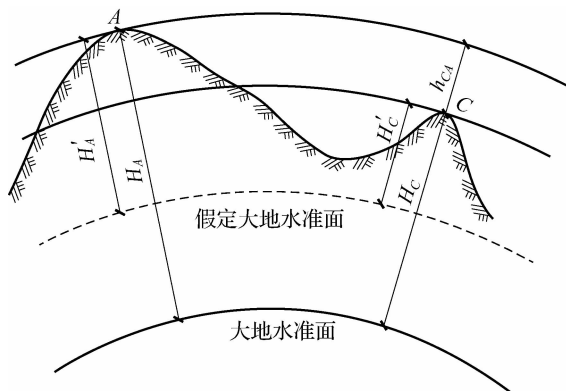


图 1-3 地面点的高程和高差

1.2.3 地面点坐标的确定

确定地面点的坐标通常可用 3 种坐标系,即地理坐标系、平面直角坐标系和地心坐标系。

1. 地理坐标系

地面点在球面上的位置是用经度和纬度来表示的,称为地理坐标。由于基准线、基准面及求坐标的方法不同,地理坐标又分为天文地理坐标(天文坐标)和大地地理坐标(大地坐标)。

1) 天文地理坐标

天文地理坐标是以铅垂线为基准线,以大地水准面为基准面确定地面点的位置。地面点的位置用天文经度 λ 和天文纬度 φ 表示。

如图 1-4 所示,地球的自转轴为地轴(NS),N 为北极,S 为南极,过地球某点与地轴所组成的平面称为该点的天文子午面,子午面与水准面的交线称为子午线,又称为经线。通过英国格林尼治天文台 G 的子午面称为首子午面,首子午面与地球表面的交线称为首子午线。过某点的天文子午面与首子午面所夹的两面角称为该点的天文经度。天文经度从首子午线向东或向西计算,取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,在首子午线以东称为东经,在首子午线以西称为西经。过某点垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为过该点的纬线,过球心的纬线称为赤道,过某点的铅垂线与赤道面的夹角称为该点的天文纬度。天文纬度自赤道起向南或向北计算,取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$,赤道以北称为北纬,赤道以南称为南纬。

一般可以应用天文测量的方法测定地面点的天文经度和天文纬度。例如,广州地区的概略天文地理坐标为东经 $113^{\circ}18'$, 北纬 $23^{\circ}07'$ 。

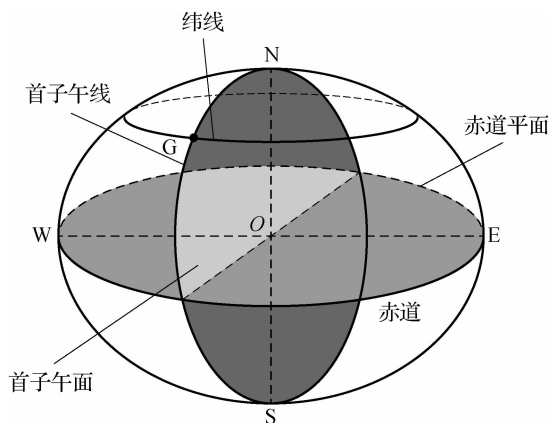


图 1-4 天文地理坐标

2) 大地地理坐标

以参考椭球面为基准面,以椭球面法线为基准线建立的坐标系为大地地理坐标系。例如,地球表面上任意一点 A 的平面位置用大地经度 L 和大地纬度 B 表示,可表示为 $A(L, B)$ 。

大地经纬度是根据一个起始的大地原点(该点的天文坐标与大地坐标重合)的天文坐标,再按大地测量所得的数据推算而得的。我国自 2008 年 7 月 1 日起启用新的统一坐标系,称为“2000 国家大地坐标系”。

2. 平面直角坐标系

球面是个曲面,其地理坐标对局部测量极不方便,不便直接用于工程规划、设计及各种测量计算中,因此,必须把球面上的坐标按一定的数学法则换算到平面上。此项工作称为地图投影。

1) 高斯平面直角坐标系

测量对地图投影的要求首先为测量中大量的角度观测元素在投影前后保持不变,这样可以避免进行大量的投影计算工作;其次,保证在有限的范围内使得地图上的图形同椭球上的原形保持相似,这会给识图和用图带来很大的方便;还有就是投影能方便地按分带进行,并能用简单的、统一的计算公式把各带连成整体。基于此要求的地图投影可采用多种方法,我国采用高斯-克吕格正形投影,简称高斯投影。高斯投影是一种等角横切椭圆柱正形投影。它是由德国数学家高斯(Gauss, 1777—1855 年)提出,后经德国大地工程测量家克吕格(Kruger, 1857—1923 年)加以补充完善的。

如图 1-5 所示,高斯投影就是设想将一个圆柱面套在旋转椭球外面,并与椭球面上的某一条子午线相切,同时使圆柱的轴线通过椭球体的中心,这条子午线称为中央子午线。将中央子午线附近的旋转梯球面上的点、线按正形投影条件投影到椭圆柱面上,顺着过两极点的母线 KK' 、 LL' 将圆柱面剪开,并展开成平面,这个平面称为高斯投影平面。

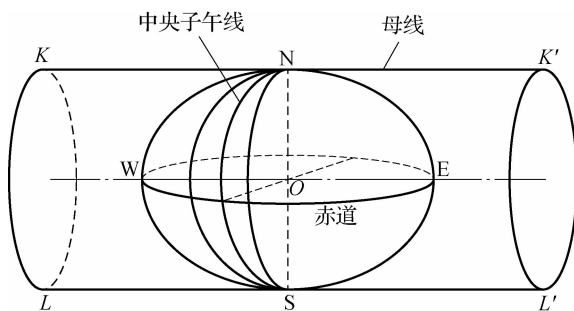


图 1-5 高斯平面直角坐标的投影

在高斯投影平面上的中央子午线和赤道的投影均为直线且互相垂直,中央子午线的长度不变形,其他子午线和纬线的长度均产生变形,离中央子午线越远,纬度越高,变形越大。为了将长度变形限制在测量精度允许的范围内,测量中采用限制投影宽度的方法,即将投影区域限制在靠近中央子午线两侧的狭长地带,即分带投影。一般采用 6° 分带法,即从格林尼治首子午线起自西向东每隔经差 6° 为1带,将椭球分成60个带。第一带的中央子午线经度为 3° ,任意一带中央子午线经度 λ_0 为

$$\lambda_0 = 6^\circ N - 3^\circ \quad (1-1)$$

式中, N 为 6° 带的带号。

当要求投影变形更小时,可用 3° 或 1.5° 分带法。 3° 分带法是从东经 $1^\circ 30'$ 开始,每隔经度 3° 划分为1带,将整个地球划分为120个带。每带中央子午线经度 λ'_0 与 3° 带的带号 n 的关系为

$$\lambda'_0 = 3^\circ n \quad (1-2)$$

也可以已知某点的经度,求该点所在 6° 或 3° 带的带号。若已知某点的经度为 L ,则该点的 6° 带的带号 N 可由式(1-3)求得。

$$N = \text{int}(L/6) + 1 \quad (1-3)$$

若已知某点的经度为 L ,则该点所在 3° 带的带号 n 按式(1-4)求得。

$$n = L/3 \quad (1-4)$$

【例 1-1】 已知某点的大地经度为 $123^\circ 36'$,问该点各在 6° 带和 3° 带的哪一带?

【解】 $N = \text{int}(L/6) + 1 = \text{int}(123.6^\circ/6) + 1 = 20 + 1 = 21$ 带

$n = L/3 = 123.6^\circ/3 = 41.2$,取 $n = 41$ 带。

我国领土概略经度范围是东经 $74^\circ \sim 138^\circ$,所以 6° 带的编号 N 为13~23(11个带), 3° 带的编号 n 为25~45(21个带)。带号没有重叠。

如图1-6所示,在高斯投影平面中,以每一带中央子午线的投影为直角坐标系中的纵轴 x 轴,向北为正,向南为负;以赤道的投影为直角坐标系中的横轴 y 轴,向东为正,向西为负,两轴交点为坐标原点 O 。由于我国的领土位于北半球,因此 x 值均为正, y 坐标有正有负,如图1-6(a)所示, $y_A = +136\,780\text{ m}$, $y_B = -272\,440\text{ m}$ 。为了避免 y 坐标出现负值,将每带的坐标纵轴向西平移500 km,如图1-6(b)所示。坐标纵轴西移后, $y_A = 500\,000\text{ m} + 136\,780\text{ m} = 636\,780\text{ m}$, $y_B = 500\,000\text{ m} - 272\,440\text{ m} = 227\,560\text{ m}$ 。为了根据某点的横坐标值确定其 6° 带的带号,需在横坐标值前冠以带号,如A、B两点均位于20号带,则其坐标值 $y_A = 20\,636\,780\text{ m}$,

$y_B = 20\,227\,560\text{ m}$ 。

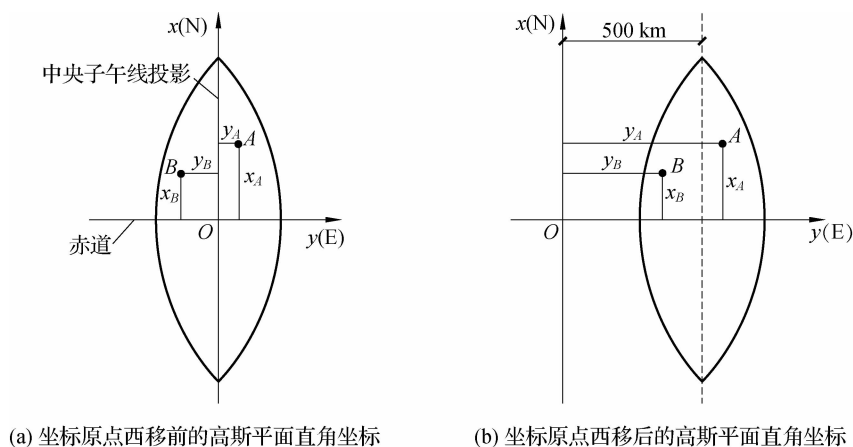


图 1-6 高斯平面直角坐标系

2) 独立平面直角坐标

当测区范围较小时,可以把测区大地水准面当作平面看待,直接将地面点沿铅垂线投影到平面上,用平面直角坐标表示点的位置,如图 1-7 所示。坐标原点一般选在测区的西南角,使测区内的坐标均为正值。把该测区子午线方向(真子午线或磁子午线)定为 x 轴,横轴为 y 轴,象限按顺时针方向编号。这与数学上规定是不同的,测量上定纵轴为 x 轴方向,主要是为了定向方便,而象限按顺时针方向编号,其目的是便于将数学上的三角函数和解析几何公式直接应用到测量计算中,而不需做任何改变。

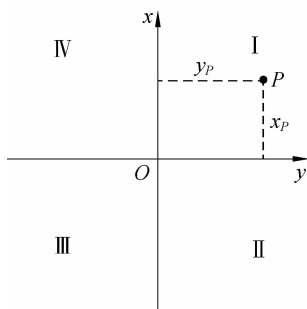


图 1-7 独立平面直角坐标系

3) 建筑坐标系

在房屋建筑工地或其他工程建筑工地,为了施工放样的方便,还可以使所采用的平面直角坐标系与建筑设计的轴线互相平行或垂直,对于前后、左右对称的建筑物,为简化计算还可以将坐标原点设置于其对称中心上。将建筑坐标系和地区平面直角坐标系或高斯平面直角坐标系进行连测后,可以在几种坐标系之间换算点的坐标。

3. 地心坐标系

地心坐标系属于空间三维直角坐标系,用于卫星大地测量。地心坐标系取地球质心为

坐标系原点, X 、 Y 轴在地球赤道平面内, 首子午面与赤道平面的交线为 X 轴, Z 轴与地球自转轴相重合。如图 1-8 所示, 地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 (x_A, y_A, z_A) 表示。地面点的空间直角坐标与大地坐标可用公式转换。WGS-84 坐标系是 GPS 全球定位系统采用的坐标系, 属于地心坐标系。

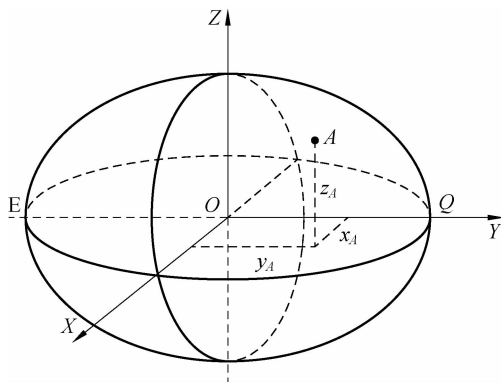


图 1-8 地心坐标系

1.3 水平面代替水准面的限度

水准面是一个不规则曲面, 要在这样的曲面上进行测量计算和工程设计是很不方便的。但是用水平面代替水准面, 必然会给测量和制图工作带来误差, 并且范围越大, 这种影响越大。因此, 为了简化测量和绘图工作, 并考虑测量与计算本身的误差, 应该选择在一定范围内用水平面来代替水准面, 以保证测绘和测设有足够的精度。下面探讨用水平面代替水准面对测量基本观测量(距离、高程和水平角)的影响, 以便给出水平面代替水准面的限度。

1.3.1 对距离的影响

如图 1-9 所示, 地面上 A 、 B 两点在大地水准面上的投影点是 a 、 b , 用过 a 点的水平面代替大地水准面, 则 B 点在水平面上的投影为 b' 。设 ab 的弧长为 D , ab' 的长度为 D' , 球面半径为 R , D 所对圆心角为 θ , 则以水平长度 D' 代替弧长 D 所产生的误差 ΔD 为

$$\Delta D = D' - D = R \tan \theta - R\theta = R(\tan \theta - \theta) \quad (1-5)$$

将 $\tan \theta$ 用级数展开为

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{5}{12}\theta^5 + \dots \quad (1-6)$$

因为 θ 角很小, 所以只取前两项代入式(1-5)得

$$\Delta D = R\left(\theta + \frac{1}{3}\theta^3 - \theta\right) = \frac{1}{3}R\theta^3 \quad (1-7)$$

又因 $\theta = \frac{D}{R}$, 则

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-8)$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-9)$$

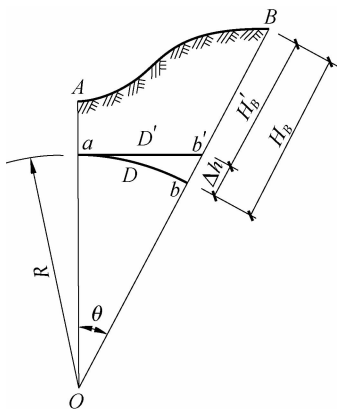


图 1-9 用水平面代替水准面对距离和高程的影响

取地球半径 $R=6\,371\text{ km}$,并以不同的 D 值代入式(1-8)和式(1-9),可求出相应的距离误差 ΔD 和距离相对误差 $\Delta D/D$,见表 1-2。

表 1-2 水平面代替大地水准面的距离误差及距离相对误差

D/km	$\Delta D/\text{cm}$	$\frac{\Delta D}{D}$
10	0.8	1/120 万
25	12.8	1/20 万
50	102.7	1/4.9 万
100	821.2	1/1.2 万

由表 1-2 可知,当距离 $D=10\text{ km}$ 时,所产生的误差为 1/120 万,这样小的误差,即使是精密量距,也是允许的。因此,当在半径为 10 km 的圆内进行距离测量时,可用水平面代替大地水准面,而不必考虑地球曲率对距离的影响。对于一般的地形测量和工程测量,当半径小于 25 km 时也不必顾及地球曲率的影响。

1.3.2 对高程的影响

如图 1-9 所示,地面一点 B 的高程应该是沿铅垂线方向到大地水准面的距离。用水平面代替水准面后, B 点的高程近似为 Bb' ,由此产生的高程误差为 Δh 。由图 1-9 可得

$$(R+\Delta h)^2 = R^2 + D'^2 \quad (1-10)$$

$$\Delta h = \frac{D'^2}{2R + \Delta h} \quad (1-11)$$

在式(1-11)中,用 D 代替 D' ,同时考虑 $\Delta h \ll 2R$,则

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R} \quad (1-12)$$

用不同的 D 值代入式(1-12),可得到相应的高程误差 Δh ,见表 1-3。从表 1-3 可以看出,

用水平面代替水准面,对高程的影响是很大的。当距离待测点 2 km 时,高程误差可达 0.31 m。因此,就高程测量而言,即使距离很短,也应考虑地球曲率对高程的影响。

表 1-3 水平面代替水准面对高程的影响

D/km	0.1	0.5	1	2	4	5
$\Delta h/\text{cm}$	0.08	2	8	31	125	196

1.3.3 对水平角的影响

从球面三角学可知,同一空间多边形在球面上投影的各内角和比在平面上投影的各内角和大一个球面角超值 ϵ 。

$$\epsilon = \rho \frac{P}{R^2} \quad (1-13)$$

式中, ϵ 为球面角超值("); ρ 为弧度的秒值, $\rho=206\,265''$; P 为球面多边形的面积(km^2); R 为地球半径(km)。

以不同的 P 值代入式(1-13),可求出不同的球面角超值,见表 1-4。

表 1-4 水平面代替水准面对水平角的影响

P/km^2	$\epsilon/(\prime)$
10	0.05
50	0.25
100	0.51
300	1.52

由表 1-4 可知,当 $P=100\text{ km}^2$ 时进行水平角测量,可以用水平面代替水准面,而不必考虑地球曲率对角度产生的影响。

1.4 测量工作的程序和原则

地球表面复杂的形态可分为地物和地貌两大类。河流、湖泊、道路和房屋等固定性物体称为地物,山头、谷地和陡崖等地面上高低起伏的形态称为地貌。无论地物还是地貌,它们的形状和大小都是由一些特征点的位置所决定的,这些特征点在地形图测绘时称为碎部点。地形图测绘就是测定这些特征点的平面位置和高程。测绘地形图时,要在某一个测站上用仪器测绘该测区所有的地貌和地物是不可能的。同样,某一建筑物(如住宅或厂区)的放样工作也不可能在一个测站上完成。

地面点的位置是根据距离、角度和高差测量结果经推算确定的。在测量工作中,无论采用何种方法,使用何种仪器进行测量,都会给测量成果带来误差。在测量方法上,假如从一个碎部点开始,逐点进行施测,最后虽可得到待测各点的位置,但是这些点的位置可能是很不准确的。因为前一点的测量误差,将会传递到下一点,这样逐点的误差累积起来,最后可能达到不能容许的程度,所以这种方法是不可取的。

为了防止或减弱测量误差的传递和积累,可以先在整个测区内选定一些有特征意义的点,这些点称为控制点,如图 1-10 中的 A、B、C 等点。用精密测量仪器精确地测定其平面位置和高程的工作称为控制测量。控制测量完成后,可以以这些控制点为依据,测绘其周围碎部点的平面位置和高程,这项工作称为碎部测量或细部测量。将碎部测量和控制测量相结合就可以将误差控制在允许的范围。

综上所述,测量工作应遵循“从整体到局部,先控制后碎部,从高级到低级”的原则。即在测量的布局上,先进行整体的测量,再进行局部的测量;在测量的程序上先进行控制测量,再进行碎部测量;在测量的精度上,从高级到低级。无论是地形测量还是施工放样都应本着这一原则进行。它既可以保证测区的必要精度,又不致使碎部测量的误差累积,同时还可以把整个测区分幅进行测绘,加快测量工作的进度。另外,为了保证测量结果的正确性,必须坚持检验校核,保证前一步工作未做检核,不开端下一步工作,即“步步有检核”,这也是测量工作应该遵循的一个原则。

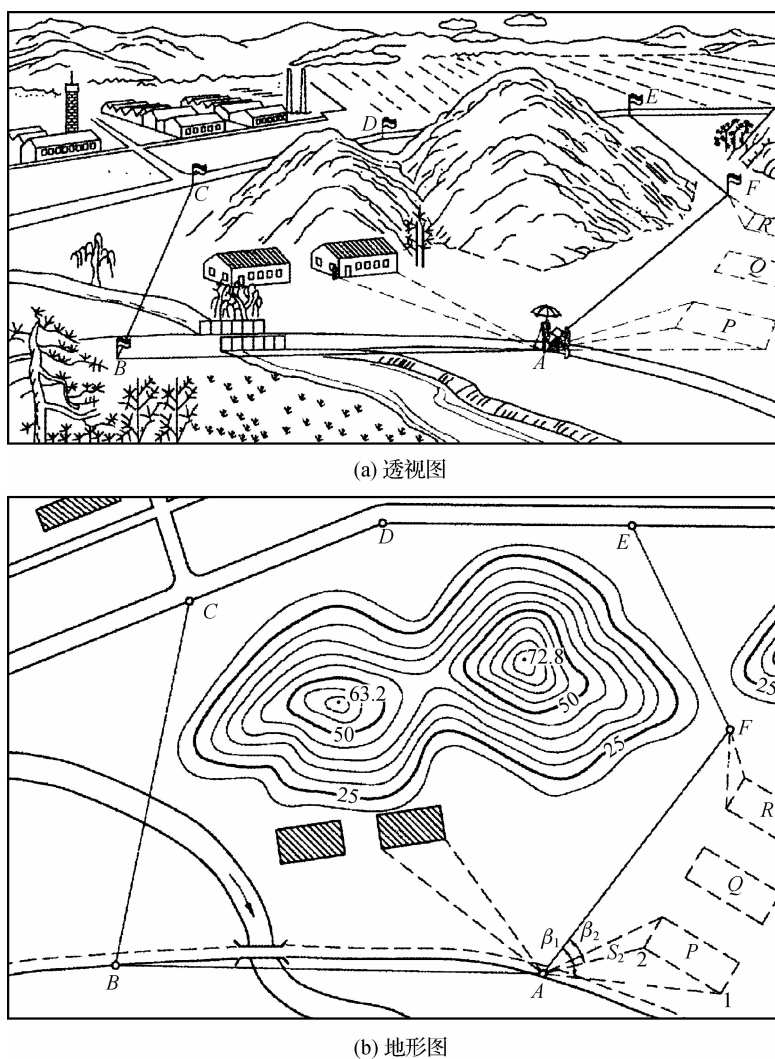


图 1-10 某地区地物地貌透视图与地形图

1.5 测量中常用的计量单位

目前,我国统一实行法定计量单位,具体规定和用法可查阅《中华人民共和国法定计量单位》和《中华人民共和国法定计量单位使用方法》。本节只介绍常用的角度、长度和面积计量单位。

1. 角度单位

我国测量工作中常用的角度单位有度分秒制单位和弧度制单位。

1) 度分秒制

度分秒制是角度测量工作中最常使用的单位。其换算关系为 1 圆周 = 360° , $1^\circ = 60'$, $1' = 60''$ 。

2) 弧度制

把弧长 b 等于半径 R 的圆弧所对圆心角称为一个弧度,以 ρ 表示,则整个圆周为 2π 个弧度。弧度与角度的换算关系为

$$\begin{aligned} 1 \text{ 圆周} &= 2\pi\rho, \pi\rho = 180^\circ \\ \rho^\circ &= \frac{180^\circ}{\pi} = 57.295\ 779\ 51^\circ \approx 57.3^\circ \\ \rho' &= \frac{180^\circ}{\pi} \times 60 \approx 3\ 438' \\ \rho'' &= \frac{180^\circ}{\pi} \times 3\ 600 \approx 206\ 265'' \end{aligned}$$

2. 长度单位

我国测量工作中法定的长度单位为米制单位。其换算关系为 $1\text{ km} = 1\ 000\text{ m}$, $1\text{ m} = 10\text{ dm} = 100\text{ cm} = 1\ 000\text{ mm}$ 。

在外文文献中还会用到英、美制长度单位,如英里(mile,简写为 mi)、英尺(foot,简写为 ft)、英寸(inch,简写为 in),它们与米制的换算关系为 $1\text{ km} = 0.621\ 4\text{ mi} = 3\ 280.8\text{ ft}$, $1\text{ m} = 3.280\ 8\text{ ft} = 39.37\text{ in}$ 。

3. 面积单位

我国测量工作中使用的法定的面积单位为 km^2 、 m^2 等,我国农业上常用的市亩为面积计量单位。其换算关系为 $1\text{ km}^2 = 1 \times 10^6\text{ m}^2$, $1\text{ m}^2 = 100\text{ dm}^2 = 1 \times 10^4\text{ cm}^2 = 1 \times 10^6\text{ mm}^2$, $1\text{ km}^2 = 1\ 500\text{ 亩}$, $1\text{ m}^2 = 0.001\ 5\text{ 亩}$, $1\text{ 亩} = 666.666\ 666\ 7\text{ m}^2 = 0.0666\ 666\ 7\text{ hm}^2$ 。

米制与英、美制面积计量单位的换算关系为 $1\text{ km}^2 = 247.11\text{ 英亩} = 100\text{ hm}^2$, $10\ 000\text{ m}^2 = 1\text{ hm}^2$, $1\text{ m}^2 = 10.764\text{ ft}^2$, $1\text{ cm}^2 = 0.155\ 0\text{ in}^2$ 。

思考练习题

1. 土木工程测量的任务是什么?
2. 测定与测设有何区别?

3. 什么是大地水准面？它在测量工作中的作用是什么？
4. 什么是绝对高程和相对高程？两点之间绝对高程之差与相对高程之差是否相等？
5. 测量工作中所用的平面直角坐标系与数学上的有哪些不同之处？
6. 用水平面代替水准面对观测距离、高程和水平角有何影响？
7. 测量工作的基本程序和原则是什么？
8. 确定地面点位的参数都是什么？
9. 设 A 点横坐标 $y_A = 19\,405\,318.87\text{ m}$ ，计算 A 点所在 6° 带中央子午线的经度，该点在中央子午线的东侧还是西侧？相距多远？

水准测量

知识目标

- 掌握水准测量的原理和计算未知点高程的方法。
- 熟练掌握水准仪的使用及减小误差的方法。
- 熟练掌握水准测量的施测方法。
- 掌握水准测量路线的布设形式及水准测量的成果整理。
- 掌握 DS3 型微倾式水准仪的主要轴线及各轴线间应满足的几何关系。
- 了解水准测量的等级及主要技术指标。
- 了解 DS3 型微倾式水准仪检验和校正的方法。
- 了解自动安平水准仪及电子水准仪的原理及使用方法。

2.1 水准测量概述

2.1.1 水准测量的原理

水准测量是利用水准仪所提供的水平视线测定两点间的高差,并据此由已知高程点的高程推算欲求高程点的高程。如图 2-1 所示,若已知 A 点(已知高程点)的高程为 H_A ,欲测定 B 点(待定高程点)的高程 H_B ,则须先测定 A、B 两点间的高差 h_{AB} 。测定 h_{AB} 的方法是:在 A、B 两点处各立一把水准尺,在两点间的 I 处(测站)安置一台可提供水平视线的水准仪,通过水准仪的视线在 A 点(后视点)的水准尺(后视尺)上的读数为 a (后视读数),在 B 点(前视点)的水准尺(前视尺)上的读数为 b (前视读数)。则 A、B 两点间的高差为

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

B 点的高程为

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

由式(2-1)可知,两点间的高差等于后视读数减去前视读数。若 $a > b$,则 h_{AB} 为正值,表示 B 点高于 A 点;反之,则 B 点低于 A 点。式(2-1)和式(2-2)是直接利用高差 h_{AB} 计算 B 点高程的方法,称为高差法。此外,还可以通过仪器的视线高 H_i 计算 B 点的高程,即

$$H_B = (H_A + a) - b = H_i - b \quad (2-3)$$

式(2-3)是利用仪器视线高 H_i 计算 B 点高程的方法,称为视线高法。当安置一次仪器可求出几个点的高程时,视线高法比高差法方便。

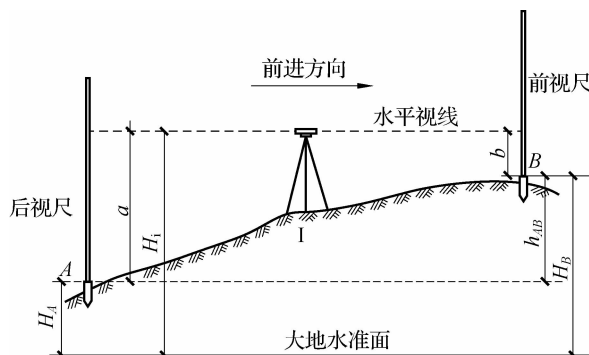


图 2-1 水准测量的原理

2.1.2 中间法水准测量

从上述可知,两点间的高差是指分别通过这两点的水准面间的铅垂距离。因此,从理论上讲,水准尺上的读数也应该根据通过仪器的水准面在 A 、 B 水准尺上得到读数 a' 和 b' ,如图 2-2 所示。 A 、 B 两点间的高差应为

$$h_{AB} = a' - b' = (a - aa') - (b - bb') \quad (2-4)$$

仪器的水平视线读数和通过仪器的水准面上的读数是有差别的。如图 2-2 所示, aa' 是两者在 A 尺上的读数差, bb' 是两者在 B 尺上的读数差。设仪器至 A 、 B 两点的距离分别为 D_a 和 D_b ,则由式(1-12)可得

$$aa' = \frac{D_a^2}{2R}, bb' = \frac{D_b^2}{2R}$$

将 aa' 和 bb' 代入式(2-4),得

$$h_{AB} = a - b - \frac{D_a^2 - D_b^2}{2R}$$

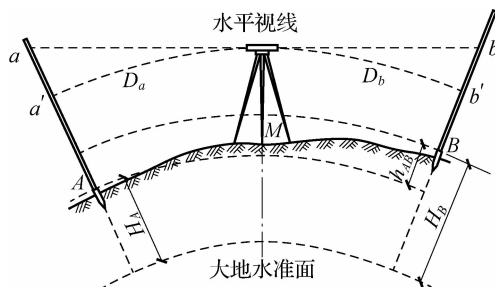


图 2-2 中间法水准测量

由此可知,若在进行水准测量时总是将水准仪安置在距离前、后视点大致相等的距离处(M 点),即 $aa' \approx bb'$,则根据水准仪的水平视线在水准尺上的读数算得的两点间的高差仍然是正确的。这种水准测量的方法称为中间法水准测量。只有中间法水准测量才能消除用水

平面代替水准面所带来的高差误差,所以在水准测量工作中一定要注意此问题,否则就需要进行高差误差修正。

2.2 水准测量的仪器与工具及其使用

水准测量所用的仪器主要有水准仪,工具有水准尺和尺垫。

2.2.1 DS3 型微倾式水准仪

水准仪是为水准测量提供水平视线的仪器。国产微倾式水准仪按其精度等级分为 DS05、DS1、DS3、DS10 四种型号,其中,D、S 分别为“大地测量”和“水准仪”中第一个汉字拼音的首字母,后面的数字表示精度等级,如 DS3 型水准仪的“3”表示该仪器每千米往返观测高差的中误差为 ± 3 mm。DS05、DS1 型为精密水准仪,DS3、DS10 型为普通水准仪。下面主要介绍 DS3 型微倾式水准仪。

根据水准测量的原理,水准仪的主要作用是提供一条水平视线,并能照准水准尺进行读数。因此,水准仪的构造主要由望远镜、水准器及基座三部分构成。图 2-3 所示为 DS3 型微倾式水准仪。

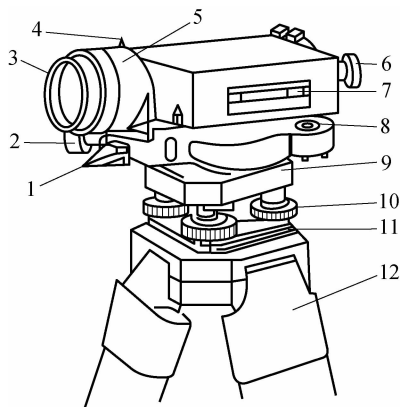


图 2-3 DS3 型微倾式水准仪

1—制动螺旋; 2—微动螺旋; 3—物镜; 4—照门; 5—望远镜; 6—目镜; 7—管水准器;
8—圆水准器; 9—轴座; 10—脚螺旋; 11—连接底板; 12—三脚架

1. 望远镜

望远镜的主要作用是提供一条水平照准视线,使观测者能够看清不同远近的目标。望远镜主要由物镜、调焦透镜、十字丝分划板和目镜等组成,如图 2-4(a)所示。十字丝中央交点与物镜光心的连线称为视准轴,简称视线,用 CC 表示。它是望远镜照准的依据。望远镜照准目标就是指视准轴对准目标。望远镜所提供的水平视线实质上就是处于水平位置的视准轴。

十字丝分划板安装在物镜和目镜之间,是直径约为 10 mm、厚度为 1~2 mm 的平板玻璃。其上刻有相互垂直的纵横细线,作为瞄准目标和读数的依据。如图 2-4(b)所示,中间水平的一根横丝称为中丝或长横丝,竖直的一根丝称为竖丝或纵丝,中丝上、下对称分别有一

根水平丝(上丝和下丝),称为视距丝。视距丝可配合水准尺进行视距测量。

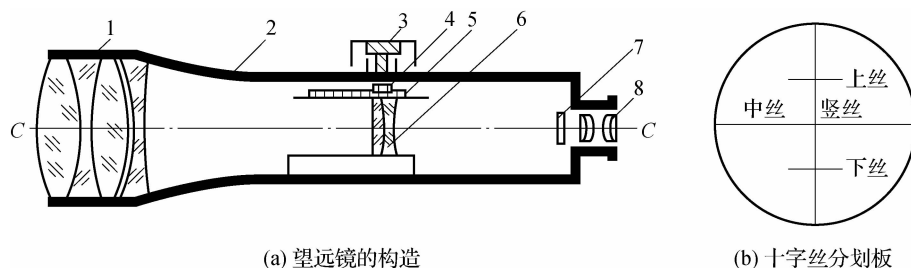


图 2-4 望远镜的构造和十字丝分划板

1—物镜; 2—物镜筒; 3—物镜调焦螺旋; 4—齿轮; 5—齿条;
6—物镜调焦透镜; 7—十字丝分划板; 8—目镜

望远镜的成像原理如图 2-5 所示。目标 AB 经过物镜后形成一个倒立而缩小的实像 ab , 移动对光透镜可使不同距离的目标均能成像在十字丝平面上; 再通过目镜的作用, 便可看到同时放大的十字丝和目标虚像 a_1b_1 。

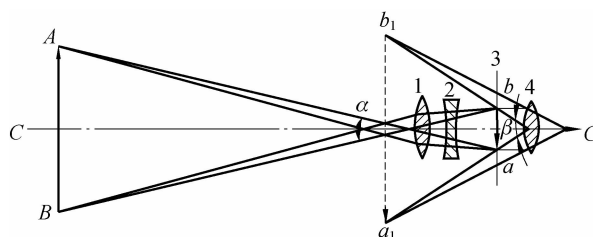


图 2-5 望远镜的成像原理

1—物镜; 2—调焦透镜; 3—十字丝分划板; 4—目镜

从望远镜内看到的目标影像的视角与肉眼直接观察该目标的视角之比, 称为望远镜的放大率, 用 V 表示。如图 2-5 所示, 从望远镜内看到目标的像所对的视角为 β , 用肉眼看目标所对的视角可近似地认为是 α , 故 $V = \beta / \alpha$ 。DS3 型水准仪望远镜的放大率一般为 28~32 倍。

2. 水准器

水准器的主要作用是置平仪器。水准器有圆水准器和管水准器两种。

1) 圆水准器

如图 2-6 所示, 圆水准器是内顶面为球面的玻璃盒, 内注酒精和乙醚的混合液体, 加热封闭冷却后, 会形成充满液体蒸气的气泡, 该气泡称为水准气泡。以球面中心为圆心刻有半径为 2 mm 的分划圈。分划圈的圆心称为圆水准器零点, 过零点的球面法线称为圆水准器轴, 用 $L'L'$ 表示。圆水准器装在托板上, 当气泡居中时, $L'L'$ 处在铅垂的位置, 而 $L'L'$ 又与仪器的竖轴 VV 平行, 所以 VV 同时处于铅垂位置, 即仪器竖直。气泡由零点向任意方向偏离 2 mm, $L'L'$ 将相对于铅垂线倾斜一个角值, 此角值称为圆水准器分划值(灵敏度), 用 τ' 表示。分划值可理解为当气泡移动 2 mm 时仪器倾斜的角度。DS3 型水准仪的分划值 τ' 一般为 $8' \sim 10'$, 灵敏度较低, 用于粗略整平仪器。

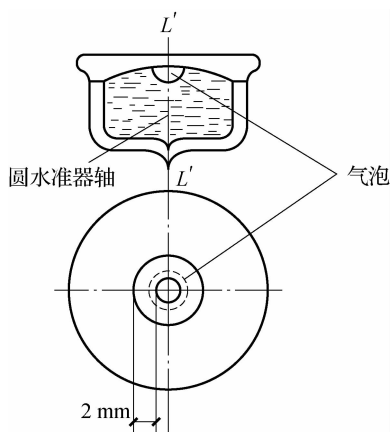


图 2-6 圆水准器的构造

2) 管水准器

管水准器也称水准管，与望远镜连在一起，用于指示望远镜视准轴是否水平。管水准器的内壁呈圆弧形，向管内注入加热的酒精和乙醚混合液，冷却后形成气泡，如图 2-7(a)所示。水准管纵向圆弧的顶点 O 称为管水准器的零点，过零点相切于内壁圆弧的纵向切线称为水准管轴，用 LL 表示。当气泡中心与零点重合时，称为气泡居中。为了使望远镜视准轴 CC 水平，水准管应安装在望远镜的左侧，并满足 $LL \parallel CC$ 。当水准管气泡居中时， LL 处于水平位置，而 CC 也就处于水平位置，这是水准仪应满足的重要条件。把气泡偏离圆弧中心 2 mm 所对应的圆心角称为水准管的分划值 τ'' ，如图 2-7(b)所示。显然，水准管内壁圆弧半径越大，分划值越小，气泡的灵敏度就越高。DS3 型水准仪的分划值 τ'' 一般为 $20''$ 。

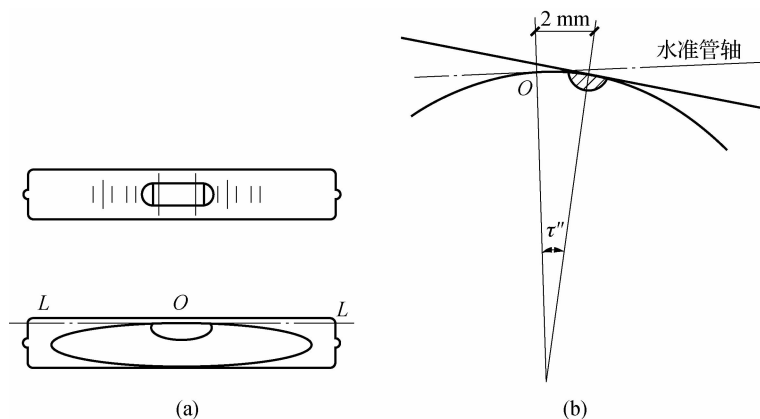


图 2-7 管水准器及其分划值

为了提高观察水准管气泡居中的精度和速度，通常在水准管上方安装一组棱镜，将气泡两端的影像同时反映到目镜旁的观察窗内，如图 2-8(a)所示。当两端的影像错开时，如图 2-8(b)所示，表示气泡不居中；若气泡两端的影像重合，则说明气泡居中，如图 2-8(c)所示。这种具有棱镜装置的水准管称为符合式水准器，它能提高气泡居中的精度。由于圆水

准器和管水准器的分划值相差甚大,即管水准器的灵敏度比圆水准器高得多,故管水准器用于水准仪的精确整平,而圆水准器只能用于粗略整平。

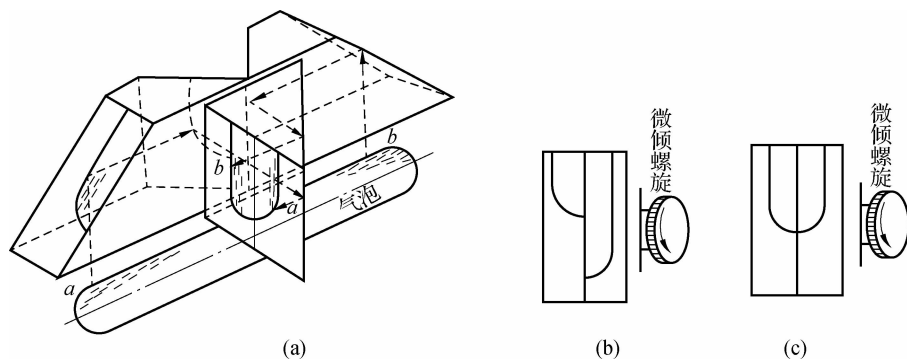


图 2-8 管水准器的构造

3. 基座

基座的作用是支撑仪器的上部并与三脚架相连接。它主要由轴座、脚螺旋、底板和连接底板构成。其中,脚螺旋(3 个)用来调整圆水准器,整平水准仪。

2.2.2 自动安平水准仪

自动安平水准仪与微倾式水准仪的区别在于自动安平水准仪没有水准管和微倾螺旋,而是在望远镜的光学系统中装置了补偿器,其基本原理如图 2-9 所示。

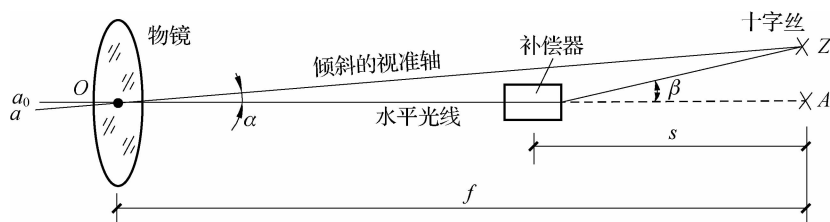


图 2-9 自动安平水准仪的基本原理

因为圆水准器的精度低,当圆水准器气泡居中时,视准轴仍存在一个微小倾角 α ,故可在望远镜的光路上安置一个补偿器,使通过物镜光心的水平光线经过补偿器后偏转一个 β 角,仍能通过十字丝交点,这样在十字丝交点上读出的水准尺读数即为视线水平时应该读出的水准尺读数。

由于无须精平,因此不仅可以缩短水准测量的观测时间,而且对于施工场地地面的微小振动、松软土地的仪器下沉以及大风吹刮等原因引起的视线微小倾斜,都能迅速自动安平仪器,从而提高水准测量的观测精度。

使用自动安平水准仪时,先将圆水准器的气泡居中,然后瞄准水准尺,等待 2~4 s 后即可进行读数。有的自动安平水准仪配有一个补偿器检查按钮,每次读数前按一下该按钮,确认补偿器能正常作用后再读数。

2.2.3 水准测量的工具

1. 水准尺

水准尺是水准测量时使用的标尺,有直尺和塔尺两种,如图 2-10 所示。直尺一般用不易变形的干燥优质木材制成,全长 3 m,多为双面尺。尺面为 1 cm 黑白或红白相间分划,每 10 cm 加一个倒字注记(与正像望远镜配套的也有正字)。黑白相间的尺面为黑面尺,称为基本分划面,尺底起点为零。红白相间的尺面为红面尺,称为辅助分划面;尺底起点不为零,与黑面相差一个常数 K ,称为零点常数。同一高度两面读数相差 K ,供红、黑面读数检核之用。直尺用于等级水准测量,两只尺组成一对,一只尺的 $K=4.687$ m,另一只尺的 $K=4.787$ m,起点读数差(零点差)恰为 ± 100 mm。

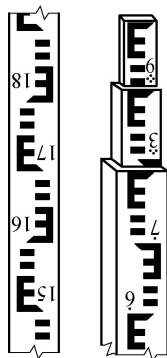


图 2-10 水准尺

塔尺一般用玻璃钢、铝合金或优质木材制成。一般由三节尺段套接而成,全长为 5 m。尺面为 5 mm 或 10 mm 分划,每 10 cm 加一个注记,超过 1 m 在注记上加红点表示米数。例如,2 上加 1 个红点表示 1.2 m,加 2 个红点表示 2.2 m,依此类推。塔尺两面起点均为零,属于单面尺。它携带方便,但尺段接头易损坏,对接易出差错,常用于精度要求不高的水准测量。

2. 尺垫

尺垫由生铁铸成,如图 2-11 所示,呈三角形,下方有 3 个尖脚,以利于稳定地放置在地面上或插入土中。尺垫上方中央有一个突出半球体,供立尺用。尺垫用于高程传递的转点上,防止水准尺下沉。

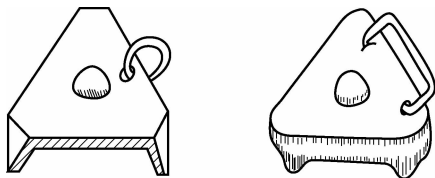


图 2-11 尺垫

2.2.4 微倾式水准仪的使用

微倾式水准仪的基本操作步骤包括水准仪的安置、粗略整平(粗平)、瞄准水准尺、精确整平(精平)、读数、扶尺和搬站。

1. 水准仪的安置

(1)目的。将仪器的脚架安置牢固。

(2)操作步骤。首先打开三脚架调节好架腿的长度,使其高度适合观测者观测,架头大致水平。若为泥土地,则应将三脚架的 3 个脚尖踩入土中,使脚架稳定。然后用连接螺旋将仪器牢固地连接在三脚架上。

2. 粗略整平

(1)目的。将仪器竖轴 VV 置于铅垂位置,使视准轴 CC 大致水平。

(2)操作步骤。整平仪器,使圆水准器的气泡居中。如图 2-12(a)所示,当气泡未居中而位于 a 处时,先按图上箭头所指的方向用两手相对转动脚螺旋①和②,使气泡移到 b 的位置,再用左手转动脚螺旋③,即可使气泡居中,如图 2-12(b)所示。在整平的过程中,气泡的移动方向与左手大拇指运动的方向一致。

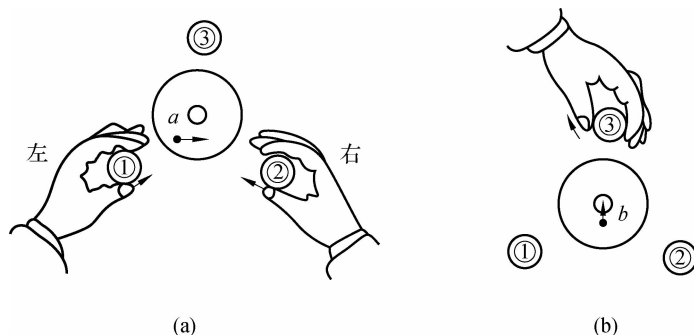


图 2-12 使圆水准器气泡居中

3. 瞄准水准尺

(1)目的。瞄准后视尺、前视尺的方向,为精平和读数创造条件。

(2)操作步骤。

①目镜对光、粗瞄。将望远镜朝向明亮背景,转动目镜对光螺旋,使十字丝影像清晰,然后松开制动螺旋,转动仪器,利用照门和准星瞄准水准尺,使水准尺进入望远镜视场,随即拧紧制动螺旋。

②物镜对光、精瞄。转动调焦螺旋,使水准尺影像清晰并落在十字丝平面上,然后转动微动螺旋,使十字丝竖丝与水准尺重合,如图 2-13 所示。

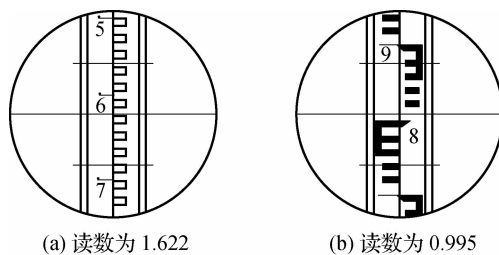


图 2-13 望远镜视场与水准尺读数

若尺的影像与十字丝影像不共面,则两者的影像将不能被同时看清。此时,如果观测者的眼睛做上下移动,就会发现目标像与十字丝之间有相对移动,这种现象称为视差,如图 2-14 所示。视差的存在会导致读数不准,必须加以消除。消除视差的方法为先转动目镜的调焦螺旋使十字丝十分清晰,然后转动物镜的调焦螺旋使目标像十分清晰,再检查视差是否存在。若视差还存在,则应重复以上的步骤,就这样反复、仔细、认真地进行目镜和物镜的对光,直到两者的影像无相对运动为止。

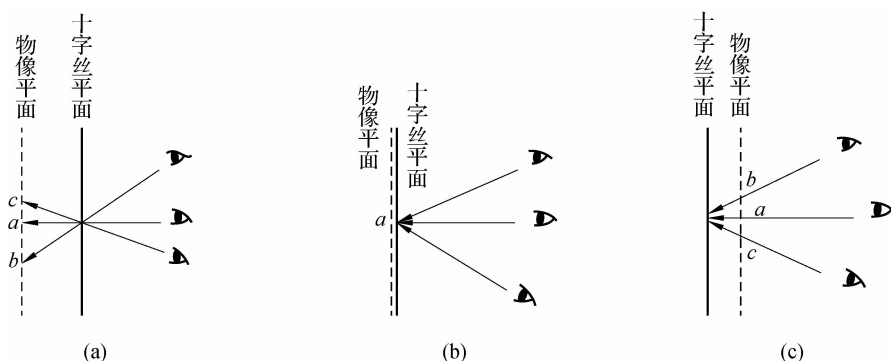


图 2-14 视差对读数的影响

4. 精确整平

(1)目的。使仪器的水准管轴和视准轴水平,即视线水平。

(2)操作步骤。通过位于望远镜左方的气泡观察窗观察水准管气泡,右手转动微倾螺旋使气泡两端的影像符合,即表示水准仪的视准轴已精确水平,如图 2-15(a)所示。图 2-15(b)、(c)所示的气泡不居中,此时,可按照图中所示的虚线箭头方向转动微倾螺旋,使气泡两端的影像符合即可。

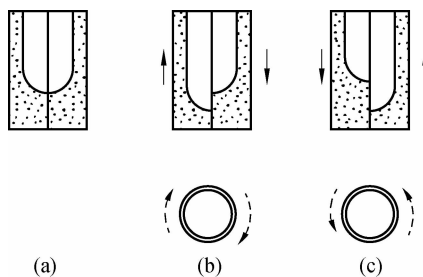


图 2-15 精确整平

5. 读数

(1)目的。在标尺竖直、气泡居中、方向正确的前提下读取中横丝截取的尺面数字。

(2)操作步骤。精平后应马上读数,速度要快,以减少气泡移动引起的读数误差。读数前应判明水准尺的注记、分划特征和零点常数,以免读错。读数时以分米注记为参照点,先读出注记的米数和分米数(如 1.6 m),再数读出厘米数(如 2 cm),最后估读不足 1 cm 的毫米数(如 2 mm),综合起来即为 4 位的全读数(如 1.622 m)。读数时,水准尺的影像无论是倒字还是正字,一律由小向大读,读足 4 位,不要漏掉 0(如 1.005 m, 1.050 m),不要误读(例如,将 6 误读为 9)。图 2-13(a)、(b)所示的标尺读数分别为 1.622 m、0.995 m。

6. 扶尺

(1)目的。将水准尺竖直地立在测站点的铅垂线上。

(2)操作步骤。当测量人扶尺时,应站在尺的后面双手握住尺,高精度水准测量时要借助尺上的气泡来保证水准尺竖直。

由于水准尺左右倾斜容易在水准仪中发现,因此可及时纠正。但是当水准仪前后倾斜

时,测量人不易发现,可能造成读数偏大。

7. 搬站

(1)目的。将仪器顺利、安全地转移到下一个测站。

(2)操作步骤。搬站时,先检查仪器中心连接螺旋是否可靠,将 3 个脚螺旋调至等高,然后收拢架腿,一手扶着基座,一手斜抱着架腿夹在腋下,安全搬站。若地形复杂,则应将仪器装箱搬站。严禁将仪器扛在肩上搬站而发生仪器损坏的事故。

2.3 水准测量的外业

2.3.1 水准点

水准点即通过水准测量测定其高程的固定点。为统一全国的高程系统和满足各种工程测量的需要,我国各级测绘部门在全国各地埋设并测定了许多高程点,这些高程点称为水准点,用 BM(bench mark)表示。水准点通常由高级水准点引测而来,不同等级的水准点有不同的埋设要求,大体可分为永久性和临时性两种。永久性水准点要求保存的时间长,须埋设在冻土线以下 0.5 m 左右的坚硬土基中,并设防护井保护。永久性水准点一般用石料或钢筋混凝土制成,上面镶嵌有不易腐蚀的金属球,如图 2-16(a)所示。

国家水准点可分为一等、二等、三等、四等 4 个等级,规范要求埋设永久性标石标记,其中,三等、四等水准点可为墙上水准点,如图 2-16(b)所示;建筑工地永久性水准点常采用混凝土或钢筋混凝土预制而成,如图 2-16(c)所示;图根水准点(施工水准点)常采用临时性标志,如木桩(桩顶钉一个半圆球状铁钉),如图 2-16(d)所示。也可用大铁钉打入地面,或在地面上凸出的硬石或房屋四周的水泥面、台阶等处用红油漆标记。水准点应选在土质坚硬、使用方便且能长期保存的地方。

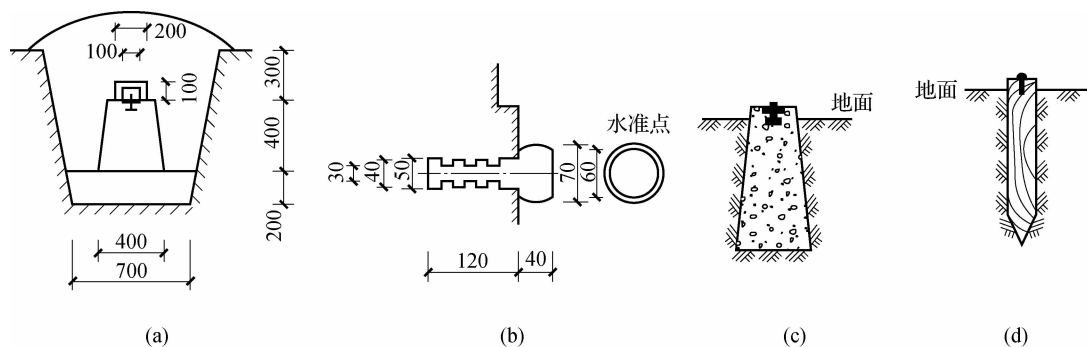


图 2-16 水准点的埋设

2.3.2 水准路线

在水准测量中,通常沿某一路线由已知高程水准点向未知高程水准点进行测量。在水准点间进行水准测量所经过的路线称为水准路线。根据测区的实际情况和需要,水准线路可布置成单一水准路线或水准网。

1. 单一水准路线

单一水准路线有以下几种类型：

1) 闭合水准路线

如图 2-17(a)所示,从某已知高程的水准点 BM_A 出发,沿各待定高程的水准点 1、2、3、4 进行水准测量,最后仍回到原出发点 BM_A 的环形路线,称为闭合水准路线。

2) 附和水准路线

如图 2-17(b)所示,从已知高程的水准点 BM_A 出发,沿待定高程的水准点 1、2、3 进行水准测量,最后附和到另一已知高程的水准点 BM_B 上所构成的水准路线,称为附和水准路线。

3) 支水准路线

如图 2-17(c)所示,从已知高程的水准点 BM_A 出发,沿待定高程的水准点 1、2 进行水准测量,这种既不闭合又不附和的水准路线,称为支水准路线。支水准路线要进行往返测量,以便检核。

2. 水准网

如图 2-17(d)所示,由多条单一水准路线相互连接构成的网状图形称为水准网。其中, BM_A 、 BM_B 为高级水准点, C 、 D 、 E 、 F 等点为结点。水准网多用于面积较大的测区。

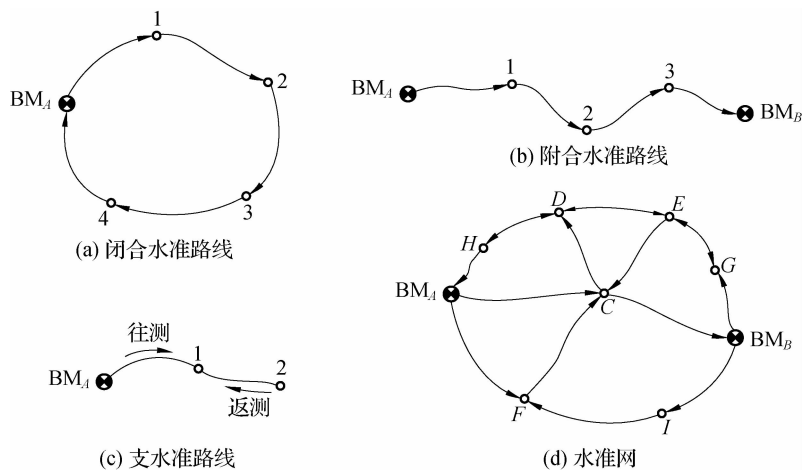


图 2-17 水准路线的布置

2.3.3 水准测量的方法

1. 测站校核

在任何一个测站上,任何一个后视读数或前视读数不正确,都会影响高差的正确性。因此,应及时校核每站高差,及时发现错误。每一测站校核的主要方法有两次仪器高法和双面尺法。

1) 两次仪器高法

在一个测站上用两次不同仪器高度(两次仪器高度之差应大于 10 cm)的水平视线来测

定相邻两点的高差,由此检查观测中是否存在错误。理论上两次测得的高差应相等,若两次所测高差之差不超过容许值(图根水准测量的容许值为 5 mm,等外水准测量的容许值为 6 mm),则取两次高差平均值作为该测站高差的最后结果。否则,说明存在错误,应重新测量。另外,也可用两台仪器同时观测两点的高差,其高差计算和精度要求与两次仪器高法相同。

2) 双面尺法

在一个测站上,不改变仪器的高度,先后两次用水准尺的黑、红面测量高差并进行比较。两次高差之差的容许值应与两次仪器高法的相同。这种方法操作简单,较常用。

2. 连续水准测量

当欲测高程点与已知水准点相距较远或高差较大时,安置一次仪器不能测得两点高差。这时需要连续多次安置仪器,也就需要在两点间设置若干个立尺点来传递高程,这些立尺点称为转点(turning point),记为 TP。转点可以起到传递高程的作用。

如图 2-18 所示,已知水准点 BM_A 的高程为 H_A ,现欲测定 B 点的高程 H_B 。对观测数据的记录与计算列于表 2-1 中。

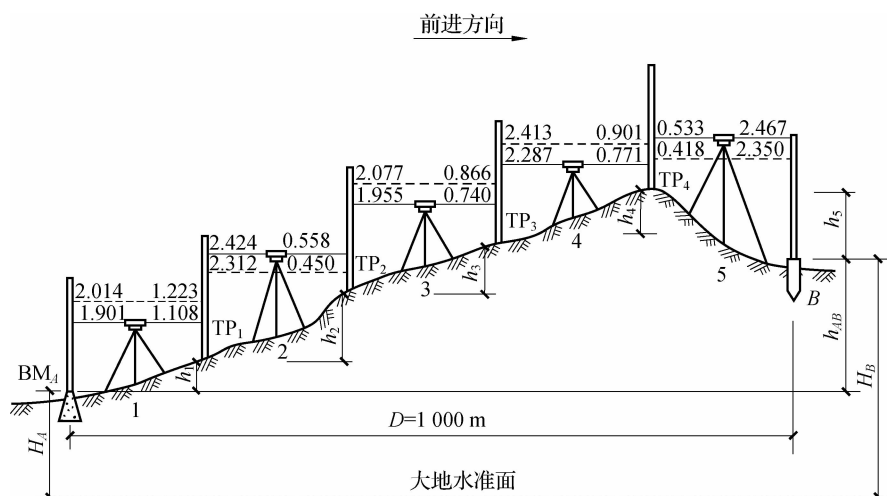


图 2-18 连续水准测量的施测

(1) 计算。每一测站都可测得前、后视两点的高差,即

$$h_1 = a_1 - b_1$$

$$h_2 = a_2 - b_2$$

⋮

$$h_5 = a_5 - b_5$$

将上述各式相加,得

$$h_{AB} = \sum h = \sum a - \sum b$$

则 B 点高程为

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + \sum h \quad (2-5)$$

(2)计算检核。为了保证记录表中数据的正确,应对后视读数总和减前视读数总和、高差总和、B点高程与A点高程之差进行检核(表格最后一行),这3个数字理论上应相等。即 $\sum a - \sum b = 9.100\text{ m} - 5.644\text{ m} = +3.456\text{ m}$, $\sum h = 5.390\text{ m} - 1.914\text{ m} = +3.456\text{ m}$, $H_B - H_A = 136.271\text{ m} - 132.815\text{ m} = +3.456\text{ m}$ 。三者相等,说明计算正确。最后,按式(2-5)计算B点的高程 $H_B = H_A + h_{AB} = H_A + \sum h = 132.815\text{ m} + 3.456\text{ m} = 136.271\text{ m}$ 。

表 2-1 水准测量计量手簿

测 站	测 点	水准尺读数/m		高差/m		高程/m	备 注
		后视读数	前视读数	+	—		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)	(7)
1	BM _A	1. 901		0. 793		132. 815	
	TP ₁		1. 108				
2	TP ₁	2. 424		1. 866			
	TP ₂		0. 558				
3	TP ₂	1. 955		1. 215			
	TP ₃		0. 740				
4	TP ₃	2. 287		1. 516			
	TP ₄		0. 771				
5	TP ₄	0. 533			1. 934		
	B		2. 467			136. 271	
计算校核	$\sum$	9. 100	5. 644	5. 390	1. 914		
	$\sum a - \sum b = + 3. 456$			$\sum h = + 3. 456$		$h_{AB} = H_B - H_A = + 3. 456$	

3. 路线校核

双面尺法或两次仪器高法只能进行每一测站的高差校核,对于整条线路来说,还不能说明它的精度符合要求。例如,对于同一个转点,在相邻两站观测时,当水准尺未放在同一个点上时,各站的高差计算都符合要求,但整条线路上却含有粗差。因此,水准测量外业结束后,应按线路形式进行水准路线校核计算。

1) 闭合水准路线的校核

如图 2-17(a)所示,对于某闭合水准路线,由已知高程的水准点 BM_A 出发,沿水准路线上的 1、2、3、4 点进行水准测量,最后回到水准点 BM_A 上,理论上各测站的高差代数和应等于零。但由于测量误差的存在,高差的代数和可能不是零,两者的差值称为高差闭合差 f_h ,即

$$f_h = \sum h \tag{2-6}$$

2) 附合水准路线的校核

如图 2-17(b)所示的附合水准路线,因为水准点 BM_A、BM_B 的高程已知,故两点之间的

高差理论值 $\sum h_{\text{理}} = H_B - H_A$ ，而水准测量测得的高差总和 $\sum h_{\text{测}}$ 可能会与高差理论值不完全相等，两者的差值也为高差闭合差 f_h ，即

$$f_h = \sum h_{\text{测}} - \sum h_{\text{理}} \quad (2-7)$$

3) 支水准路线的校核

如图 2-17(c) 所示，支水准路线既不附和到其他水准点上，也不闭合到原来的水准点上。为了进行路线检核，对支水准路线要进行往返观测，往测高差总和与返测高差总和在理论上应大小相等、符号相反，但实测值可能存在差异，往返观测的代数和即为高差闭合差 f_h 。

$$f_h = \left| \sum h_{\text{往}} \right| - \left| \sum h_{\text{返}} \right| \quad (2-8)$$

高差闭合差应在容许值 $f_{h\text{容}}$ 的范围内，即不同等级水准路线闭合差的限值应不大于《工程测量规范》(GB 50026—2007) 的规定。否则，应查明原因予以重测。

不同等级的水准测量技术指标要求不同，工程上常用的水准测量有三等、四等水准测量和等外水准测量。其中，三等、四等水准测量常作为小地区测绘大比例尺地形图和施工测量的高程基本控制。三等、四等水准测量的主要技术要求见表 2-2 和表 2-3。

表 2-2 三等、四等水准测量的主要技术要求(一)

等级	水准仪	水准尺	视线高度 /m	视线长度 /m	前后视距差 /m	前后视距累积差 /m	红、黑面读数 较差/mm
三	DS3	双面	≥ 0.3	≤ 75	≤ 3.0	≤ 6.0	≤ 2
四	DS3	双面	≥ 0.2	≤ 100	≤ 5.0	≤ 10.0	≤ 3

表 2-3 三等、四等水准测量的主要技术要求(二)

等级	红、黑面所测高差 较差/mm	观测次数		往返较差、附和或闭合路线闭合差	
		与已知点连测	附和或闭合路线	平原/mm	山区/mm
三	≤ 3	往返各一次	往返各一次	$\pm 12\sqrt{L}$	$\pm 4\sqrt{n}$
四	≤ 5	往返各一次	往一次	$\pm 20\sqrt{L}$	$\pm 6\sqrt{n}$

注： L 为水准路线的长度(km)， n 为测站数。

等外水准测量又称为图根水准测量或普通水准测量，主要用于测定图根点的高程及工程水准测量。等外水准测量的主要技术要求见表 2-4。

表 2-4 等外水准测量的主要技术要求

等级	路线长度 /km	水准仪	水准尺	视线长度 /m	观测次数		往返较差、附和或环线闭合差	
					与已知点连测	附和或环线	平原/mm	山区/mm
等外	≤ 5	DS3	单面	100	往返各一次	往一次	$\pm 40\sqrt{L}$	$\pm 12\sqrt{n}$

注： L 为水准路线的长度(km)， n 为测站数。

2.4 水准测量的内业计算

水准测量外业结束之后即可进行内业计算，计算之前要复查外业手簿，然后将数据填入

成果计算表中,进行高差闭合差、高差容许闭合差、改正数、改正后的高差、高程等的计算。水准测量内业计算的目的是调整整条水准路线的高差闭合差及计算各待测水准点的高程。因为闭合水准路线成果的计算步骤与附和水准路线相同,所以下面只介绍附和水准路线和支水准路线的内业计算步骤。

1. 附和水准路线的内业计算

图 2-19 中的数据是根据等外水准测量外业测量手簿整理得来的, BM_A 、 BM_B 为已知水准点,1、2、3 为待定高程的水准点, h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 为各测段的观测高差, n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 为各测段的测站数, L_1 、 L_2 、 L_3 和 L_4 为各测段的长度。已知 $H_A=65.376\text{ m}$, $H_B=68.623\text{ m}$, 各测段的测站数、长度及观测高差均注于图 2-19 中。

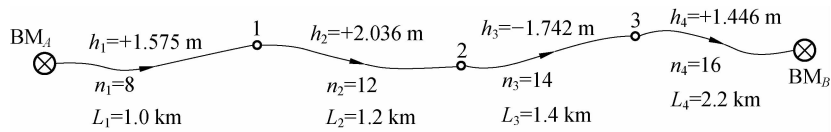


图 2-19 附和水准路线的内业计算

下面分述其计算步骤。

(1)将观测数据和已知数据填入表 2-5。

表 2-5 附和水准路线的成果计算

点 号	距离/km	测站数	实测高差/m	改正数/mm	改正后高差/m	高程/m	点 号
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
BM_A	1.0	8	+1.575	-12	+1.563	65.376	BM_A
1						66.939	1
2	1.2	12	+2.036	-14	+2.022	68.961	2
	1.4	14	-1.742	-16	-1.758	67.203	3
BM_B	2.2	16	+1.446	-26	+1.420	68.623	BM_B
$\sum$	5.8	50	+3.315	-68	+3.247	+3.247	
辅助计算	$ f_h < f_{h容} $						

(2)计算高差闭合差。

$$f_h = \sum h_{测} - (H_B - H_A) = 0.068\text{ m} = 68\text{ mm}$$

(3)计算高差闭合差容许值。水准路线的高差闭合差容许值可按表 2-4 计算(设为平原),即 $f_{h容} = \pm 40 \sqrt{L} = \pm 40 \times \sqrt{5.8\text{ km}} = \pm 96\text{ mm}$ 。此时 $|f_h| = 68\text{ mm} < |f_{h容}| = 96\text{ mm}$, 说明成果符合精度要求,可进行闭合差调整。

(4)高差闭合差的调整。在一条水准路线上,假设观测条件是相同的,则各测站产生误差的机会是相等的。故高差闭合差的调整按与测站数(或距离)成正比例、反符号平均分配的原则进行,即

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum n} n_i \text{ 或 } v_i = -\frac{f_h}{\sum L} L_i \quad (2-9)$$

式中, $\sum n$ 为总测站数; n_i 为第 i 测段测站数; $\sum L$ 为路线总长(km); L_i 为第 i 测段路线长(km)。

在本例中, 路线总长 $\sum L = 5.8 \text{ km}$, 故各测段的改正数分别为

$$v_1 = -\frac{f_h}{\sum L} L_1 = -\frac{68 \text{ mm}}{5.8 \text{ km}} \times 1.0 \text{ km} = -12 \text{ mm}$$

$$v_2 = -\frac{f_h}{\sum L} L_2 = -\frac{68 \text{ mm}}{5.8 \text{ km}} \times 1.2 \text{ km} = -14 \text{ mm}$$

$$v_3 = -\frac{f_h}{\sum L} L_3 = -\frac{68 \text{ mm}}{5.8 \text{ km}} \times 1.4 \text{ km} = -16 \text{ mm}$$

$$v_4 = -\frac{f_h}{\sum L} L_4 = -\frac{68 \text{ mm}}{5.8 \text{ km}} \times 2.2 \text{ km} = -26 \text{ mm}$$

将各测段高差改正数填入表 2-5 的第(5)栏内。

注意

改正数总和应与高差闭合差的绝对值相等, 符号相反。

(5) 计算改正后的高差。各测段改正后的高差等于各测段的观测高差加上相应的改正数, 即

$$\bar{h}_i = h_i + v_i \quad (2-10)$$

式中, $\bar{h}_i$ 为第 i 段的改正后高差(m)。

在本例中, 各测段改正后的高差分别为

$$\bar{h}_1 = h_1 + v_1 = +1.575 \text{ m} + (-0.012 \text{ m}) = +1.563 \text{ m}$$

$$\bar{h}_2 = h_2 + v_2 = +2.036 \text{ m} + (-0.014 \text{ m}) = +2.022 \text{ m}$$

$$\bar{h}_3 = h_3 + v_3 = -1.742 \text{ m} + (-0.016 \text{ m}) = -1.758 \text{ m}$$

$$\bar{h}_4 = h_4 + v_4 = +1.446 \text{ m} + (-0.026 \text{ m}) = +1.420 \text{ m}$$

计算检核公式为

$$\sum \bar{h}_i = H_B - H_A \quad (2-11)$$

将各测段改正后的高差填入表 2-5 的第(6)栏内。

(6) 计算待定点的高程。由 BM_A 点的已知高程开始, 根据改正后的高差, 逐点推算 1、2、3 点的高程。算出 3 点的高程后, 应推算至 BM_B 点, 其推算高程应等于 BM_B 点的已知高程。若不等, 则说明计算有误。

2. 支线水准路线的内业计算

根据式(2-8), 若高差闭合差在容许范围内, 则成果可用, 否则应予以重测。若符合要求, 则取往、返高差绝对值的平均值作为两点间的高差, 符号与往测方向高差的符号一致。其他的计算同附和合水准路线。

2.5 水准仪的检验和校正

2.5.1 水准仪的主要轴线及其应满足的条件

如图 2-20 所示,水准仪的主要轴线有视准轴 CC 、圆水准器轴 $L'L'$ 、水准管轴 LL 、竖轴 VV 。水准仪要正常工作,需要提供一条水平视线,其相应轴线间必须满足以下几何条件:

(1)圆水准器轴应平行于竖轴,即 $L'L' // VV$ 。

(2)十字丝横丝应垂直于竖轴。

(3)水准管轴应平行于视准轴,即 $LL // CC$ 。

虽然仪器在出厂前经过严格检验,各项几何条件均满足要求,但在搬运、长期使用、振动等因素的影响下,其几何条件可能会发生变化。为此,在使用仪器进行测量之前应对上述条件进行必要的检验和校正。

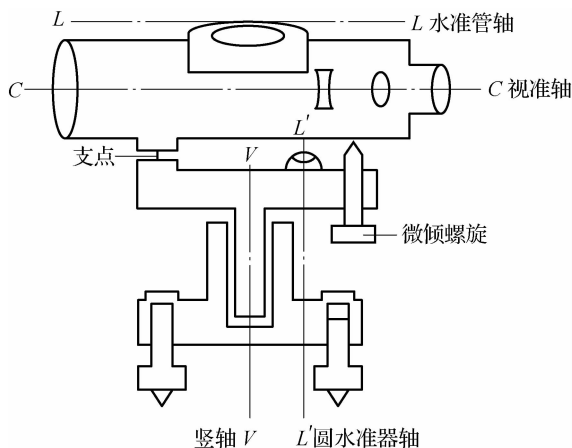


图 2-20 水准仪的主要轴线

2.5.2 圆水准器轴平行于竖轴的检验和校正

1. 检验

(1)目的。满足条件 $L'L' // VV$ 。当圆水准器气泡居中时, VV 基本铅垂,视准轴处于粗平。

(2)方法。安置仪器后,旋转脚螺旋使圆水准器气泡居中,如图 2-21(a)所示;然后将仪器绕竖轴旋转 180° ,若气泡偏于一边,如图 2-21(b)所示,则说明不满足条件,需要校正。

2. 校正

旋转脚螺旋使气泡向中心移动偏距的一半,如图 2-21(c)所示,然后用校正针拨圆水准器底下的 3 个校正螺丝(见图 2-22),使气泡居中,如图 2-21(d)所示。在圆水准器底部除了有 3 个校正螺丝以外,中间还有一个固紧螺丝(见图 2-22),在拨动各个校正螺丝以前,应先稍松一下固紧螺丝,这样,拨校正螺丝时气泡才能移动,校正完毕后勿忘将固紧螺丝收紧。

检验和校正应反复进行,直到仪器转到任何方向气泡都居中为止。

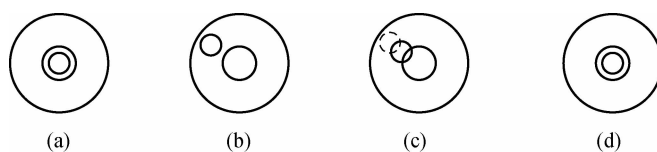


图 2-21 圆水准器轴平行于竖轴的检校

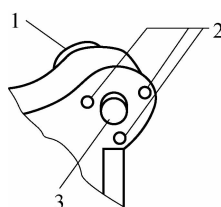


图 2-22 圆水准器的校正螺丝和固紧螺丝

1—圆水准器；2—校正螺丝；3—固紧螺丝

3. 原理

仪器粗平, 气泡居中后, $L'L'$ 处于铅垂, VV 相对于铅垂线倾斜 α 角, 如图 2-23(a) 所示。当望远镜绕 VV 旋转 180° 时, $L'L'$ 为了保持与 VV 的交角 α 也绕 VV 旋转。这样, $L'L'$ 将相对于铅垂线倾斜 2α 角, 如图 2-23(b) 所示。校正时, 用脚螺旋使气泡退回偏离值的一半, 此时 VV 处于铅垂, 消除一个 α 角, 但 $L'L'$ 仍然偏离 α 角, 气泡不居中, 如图 2-23(c) 所示。此时, 拨校正螺丝使水准气泡居中, 则 $L'L'$ 也处于铅垂位置, 再消除一个 α 角, 这样 $L'L' // VV$ 的目的就达到了, 如图 2-23(d) 所示。

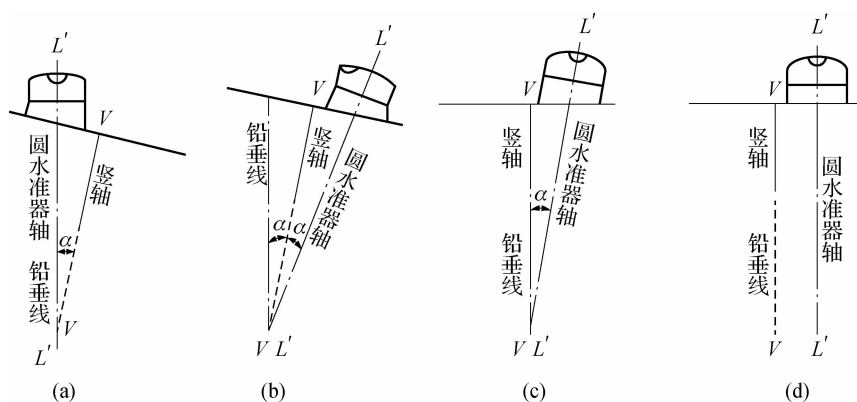


图 2-23 圆水准器轴平行于竖轴的检校原理

2.5.3 十字丝横丝垂直于仪器竖轴的检验和校正

1. 检验

(1) 目的。满足十字丝横丝垂直于 VV 的条件。当 VV 铅垂时, 横丝处于水平, 用横丝的任何位置读数均相同。

(2)方法。整平仪器后,用十字丝的一端瞄准远处一点状目标 P ,如图 2-24(a)所示,拧紧制动螺旋,转动微动螺旋,从望远镜中观察 P 点。若 P 点始终在横丝上移动,如图 2-24(b)所示,则表示横丝已水平;若 P 点离开横丝,如图 2-24(c)所示,则表示横丝不水平,需要校正。

2. 校正

用螺丝刀松开物镜镜筒上目镜筒的固定螺钉,如图 2-24(d)所示(有的仪器有十字丝座护罩,应先旋下),转动目镜筒(十字丝座连同一起转动),使横丝向 P 点移动偏离值的一半,再进行检验。若 P 点始终在横丝上移动,则表示横丝已水平。最后拧紧固定螺钉(旋上护罩)。

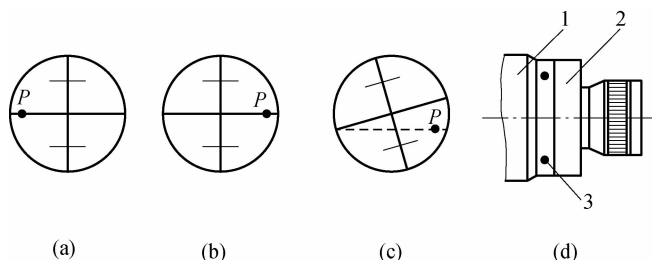


图 2-24 十字丝横丝垂直于竖轴的检验和校正

1—物镜筒; 2—目镜筒; 3—目镜筒的固定螺钉

2.5.4 水准管轴平行于视准轴的检验和校正

1. 检验

(1)目的。满足 $LL \parallel CC$, 当水准管气泡居中时, CC 处于精确水平位置。

(2)方法。如图 2-25 所示, 设水准管轴不平行于视准轴, 它们之间形成一个 i 角。当水准管气泡居中时, 视准轴将倾斜 i 角, 则水准尺至水准仪距离越远, 由此引起的读数误差越大。当仪器的前视距离与后视距离相等时, 根据后视读数减前视读数求得的高差不受影响, 可得 $h = (a_1 - x) - (b_1 - x) = a_1 - b_1$ 。式中, a_1 、 b_1 分别为水准仪居中时水准尺上的读数; x 为曲率对高差产生的影响。

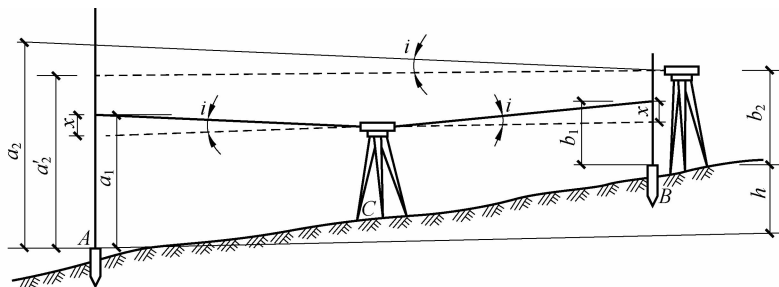


图 2-25 水准管轴平行于视准轴的检校

为了检验水准管轴是否平行于视准轴, 需在平坦地面上选大致在一条直线上的 A 、 B 、 C 三点, 并使 $AC=BC$ ($AB \approx 80$ m), 在 A 、 B 点打下木桩或放尺垫。在 C 点支水准仪测 A 、 B

两点的高差 h 。接着将仪器搬到靠近 B 点(或 A 点),使望远镜目镜距水准尺尺面 $3\sim 5\text{ cm}$ 。整平仪器后,从物镜中观察,按目镜的中心位置直接在水准尺上用笔尖定出读数 b_2 ,瞄准 A 点水准尺,转动微倾螺旋,使水准管气泡居中,得到读数 a_2 ,则 $h' = a_2 - b_2$ 。如果 $h' = h$,说明 $CC // LL$ 。否则,说明两轴不平行。当 $i \geq 20''$ 时,需要校正。

$$i = \frac{\Delta}{D} \rho \quad (2-12)$$

式中, Δ 为在仪器的中点和端点所测高差之差(m); D 为 A 、 B 两点之间的距离(m)。

2. 校正

先计算出视准轴水平时在 A 尺上的正确读数 a'_2 ,即 $a'_2 = b_2 + h$ 。为了使 $LL // CC$,一般通过校正水准管来改变水准管轴的位置,也可以通过校正十字丝来改变视准轴的位置。

1) 校正水准管

转动微倾螺旋,使横丝在 A 尺上的读数从 a_2 变为 a'_2 ,这时视准轴达到水平,但水准管气泡仍不居中,可用校正针拨动水准管的上、下两个校正螺丝(见图 2-26),使气泡居中。

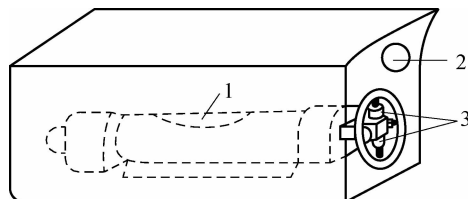


图 2-26 水准管的检校

1—水准管气泡; 2—观察窗; 3—校正螺丝

2) 校正十字丝

自动安平水准仪没有水准管,所以要采用校正十字丝法。其操作方法是:先卸下目镜处的外罩,用校正针拨动十字丝的上、下两个校正螺丝,使横丝对准 A 尺上的正确读数 a'_2 即可。这时要保持水准管气泡居中。校正后的仪器必须进行高差检测,将测得的高差值与正确的高差值进行比较,直至 $i \leq 20''$ 。

2.6 水准测量的误差及注意事项

由于测量仪器制造的不完善,即使经检验校正后也不能完全满足理想的几何条件;加之观测人员感官的局限和外界环境因素的影响,也使观测数据不可避免地存在误差。因此,为了保证应有的观测精度,测量工作者应对测量误差产生的原因、性质及处理措施有所了解,以便将误差控制在最低程度上。

测量误差主要来源于仪器误差、观测误差和外界条件的影响。水准测量也不例外。

2.6.1 仪器误差

1. 水准尺误差

水准尺误差包括尺长误差、分划误差和零点误差,它直接影响读数和高差的精度。经检定不符合尺长误差、分划误差规定要求的水准尺应禁止使用。对于尺长误差较大的尺,在用于精度要求较高的水准测量时,应对读数进行尺长误差改正。零点误差是尺底不同程度磨损造成的,若水准尺前、后视交替使用,则相邻两站高差的影响值大小相等、符号相反。因此,成对使用的水准尺可以通过在测段内设偶数站来消除零点误差。

2. 仪器校正后的残余误差

仪器虽经过校正但仍然会残存水准管轴与视准轴不平行的误差。这种误差与距离成正比,只要在观测时注意使前、后视距相等,便可消除或减弱此项误差。

3. 望远镜调焦镜运行的误差

物镜对光时,调焦镜应严格沿光轴前后移动。由于仪器受到振动或仪器陈旧等,调焦镜不能沿光轴运动,造成目标影像偏移,导致不能正常读数。这项误差随调焦镜位置的不同而变化,根据同距离等影响的原则,采用中间法前后视仅做一次对光,可削弱或消除此项误差。

2.6.2 观测误差

1. 水准管气泡居中的误差

水准管气泡居中的误差与水准管的分划值 τ 有关,一般为 $\pm 0.15\tau$,并与视线长度 D 成正比。当采用符合式水准器时,居中精度可提高一倍。水准管气泡居中的误差 m_τ 为

$$m_\tau = \pm \frac{0.15\tau}{2\rho} D \quad (2-13)$$

减少水准管气泡居中误差的方法是每次读数前认真检查气泡的位置,使气泡严格居中。

2. 读数误差

在水准尺上估读毫米数的误差与人眼的分辨能力、望远镜的放大倍率及视线长度有关。读数误差 m_V 可用式(2-14)计算。

$$m_V = \pm \frac{60''}{V\rho} D \quad (2-14)$$

式中, V 为望远镜的放大倍率; $60''$ 为人眼的极限分辨能力。

3. 视差影响的误差

当存在视差时,十字丝平面与水准尺影像不重合,若眼睛观察的位置不同,就会读出不同的读数,因而也会产生读数误差。视差误差可通过仔细调焦来削弱或消除。

4. 水准尺倾斜的误差

水准尺左右倾斜,在望远镜中容易发现,可及时纠正。若沿视线方向前后倾斜 δ 角,会导致读数偏大 m_δ 。如图 2-27 所示,若读数为 b' ,而应读数为 b ,则 $m_\delta = b' - b = b'(1 - \cos \delta)$ 。在山坡地测量时尤其要注意此项误差的影响。

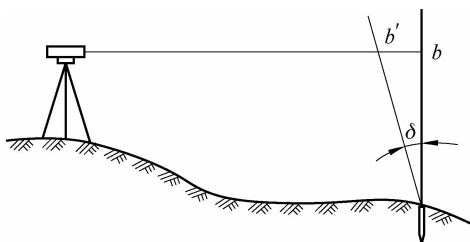


图 2-27 水准尺倾斜的误差

由上述可知,观测误差对测量成果影响较大,而且是不可避免的偶然误差。因此,观测者应按操作规程认真操作,快速观测,准确读数,借助标尺的水准器立直标尺,尽量减小观测误差的影响。

2.6.3 外界条件的影响

1. 仪器下沉的影响

仪器下沉,会使视线降低,从而引起高差误差。因此,安置仪器时应踩稳脚架,并采用合适的观测次序(后—前—前—后)。

2. 尺垫下沉的影响

转点发生下沉,将使下一站的后视读数增大,这将引起高差误差。因此,在观测的过程中要注意把尺垫踩实,尤其不能移位;采用往返观测的方法,取测量结果的中数,可以减弱尺垫下沉的影响。

3. 地球曲率及大气折光的影响

如图 2-28 所示,过仪器高度点 a 的水准面在水准尺上的读数为 b' 。水准测量时,过 a 点的水平视线在标尺上的读数为 b'' 而不是 b' , $b'b''$ 即为地球曲率对读数的影响,称为地球曲率差,用 c 表示。

$$c = \frac{D^2}{2R} \quad (2-15)$$

式中, D 为仪器到水准尺的距离(m); R 为地球的平均半径, $R=6\,371\text{ km}$ 。

实际上由于大气折光后的视线并非是水平的,而是一条曲线,使得水平视线在标尺上的实际读数为 b 而不是 b'' (见图 2-28),两者之差称为大气折光差,用 r 表示。曲线的曲率半径为地球半径的 7 倍,其折光量的大小对水准尺读数产生的误差为

$$r = \frac{D^2}{2 \times 7R} \quad (2-16)$$

折光与地球曲率的共同影响产生的误差 f 为

$$f = c - r = \frac{D^2}{2R} - \frac{D^2}{2 \times 7R} = 0.43 \frac{D^2}{R} \quad (2-17)$$

若使前、后视距离 D 相等,则由式(2-17)计算的 f 值相等,此时地球曲率和大气折光的影响将得到消除或大大减弱。

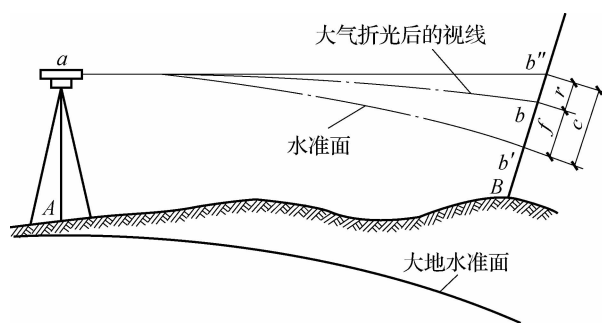


图 2-28 地球曲率及大气折光对读数的影响

4. 大气温度和风力的影响

温度不规则变化、较大的风力都会引起大气折光变化,致使标尺影像跳动,难以读数。温度变化会引起仪器几何条件变化,烈日直射仪器会影响水准管气泡居中等,导致测量误差产生。因此,水准测量时应选择有利的观测时间,在观测时应撑伞遮阳,避免仪器日晒雨淋。

2.6.4 水准测量的注意事项

通过上述水准测量的误差分析,要想获得可靠的测量成果,在观测过程中应注意以下几点:

- (1) 测量前检校好仪器。
- (2) 测站和转点应选在坚实的地面上,并尽可能使前、后视距相等。
- (3) 视线长度不宜过长,一般控制在 100 m 以内,视线高不小于 0.3 m。
- (4) 瞄准时要仔细对光,注意消除视差。
- (5) 读数前应严格使水准管气泡居中,读数后及时检查气泡的位置。
- (6) 读数时应认真仔细,做到准确无误。
- (7) 标尺要立直,尤其是在倾斜地面上时。
- (8) 仪器搬站前,后视尺垫不能被移动;仪器搬站时,前视尺垫不能被移动。
- (9) 观测时应选择良好的观测时期。当气温变化大、折光强、风力大时不宜观测,在阳光或细雨下测量时应撑伞。

2.7 精密水准仪与精密水准尺

对于国家一、二等水准测量及高精度的工程测量,如建筑物的变形观测、精密设备安装测量工作等,普通水准仪的精度已不能满足要求,需要精密水准仪和精密水准尺配套使用。DS05、DS1 型水准仪属于精密水准仪,精密水准尺主要是钢瓦尺。精密水准仪具有特殊的构造,可以大大提高观测精度。图 2-29 所示为我国生产的 DS1 型精密水准仪的构造。

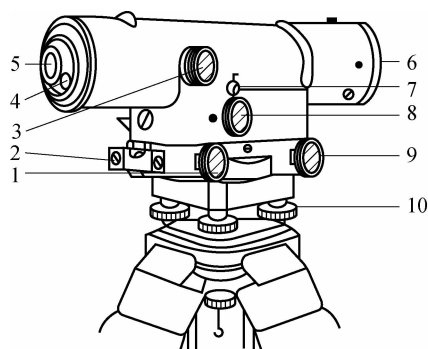


图 2-29 DS1 型精密水准仪的构造

1—微倾螺旋；2—粗平水准管；3—物镜调焦螺旋；4—读数显微镜；5—目镜；
6—物镜；7—测微器进光窗；8—测微螺旋；9—微动螺旋；10—脚螺旋

2.7.1 精密水准仪的构造特点

精密水准仪的构造与 DS3 型水准仪的构造基本相同，主要区别有以下几点：

(1) 为了提高安平精度，水准管采用符合式水准器，且 $\tau = (8'' \sim 10'')/2 \text{ mm}$ ，大大提高了灵敏度。望远镜和水准器均套装在隔热壳罩内，结构坚固， $LL // CC$ 稳定，受外界影响小。

(2) 为了提高读数精度，可配有平行玻璃板测微装置，可测量微小读数 ($0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$)。图 2-30 所示为 DS1 型水准仪光学测微装置的构造。在望远镜前装有一块平行玻璃板，转动测微螺旋，齿轮带动齿条推动传导杆使平行玻璃板以视准轴水平垂直线为旋转轴前后倾斜，固定在齿条上方的测微分划尺也随之移动。标尺影像的光线通过倾斜的平行玻璃板后，在垂直面上移动一个量，该移动量的大小可由测微分划尺量测，并显示在测微读数视场中。测微分划尺全长有 100 个分划，标尺影像移动 5 mm 或 10 mm，测微分划尺移动全长 100 个分划，恰好测微螺旋转动一周。因此，测微分划尺的分划值为 0.05 mm 或 0.1 mm，测微周值为 5 mm 或 10 mm。

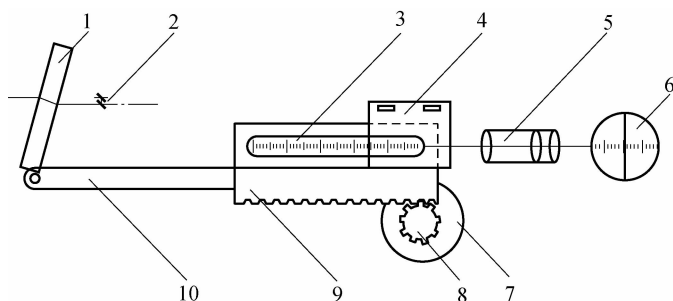


图 2-30 DS1 型水准仪光学测微装置的构造

1—平行玻璃板；2—平行移动量；3—测微分划尺；4—测微读数指标；5—读数显微镜；
6—测微读数视场；7—测微螺旋；8—齿轮；9—齿条；10—传导杆

2.7.2 精密水准尺

精密水准尺又称钢瓦水准尺，与精密水准仪配套使用。这种尺是在优质的木质标尺中

间的尺槽内安装一个厚度为 1 mm、宽度为 30 mm、长度为 3 m 的钢钢合金尺带,将尺带底端固定,上端用弹簧绷紧。尺带上刻有间隔为 5 mm 或 10 mm 的左右两排相互错置的分划,左边为基本分划,右边为辅助分划,分米或厘米注记刻在木尺上。两种分划相差常数 K ,称为基辅差,供读数检核用。有的尺无辅助分划,基本分划按左右分奇偶排列,以便于读数。图 2-31 所示为两种精密水准尺,图 2-31(a)所示精密水准尺的分划值为 10 mm,图 2-31(b)所示精密水准尺的分划值为 5 mm。

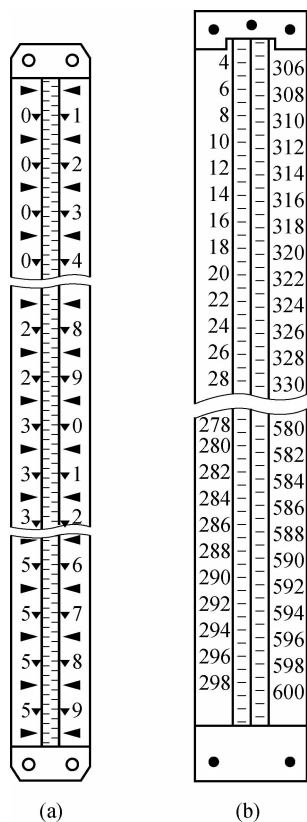


图 2-31 两种精密水准尺

2.8 电子水准仪

电子水准仪的光学系统采用了自动安平水准仪的基本形式,是一种集电子、光学、图像处理 and 计算机技术为一体的自动化智能水准仪。如图 2-32(a)所示,在仪器的中央处理器(数据处理系统)中建立了一个对单平面上所形成的图像信息自动编码程序,通过望远镜中的光电二极管阵列(相机)摄取水准尺(条码尺)上的图像信息,传输给数据处理系统,数据处理系统自动地进行编码、释疑、对比、数字化等一系列的数据处理,而后转换成水准尺读数和视距或其他所需要的数据,并自动记录储存在记录器中或显示在显示器上。

2.8.1 电子水准仪的读数方法

目前,电子水准仪采用的读数方法有几何法、相关法和相位法。

1. 几何法

标尺采用双相位码,标尺上每 2 cm 为一个测量间距,其中的码条构成码词,每个测量间距的边界由过渡码条构成,其下边界到标尺底部的高度可由该测量间距中的码条判读出来。进行水准测量时,一般只利用标尺上的中丝的上下边各 15 cm 尺截距,即 15 个测量间距来计算视距和视线高。采用几何法读数的水准仪有 Zeiss Dini 系列电子水准仪。

2. 相关法

将标尺上与常规标尺相对应的伪随机码事先储存在仪器中作为参考信号(条码本源信息),测量时将望远镜摄取到的标尺某段伪随机码(条码影像)转换成测量信号后与仪器内的参考信号进行比较,形成相关过程。按相关方法将电子耦合与本源信息相比较,若两信号相同,即得到最佳相关位置,经数据处理后读数就可确定。比较十字丝中丝位置周围的测量信号,得到视线高;比较上、下丝的测量信号及条码影像的比例,得到视距。采用相关法读数的水准仪有 Leica NA 系列电子水准仪。

3. 相位法

尺面上刻有 3 种独立相互嵌套在一起的码条,3 种独立码条形成一组参考码 R 和两组信息码 A、B。R 码为三道 2 mm 宽的黑色码条,以中间码条的中线为准,全尺等距分布(一般间隔为 3 cm)。A、B 码分别位于 R 码上、下方 10 mm 处,宽度为 0~10 mm,按正弦规律变化,A 码的周期为 600 mm,B 码的周期为 570 mm,这样就在标尺长度方向上形成了明暗强度按正弦规律周期变化的亮度波。将 R、A、B 码与仪器内部条码本源信息进行相关比较确定读数。采用相位法读数的水准仪有 Topcon DL 系列电子水准仪。

进行水准测量时,光电二极管阵列摄取的数码水准尺条码信息(图像)通过分光器被分为两组,一组转射到 CCD 探测器上,并传输给微处理器进行数据处理,得到视距和视线高;另一组成像呈现于十字丝分划板上,便于目镜观测,如图 2-32(b)所示。

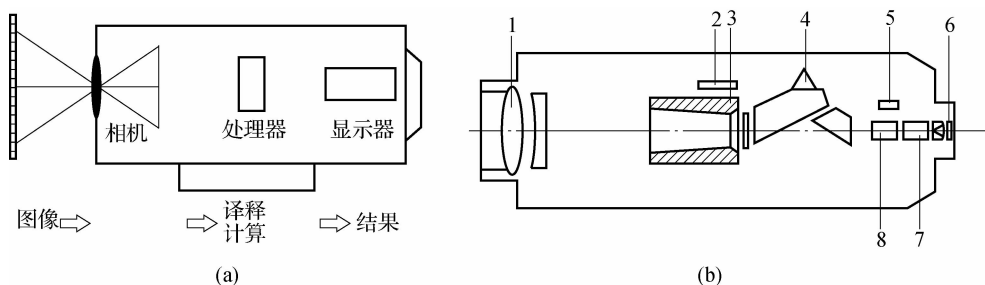


图 2-32 电子水准仪测量与读数原理

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

利用电子水准仪不仅可以进行普通水准仪所能进行的测量,还可以进行高程连续计算、多次测量平均值测量、水平角测量、距离测量、坐标增量测量、断面计算、水准路线和水

准网测量闭合差的调整(平差)以及测量数据的自动记录、传输等。尤其是其自动连续测量的功能对大型建筑物的变形(瞬时变化值)观测,相当便利且准确,具有其独特之处,是普通水准仪无法比拟的。表 2-6 为瑞士 Leica NA3000 型电子水准仪的主要技术参数(电子读数)。

表 2-6 瑞士 Leica NA3000 型电子水准仪的主要技术参数(电子读数)

主要技术参数	数 值
每千米往返测量中误差/mm	± 0.4
测距精度/mm	± 5
测角精度/ $^{\circ}$	0.1
最小视距/m	2.0
最大测程/m	120
高差最小显示值/mm	0.01
视场角/ $^{\circ}$	2
安平补偿精度/ $''$	± 0.4
外业作业温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-20\sim+50$

2.8.2 电子水准仪的操作步骤

电子水准仪的操作步骤分为粗平、照准、读数三步。现以 NA3000 型为例介绍电子水准仪的操作步骤。

1. 粗平

同普通水准仪一样,粗平时转动脚螺旋使圆水准器的气泡居中即可。气泡居中的情况可在圆水准器观察窗中看到。然后打开仪器电源开关(开机),仪器开始进行自检。当仪器自检合格后显示器显示程序清单,此时即可进行测量工作。

2. 照准

先转动目镜调焦螺旋,看清十字丝;照准标尺,转动物镜调焦螺旋,消除视差,看清目标。然后按相应键选择测量模式和测量程序,如仅测量不记录、测量并记录测量数据等。例如,按 PROG 键调出程序清单;按 DSP $\uparrow$ 键或 DSP $\downarrow$ 键选择相应的测量程序,按 RUN 键予以确认。仅测量水准尺的读数和距离的程序为“P MEAS ONLY”,开始进行水准测量的程序为“P START LEVELING”,水准线路连续高程测量和输入起始点高程的程序为“P CONT LEVELING”,视准轴误差检查的程序为“P CHECK&ADJUST”,删除记录器中数据记录的程序为“P ERASE DATA”。最后用十字丝的竖丝照准条码尺中央,并制动望远镜。

3. 读数

轻按一下测量按钮(红色),显示器将显示水准尺读数;按测距键即可得到仪器至水准尺的距离。在“测量并记录”模式下,仪器将自动记录测量数据。在高程测量的过程中,当后视观测完毕时,仪器会自动显示提示符“FORE=”提醒观测员观测前视;当前视观测完毕时,仪器又会自动显示提示符“BACK=”提醒进行下一测站后视的观测;如此连续进行直至观测到终点。仪器显示的待定点的高程是按前一站转点的高程推算的。一站观测完毕后,按 IN/SO 键结束测量工作,关机、搬站。

2.8.3 电子水准仪使用的注意事项

电子水准仪是自动化程度较高的电子测量仪器,属于高精度精密仪器,使用时除应注意普通水准仪的注意事项外,还应注意以下几点:

(1)避免在强阳光下进行测量,以防损伤眼睛和因光线折射导致条码尺图像不清晰而产生错误;必要时,可采用给仪器和条码尺撑伞遮阳的方法。

(2)照准时,尽量照准条码尺的中部,避免照准条码尺的底部和顶部,以防仪器识别读数产生误差。

(3)一般来讲,物体在条码尺上的阴影不影响读数,但是当阴影形成与水准尺条码图形相似的图像化投影时,仪器将接收到错误的编码信息,此时不能进行测量。

(4)使用条码尺时要防摔、防撞,保管时要保持清洁、干燥,以防变形和影响测量成果精度。有的条码尺可导电,故应严防其与带电电线(缆)接触,以免危及人身安全。

(5)在使用电子水准仪和条码尺之前,必须认真阅读相关规定。

思考练习题

1. 画图示意水准测量的原理。
2. 水准测量时为什么要用中间法?
3. 什么是视差? 如何检查? 如何消除视差?
4. 水准测量的测站校核是否可代替路线校核? 为什么?
5. 水准仪有哪些轴线? 它们之间应满足哪些条件?
6. 在实际工程测量中,造成误差的因素有哪些? 在工程测量中应当如何削弱或消除误差?
7. 已知后视点 A 的高程为 17.318 m,读得其水准尺的读数为 4.212 m,在前视点 B 尺上的读数为 1.412 m,问高差 h_{AB} 是多少? B 点比 A 点高,还是比 A 点低? B 点的高程是多少? 试绘图说明。
8. 为了测得图根控制点 A、B 的高程,由四等水准点 BM_1 (高程为 34.345 m)以附和路线测量至另一个四等水准点 BM_5 (高程为 21.141 m),观测数据及部分成果如图 2-33 所示。试列表(按表 2-1 的格式)进行记录,并计算下列问题:
 - (1)将第一段观测数据填入记录手簿,求出该段高差 h_1 。
 - (2)根据观测成果算出 A、B 点的高程(列表计算)。
9. 图 2-34 为一闭合水准路线等外水准测量示意图,水准点 BM_2 的高程为 33.723 m,1、2、3、4 点为待测高程点,各测段高差及测站数均标注在图中,试计算各待测点的高程。
10. 已知 A、B 两个水准点的高程分别为 $H_A = 63.198$ m, $H_B = 63.186$ m。水准仪安置在 A 点附近,测得 A 尺上的读数 $a = 1.966$ m, B 尺上的读数 $b = 1.892$ m。问这架仪器的水准管轴是否平行于视

准轴? 若不平行, 当水准管的气泡居中时, 视准轴是向上倾斜, 还是向下倾斜? 如何校正?

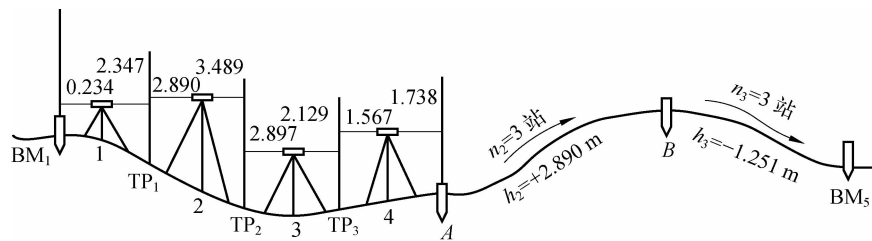


图 2-33 题 8 图

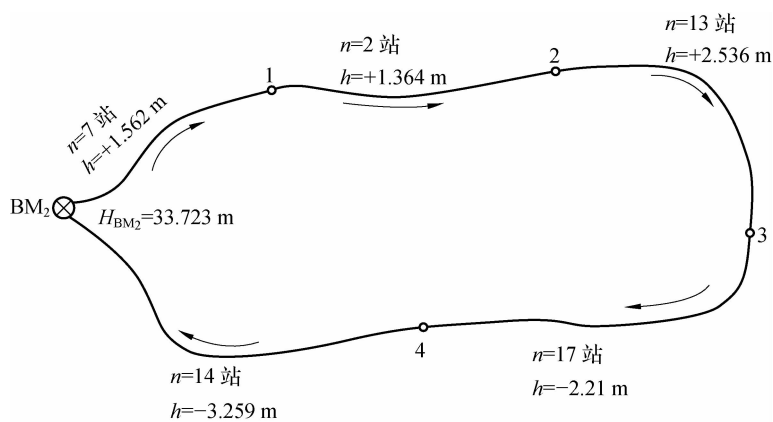


图 2-34 题 9 图

角 度 测 量

知识目标

- 掌握光学经纬仪角度测量的基本原理及 DJ6 型光学经纬仪的构造和使用方法。
- 掌握对中整平、测回法测单角和方向观测法测多水平角的方法及成果整理。
- 掌握测竖直角的方法及成果整理。
- 掌握水平角测量的误差来源及消减方法。
- 了解光学经纬仪检验校正的内容及方法。
- 掌握中丝法观测竖直角的方法及成果整理。
- 掌握经纬仪的安置及误差的消减方法。

角度是测量工作的基本观测量,而角度测量是测量工作的基本内容,它包括水平角测量和竖直角测量。角度测量的仪器为经纬仪。

3.1 角度测量的基本原理

3.1.1 水平角的测量原理

地面上一点与两个目标点连接的两条空间方向线垂直投影在水平面上所形成的夹角,或过空间两条相交方向线的竖直面所夹的两面角,称为水平角,通常用 β 表示。如图 3-1 所示, $A、O、B$ 为地面上的 3 个点,过 $OA、OB$ 直线的竖直面 $V_1、V_2$ 与水平面 H 的交线 $O'A'、O'B'$ 所夹的角 $\angle A'O'B'$ 就是 OA 与 OB 之间的水平角。

为了测量水平角,设想在过 O 点的铅垂线上水平地安置一个刻度盘(水平度盘),使刻度盘的刻画中心(度盘中心) o 与 O 在同一条铅垂线上。竖直面 $V_1、V_2$ 与水平度盘有交线 $oA''、oB''$,通过 oA'' 和 oB'' 可在水平度盘获得读数 $a、b$ (方向观测值,简称方向值),水平度盘一般是顺时针刻画和注记的,则所测得的水平角为

$$\beta = b - a \quad (3-1)$$

由式(3-1)可知,水平角值为两个方向值之差。水平角的取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,且无负值。

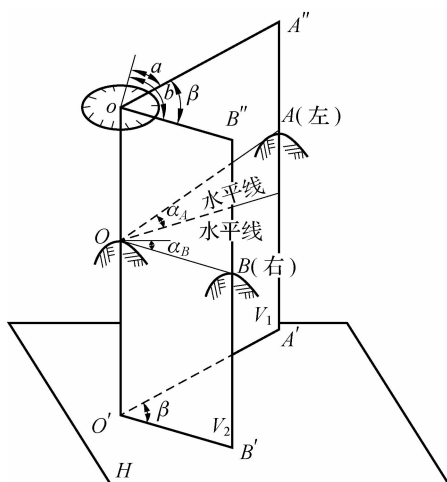


图 3-1 水平角的测量原理

3.1.2 竖直角的测量原理

在同一竖直面内,地面某点至目标的方向线与水平线的夹角称为竖直角或垂直角,用 α 表示。若目标方向线在水平线之上,该竖直角称为仰角,取值为“+”;若目标方向线在水平线之下,该竖直角称为俯角,取值为“-”。如图 3-2 所示, A 目标在水平线上方, α_A 为正,为仰角; B 目标在水平线下方, α_B 为负,为俯角。竖直角的取值范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。

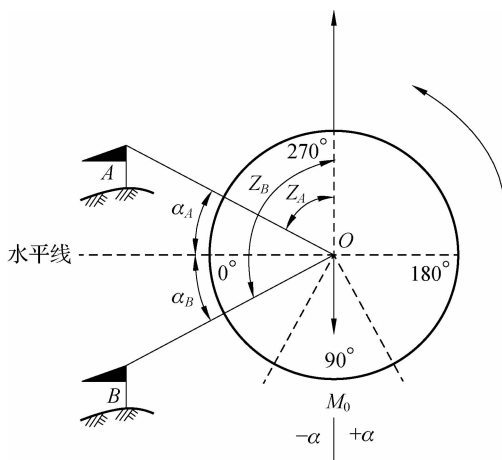


图 3-2 竖直角的测量原理

测角时,可借助一个竖直圆盘(竖直度盘)随照准设备同轴旋转,当照准目标 A 或 B 时,利用固定的竖盘指标(图 3-2 中向下的箭头线)可读出目标相应的度盘读数 a 或 b 。目标读数与水平视线读数之差即为该目标的竖直角 α 。

设水平视线的竖盘读数为 M_0 (始读数)。始读数为一个预定值,一般盘左为 90° ,盘右为 270° 。读数 $+\alpha$ 、 M_0 、 $-\alpha$ 三者 in 度盘上分布的位置如图 3-2 所示。 M_0 在铅垂线位置, $+\alpha$ (仰

角读数)在右侧, $-\alpha$ (俯角读数)在左侧。当竖盘注记为逆时针时, $a > M_0$, 则 $\alpha_A = a - M_0$; 当竖盘注记为顺时针时(将图 3-2 中的 90° 与 270° 互换位置, 即构成顺时针注记的度盘), $a < M_0$, 则 $\alpha_A = M_0 - a$ 。

为了区分因度盘注记方向不同而产生不同的读数, 设任一目标在逆时针度盘上的读数为 N , 在顺时针度盘上的读数为 S , 则上述两式可合并表达为

$$\alpha = N - M_0 = M_0 - S \quad (3-2)$$

式中, N 、 S 分别为“逆时针”和“顺时针”汉语拼音的第一个字母。测角时, 务必注意读数的度盘注记方向, 以确定读数是 N 还是 S 。

在同一竖直面内, 任一点至目标方向与天顶方向(图 3-2 中向上的箭头方向)的夹角 Z , 称为天顶距, 其取值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 它与角 α 的关系为

$$Z = 90^\circ - \alpha \quad (3-3)$$

根据上述角度测量原理, 测角仪器应满足下列条件:

- (1) 水平度盘的刻画中心必须通过仪器的旋转中心, 即通过所测角的顶点。
- (2) 竖直度盘的刻画中心必须通过目标方向线与水平线的交点。
- (3) 必须有一个可照准不同高度、不同方向的照准设备, 该设备可以在水平和竖直平面内旋转。

经纬仪就是满足上述条件的测角仪器。

3.2 光学经纬仪的构造及使用

经纬仪是以测角为主的多用途测量仪器。我国的经纬仪按照测角精度可分为 DJ07、DJ1、DJ2、DJ6、DJ10 等几个等级。D 和 J 分别为大地测量和经纬仪的汉语拼音的第一个字母, 后面的数字代表该仪器的测量精度, 即每测回方向观测中误差的秒数。其中, DJ07、DJ1、DJ2 型经纬仪为精密经纬仪, DJ6、DJ10 型等经纬仪属于普通经纬仪。根据制造原理的不同, 经纬仪分为光学经纬仪和电子经纬仪两类。目前工程建设中使用较多的是光学经纬仪, 一般用 DJ6 型, 精度要求较高时用 DJ2 型。DJ2 型经纬仪具有照准部水准器灵敏度高、度盘分划值小、双光路对径 180° 符合读数可消除度盘偏心差的特点。

3.2.1 光学经纬仪的构造

尽管经纬仪的精度等级和生产厂家可能不同, 但光学经纬仪的构造基本是一致的。经纬仪主要由照准部、度盘和基座三部分组成。图 3-3 所示为北京光学仪器厂生产的 DJ6 型和 TDJ6 型光学经纬仪的构造, 图 3-4 所示为西北光学仪器厂生产的 DJ6 型光学经纬仪的构造。

1. 照准部

照准部是指经纬仪上部可转动的部分。它主要包括望远镜、读数显微镜、水准器、光学对点器、垂直度盘、横轴系、支架、测微装置、竖轴、水平和竖直制动及微动装置等。如图 3-5 所示, 照准部下部的有个旋转轴, 可插在轴套中, 照准部绕该轴转动, 旋转轴的几何中心线被称为竖轴, 用 VV 表示。轴套插入轴座孔中, 由轴座锁定螺丝固定, 使照准部与基座成为一个整体。

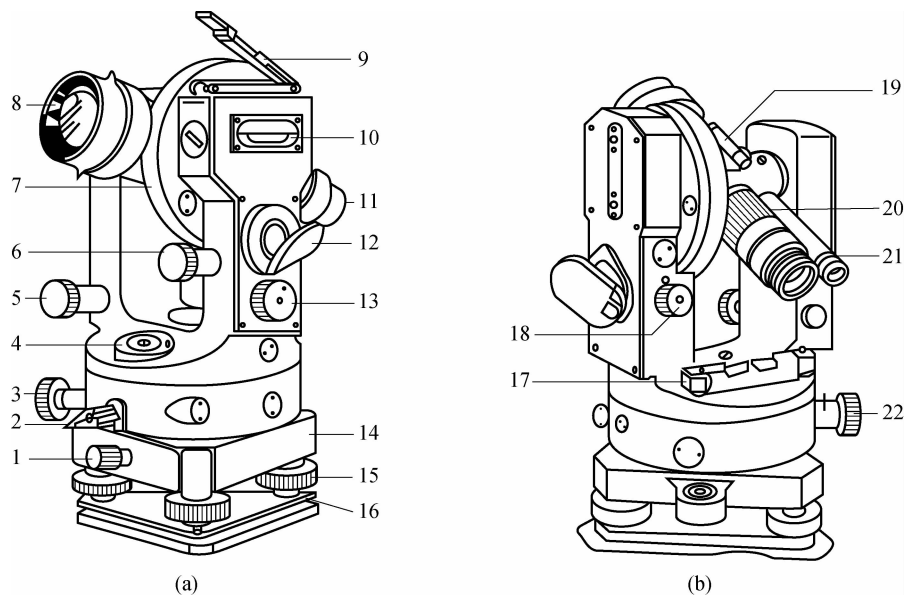


图 3-3 北京光学仪器厂生产的 DJ6 型和 TDJ6 型光学经纬仪的构造

- 1—轴座锁定螺丝；2—水平制动螺旋；3—水平微动螺旋；4—圆水准器；5—竖直微动螺旋；6—指标水准管微动螺旋；
7—竖直度盘；8—望远镜物镜；9—指标水准管反光镜；10—指标水准管进光窗；11—望远镜目镜；
12—进光反光镜；13—测微轮；14—轴座；15—脚螺旋；16—连接板；17—自动归零锁紧手轮；
18—照准部水准管；19—光学照准器；20—物镜调焦螺旋；21—读数显微镜；22—拨盘手轮

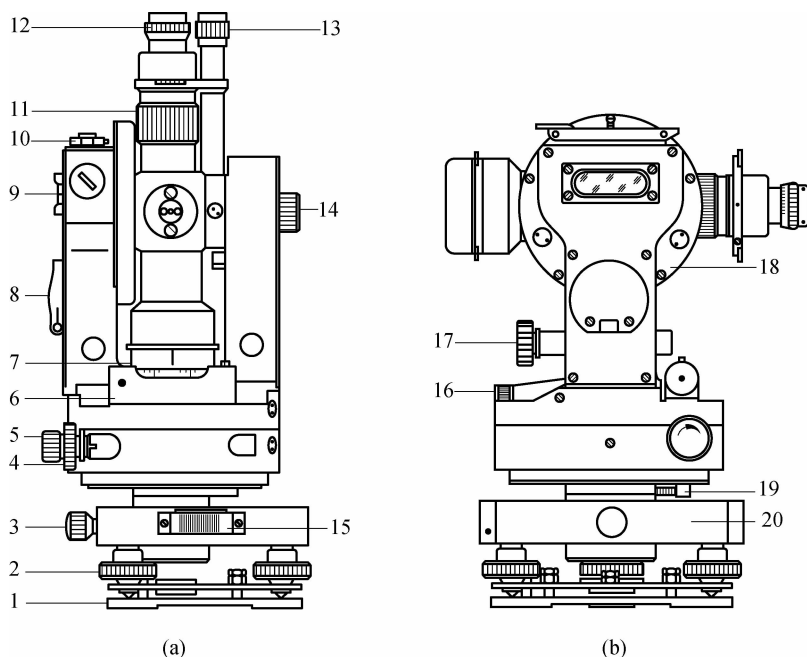


图 3-4 西北光学仪器厂生产的 DJ6 型光学经纬仪的构造

- 1—连接板；2—脚螺旋；3—轴座锁定螺丝；4—水平微动螺旋；5—水平制动螺旋；6—照准部水准管；
7—望远镜物镜；8—进光反光镜；9—指标水准管进光窗；10—指标水准管反光镜；11—物镜调焦螺旋；
12—望远镜目镜；13—读数显微镜；14—竖直制动螺旋；15—圆水准器；16—光学对点器；
17—指标水准管微动螺旋；18—竖直度盘；19—拨盘手轮；20—轴座

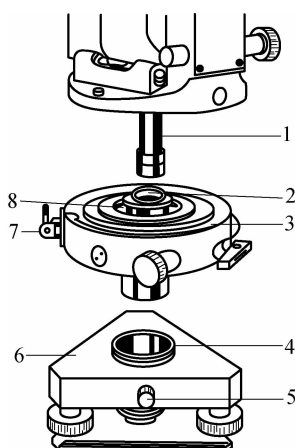


图 3-5 照准部与基座的连接

1—照准部旋转轴；2—竖轴套；3—水平度盘；4—轴座孔；
5—轴座锁定螺丝；6—轴座；7—复测器；8—套轴

经纬仪的望远镜和水准器的构造及作用同水准仪。望远镜与旋转轴(称为横轴,其轴线用 HH 表示)固连,安装在支架上,可绕横轴 360° 旋转,通过制动螺旋和微动螺旋可在竖直面内转动,照准高低不同的目标。为了建立竖直面,望远镜的视准轴 CC 应垂直于横轴 HH ,且 HH 应垂直于仪器的竖轴 VV 。

望远镜右侧设有读数显微镜,通过它可以读取水平度盘和竖直度盘的读数。

照准部的水准器用来精确整平仪器,使水平度盘处于水平位置(同时也使 VV 铅垂)。有的仪器除装有照准部水准管外,还装有圆水准器,用来粗略整平仪器。

光学对点器用于调整使水平度盘中心与测站点位于同一条铅垂线上,即对中。

竖盘装置包括竖直度盘、竖盘读数指标水准管与微动螺旋等。竖盘装置用于竖直角测量。垂直度盘与横轴固连并以横轴为中心,随望远镜一起转动。

测微装置用于测量不足度盘分划值的微小角值。

2. 度盘

光学经纬仪装有水平度盘和竖直度盘。其中,水平度盘由光学玻璃制成,度盘边缘通常按顺时针方向刻有 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的等角测距分划线。在水平角的测量过程中,水平度盘不随照准部转动,须利用度盘变换手轮将度盘转至所需要的位置,度盘配置好后应及时盖上护盖,以免在作业中被碰动。

对于装有复测器的复测光学经纬仪,水平度盘与照准部之间的连接由复测器控制。将复测器扳手往下扳时,水平度盘将和照准部一起转动;将复测器扳手往上扳时,水平度盘将不随照准部转动。

3. 基座

基座同水准仪基座类似,由轴座、脚螺旋和连接板等组成,用于支承整个仪器,借助中心螺旋使经纬仪紧固在三脚架上。松开轴座锁定螺丝,整个仪器可从基座中提出。但作业时务必将锁定螺丝拧紧,不得随意松动,以防仪器与基座分离而坠落。中心螺旋下有一个挂

钩,用于挂垂球。当垂球尖对准地面测点且水平度盘水平时,水平度盘的中心位于测点的铅垂线上。

3.2.2 光学经纬仪的使用

1. 光学读数系统

图 3-6(a)所示为 DJ6 型光学经纬仪读数设备的光路图。调节进光反光镜朝向光源,使光线经反光镜进入仪器内部,同时照明水平度盘和竖直度盘。此时带有度盘分划线的光线经过棱镜折射和透镜组(显微物镜组)的调节,消除行差(度盘分划线的间隔经成像透镜组放大倍数与透镜组的放大率不一致产生的透镜组放大倍率误差,称为行差)与视差,将度盘分划线影像成像于测微装置的像平面上;而后和测微尺(盘)分划线的影像一起,经横轴棱镜折射和显微物镜组放大并成像,进入读数显微镜视窗。这种读数系统称为单光路读数系统,利用该系统可在读数视窗内同时观察到水平度盘和竖直度盘的像。

图 3-6(b)所示为 DJ2 型光学经纬仪读数设备的光路图,与 DJ6 型经纬仪不同的是 DJ2 型经纬仪采用双光路,水平度盘与竖直度盘分别进光。光线照明度盘后,带有分划线影像的光线经 1:1 成像透镜组(度盘平面的上方或左方)调节像的行差与视差,落在同一度盘对径 180°的分划线附近,形成两组相差 180°的影像,如图 3-7 所示。再通过分像器将两组影像切去重叠部分而变成平直相切的分划线,而后经显微物镜组成像于测微装置的像平面上,经横轴棱镜折射进入读数视场,即可观察到正字注记(主像)分划线、倒字注记(副像)分划线和测微尺影像。

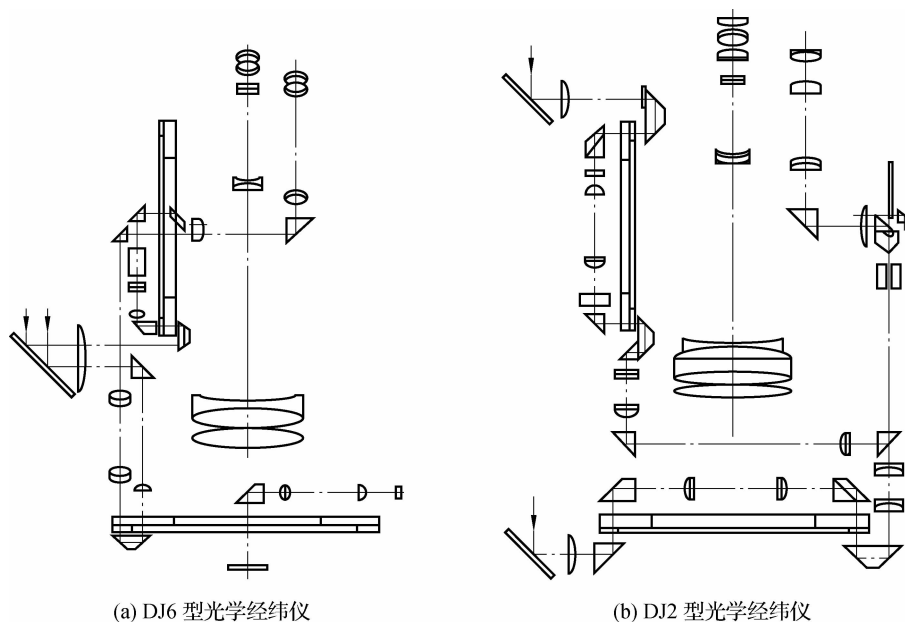


图 3-6 光学经纬仪读数设备的光路图

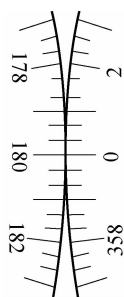


图 3-7 主、副像对径符合

水平度盘和竖直度盘的光路在换像棱镜处会合,改变换像棱镜的方向可使它们分别进入测微装置的像平面。DJ2 型经纬仪在读数视场内只能观察到水平或垂直一种度盘的像,这种双光路读数系统称为对径 180°符合读数系统。

2. 光学测微装置与读数方法

由于度盘尺寸限制,光学经纬仪度盘分划线的最小分划值难以直接刻划到秒,为了实现精密测角,要借助光学测微技术制作成测微器来测量不足度盘分划值的微小角值。DJ6 型光学经纬仪采用分微尺测微器或单平板玻璃测微器,DJ2 型光学经纬仪采用双光楔测微器。

1) 分微尺测微器及其读数方法

分微尺为一平板玻璃,上面刻有 60 格分划线,每 10 格注有注记,安装在光路上的读数窗(测微装置像平面)之前。经过折射和透镜组放大后的度盘分划线成像在分微尺上,度盘分划线经放大后的间隔弧长恰好等于分微尺的全长。因为度盘分划间隔是 1° ,所以分微尺一格代表 $1'$,每 10 格注记表示整 $10'$ 数。不足度盘分划值的微小角值就是分微尺 0 分划和度盘分划线间所夹的角值。图 3-8 所示为分微尺测微器的读数视场,其中,H、V 分别表示水平度盘和竖直度盘的影像。读数时,先读出落在分微尺间的度盘线注记(整度数,如 134°),再以度盘分划线为指标线,读取微小角值的整数(分微尺注记数,如 $50'$),再读出分数,并估读至 $0.1'$ (如 $5.2'$),最后相加即得全读数(如 $134^\circ 55.2'$)。图 3-8 所示的竖盘读数为 $85^\circ 23.7'$ 。

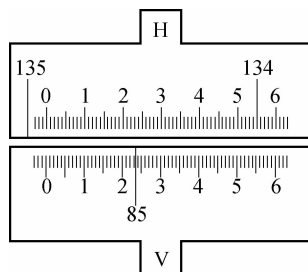


图 3-8 分微尺测微器的读数视场

2) 单平板玻璃测微器及其读数方法

单平板玻璃测微器由平板玻璃、测微尺、测微轮及传动装置组成。单平板玻璃安装在光路的显微透镜组之后,与传动装置和测微尺连在一起。转动测微轮,单平板玻璃与测微尺同轴转动,平板玻璃随之倾斜。根据平板玻璃的光学特性,平板玻璃倾斜时,出射光线与入射光线不共线而偏移一个量,这个量可由测微尺度量出来。转动测微轮使度盘线移动一个分划值(一格) $30'$,测微尺刚好移动全长。度盘的最小分划值为 $30'$,测微尺共30大格,一大格分划值为 $1'$,一大格又分为3小格,则一小格的分划值为 $20''$ 。图3-9所示为单平板玻璃测微器的读数视场,其有3个读数窗:上面为测微窗,有一单指标线;中间为竖直度盘影像,下面为水平度盘影像,两者均有双指标线。读数前,应先转动测微轮,使双指标线夹准(平分)某一度盘分划线像,读出度数和整 $30'$ 数,如图3-9(a)所示的水平度盘的读数为 $7^\circ 30'$,再读出测微窗中单指标线所指出的测微尺上的读数,如图3-9(a)所示的 $8'47''$,两者相加即为水平度盘的读数 $7^\circ 38'47''$ 。同理,图3-9(b)所示的竖直度盘的读数为 $97^\circ 20'40''$ 。

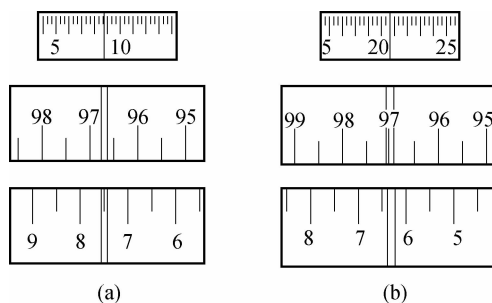


图 3-9 单平板玻璃测微器的读数视场

3) 双光楔测微器及对径 180° 符合读数方法

双光楔测微器将两组双光楔或平板玻璃安装在主、副像光路的转像棱镜与测微尺之间,转动测微轮可使双光楔离合或平板玻璃倾斜,让通过的主、副像光线做等量反向移动偏移一个量,该量由测微尺度量出来,如图3-10所示。图3-10(a)所示的主像读数为 $167^\circ 20' + b$,副像读数为 $347^\circ 20' + c$,正确读数应为主、副像读数的平均值,即 $[(167^\circ 20' + b) + (347^\circ 20' + c - 180^\circ)] \div 2 = 167^\circ 20' + (b + c)/2$ 。当转动测微轮使 $167^\circ 20'$ 和 $347^\circ 20'$ 的分划线对齐时,主、副像必然相向移动 $(b + c)/2$,此值可直接在测微尺上读出。这样直接读对径读数的平均值,即可自动消除照准部偏心差。

对径 180° 符合读数的度盘分划值为 $20'$,测微尺全长共600格,主、副像相向移动一个分划($10'$),测微尺移动全长,所以测微尺的分划值为 $1''$ 。测微尺左侧相同连续注记数为整 $10'$,右侧注记为整 $10''$ 数。瞄准目标后,先用换像手轮选择需要的度盘,打开相应的度盘进光到反光镜上,而后转动测微轮使主、副像的分划线精确对齐,再进行读数。读数时,先读取对径 180° 且主像在主、副像的主像注记值(整度数),如图3-10(b)中的 167° ;接着数出主、副像分划线间所夹度盘线格数 n , n 乘以 $10'$ 即得整 $10'$ 数(如 $30'$);再以测微窗的指标线为准,读取微小角值,估读至 $0.1''$ (如 $8'02.4''$)。三者相加即为全读数(如 $167^\circ 38'02.4''$)。

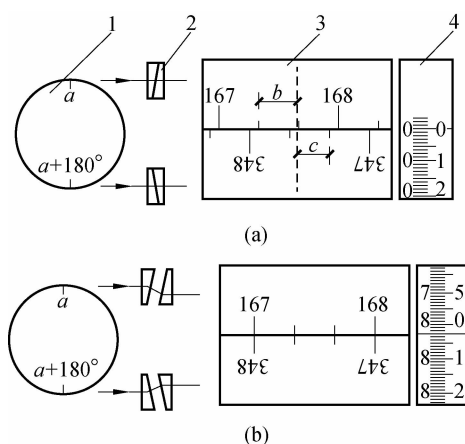


图 3-10 双光楔测微器的工作原理

1—度盘；2—光楔；3—度盘读数窗；4—测微窗

目前生产的 DJ2 型经纬仪为了简化读数,防止出错,均采用半数字化读数。图 3-11 所示为常见的读数视场,视场显示主像整数度数记和整 $10'$ 记(小框中的数字或用符号标记的数字)、主(副)像度盘分划线影像(图中已经对齐)和测微窗。只要对齐分划线便可直接读出全读数。图 3-11(a)所示读数为 $158^{\circ}43'14.3''$,图 3-11(b)所示读数为 $168^{\circ}14'57.3''$,图 3-11(c)所示读数为 $178^{\circ}22'55.2''$ 。

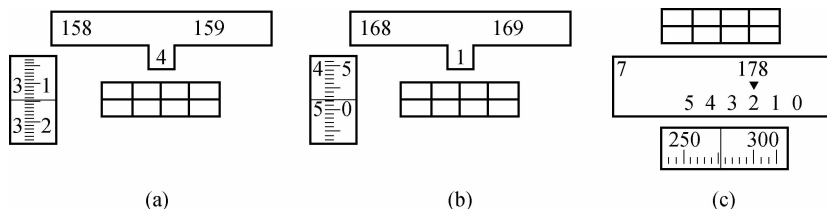


图 3-11 经纬仪半数字化读数视场

3. 光学经纬仪的技术操作

1) 光学经纬仪的安置

利用经纬仪测量角度时,首先应将仪器安置在测站点(角顶点)的铅垂线上,包括对中和整平两项工作。对中的目的是使仪器竖轴(或水平度盘中心)位于过测站点的铅垂线上。对中的方法有光学对中法和垂球对中法。整平的目的是使仪器的竖轴竖直,从而使水平度盘和横轴处于水平位置,使竖直度盘位于铅垂平面内。整平分粗略整平和精确整平两步。

由于对中和整平两项工作相互影响,因此在安置经纬仪时应同时满足对中和整平这两个条件。下面分别介绍采用两种不同的对中方法安置经纬仪的步骤。

(1)使用光学对中法安置经纬仪。具体操作步骤如下:

①粗略对中。打开三脚架,使其高度适中,3 个脚架的连线呈大致等边的三角形。将脚架放置在测站点上,架头大致水平。将仪器安置在脚架的架头上,旋紧连接的螺旋,调节 3 个脚架的螺旋至适中位置。移动三脚架或旋转脚螺旋使光学对点器分划板的圆心或者十字丝

分划板的交点大致对准地面标志中心,移动脚架时架头应基本保持水平。

②粗略整平。通过变换三脚架的高度,使水准管气泡(或者圆水准器气泡)大致居中。

③精确整平。如图 3-12(a)所示,先转动照准部,使水准管平行于任意一对脚螺旋的连接线,两手同时向内或向外转动这两个脚螺旋,使气泡居中,注意气泡的移动方向始终与左手大拇指的移动方向一致;然后将照准部转动 90° [见图 3-12(b)],再转动第三个脚螺旋,使水准管气泡居中;再将照准部转回到原位置,检查气泡是否居中,若不居中,按上述步骤反复进行,直到水准管在任何位置气泡偏离零点都不超过一格为止。

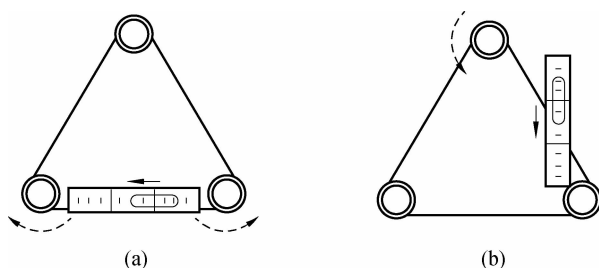


图 3-12 经纬仪的精确整平

④精确对中并整平。精确整平后应重新检查对中,如有少许偏离,可稍松开中心连接螺旋,在架头上慢慢地平移经纬仪,使其精确对中后,及时拧紧中心连接螺旋,再次进行精确整平。由于对中和整平之间相互影响,因此需要操作者反复进行操作,最后实现既对中又整平。

光学对中法操作简便,不受风力等因素影响,而且精度较高,对中误差一般不超过 1 mm。

(2)使用垂球对中法安置经纬仪。具体操作步骤如下:

①先将三脚架张开并放置于测站点上,使其高度适中。在连接螺旋上挂上垂球,调整垂球线的长度,使垂球尖略高于测站点。

②移动三脚架使垂球尖大致对准地面上的测点,同时架头大致水平。三脚架稳定后,将仪器安置在架头上,若垂球尖偏离测点较大,则需要水平移动三脚架;若偏离较小,则可以松开中心连接螺旋,在架头上平移仪器,对中后及时拧紧中心连接螺旋。

③转动照准部,调节脚螺旋使照准部水准管气泡在相互垂直的两个方向上居中,达到精确整平的目的。

与光学对中法相比,垂球对中法受风力的影响比较大,操作也不方便,而且精度比较低,对中误差一般小于 3 mm。

2) 瞄准

测角时的照准部标志一般是竖立于测点的标杆、测钎、垂球线或觇牌等。测量水平角时,以望远镜的十字丝竖丝瞄准照准部标志,并尽量瞄准标志底部;而测量竖直角时一般以望远镜的十字丝中横丝切标志的顶部,如图 3-13 所示。瞄准的具体操作步骤如下:

(1)松开望远镜的制动螺旋和照准部的制动螺旋,将望远镜朝向明亮背景,调节目镜对光螺旋,使十字丝清晰。

(2)利用望远镜上的照门和准星粗略对准目标,拧紧照准部及望远镜的制动螺旋,调节物镜对光螺旋,使目标影像清晰,并注意消除视差。

(3)转动照准部和望远镜的微动螺旋,精确瞄准目标。

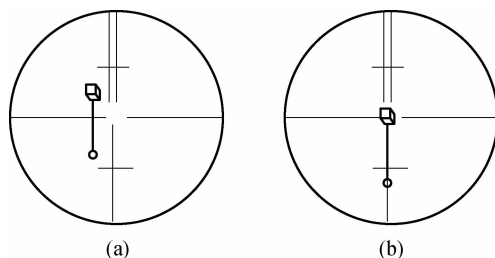


图 3-13 瞄准目标

3) 读数

读数前,先将进光反光镜张开适当角度,转动它使镜面朝向光源,让读数窗明亮且亮度均匀,旋转读数窗显微镜调焦螺旋,使分划和注记清晰,然后根据分度盘的测微类型用前述读数方法读数。

4) 归零

在水平角的测量中,为了使角度计算方便或减少度盘刻画误差的影响,通常需要将起始方向的水平度盘读数配置成 $0^{\circ}00'00''$ 或其附近某一预定值,该过程称为配度盘(或者叫作归零),其具体的操作步骤如下:

(1)调节测微轮,使测微尺的读数为 $0'00''$ 。

(2)先将复测扳手朝上(照准部与度盘分离),转动照准部,使度盘 0° 刻线位于双指标线的中央。再将复测扳手朝下(照准部与度盘结合)。

(3)松开水平制动螺旋,用望远镜瞄准目标后,再将复测扳手朝上。这时,瞄准目标方向的度盘读数即为 $0^{\circ}00'00''$ (或为某一预定值)。

利用拨盘手轮配度盘时,先用望远镜瞄准目标,打开拨盘手轮护盖,转动手轮使度盘 0° 分划线与分微尺 0 分划线重合,随后关上护盖。

有的仪器在拨盘手轮旁增设了一个保险手柄,故在配度盘时需先扳下该手柄,然后按下并转动拨盘手轮,使度盘读数为 $0^{\circ}00'00''$ 。松手后,手轮随即退出,此时再扳回保险手柄,使手轮不会被按下,避免误拨度盘。

3.3 水平角测量

水平角的测量方法通常根据目标的多少和精度要求而定。常用的水平角测量方法有测回法和方向观测法。测回法用于测量两个方向之间的单角,是测角的基本方法。方向观测法用于在一个测站上观测两个以上方向的多角。

3.3.1 测回法

如图 3-14 所示,设 O 为测站点, A 、 B 为观测目标,用测回法观测 OA 与 OB 两方向之间的水平角 β ,具体施测步骤如下:

(1)在测站点 O 安置经纬仪,在 A 、 B 两点竖立测杆或测钎等作为目标标志。

(2)将仪器置于盘左位置,转动照准部,先瞄准左目标 A ,读取水平度盘的读数 a_L ,设读数为 $0^\circ 01' 30''$,记入水平角观测手簿(见表 3-1)的第(4)栏内。松开照准部的制动螺旋,顺时针转动照准部,瞄准右目标 B ,读取水平度盘的读数 b_L ,设读数为 $98^\circ 20' 48''$,记入表 3-1 的第(4)栏内。

以上操作称为上半测回,盘左位置的水平角的角值(上半测回角值) β_L 为

$$\beta_L = b_L - a_L = 98^\circ 20' 48'' - 0^\circ 01' 30'' = 98^\circ 19' 18''$$

(3)松开照准部的制动螺旋,倒转望远镜成盘右位置,先瞄准右目标 B ,读取水平度盘的读数 b_R ,设读数为 $278^\circ 21' 12''$,记入表 3-1 的第(4)栏内。松开照准部的制动螺旋,逆时针转动照准部,瞄准左目标 A ,读取水平度盘的读数 a_R ,设读数为 $180^\circ 01' 42''$,记入表 3-1 的第(4)栏内。

以上操作称为下半测回,盘右位置的水平角的角值(下半测回角值) β_R 为

$$\beta_R = b_R - a_R = 278^\circ 21' 12'' - 180^\circ 01' 42'' = 98^\circ 19' 30''$$

上半测回和下半测回构成一测回。

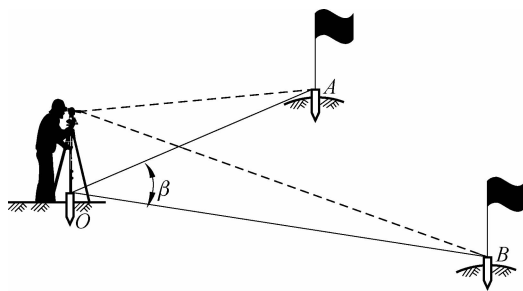


图 3-14 用测回法观测水平角

(4)对于 DJ6 型光学经纬仪,若上、下两半测回的角值之差的绝对值不大于 $40''$,则认为观测结果合格。此时,可取上、下两半测回角值的平均值作为一测回角值 β 。

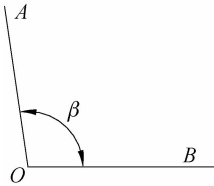
在本例中,上、下两半测回的角值之差 $\Delta\beta = \beta_L - \beta_R = 98^\circ 19' 18'' - 98^\circ 19' 30'' = -12''$,观测结果合格。故一测回角值 $\beta = (\beta_L + \beta_R) / 2 = (98^\circ 19' 18'' + 98^\circ 19' 30'') \div 2 = 98^\circ 19' 24''$ 。

注意

因为水平度盘是顺时针刻画和注记的,所以在计算水平角时总是用右目标的读数减去左目标的读数,若结果为负值,则应在右目标的读数上加上 360° ,再减去左目标的读数,决不可以倒过来减。

当测角精度要求较高时,需对一个角度观测多个测回。为了减少度盘分划误差的影响,应根据测回数 n ,以 $180^\circ/n$ 的差值安置起始水平度盘的读数。例如,当测回数 $n=2$ 时,第一测回的起始方向读数可安置在略大于 0° 处,第二测回的起始方向读数安置在略大于 $(180^\circ \div 2)=90^\circ$ 处。若各测回角值的互差的绝对值不超过 $24''$ (对于 DJ6 型),则取各测回角值的平均值作为最后角值,记入表 3-1 的第(7)栏内。

表 3-1 水平角观测手簿(测回法)

测站	竖盘位置	目标	水平度盘 读数 /(° ' ")	半测回 角值 /(° ' ")	一测回 角值 /(° ' ")	各测回 平均角值 /(° ' ")	备 注
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
第一测回	左	A	0 01 30	98 19 18	98 19 24	98 19 30	
		B	98 20 48				
	右	A	180 01 42	98 19 30			
		B	278 21 12				
第二测回	左	A	90 01 06	98 19 30	98 19 36		
		B	188 20 36				
	右	A	270 00 54	98 19 42			
		B	8 20 36				

3.3.2 方向观测法

当在一个测站上需要观测的方向为 3 个或 3 个以上时,需采用方向观测法。方向观测法又称为全圆测回法。

如图 3-15 所示,设 O 为测站点, A 、 B 、 C 、 D 为观测目标,用方向观测法观测各方向间的水平角。

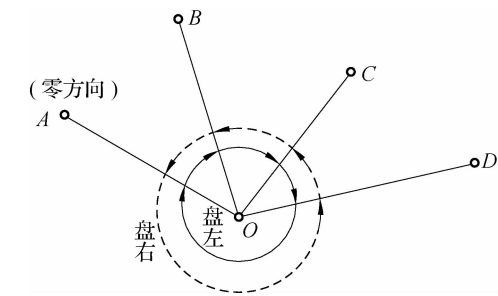


图 3-15 用方向观测法观测水平角

其具体施测步骤如下:

1. 观测

(1)在测站点 O 安置经纬仪,对中、整平;并且在 A 、 B 、 C 、 D 观测目标处竖立观测标志。

(2)在盘左位置选择一个明显目标 A 作为起始方向,瞄准目标 A ,将水平度盘的读数安置在稍大于 0° 处,读取水平度盘的读数,记入表 3-2 中的第(4)栏内。

松开照准部制动螺旋,顺时针方向旋转照准部,依次瞄准 B 、 C 、 D 各目标,分别读取水平度盘的读数,记入表 3-2 中的第(4)栏内。为了校核,再次瞄准起始方向 A ,读取水平度盘的读数,记入表 3-2 中的第(4)栏内。该操作称为上半测回归零。 A 目标方向两次读数之差的绝对值,称为半测回归零差,半测回归零差不应超过表 3-3 中的规定。若归零差超限,则应重新观测。以上观测过程称为上半测回。

(3)在盘右位置逆时针方向依次照准目标 A 、 D 、 C 、 B 、 A ,并将水平度盘的读数由下向上记入表 3-2 中的第(5)栏内,此观测过程为下半测回。

上、下两个半测回合称一测回。为了提高精度,有时需要观测 n 个测回,则各测回起始方向仍按 $180^\circ/n$ 的差值安置水平度盘的读数。

2. 计算

1) 计算两倍视准轴误差 $2c$ 值

在一个测回中,同一方向的盘左、盘右水平度盘读数之差称为 $2c$ 值。即

$$2c = \text{盘左读数} - (\text{盘右读数} \pm 180^\circ)$$

式中,括号内盘右读数大于 180° 时取“ $-$ ”号,盘右读数小于 180° 时取“ $+$ ”号。

计算各方向的 $2c$ 值,填入表 3-2 中的第(6)栏内。 $2c$ 值应该为一个常数,各个方向的 $2c$ 值的变化是方向观测中偶然误差的反映。一测回内各方向 $2c$ 值的互差不应超过表 3-3 中的规定。若超限,则应在原度盘位置重测。

2) 计算各方向的平均读数

各方向的平均读数即各方向的方向值。计算时,以盘左读数为准,将盘右读数加或减 180° 后,和盘左读数取平均值,并将结果填入表 3-2 中的第(7)栏内。起始方向有两个平均读数,故应再取其平均值,填入表 3-2 中第(7)栏上方的小括号内。

3) 计算归零后的方向值

将各方向的平均读数减去起始方向的平均读数(括号内数值),即得到各方向归零后的方向值,填入表 3-2 中的第(8)栏内。起始方向归零后的方向值为零。

4) 计算各测回归零后方向值的平均值

在观测过程中若没有误差,则在进行多测回观测时,各测回同一方向的归零值应该是相等的。归零值的互差大小意味着误差的大小。《工程测量规范》(GB 50026—2007)规定,对于一级及以下导线的方向观测法,同一方向值各测回互差应符合表 3-3 中的限值要求。若满足,则取各测回归零后方向值的平均值作为该方向的最后结果,填入表 3-2 中的第(9)栏内。

5) 计算各目标间水平角的角值

将表 3-2 的第(9)栏中相邻两方向值相减即可求得各目标间水平角的角值。当需要观测的方向为 3 个时,可不作归零观测,其他步骤均与 3 个以上方向的观测方法相同。

表 3-2 水平角观测手簿(方向观测法)

测站	测回数	目标	水平度盘读数		2 <i>c</i> /($^{\circ}$)	平均读数 /($^{\circ}$ ' ")	归零后方向值 /($^{\circ}$ ' ")	各测回归零后 方向值的平均值 /($^{\circ}$ ' ")
			盘左 /($^{\circ}$ ' ")	盘右 /($^{\circ}$ ' ")				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
O	1	A	0 02 12			(0 02 10)	0 00 00	0 00 00
				180 02 00	12	0 02 06		
		B	37 44 15	217 44 05	10	37 44 10	37 42 00	37 41 33
		C	110 29 04	290 28 52	12	110 28 58	110 26 48	110 26 52
		D	150 14 51	330 14 43	8	150 14 47	150 12 37	150 12 33
		A	0 02 18	180 02 08	10	0 02 13		
	2	A	90 03 30	270 03 22	8	(90 03 24)	0 00 00	
						90 03 26		
		B	127 45 34	307 45 28	6	127 45 31	37 42 07	
		C	200 30 24	20 30 18	6	200 30 21	110 26 57	
		D	240 15 57	60 15 49	8	240 15 53	150 12 29	
		A	90 03 25	270 03 18	7	90 03 22		

表 3-3 方向观测法的技术要求

经纬仪型号	光学测微器两次 重合读数差/($^{\circ}$)	半测回 归零差/($^{\circ}$)	一测回内 2 <i>c</i> 值 互差/($^{\circ}$)	同一方向值 各测回互差/($^{\circ}$)
DJ2	3	12	18	12
DJ6		18		24

3.4 竖直角的相关计算及测量

3.4.1 竖盘的构造

竖盘装置包括竖直度盘、读数指标、指标水准管和微动螺旋等,如图 3-16 所示。竖直度盘安装在横轴的一端,随望远镜在竖直面内同轴转动。经纬仪的读数指标与指标水准管连接在一起,不随望远镜转动,只能通过调节指标水准管微动螺旋,使读数指标和指标水准管一起做微小转动。当指标水准管的气泡居中时,指标线处于正确位置,即铅垂位置。

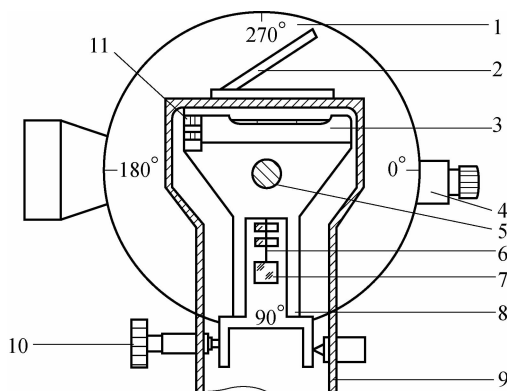


图 3-16 竖盘的构造

1—竖直度盘；2—指标水准管反光镜；3—指标水准管；4—望远镜；5—横轴；

6—读数指标；7—测微平板玻璃；8—指标水准管支架；9—左支架；

10—指标水准管微动螺旋；11—指标水准管校正螺丝

3.4.2 竖直角计算

根据注记方向的不同,竖盘有顺时针注记和逆时针注记两种。两种方法注记竖直角的计算公式不同。现在以顺时针注记的竖盘为例,推导竖直角的计算公式,如图 3-17 所示。

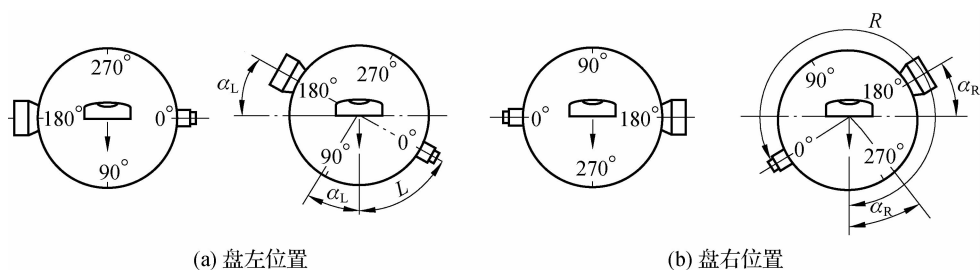


图 3-17 竖盘的注记方法

当望远镜处于盘左位置,视线水平时,竖盘读数为 90° 。当瞄准一个目标时,竖盘读数为 L ,则盘左竖直角 α_L 为

$$\alpha_L = 90^\circ - L \quad (3-4)$$

当望远镜处于盘右位置,视线水平时,竖盘读数为 270° 。当瞄准原目标时,竖盘读数为 R ,则盘右竖直角 α_R 为

$$\alpha_R = R - 270^\circ \quad (3-5)$$

将盘左、盘右位置的两个竖直角取平均值,即得竖直角 α 的计算公式为

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_R) = \frac{1}{2}(R - L - 180^\circ) \quad (3-6)$$

对于逆时针注记的竖盘,同理可推得竖直角的计算公式为

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_R) = \frac{1}{2}(L - R - 180^\circ) \quad (3-7)$$

在观测竖直角之前,将望远镜大致放置水平,读取竖盘读数,首先确定视线水平时的读数,然后上仰望远镜,观测竖盘读数是增加还是减少,若读数增加,则竖直角计算公式为

$$\alpha = \text{瞄准目标时的读数} - \text{视线水平时的读数} \quad (3-8)$$

若读数减少,则竖直角计算公式为

$$\alpha = \text{视线水平时的读数} - \text{瞄准目标时的读数} \quad (3-9)$$

以上规定,适用于任何竖盘注记形式的盘左、盘右观测。

3.4.3 竖盘指标差的计算

竖盘与读数指标间的固定关系取决于指标水准管轴垂直于成像透镜组的光轴(光学指标)。在竖直角计算公式中,默认当视准轴水平、竖盘指标水准管气泡居中时,竖盘读数应是 90° 的整数倍。但是实际上这个条件往往不能满足,竖盘指标常常偏离正确位置,这个偏离的差值 x 角称为竖盘指标差。竖盘指标差是由水准管、视准轴等因素影响而导致的。竖盘指标差 x 有正、有负,一般规定当竖盘指标的偏移方向与竖盘注记方向一致时, x 为正,反之 x 为负。

如图 3-18(a)所示的盘左位置,由于存在指标差,其正确的竖直角计算公式为

$$\alpha = 90^\circ - L + x = \alpha_L + x \quad (3-10)$$

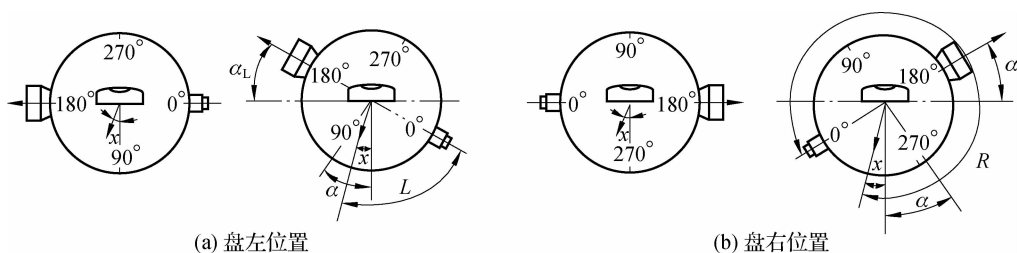


图 3-18 竖盘指标差

同理,图 3-18(b)所示的盘右位置,其正确的竖直角计算公式为

$$\alpha = R - 270^\circ - x = \alpha_R - x \quad (3-11)$$

将式(3-10)和式(3-11)相加并除以 2,得

$$\alpha = \frac{1}{2}(R - L - 180^\circ) = \frac{1}{2}(\alpha_R + \alpha_L) \quad (3-12)$$

将式(3-10)和式(3-11)相减并除以 2,得

$$x = \frac{1}{2}[(L + R) - 360^\circ] = \frac{1}{2}(\alpha_R - \alpha_L) \quad (3-13)$$

式(3-12)与无竖盘指标差时的竖直角计算公式(3-6)完全相同,说明仪器即使存在指标差,通过盘左、盘右竖直角取平均值也可以消除指标差的影响,获得正确的竖直角。

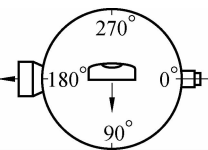
式(3-13)为竖盘指标差的计算公式。指标差 x 可用来检查观测质量。当在同一测站上观测不同目标时,对 DJ6 型经纬仪来说,指标差互差或同方向各测回指标差互差不应超过 $25''$ 。

3.4.4 竖直角的测量

竖直角测量一般采用中丝法。具体操作步骤如下:

- (1)在测站点 O 安置经纬仪,在目标点 A 竖立观测标志,按前述方法确定该仪器竖直角
的计算公式,为了方便应用,可将公式记录于竖直角观测手簿(见表 3-4)的第(8)栏内。
- (2)在盘左位置瞄准目标 A ,使十字丝横丝精确地切于目标底端,转动竖盘指标水准管
的微动螺旋,使水准管气泡严格居中,然后读取竖盘读数 L ,记入表 3-4 的第(4)栏内。
- (3)在盘右位置重复步骤(2),设其读数 R 为 $274^{\circ}17'36''$,记入表 3-4 的第(4)栏内。
- (4)按式(3-4)和式(3-5)分别计算半测回角值,记入表 3-4 的第(5)栏内;再按式(3-12)
计算一测回角值,记入表 3-4 的第(7)栏内;按式(3-13)计算竖盘指标差,记入表 3-4 的第(6)
栏内,并验算指标差互差(计算过程从略)。

表 3-4 竖直角观测手簿

测 站 点	目 标	盘 位	竖 直 度 盘 读 数 /(° ' ")	竖 直 角			备 注
				半测回角值 /(° ' ")	指标差 /(")	一测回角值 /(° ' ")	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
O	A	L	85 42 45	4 17 15	+10	4 17 26	
		R	274 17 36	4 17 36			
	B	L	95 48 24	—5 48 24	+12	—5 48 12	
		R	264 12 00	—5 48 00			

3.5 光学经纬仪的检验和校正

3.5.1 经纬仪的轴线及其应满足的条件

如图 3-19 所示,经纬仪的轴线有视准轴 CC 、横轴 HH 、竖轴 VV 、照准部水准管轴 LL 、圆水准器轴 $L'L'$ 、光学对点器视准轴 $C'C'$ 等。根据角度测量原理,经纬仪要测得正确的角值,必须具备的条件有水平度盘水平、竖盘铅垂、望远镜转动时视准轴的轨迹为铅垂面,同时观测竖直角时读数指标应处于铅垂位置的条件。因此,经纬仪的主要轴线间应满足以下条件:

- (1)水准管轴垂直于竖轴($LL \perp VV$)。
- (2)十字丝的纵丝垂直于横轴。
- (3)望远镜的视准轴垂直于横轴($CC \perp HH$)。
- (4)横轴垂直于竖轴($HH \perp VV$)。
- (5)竖盘读数指标处于正确位置($x=0$)。
- (6)光学对点器的视准轴与仪器竖轴重合($C'C'$ 与 VV 共轴)。

因此,在使用经纬仪前,应对其进行检验,必要时,要进行校正。

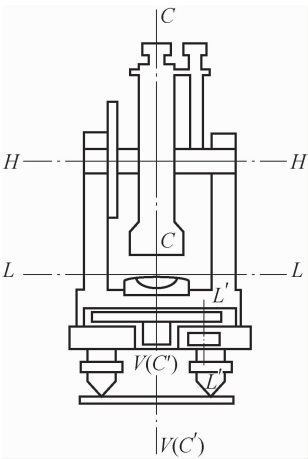


图 3-19 经纬仪的主要轴线

3.5.2 照准部水准管轴的检验和校正

1. 检验目的

满足 $LL \perp VV$ 的条件。当水准管气泡居中时,竖轴铅垂,水平度盘大致水平。

2. 检验方法

初步整平仪器,转动照准部使水准管平行于任意两个脚螺旋①、②[见图 3-20(a),校正螺丝端朝向脚螺旋②],相向旋转这两个脚螺旋,使水准管气泡居中。然后将照准部旋转 60° ,使水准管平行于①、③脚螺旋,旋转脚螺旋③,使水准管气泡居中[见图 3-20(b),校正螺丝端朝向脚螺旋③]。此时,①、③脚螺旋等高。再转动照准部 60° ,使水准管平行于脚螺旋②、③[见图 3-20(c),校正螺丝端朝向脚螺旋③],若气泡仍居中,表明 $LL \perp VV$ 的条件满足。否则应校正。

在检验过程中,水准管应平行于脚螺旋①、②且气泡居中,若条件满足,则脚螺旋①、②等高;若条件不满足,则两个脚螺旋不等高,假设脚螺旋②比脚螺旋①(公共螺旋)高 δ 。当水准管平行于脚螺旋①、③且气泡居中时,脚螺旋③应比脚螺旋①高 δ 。根据等量影响的原则,脚螺旋②、③等高。

3. 校正方法

用校正针拨动水准管一端的校正螺丝,使水准管的校正螺丝端升高或降低,将气泡调至居中。而后转动照准部 180° 使水准管调头,仍然平行于脚螺旋②、③,但校正螺丝端朝向脚螺旋②。若气泡仍居中或偏离零点小于 $1/2$ 格,则校正合格。否则应再校正,直至满足要求。

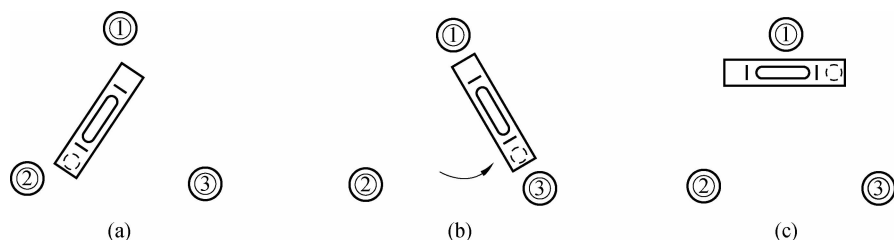


图 3-20 照准部水准管轴的检验

如果经纬仪装有圆水准器,可用已校正好的水准管将仪器严格整平,观察圆水准器的气泡是否居中,若不居中,则可直接调节圆水准器的校正螺丝使气泡居中。此方法也可用于检校水准仪 $L'L' // VV$ 。同理,水准仪 $L'L' // VV$ 的检校方法也可用来检校经纬仪 $LL \perp VV$,不同的是水准管平行于脚螺旋①、②且气泡居中后,转动照准部 180° ,若气泡仍居中,则表明条件满足,否则应校正。校正时是平一半、校一半。

3.5.3 十字丝的检验和校正

1. 检验目的

满足十字丝竖丝垂直于横轴的条件。仪器整平后,十字丝竖丝在竖直面内,保证精确瞄

准目标。

2. 检验方法

同水准仪,所不同的是经纬仪的十字丝的检验用竖丝。

3. 校正方法

如图 3-21 所示,旋下十字丝护罩,用螺丝刀拧松 4 个十字丝座压环螺丝,转动目镜筒(十字丝环一起转动),使目标点向竖丝移动偏离值的一半。然后拧紧压环螺丝,旋上护罩。

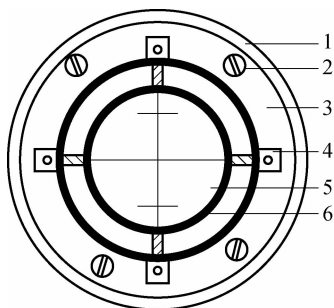


图 3-21 十字丝的校正

1—目镜筒；2—十字丝座压环螺丝；3—压环；4—十字丝校正螺丝；
5—十字丝分划板；6—十字丝环

3.5.4 视准轴的检验和校正

1. 检验目的

满足 $CC \perp HH$ 的条件,旋转望远镜时视准轴的轨迹为一个平面而不是一个圆锥面。

2. 检验方法

CC 不垂直于 HH 是由于十字丝交点的位置发生改变,导致视准轴与横轴的相交不是 90° ,而是偏差一个角度,这个角度误差即视准轴误差 c 。 c 使在观测同一铅垂面内不同高度的目标时,水平度盘的读数不一致,产生对测量成果影响较大的测角误差。该项检验通常采用四分之一法和对称法。下面介绍一下四分之一法。

如图 3-22 所示,在平坦地段选择相距 $60 \sim 100$ m 的 A 、 B 两点,在 A 点设标志,在 B 点与仪器大致等高处横放一把毫米分划直尺,且与 AB 垂直。在 A 、 B 连线的中点 O 处安置经纬仪。先以盘左位置瞄准 A 点标志,固定照准部,然后倒转望远镜,在 B 点处的直尺上读数,如图 3-22(a)所示。若为 B_1 而不是 B ,则 BB_1 对应的角值为 $2c$ 。再以盘右位置瞄准 A 点标志,固定照准部,倒转望远镜在 B 点处的直尺上读得 B_2 ,如图 3-22(b)所示。若 B_1 、 B_2 两点重合(在 B 点),则说明条件满足;若 B_1 、 B_2 两点不重合,则 B_1B_2 对应的角值为 $4c$ 。 c 值按式(3-14)计算。

$$c = \frac{B_1 B_2}{4D} \rho \quad (3-14)$$

式中, D 为 O 点到 B 点的水平距离(m); $B_1 B_2$ 为 B_1 与 B_2 的读数差值(m)。

3. 校正方法

校正时,在直尺上定出一点 B_3 ,使 $B_2B_3=B_1B_2/4$, OB_3 便与横轴 HH 垂直。打开望远镜目镜端护盖,用校正针先松开十字丝上、下的十字丝校正螺丝,再拨动左、右两个十字丝校正螺丝,一松一紧,左右移动十字丝分划板,直至十字丝交点对准点 B_3 。

此项检验和校正也须反复进行,直到 c 值满足要求为止。当然,若取盘左、盘右的度盘读数的平均值,则可以抵消视准轴的误差。

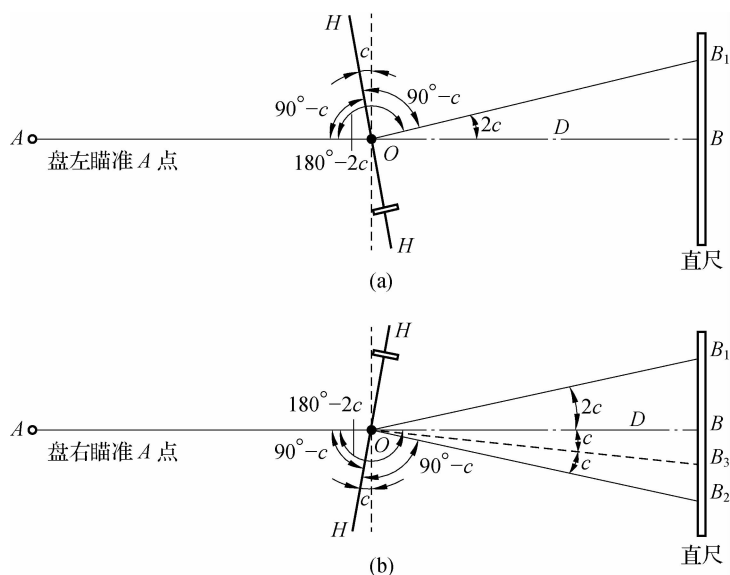


图 3-22 四分之一法检校视准轴

3.5.5 横轴的检验和校正

1. 检验目的

满足 $HH \perp VV$ 的条件,当望远镜绕横轴旋转时,视准轴的轨迹为一个铅垂面而不是一个斜面。

2. 检验方法

如图 3-23 所示,在距一垂直墙面 20~30 m 处安置经纬仪,整平仪器。在盘左位置,瞄准墙面上高处一明显目标 P ,仰角 α 宜在 30° 左右。固定照准部,将望远镜置于水平位置,根据十字丝交点在墙上定出一点 A 。倒转望远镜成盘右位置,瞄准 P 点,固定照准部,再将望远镜置于水平位置,在墙上定出点 B 。若 A 、 B 两点重合,则说明横轴是水平的,横轴垂直于竖轴;否则,需要校正。横轴不垂直于竖轴所构成的倾斜角 i (横轴误差)可按式(3-15)计算。

$$i = \frac{AB\rho}{2D} \cot \alpha \quad (3-15)$$

式中, AB 为 A 、 B 两点间的距离(m); α 为 P 点的竖直角($^\circ$); D 为仪器至 P 点的水平距离(m)。

对于 DJ6 型经纬仪,当计算出的横轴误差 $i > 20''$ 时必须校正。

3. 校正方法

(1)在墙上定出 A、B 两点连线的中点 M,仍以盘右位置转动水平微动螺旋,照准 M 点,转动望远镜,仰视 P 点,此时十字丝交点必然偏离 P 点而位于 P' 点。

(2)打开仪器支架的护盖,松开望远镜横轴的校正螺丝,转动偏心轴承,升高或降低横轴的一端,使十字丝交点准确照准 P 点,最后拧紧校正螺丝。

横轴垂直于竖轴的检验和校正也需反复进行。

由于光学经纬仪密封性好,仪器出厂时又经过了严格的检验,因此一般情况下其横轴不易变动。但测量前仍应加以检验,如有问题,最好送专业修理单位检修。

由上述检校原理可知,盘左、盘右瞄准同一目标并取其读数的平均值,可以抵消横轴误差的影响。

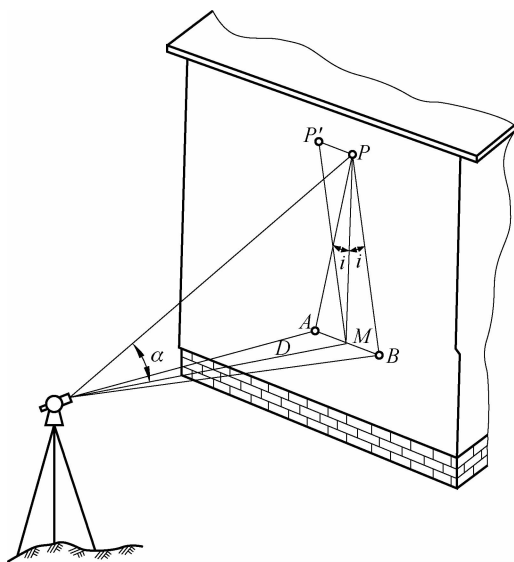


图 3-23 横轴垂直于竖轴的检验和校正

3.5.6 竖盘水准管的检验和校正

1. 检验目的

满足 $x=0$ 的条件,当指标水准管气泡居中时,使竖盘读数指标处于正确位置。

2. 检验方法

安置经纬仪,整平仪器后,用盘左、盘右观测同一目标,使竖盘指标水准管气泡居中,分别读取竖盘读数 L 和 R ,用式(3-13)计算竖盘指标差 x ,若 x 的绝对值超过 $1'$,则需要校正。

3. 校正方法

先计算出盘右位置时竖盘的正确读数 $R_0 = R - x$,原盘右位置瞄准目标不动,然后转动竖盘指标水准管微动螺旋,使竖盘读数为 R_0 ,此时竖盘指标水准管气泡不再居中,用校正针

拨动竖盘指标水准管一端的校正螺丝,使气泡居中即可。

此项检验和校正需反复进行,直至竖盘指标差小于规定的限值。

3.5.7 光学对点器的检验和校正

1. 检验目的

满足光学对点器视准轴与仪器竖轴重合的条件。安置好仪器后,水平度盘刻画中心、仪器竖轴和测站点位于同一铅垂线上。

2. 检验方法

光学对点器由物镜、分划板和目镜等组成,为放大倍率较小的外对光望远镜。光学对点器安装在照准部或基座上。

对安装在照准部上的光学对点器进行检验时,先安置好仪器,整平后在仪器正下方的地面上放置一块白色纸板。先将对点器分划圈的中心点 A (或十字丝中心) 投绘到纸板上,如图 3-24(a) 所示。然后将照准部旋转 180° ,如果 A 点仍在分划圈内表示条件满足,否则原绘制的 A 点将偏离,此时应进行校正,如图 3-24(b) 所示。

对安装在基座上的对点器进行检验时,将仪器整平后,将基座轮廓边用铅笔画在架头顶面上,并把对点器分划圈的中心(或十字丝中心)投绘在地面的纸板上,设为 A 点,拧松中心连接螺丝,将仪器(连同基座)在基座轮廓线内转 120° ,整平仪器后再投绘分划圈中心(或十字丝中心),设为 B 点,同法再转 120° 投绘分划圈中心 C 点。若 A 、 B 、 C 三点重合,则表明条件满足;否则应校正。

3. 校正方法

校正时,有的是校正转像棱镜,有的是校正分划板,有的两者均校正。校正照准部上的对点器时,先在纸板上画出分划圈中心与 A 点之间连线的中点 A_1 ,如图 3-24(c) 所示;然后调节光学对点器的校正螺丝,使 A 点移至 A_1 点即可。校正基座上的对点器时,调节光学对点器的校正螺丝,使分划圈中心与 A 、 B 、 C 三点构成的误差三角形中心一致即可。

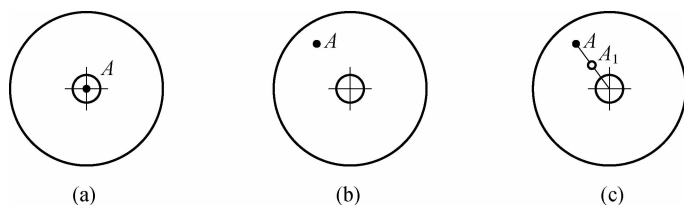


图 3-24 光学对点器的检验和校正

图 3-25(a) 为校正转像棱镜的示意图,松开支架间校正孔的圆形护盖,调节螺丝 1 可使分划圈左右移动,调节螺丝 2 可使分划圈前后移动。图 3-25(b) 为校正分划板的示意图,同望远镜十字丝分划板校正一样,调节校正螺丝 3 可使分划圈移动。

该项检验和校正也应反复进行,直至满足要求。

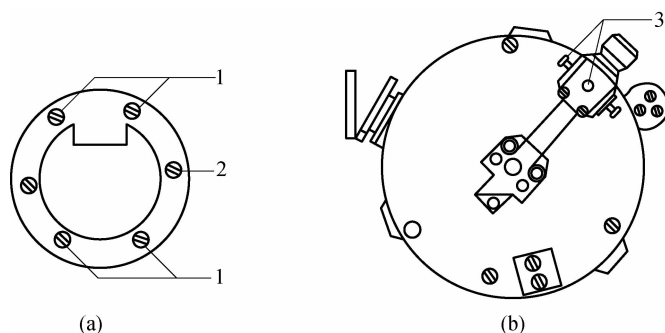


图 3-25 光学对点器的校正机构

1, 2—螺丝; 3—校正螺丝

3.6 角度测量的主要误差及注意事项

仪器误差和作业各环节产生的观测误差及外界影响都会对角度测量的精度造成影响。为了获得符合精度要求的角度测量成果,必须分析这些误差的影响,采取相应的措施,将它们消除或控制在容许范围以内。误差类别不同,对角度的影响程度也不同。下面分别对各项误差加以分析,并找出削弱或消除这些误差的方法。

3.6.1 仪器误差

仪器误差是指仪器不能满足设计理论要求而产生的误差,主要包括以下两个方面:

- (1) 仪器制造和加工不完善而引起的误差,如度盘偏心差、度盘刻画误差等。
- (2) 仪器检校不完善而引起的误差,如视准轴不垂直于横轴、横轴不垂直于竖轴等残余误差。

削弱或消除上述误差的具体方法如下:

- (1) 采用盘左、盘右观测取平均值的方法,可以消除视准轴不垂直于水平轴、水平轴不垂直于竖轴和水平度盘偏心差的影响。
- (2) 采用在各测回间变换度盘观测位置,取各测回平均值的方法,可以削弱由于水平度盘刻画不均匀给测角带来的影响。
- (3) 仪器竖轴倾斜引起的水平角测量误差无法采用一定的观测方法来消除。因此,在使用经纬仪之前应严格检校,确保水准管轴垂直于竖轴;同时,在观测过程中,应特别注意仪器的严格整平。

3.6.2 观测误差

1. 仪器对中误差

在安置仪器时,由于对中不准确,造成仪器中心与测站点不在同一条铅垂线上,由此所产生的误差称为对中误差。如图 3-26 所示, A 、 B 为两个目标点, O 为测站点, O' 为仪器中心, OO' 的长度称为测站偏心距,用 e 表示,其方向与 OA 之间的夹角 θ 称为偏心角。 β 为正

确角值, β' 为观测角值。 δ_1 、 δ_2 分别为在 O 点和 O' 点观测 A 、 B 两个目标时方向线的夹角。 D_1 、 D_2 分别为测站至目标点 A 、 B 的距离。由对中误差引起的角度误差 $\Delta\beta$ 为

$$\Delta\beta = \beta - \beta' = \delta_1 + \delta_2 \quad (3-16)$$

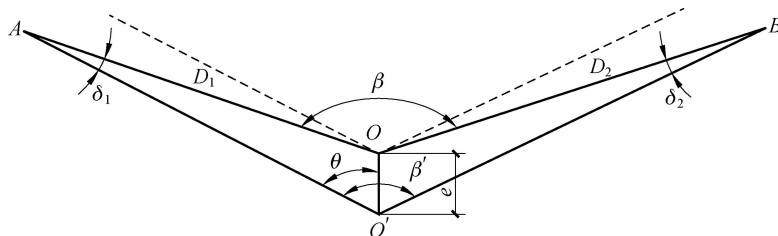


图 3-26 仪器对中误差

因为 δ_1 、 δ_2 很小,故

$$\delta_1 \approx \frac{e \sin \theta}{D_1} \rho, \delta_2 \approx \frac{e \sin(\beta' - \theta)}{D_2} \rho$$

于是

$$\Delta\beta = e\rho \left[\frac{\sin \theta}{D_1} + \frac{\sin(\beta' - \theta)}{D_2} \right] \quad (3-17)$$

分析式(3-17)可知,对中误差对水平角的影响有以下特点:

- (1) $\Delta\beta$ 与偏心距 e 成正比, e 越大, $\Delta\beta$ 越大。
- (2) $\Delta\beta$ 与测站点到目标的距离 D_1 、 D_2 成反比, D_1 、 D_2 越小,误差越大。
- (3) $\Delta\beta$ 与水平角 β' 和偏心角 θ 的大小有关,当 $\beta' = 180^\circ$, $\theta = 90^\circ$ 时, $\Delta\beta$ 最大。

例如,当 $e = 3 \text{ mm}$, $\theta = 90^\circ$, $\beta' = 180^\circ$, $D_1 = D_2 = 100 \text{ m}$ 时, $\Delta\beta = 12.4''$,这就说明仪器对中误差对水平角观测的影响是很大的。

由于对中误差引起的角度误差不能通过观测方法来消除,因此在观测水平角前应仔细对中,当边长较短或两个目标与仪器接近于一条直线时,要特别注意仪器的对中,避免引起较大的误差。一般规定对中误差的绝对值不应超过 3 mm 。

2. 目标偏心差

在观测水平角时,常用测钎、测杆或觇牌等立于目标点上作为观测标志,当观测标志倾斜或没有立在目标点的中心时,将产生目标偏心差。

如图 3-27 所示, O 为测站, A 为地面目标点, OA 的距离为 D , AA' 为测杆,测杆长度为 L ,倾斜角度为 α ,则目标偏心距 e 为

$$e = L \sin \alpha \quad (3-18)$$

目标偏心距对观测方向的影响为

$$\epsilon = \frac{e}{D} \rho = \frac{L \sin \alpha}{D} \rho \quad (3-19)$$

由式(3-19)可知,目标偏心误差 ϵ 对水平角观测的影响是与偏心距 e 成正比,与距离 D 成反比。为了减小目标偏心差,在瞄准测杆时,测杆应立直,并尽可能瞄准测杆的底部。当目标较近,又不能瞄准目标的底部时,可采用悬吊垂线或选用专用觇牌作为目标。

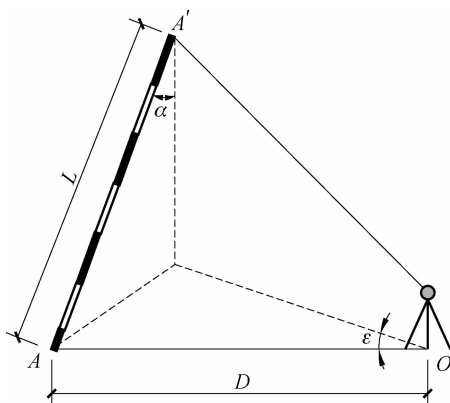


图 3-27 目标偏心误差

3. 整平误差

整平误差是指在安置仪器时由于竖轴不竖直而产生的误差。竖轴相对于铅垂线的倾角越大,对角度测量的影响就越大。一般规定在观测过程中水准管偏离零点不得超过一格。

4. 瞄准误差

视准轴偏离目标理想瞄准线的夹角称为瞄准误差,主要取决于人眼分辨两点的角度 P 和望远镜的放大倍率 V 。

人眼分辨两点的最小视角一般为 $60''$ 。设经纬仪望远镜的放大倍率为 V ,则用该仪器观测角度时,其瞄准误差 m_v 为

$$m_v = \pm P/V = \pm 60''/V \quad (3-20)$$

由于 DJ6 型光学经纬仪望远镜的放大倍率一般为 25~30 倍,因此,瞄准误差 m_v 一般为 $2.0'' \sim 2.4''$ 。

另外,瞄准误差与目标的大小、形状、颜色和大气透明度等有关。因此,在观测中应尽量消除视差,选择适宜的照准标志,熟练操作仪器,掌握瞄准方法,并仔细瞄准以减小误差。

5. 读数误差

读数误差主要取决于仪器的读数设备,同时也与照明情况和观测者的经验有关。对于 DJ6 型光学经纬仪,用分微尺测微器读数,一般估读误差不超过分微尺最小分划的十分之一,即不超过 $\pm 6''$,对于 DJ2 型光学经纬仪一般不超过 $\pm 1''$ 。若反光镜进光情况不佳,读数显微镜调焦不好,以及观测者的操作不熟练,则估读的误差可能会超过上述数值。因此,读数前必须仔细调节读数显微镜,使度盘与测微尺影像清晰,也要仔细调整反光镜,使影像亮度适中,然后再仔细读数。使用测微轮时,一定要使度盘分划线位于双指标线的正中央。

3.6.3 外界条件的影响

外界条件的影响很多,如大风、松软的土质会影响仪器的稳定,地面的辐射热会引起物像的跳动,观测时大气透明度和光线的不足会影响瞄准精度,温度变化会影响仪器的正常状态等,这些因素都直接影响测角的精度。因此,在测量水平角时,要采取有效措施,使这些外

界条件的影响降低到较小的程度。例如,选择有利的观测时间确保成像清晰稳定,踩实三脚架的脚尖,为仪器撑遮阳伞;尽可能使视线远离建筑物、水面及烟囱顶,以防止这些部位因气温引起的大气水平密度变化所产生的旁折光影响等。

3.6.4 水平角观测的注意事项

通过上述分析,为了提高测角精度,观测时必须注意以下几点:

- (1) 观测前应先检验仪器,若不符合要求则要进行校正,使仪器误差降低到最低程度。
- (2) 仪器要安置稳定,三脚架的脚尖应踩实,仔细对中和整平,一测回内不得重新对中和整平。
- (3) 标志应竖直,尽可能瞄准标志的底部。
- (4) 观测时应严格遵守各项操作规定和限差要求,尽量采用盘左、盘右观测。
- (5) 观测水平角时应用十字丝交点对准目标底部,观测竖直角时应用十字丝交点对准目标顶部。
- (6) 对一个水平角进行 n 个测回的观测时,各测回间应按 $180^\circ/n$ 来分配水平度盘的初始位置。
- (7) 读数应准确、果断,对观测结果应及时记录和计算。若发现错误或误差超过限差,应立即重测。
- (8) 选择有利的观测时间进行观测,避开不利因素。

3.7 电子经纬仪的介绍

图 3-28 所示为北京拓普康有限公司生产的 DJD2 型电子经纬仪。电子经纬仪具有与光学经纬仪相似的外形结构,在仪器操作上也有相同之处,但读数系统各不相同。光学经纬仪采用的是玻璃度盘刻画并注记,配以光学测微器读取角值;电子经纬仪采用的是光电度盘,利用光电扫描度盘获取照准方向的电信号,通过电路对信号的识别、转换、计数,拟合成相应的角值显示在显示屏上。



图 3-28 DJD2 型电子经纬仪

电子经纬仪具有以下特点:

- (1) 实现了测量、读数、记录、计算、显示的自动一体化,避免了人为的影响。
- (2) 仪器的中央处理器配有专用软件,可自动对仪器的几何条件进行检校和各种计算改正。
- (3) 储存的数据可通过 I/O 接口输入计算机并做相应的数据处理。
- (4) 与光电测距仪联机可组成组合式全站仪,能进行各种测量工作。

3.7.1 光电度盘的测角原理

电子经纬仪的关键部件是光电度盘,仪器获取电信号与光电度盘的形式有关。目前,有光栅式、区格式和编码式三种测角形式的光电度盘。下面着重介绍光栅度盘和区格式度盘的测角原理。

1. 光栅度盘的测角原理

如图 3-29(a)所示,在光学玻璃圆盘上全圆均匀而密集地刻画出径向刻线,构成了明暗相间的条纹——光栅,这种度盘称为光栅度盘。通常光栅的刻线宽度 a 与缝隙宽度 b 相等,两者之和 d 称为栅距,如图 3-29(b)所示。栅距所对的圆心角即为光栅度盘的分划值。在光栅度盘的上、下方对应安装有照明器(发光管)和光电接收管,光栅的刻线不透光,缝隙透光,即可把光信号转换为电信号。当照明器和接收管随照准部相对于光栅度盘转动时,由计数器计取转动所累计的栅距数,就可得到转动的角度值。测角时,当仪器照准零(起始)方向后,使计数器处于“0”状态,当仪器转动照准另一个目标时,计数器计取两个方向间所夹的栅距数,由于两个相邻光栅间的夹角已知,计数器所计取的栅距数经过处理后就可得到相应的角值。光栅度盘的计数是累计计数的,故通常称这类读数系统为增量式测角系统。

由上述可知,光栅度盘的栅距就相当于光学度盘的分划,栅距越小,分划值就越小,测角精度就越高。由于栅距不可能很小,一般在直径为 80 cm 的度盘上每毫米刻画 50 条线,栅距分划值为 $1'43.8''$,但仍然不能满足精度要求。为了提高测角精度,必须采用电子方法对栅距进行细分,分成几十甚至几千等份,这种电子法细分就是莫尔(Moire)技术。该方法是将一段密度相同的光栅[指示光栅,见图 3-29(c)]与光栅度盘相叠,并使它们的刻线相互倾斜一个微小的角度 θ ,就会在与光栅几乎垂直的方向上形成莫尔条纹,如图 3-30 所示。

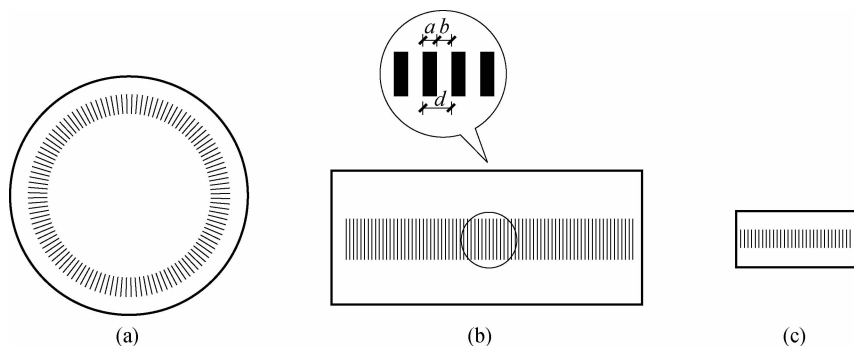


图 3-29 光栅度盘

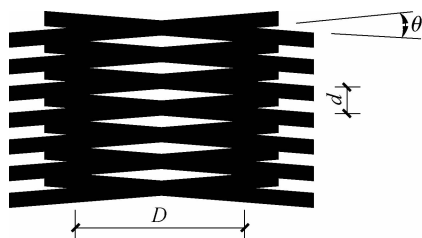


图 3-30 莫尔条纹

根据光学原理,莫尔条纹有如下特点:

- (1)两个光栅之间的倾角越小,条纹间距 D 越宽,则相邻明条纹或暗条纹之间的距离越大。
- (2)在垂直于光栅构成的平面方向上,条纹亮度按正弦规律周期性变化。
- (3)当光栅在垂直于刻线的方向上移动时,条纹顺着刻线方向移动。光栅在水平方向上相对移动一条刻线,莫尔条纹则上下移动一个周期,即移动一个纹距 D ,如图 3-30 所示。
- (4)纹距 D 与栅距 d 之间满足式(3-21)的关系。

$$D = \frac{d}{\theta} \rho_1 \quad (3-21)$$

式中, ρ_1 为两个光栅(指示光栅与光栅度盘)之间的夹角($'$), $\rho_1 = 3\ 438'$ 。

例如,当 $\theta = 20'$ 时,纹距 $D = 172d$,即纹距比栅距放大了 172 倍。这样,就可以对纹距进一步细分,达到测微和提高测角精度的目的。

光栅度盘电子经纬仪的指示光栅、发光管(光源)、光电转换器和接收二极管的位置是固定的,而光栅度盘与经纬仪照准部一起转动。发光管发出的光信号通过莫尔条纹落到光电接收管上,度盘每转动一个栅距(d),莫尔条纹就移动一个周期(D)。所以,当望远镜从一个方向转动到另一个方向时,通过光电管的光信号周期数就是两个方向间的光栅数。为了提高测角精度和角度分辨率,在仪器工作时,在每个周期内再均匀地填充 n 个脉冲信号,计数器对脉冲计数,则相当于光栅刻画线的条数又增加了 n 倍,即角度分辨率提高了 n 倍。

仪器在操作中会顺时针和逆时针转动。所以计数器在累计栅距时必须相应增减。例如,在照准目标时,若转动超过该目标及反转回到目标时,计数器就会自动地增减相应的多转栅距数。为了判别测角时照准部旋转的方向,采用光栅度盘的电子经纬仪的电子线路中还必须要有判向电路和可逆计数器。判向电路用于判别照准时旋转的方向,若顺时针旋转,则计数器累加;若逆时针旋转,则计数器累减。

2. 区格式度盘的测角原理

区格式度盘的测角原理如图 3-31 所示。度盘全圆刻有 1 024 个径向分划(格栅),每个分划包括一条刻线和一个空隙(刻线不透光,空隙透光),其分划值为 φ_0 ,测角时度盘以一定的速度旋转,因此此系统称为动态测角系统。度盘的外缘装有固定指示光栏 L_S ,内缘装有可随照准部旋转的可动指示光栏 L_R (相当于光学度盘的指标线)。测角时, L_R 随照准部转动, L_S 与 L_R 之间构成角度 φ 。度盘在电动机的带动下以一定的速度旋转,其分划被光栏扫描而计取两个光栏之间的分划数,从而得到角值。

两种光栏距度盘中心远近不同,当照准部旋转以瞄准不同目标时,彼此互不影响。为消

除度盘偏心差,同名光栏应按对径位置设置,共4个(两对,图中仅示一对)。竖直度盘的固定光栏指向天顶方向。光栏上装有发光二极管和接收光电二极管,分别处于度盘的上、下侧。发光二极管发射红外光线,通过光栏孔隙照到度盘上。当微型电动机带动度盘旋转时,因度盘上明暗条纹而形成透光亮度的不断变化,这些光信号被设置在度盘另一侧的光电二极管接收,转换成正弦波的电信号而输出,用以测角。测量角度时,首先要测出各方向的方向值才能得到角度。方向值表现为 L_S 与 L_R 之间的夹角 φ 。设一对明暗条纹(一个分划)相应的角值(栅距)为 φ_0 ,其值为 $\varphi_0 = 360^\circ \div 1\,024 = 21.094' = 21'05.64''$ 。

由图3-31可知, $\varphi = n\varphi_0 + \Delta\varphi$,即 φ 角等于 n 个整周期 φ_0 与不足整周期的 $\Delta\varphi$ 之和。 n 与 $\Delta\varphi$ 分别由粗测和精测求得。

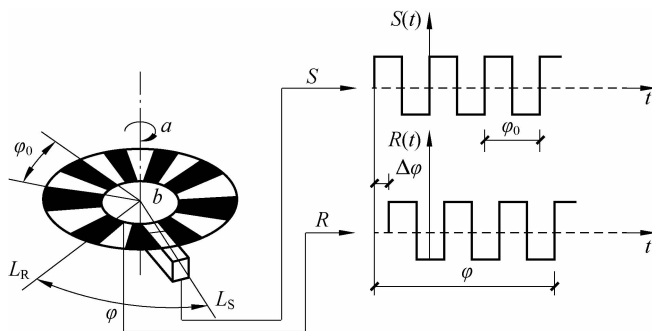


图 3-31 区格式度盘的测角原理

1) 粗测

在度盘同一径向的内外缘上设有两对(每 90° 一个)特殊标记(标志分划) a 和 b ,在度盘旋转的过程中,光栏对度盘进行扫描,当某一标志被 L_S 或 L_R 中的一个首先识别后,脉冲计数器立即计数,当该标志达到另一光栏后,计数停止。因为脉冲波的频率是已知的,所以由脉冲数可以统计相应的时间 T_i ,电动机的转速也是已知的,相应于转角 φ_0 所需的时间 T_0 也就知道了。将 T_i/T_0 取整(取其比值的整数部分)就得到 n_i 。由于有4个标志,故可得到 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 ,经微处理机比较确定 n 值,从而得到 $n\varphi_0$ 。由于 L_S 、 L_R 识别标志的先后不同,因此所测角可以是 φ 也可以是 $360^\circ - \varphi$,这可由角度处理器做出正确判断。

2) 精测

如图3-31所示,当光栏对度盘进行扫描时, L_S 、 L_R 各自输出正弦波电信号 S 和 R ,经整形形成方波,运用测相技术便可测出相位差 $\Delta\varphi$ 。 $\Delta\varphi$ 的数值是采用在此相位差里填充脉冲计算得到的,由脉冲数和已知的脉冲频率(约为1.72 MHz)算得相应时间 ΔT ,因度盘上有1024个分划,度盘转动一周输出1024个周期的方波,那么对应于每一个分划均可得到一个 $\Delta\varphi_i$ 。设 φ_0 所对应的周期为 T_0 , $\Delta\varphi_i$ 所对应的周期为 ΔT_i ,则有 $\Delta\varphi_i = \varphi_0 \Delta T_i / T_0$ 。

在进行角度测量时,机内微处理器自动将整周度盘的1024个分划所测得的 $\Delta\varphi_i$ 取平均值作为最后结果。粗测和精测信号同时输入处理器并完成角度(方向)值的拟合,然后由液晶显示器显示或记录于数据终端。

动态测角系统直接测得的是时间 T 和 ΔT ,因此,微型电动机的转速要均匀、稳定,这是十分重要的。

3.7.2 电子经纬仪的使用

电子经纬仪同光学经纬仪一样,可用于水平角、竖直角和视距的测量。它配备有 RS 通信接口,与光电测距仪、电子记录手簿和成套附件相结合,可进行平距、高差、斜距和点位坐标等的测量及测量数据的自动记录。它广泛应用于地形、地籍、控制测量和多种工程测量中。其操作方法与光学经纬仪相同,分为对中、整平、照准和读数四步,读数时为显示器直接读数。下面介绍电子经纬仪的几个基本操作。

1. 初始设置

电子经纬仪在作业之前应根据需要进行初始设置。初始设置项目包括角度单位(360° 、 400 gon 、 $6\ 400\text{ mil}$,出厂一般设为 360°)、视线水平时竖盘零读数(水平为 0° 或天顶为 0° ,出厂设天顶为 0°)、自动断电时间、角度最小显示单位($0.2''$ 、 $1''$ 或 $5''$)、竖盘指标零点补偿(自动补偿或不补偿)、水平角读数经过 0° 、 90° 、 180° 、 270° 时的蜂鸣声(鸣或不鸣)、与不同类型的测距仪的连接方式等。在进行初始设置时,按相应功能键,仪器进入初始设置模式状态,而后逐一设置;设置完成后按确认键(一般为 Enter 键)予以确认,仪器返回测量模式,测量时仪器将按设置显示数据。

2. 开关电源

按电源开关键,电源打开,显示屏显示全部符号。几秒钟后显示角度值,即可进行测量工作。按住电源开关不动,数秒钟后电源关闭。

3. 水平度盘的配置

瞄准目标后,制动仪器,按水平度盘归零键(一般为 0 SET)两次,即可使水平角度盘读数为 $0^\circ00'00''$ 。若需要将瞄准某一方向时的水平度盘读数设置为指定的角度值,则在瞄准目标后,制动仪器,按水平角设置键(一般为 HANG),此时光标在水平角位置闪烁,用数字键输入指定角值(注意“度”应输足 3 位,“分”“秒”输足 2 位,不够补 0)后,再按确认键予以确认。

4. 水平角的锁定与解除

在观测水平角的过程中,若需保持所测(或对某方向值预置)水平角时,应按水平角锁定键(一般为 HOLD)两次,此时水平角值符号闪烁,再转动仪器时水平角不会发生变化。当照准至所需方向后,再按锁定键一次,即可解除锁定功能,此时仪器照准方向的水平角就是原锁定的水平角。该功能适用于用复测法观测水平角。

在使用电子经纬仪测角时,应该注意开机后仪器会进行自检,在确认自检合格、电池电压满足仪器供电需求时,才可进行测量。在测量工作开始前,有的仪器需平转一周设置水平度盘读数指标,纵转望远镜一周设置竖直度盘读数指标。仪器具有自动倾斜校正装置,当倾斜超过传感器的工作范围时,应重新整平再进行工作。当遇到不稳定的环境或大风天气时,应关闭自动倾斜校正功能。竖直角指标差在检校时不能发生错误操作,否则不能检校或可能会损坏仪器内置程序。此外,光学经纬仪使用和保管的注意事项也均适用于电子经纬仪。

思考练习题

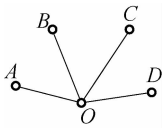
- 1. 名词解释：水平角、竖直角、天顶距、竖盘指标差、对中、整平、目标偏心差、水平度盘配置、测回法。
- 2. 在同一竖直面内瞄准不同高度的点在水平度盘和竖直度盘上的读数是否相同？为什么？
- 3. 竖盘指标水准管起什么作用？自动归零仪器为什么没有指标水准管？
- 4. 怎样确定竖直角计算公式？
- 5. 经纬仪有哪些几何轴线？其意义是什么？它们之间的正确关系是什么？
- 6. 安置经纬仪时为什么要对中和整平？
- 7. 试述水平角测量时使用的测回法和方向观测法。
- 8. 对经纬仪进行 $CC \perp HH$ 和 $HH \perp VV$ 的检校时为什么有目标高度的要求？经纬仪的各项检验是否有顺序要求？为什么？
- 9. 对于 DJ6 型光学经纬仪，如何利用分微尺进行读数？
- 10. DJ2 型经纬仪如何进行读数？观测水平角时，如何进行水平度盘归零设置和指定角值的配置？
- 11. 在实际工程测量作业中，对现场进行一次测量，在原地 A 处放置经纬仪，将距离 A 点 150 m、处于同一水平面的 B 点作为目标，用盘左、盘右瞄准 B 点，水平读数分别为 $\alpha_L = 180^\circ 45' 58''$ ， $\alpha_R = 0^\circ 23' 35''$ 。通过盘左、盘右的数据，判断经纬仪的视准轴与横轴之间是否相互垂直？若两轴不垂直，照准差是多少？在实际工程测量作业中，如何做到视准轴与横轴相互垂直？
- 12. 在一次竖直角现场观测中，测量员将有关测量数据记录在表 3-5 中，试将该表内容补充完整。

表 3-5 竖直角观测记录

测站点	目标	盘位	竖直度盘读数 /(° ' ")	竖 直 角			备 注
				半测回角值 /(° ' ")	指标差 /(")	一测回角值 /(° ' ")	
O	1	左	65 27 48				
		右	294 32 25				
	2	左	92 18 25				
		右	267 41 58				

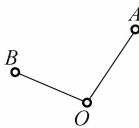
- 13. 在一次工程实际测量中，测量员使用经纬仪对一个目标进行测量，已知盘左时竖盘读数为 $62^\circ 34' 56''$ ，该经纬仪的竖盘指标差 $x = \pm 10''$ ，竖盘注记见表 3-5，那么该目标的竖直角是多少？
- 14. 在一次现场用方向观测法观测水平角的过程中，测量员将有关测量数据记录在表 3-6 中，试将该表内容补充完整。

表 3-6 用方向观测法观测水平角的记录

测站号	测回数	目标	水平度盘读数		2 <i>c</i> /([°])	平均读数 /([°] ' ")	归零后 方向值 /([°] ' ")	各测回归零 后方向值 /([°] ' ")	备 注
			盘左 /([°] ' ")	盘右 /([°] ' ")					
O	1	A	0 06 12.5	90 06 14					
		B	45 34 23.3	225 34 24					
		C	123 45 25.6	303 45 23.2					
		D	256 45 39.5	76 45 34					
		A	0 06 14.5	180 06 17.2					
	2	A	90 12 45.2	270 12 23.2					
		B	135 40 40.2	225 40 21.2					
		C	213 29 45.2	33 29 34.7					
		D	346 23 57.2	166 23 45.9					
		A	90 12 35.2	270 12 23.1					

15. 整理水平角观测记录(见表 3-7),计算出该水平角。

表 3-7 水平角观测记录

观测点	盘位	目标	水平度盘读数 /([°] ' ")	半测回 角值 /([°] ' ")	一测回 角值 /([°] ' ")	各测回 平均角值 /([°] ' ")	备 注
O	左	A	0 00 12				
		B	52 56 18				
	右	A	180 00 24				
		B	232 56 54				
O	左	A	60 00 24				
		B	112 56 36				
	右	A	240 00 24				
		B	292 56 48				
O	左	A	120 00 18				
		B	172 56 30				
	右	A	300 00 24				
		B	352 56 54				