

模块 1 测量的基础知识

学习目标

【知识目标】 了解测绘学的基本概念及水利工程测量的任务与作用,用水平面代替水准面对距离测量、高程测量和角度测量的影响,测量误差的基本内容;掌握测量的基准面和基准线的含义,常用坐标系统的概念及应用,测量的基本工作和测量工作的基本原则,相对误差的计算;熟悉测量误差的来源和分类。

【技能目标】 能够根据已知高程求解高差,并根据高差判断地面的高低情况;能够根据测区范围的大小判断是否能用水平面代替水准面;能够在后续技能训练中始终遵循测量工作的基本原则;能够进行相对误差的计算。

本模块主要介绍了测绘学的基本概念和研究对象,水利工程测量的任务与作用,测量工作的基准面和基准线,水利工程测量中常用的坐标系统及其建立方法,用水平面代替水准面对测量工作的影响,测量的基本工作和原则及测量误差的基本内容。本模块的重点是水利工程测量的主要任务;水准面、大地水准面、相对高程、绝对高程、高差,独立平面直角坐标系的相关内容;测量的基本工作和原则;地球曲率对水平距离、高程和水平角的影响等。本模块的难点是高斯平面直角坐标系。

1.1 测绘学概述

测绘学是研究地球的形状和大小,确定地球表面点的位置,以及如何将地球表面的地形、地貌及其他地理信息测绘成图的科学。测绘学的研究对象是地球。我们知道,物体的几何形状和大小都是由组成该物体的一些特定点的位置所决定的,因此,测绘学的实质是确定地球表面点的位置。

1.1.1 测绘学的产生和发展

测绘学是随着人们生产和生活的需要而发展起来的。人类在地球上的存在总要有个生存、发展的场所,如土地及地面上的房屋就是最基本的场所。这些场所的建造和使用都离不开点的位置的确定,离不开边界点、边界线的确定,离不开这些场所的面积及工程位置的测定。测绘学正是适应人类生存、发展的需要和工程建设的定位技术需求而发展起来的。漫长人类文明史中的生产活动与测绘科学技术息息相关。最初,人们利用绳子丈量土地,用指南针定向,随着望远镜的发明、最小二乘理论的提出、摄影技术的应用,以及近代航空航天、激光、电子等技术的飞速发展及其在测绘工作中的广泛应用,测绘学正朝着自动化、数字化和高精度化的方向发展。

1.1.2 测绘学的分支学科

由于测绘学所涉及的研究对象、方式、手段各有不同,因而测绘学在自身的发展中形成了特色各异的其他测绘分支学科,这些分支学科是大地测量学、地形测量学、摄影测量与遥感学、工程测量学、海洋测量学与地图学等。

1. 大地测量学

大地测量学是研究和确定地球形状、大小、整体与局部运动和地表面点的几何位置,以及其形变理论和技术的学科。近年来,随着人造地球卫星技术的发展,大地测量学又分为常规大地测量学和卫星大地测量学。

2. 地形测量学

地形测量学是研究小区域内测绘地形图的基本理论、技术和方法的学科。它基本上可以不考虑地球曲率的影响,而把小区域内的地球表面当作水平面对待。

3. 摄影测量与遥感学

摄影测量与遥感学是研究利用摄影相片来测定物体的形状、大小和空间位置的学科。由于获得相片的方法不同,摄影测量与遥感学又分为地面摄影测量学、航空摄影测量学、水下摄影测量学和航天摄影测量学。

4. 工程测量学

工程测量学是研究工程建设与自然资源开发中,在规划、勘测设计、施工与管理各个阶段进行测量工作的理论、方法与技术的学科。工程测量学是测绘科学技术在国民经济和国防建设中的直接应用。

5. 海洋测量学

海洋测量学是研究以海洋水体和海底为研究对象的测绘理论与技术的学科。

6. 地图学

地图学是研究模拟地图和数字地图的基础理论、设计、测绘、复制的技术方法及其应用的学科。

1.1.3 测绘学的任务与作用

1. 测绘学的任务

测绘学的任务主要包括地形图的测绘和施工测量两个方面。

(1)地形图的测绘。地形图的测绘是指用测量仪器经过测量和计算得到一系列测量数据,或将地球表面的地形按一定的比例缩小绘成地形图,供经济建设、国防建设和科学研究使用。地形图的测绘也称为测定。

(2)施工测量。施工测量是指将图纸上规划设计好的建筑物、构筑物的位置在实地标定出来,作为工程施工的依据。施工测量也称为测设。

除此之外,对高层建筑或其他重要建筑物、构筑物进行变形观测已经成为测绘学的又一个重要任务。

2. 测绘学在工程建设中的作用

测绘科学的应用范围非常广泛,在社会主义建设中起着十分重要的作用。在国防建设方面,必须应用地形图进行战略部署和战役的指挥工作;在经济建设方面,工程的勘测和设计需要测绘和使用地形图,工程施工需要测量工作做指导,工程竣工需要测绘竣工图,工程竣工使用阶段对一些大型或重要建(构)筑物还要进行变形观测;在科学研究方面,如空间科学技术、地壳变形、海岸变迁、地震预报等方面的研究都要使用地形图。测绘科学既要为房地产、灾害监视与调查、土地管理、环境保护文化教育等国民经济相关部门提供精确的测绘数据及地图资料,又要满足人民群众对各种地图的需要。

1.1.4 测绘学在水利工程中的应用

测绘学在水利工程中的应用即水利工程测量,水利工程测量的工作任务可概括为三大类,即测图、放样和监测,具体的有地形图的测绘、剖面图的测绘、水利施工及建筑物放样、变形观测等。

1. 地形图的测绘

地形图表示地球表面局部地区的地貌和地物。在水利工程测量中,地形图又分为库区地形图、流域面积图、坝址区地形图、堆料场地形图、河流(渠道)带状地形图等。

(1)库区地形图。在库区地形图的基础上可绘制出水位库容曲线和水位面积曲线,以便于查出不同水位的水面面积和水库蓄水量,并确定水库淹没范围。

(2)流域面积图。在地形图的基础上可勾画出河流的分水线,形成流域面积图。该图主要用于计算坝址以上的集水面积,以便于计算出水库的来水量和来沙量。

(3)坝址区地形图。坝址区地形图是在库区地形图的基础上绘制而成的。该图主要用于布置水库、布置施工场地、进行地勘工作,以及填绘地质图。

(4)堆料场地形图。堆料场地形图是在地形图的基础上配合地质资料绘制而成的。该图主要用于摸清库区料场的分布范围及其储量。

(5)河流(渠道)带状地形图。河流(渠道)带状地形图是指狭长地带的地形图,带状宽度为100~300 m,常用于河流、渠道等线形工程的初步设计和纸上定线。

上述各类地形图的测绘实质上也是地形图在各种情况下的应用,所以水利测量的一大任务就是地形图的施测。

2. 剖面图的测绘

剖面图可直观地反映地表的形状和走势。无论是计算土方量还是进行土坝脚的定线和清基边线的定线,都需要剖面图。剖面图分为纵剖面图和横剖面图。剖面图可通过实地测绘和在地形图上绘制两种途径获得,其中,经实地测绘得到的剖面图的精度较高。

3. 水利施工及建筑物放样

地形测量是把实地的形状、地物的位置和大小表示到图纸上。放样工作却恰恰相反,它是将图上设计好的点、线、面的位置反映到实地上。

(1)土坝的施工放样。土坝的施工放样包括坝轴线放样、清基边线放样、坝脚定线、边坡放样、放水涵洞(坝下埋管)放样和溢洪道放样等。

(2)隧道定线。由于隧道一般由两端同时掘进,因此必须进行隧道中心线及定坡线的定

向,以指导掘进,保证其准确贯通。

(3)中心线及轴线放样。在进行坝和渠道施工时需要测设轴线或进行中心线定位。

(4)建筑物放样。建筑物放样是指将图上设计好的建筑物准确地在地找出相应的位置。

无论采用哪一种放样,都要将图上有关的点、线、面的位置相应地表示在实地,并打上标志桩,以指导施工。

4. 变形观测

在水利工程的运行管理初期,应对某些大型的、重要的建筑物进行定期的变形观测。这里的变形主要是指水平方向和竖直方向的位移。若变形超过一定的限度,则工程质量将得不到保证,甚至会出现事故。因此,在水利工程建设中,变形观测占有重要地位。

1.2 地面点位的确定

1.2.1 地球的形状和大小

地面点位的确定需要建立坐标系,这与地球的形状和大小密切相关。

地球表面是极其不规则的,有高山、丘陵、平原、盆地、海洋等不同地形,形成不同的起伏变化。其中,珠穆朗玛峰的海拔为 8 844. 43 m,而位于北太平洋西部的马里亚纳海沟深达

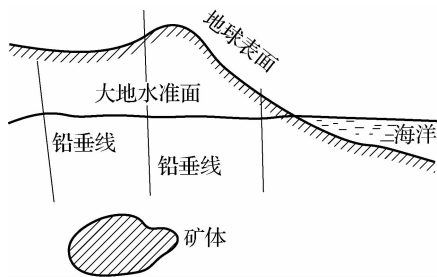


图 1-1 大地水准面

10 994 m,但它们与地球的尺度相比还是很小的。就整个地球而言,考虑到海洋几乎占地球表面的 71%,可以把地球想象成一个处于静止状态的海水面延伸穿过陆地所包围的形体,这个处于静止状态的海水面就是水准面,这个形体基本上代表了地球。但由于水位时高时低,因此水准面有无数个。在高度不同的水准面中选择一个高度适中的水准面作为平均海水面,这个没有风浪、没有潮汐的平均海水面就称为大地水准面(见图 1-1)。不同的国家或地区,通过验潮站观测潮汐变化来确定平均海水面,以作为该国家或地区的大地水准面。

由大地水准面所包围的形体称为大地体,大地体就代表了地球的形状和大小。

1.2.2 测量的基准面和基准线

水准面的特点是其处处与铅垂线方向正交。测量工作是通过安置测量仪器观测数据,并沿着铅垂线方向将这些数据投影到大地水准面上的,因此,大地水准面是测量工作的基准面,铅垂线是测量工作的基准线。

由于地球内部质量分布不均匀,引起在铅垂线方向上的不规则变动,使得大地水准面成为一个不规则、复杂的曲面,不便于计算与制图。为此,人们就用一个既可以用数学公式表示又很接近大地水准面的椭球面来代替大地水准面,这个椭球面称为参考椭球面(见图 1-2)。参考椭球面所包围的形体叫作参考椭球体。参考椭球体是由椭圆 ABCD 绕其短

轴 DB 旋转而成的,其形状和大小由椭圆长半轴 a 和短半轴 b 或扁率 α 决定。扁率的计算式为

$$\alpha = \frac{a-b}{a}$$

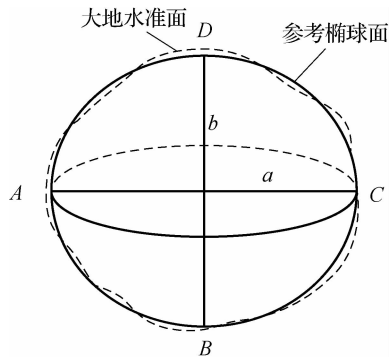


图 1-2 参考椭球面

参考椭球面与大地水准面不完全一致。对精密测量工作来说,必须考虑两者的差异,要通过计算进行数据转换;对普通测量来说,由于精度要求不高,当测量范围不大时可不考虑两者之间的差异,同时,由于扁率很小,为方便计算,可以将地球看成圆球体来进行处理,经计算其半径约为 6 371 km。

世界各国采用了适合本国的参考椭球。自 1980 年开始,我国基于 1975 年国际椭球建立了新的国家大地坐标系。2008 年 7 月 1 日,我国正式启用“2000 国家大地坐标系”。

1.2.3 水利工程测量中常用的坐标系统

坐标是表示地面点位置并从属于某种坐标系统的技术参数。根据用途的不同,表示地面点位置的坐标系统各有不同。

1. 地理坐标系

地理坐标系采用经纬度来表示地面点的投影位置。它表示出物体在地面上的位置,能明确显示出地物的方位(经线与南北方向相应,纬线与东西方向相应);同时,由于地球的自然特性,可以利用经度差表示时差,利用纬度表示地理现象所处的地理带,研究气候、土壤、植被等的空间分布规律。

我国位于东半球和北半球,所以各地的地理坐标都是东经和北纬,如西安某地的地理坐标为东经 $108^{\circ}56'$ 、北纬 $39^{\circ}45'$ 。

2. 平面直角坐标系

(1) 高斯平面直角坐标系。

① 高斯投影原理。地理坐标是球面坐标,若直接将其用于工程建设规划、设计、施工,会给计算和测量带来很多不便。因此,须将球面坐标按一定的数学法则归算到平面上,即测量工作中所称的投影。在测量工作中常用的是高斯投影,如图 1-3 所示。

高斯投影是设想将一个平面卷成一个空心椭圆柱,把它横着套在地球椭球外面,使空心圆柱的中心轴线位于赤道面内并通过球心,使地球椭球上某个投影范围内的中央子午

线(经线)与椭圆柱面相切,使椭球面上的图形投影到椭圆柱面上后保持角度不变,如图 1-3(a)所示。将某区域全部投影到椭圆柱上后,再将椭圆柱沿着通过南北极的母线切开并展成平面,并在该平面上定义平面直角坐标系,如图 1-3(b)所示。

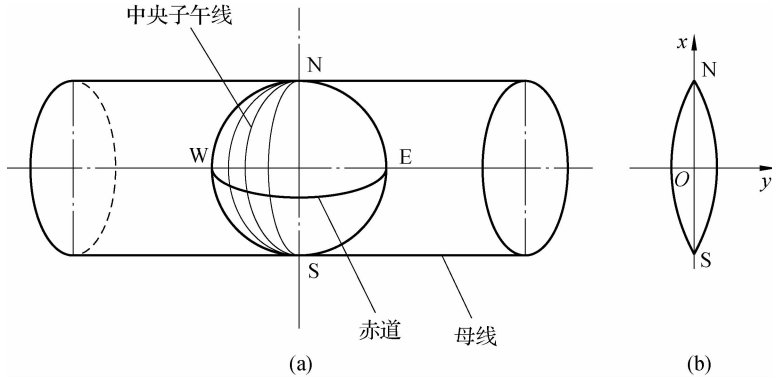


图 1-3 高斯投影法

②高斯投影带。为了控制变形,高斯投影法采用分带投影的方法,常用的是 6°带投影法和 3°带投影法。

a. 6°带投影法。6°带投影法是把地球按 6°的经差分成 60 个带,从首子午线开始自西向东编号,东经 0°~6°为 1 带,6°~12°为 2 带,依此类推,如图 1-4 所示。位于各分带中央的子午线称为中央子午线,设其经度为 λ_0 ,则在东半球 N 带中央子午线的经度可按式(1-1)计算;如果已知地面任意一点的经度 λ (单位为°),要计算该点所在的统一 6°带编号可按式(1-2)计算。

$$\lambda_0 = 6N - 3 \tag{1-1}$$

$$N = \text{INT}\left(\frac{\lambda}{6} + 1\right) \tag{1-2}$$

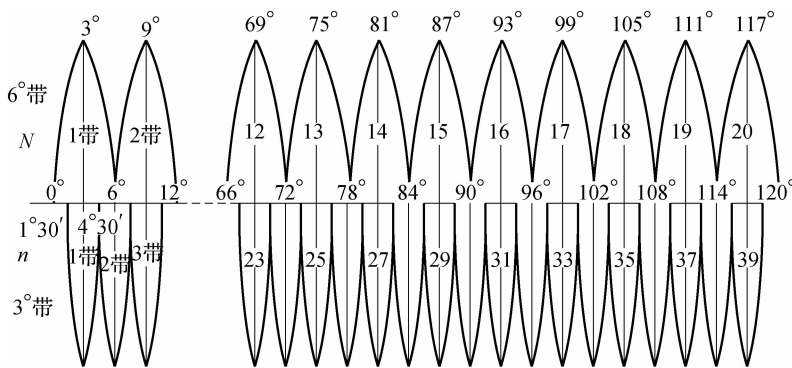


图 1-4 高斯投影分带

b. 3°带投影法。投影中,除中央子午线和赤道均为直线外,其余各纬线和经线均为曲线,且距中央子午线距离越大,投影变形越大,因此为了控制变形,可以选择统一 3°带投影。3°带投影是从东经 1°30' 起,每隔经差 3°划带,将整个地球分成 120 个带(见图 1-4)。式(1-3)表示了 3°带中央子午线经度 λ'_0 (单位为°)与带号 n 的关系。已知任意一点的经度 λ ,

要计算该点所在的统一 3° 带编号可按式(1-4)计算。

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

$$n = \text{INT}\left(\frac{\lambda}{3} + 0.5\right) \quad (1-4)$$

③高斯平面直角坐标系分析。由于在参考椭球面上,中央子午线与赤道相互垂直,因此经等角投影后的中央子午线与赤道也相互垂直。以中央子午线为坐标纵轴(x 轴,向北为正)、赤道为坐标横轴(y 轴,向东为正)、中央子午线与赤道的交点为坐标原点 O 组成的平面直角坐标系称为高斯平面直角坐标系。

我国位于北半球, x 坐标值恒为正, y 坐标值则有正有负(当测点位于中央子午线以东时为正,以西时为负)。例如,图 1-5(a)中的 B 点位于中央子午线以西,其 y 坐标值为负值,与其形成对比的 A 点的 y 坐标值为正值。对于 6° 高斯平面坐标系,最大的 y 坐标负值约为 -365 km 。为了避免 y 坐标出现负值,我国统一规定将每带的坐标原点向西移 500 km ,也就是给每个点的 y 坐标值加上 500 km ,使之恒为正值,如图 1-5(b)所示。为了能正确区分某点所处投影带的位置,规定在横坐标 y 值前加投影带号。如图 1-5 中的 B 点位于高斯投影 6° 带的 18 带内($N=18$),其实际横坐标值 $y_B = -105\,327.872 \text{ m}$,按照上述规定值应改写为 $y_B = 18\,394\,672.128 \text{ m}$ (其中,“18”表示 6° 带编号,“394 672.128”可由 $-105\,327.872 + 500\,000$ 求得);反之,由 y_B 可以求出该点的真正坐标,即 $394\,672.128 - 500\,000 = -105\,327.872 \text{ m}$ 。

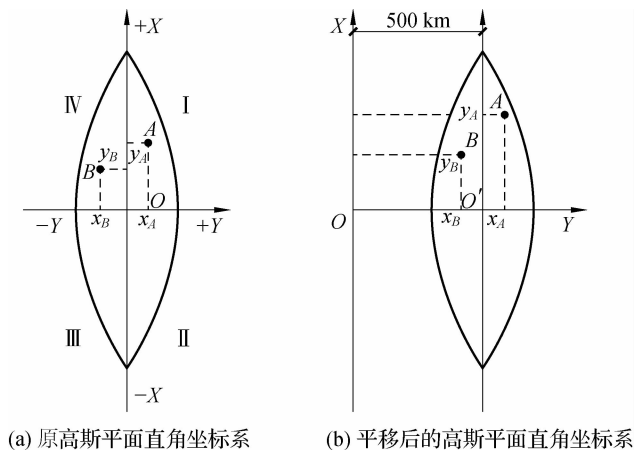


图 1-5 高斯平面直角坐标系

(2)独立平面直角坐标系。若测区范围较小(半径小于 10 m),可将该测区的大地水准面看成平面,直接将地面点沿铅垂方向投影到水平面上,用平面直角坐标系表示该点的位置,这种测区平面直角坐标系即独立平面直角坐标系。如图 1-6 所示,测量上使用的平面直角坐标系与数学上的笛卡尔坐标系有所不同,测量上将南北方向的坐标轴定为 X 轴(纵轴),自原点向北为正,向南为负;将东西方向的坐标轴定为 Y 轴(横轴),自原点向东为正,向西为负;象限按顺时针方向编号,并规定所有直线的方向都是以纵坐标轴北端为准按顺时针方向度量。这样,数学中的平面三角公式均可直接使用,同时便于测量过程中对方向和坐标的计算。在实际测量工作中,通常将独立平面直角坐标系的原点选在测区的西南角,以使测

区内的点的坐标均为正值。

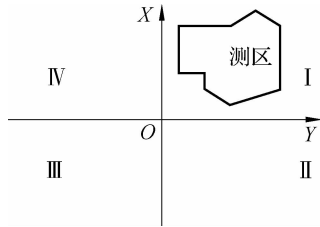


图 1-6 独立平面直角坐标系

3. 地心坐标系

地心坐标系是以地球质心为原点建立的空间直角坐标系,或以球心与地球质心重合的地球椭球面为基准面而建立的大地坐标系。地心坐标系通常分为地心空间直角坐标系(以 X 、 Y 、 Z 为坐标元素)和地心大地坐标系(以地心纬度 B 、地心经度 L 、高程 H 为坐标元素)。我国在用的地心坐标系主要有美国的全球定位系统(global positioning system, GPS)采用的WGS-84坐标系和 2000 国家大地坐标系(或称 CGS 2000),如图 1-7 所示。图中,BIH(Bureau International de l'Heure)指国际时间局,CTP(conventional terrestrial pole)指协议地极方向,IERRSS(International Earth Rotation and Reference Systems Service)指国际地球自转和参考系服务。

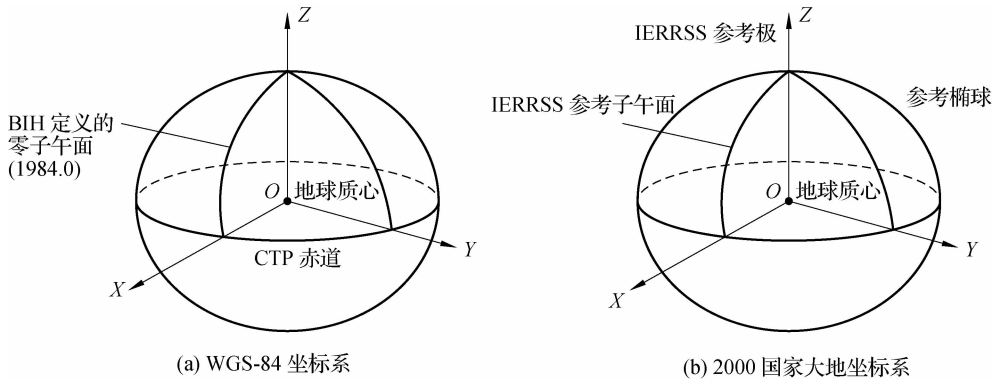


图 1-7 常见的地心坐标系

4. 高程坐标系

建立高程坐标系,首先要选择一个基准面。在一般测量工作中都是以大地水准面作为基准面。地面点沿铅垂线到大地水准面的距离称为该点的绝对高程或海拔,简称高程,通常用 H 表示。在图 1-8 中, A 、 B 两点的高程分别表示为 H_A 、 H_B 。大地水准面上的高程恒为零。

在我国境内所测定的高程点是以青岛验潮站历年观测的黄海平均海水面为基准面,并在青岛市观象山建立了水准原点。1956 年,我国以青岛验潮站 1950—1956 年的潮汐记录资料推算出的以大地水准面为基准引测出水准原点的高程为 72.289 m,以这个大地水准面为高程基准建立的高程系统称为“1956 年黄海高程系”。20 世纪 80 年代,我国又以青岛验潮站 1953—1977 年的潮汐记录资料推算出的以大地水准面为基准引测出水准原点的高程为 72.260 m,以这个大地水准面为高程基准建立的高程系统称为“1985 国家高程基准”。

地面点到任意水准面的铅垂距离,称为假定高程或相对高程,通常用 H' 表示。图 1-8 中 A、B 两点的相对高程分别表示为 H'_A 、 H'_B 。

地面两点间的绝对高程或相对高程之差称为高差,用 h 表示。如 A、B 两点的高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-5)$$

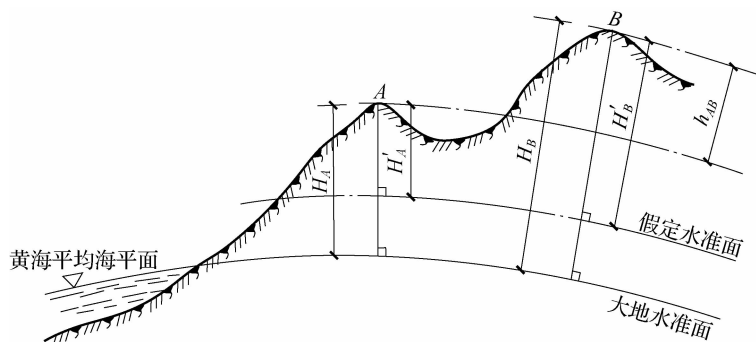


图 1-8 高程与高差

由此可见,地面两点之间的高差与采用的高程系统无关。

高差值有正有负。当 $h_{AB} > 0$ 时,表明 B 点高于 A 点;反之,B 点低于 A 点。当 $h_{AB} = 0$ 时,表明 B 点和 A 点的高程相等。

A 点相对于 B 点的高差与 B 点相对于 A 点的高差绝对值相等,但符号相反。

1.3 用水平面代替水准面的影响

小范围测量时允许把该测区的水准面看成水平面,但随着测区范围的增大,由此产生的误差也会增大。下面分析当测区范围究竟为多大时,用水平面代替大地水准面所产生的距离、高程、角度的变化才不会超过测图误差的允许范围。

1.3.1 用水平面代替水准面对水平距离的影响

如图 1-9 所示,用该地区中心点的切平面代替大地水准面,则地面点 A、B 在大地水准面上的投影分别为 a 、 b ,在水平面上的投影分别是 a' 、 b' , D 、 D' 分别为地面两点在大地水准面上和在水平面上的投影距离,据此可推导出用水平面代替水准面对水平距离的影响值,即

$$\Delta D = D' - D \approx \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-6)$$

式中, ΔD 为距离误差(mm)。

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-7)$$

式中, $\frac{\Delta D}{D}$ 为相对误差。

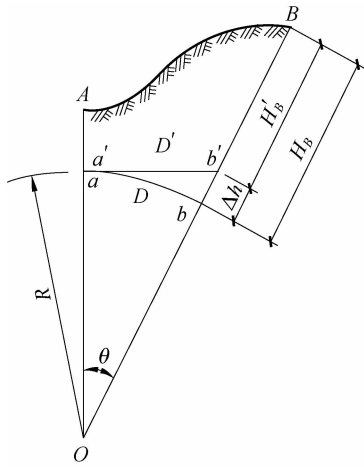


图 1-9 用水平面代替水准面对水平距离和高程的影响

当取地球半径 $R=6\,371\text{ km}$ 时, ΔD 及 $\frac{\Delta D}{D}$ 的值见表 1-1。

表 1-1 用水平面代替水准面引起的距离误差和相对误差

D/km	5	10	25	50	100
$\Delta D/\text{mm}$	1.0	8.2	128	1 026	8 212
$\frac{\Delta D}{D}$	1/5 000 000	1/1 200 000	1/195 000	1/48 000	1/12 000

从表 1-1 可以看出,当距离 $D=10\text{ km}$ 时,产生的距离相对误差为 $1/1\,200\,000$,这样小的误差,即使是精密量距,也是允许的。因此,在以 10 km 为半径的圆面积之内进行距离测量时,可以用切平面代替大地水准面,而不必考虑地球曲率对距离的影响。

1.3.2 用水平面代替水准面对高程的影响

如图 1-9 所示,可以推导出用水平面代替水准面对高程的影响值为

$$\Delta h = bB - b'B \approx \frac{D^2}{2R} \tag{1-8}$$

式中, Δh 为高程误差(mm)。

当取地球半径 $R=6\,371\text{ km}$ 时, Δh 值见表 1-2。

表 1-2 用水平面代替水准面引起的高程误差

D/km	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
$\Delta h/\text{mm}$	0.8	3.1	13	28	50	78

Δh 是随距离平方的增加而增加的。当距离 $D=200\text{ m}$ 时,就有 3.1 mm 的高程误差,这是不允许的。因此,在进行高程测量时,即使距离很近,也要考虑地球曲率对高程的影响。

1.3.3 用水平面代替水准面对水平角度的影响

由球面三角学可知,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 (水平角误差),其值为

$$\epsilon = \rho \frac{S}{R^2} \quad (1-9)$$

式中, ϵ 为球面角超值("); S 为球面多边形的面积(km^2); R 为地球半径(km); ρ 为1弧度的秒值, $\rho=206\,265''$ 。将不同的面积 S 代入式(1-9)可求出球面角超值,见表1-3。

表 1-3 用水平面代替水准面引起的水平角误差

球面多边形面积 S/km^2	球面角超值 $\epsilon/''$
10	0.05
50	0.25
100	0.51
300	1.52

由表1-3可以看出,当面积 $S=100\text{ km}^2$ 时,用水平面代替水准面所产生的角度误差仅为 $0.51''$,所以,在测量工作中用水平面代替水准面引起的水平角误差可以忽略不计。

1.4 测量工作概述

1.4.1 测量的基本工作

测量工作的主要目的是确定点的坐标和高程。在实际测量工作中,地面点的坐标和高程一般不能直接测出,而是通过观测坐标和高程已知的点与坐标和高程未知的点之间的几何位置关系,计算出待定点的坐标和高程。

如图1-10所示,设 A 、 B 两点为坐标、高程已知的点, C 为待定点。在 $\triangle ABC$ 中, AB 边的边长是已知的,只要测量出一条未知边(AC 或 BC)的边长 D_1 或 D_2 和一个水平角(α 或 β),就可以推算出 C 点的坐标。可见,测定地面点坐标的主要工作是测量水平角和水平距离;欲求 C 点的高程,先要测量出高差 h_{AC} 或 h_{BC} ,然后推算出 C 点的高程,所以测定地面点的高程主要是测量高差。

综上所述,距离、角度、高差是确定地面点位置的三个基本要素,距离测量、角度测量和高差测量是测量的三项基本工作。

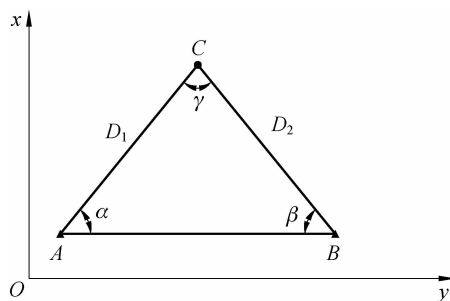


图 1-10 确定地面点位的测量工作

1.4.2 测量工作的基本原则

进行测量工作时,需要测定(或测设)许多特征点(碎部点)的坐标和高程。如果从一个

特征点开始到下一个特征点逐点进行施测,虽然可以得到各点的位置,但由于测量中不可避免地存在误差,会导致前一点的误差传递到下一点,这样累加起来可能使点位误差达到不可容许的程度;另外,逐点传递的测量方法的效率也很低。因此,测量工作必须按照一定的原则进行。

(1)“从整体到局部,先控制后碎部,由高级到低级”是测量工作应遵循的基本原则。也就是先在测区内选择一些有控制作用的点(控制点),把它们的坐标和高程精确地测定出来,然后分别以这些控制点为基准,测定出附近碎部点的位置。这种方法不但可以减少碎部点测量误差的累积,而且可以同时在各个控制点上进行碎部测量,提高工作效率。

(2)在控制测量或碎部测量工作中都有可能发生错误,小错误会影响成果质量,严重的错误则会造成返工浪费,甚至造成不可挽回的损失。因此,为了避免出错,测量工作必须遵循“前一步工作未做检核不进行下一步工作”的原则。

1.5 测量误差的基本内容

1.5.1 测量误差概述

1. 测量误差的概念及对测量人员的要求

测量工作是由观测者使用一定的测量仪器和工具,采用一定的测量方法和程序,在一定的观测环境中进行的。对某一个未知量进行测定的过程,称为观测。对某个量进行重复观测时就会发现,这些观测值之间往往存在一些差异。例如,对某一段距离丈量若干次,量得的长度通常是互有差异。另一种情况是,即使已经知道某几个量之间应该满足某一理论关系,但当对这几个量进行观测后发现实际观测结果往往不能满足应有的理论关系。例如,从几何关系上知道一个平面三角形的三个内角之和应等于 180° ,但如果对这个三角形进行观测,则三个内角的观测值之和常常不等于 180° 。

大量实践表明,在测量工作中,当对某一未知量进行多次观测时,无论测量仪器多么精密,观测进行得多么仔细,观测值之间总是存在着差异。这种差异实质上表现为各次测量所得的数值与未知量的真实值之间的差值,即测量误差。

测量误差是不可避免的,为了确保测量成果具有较高的质量,使产生的误差不超过一定限度,测量人员必须要充分了解影响测量结果的误差来源和性质,以便采取适当的措施限制或减小误差的产生;同时要掌握处理误差的理论和方法,以便合理消除误差并取得合理的数值。优秀的测量员不仅要能进行熟练的测量,还应具有对误差情况进行综合分析,能恰当地选择和应用与作业目的要求相适应的测量方法的能力。

2. 测量误差的分类

按测量误差产生的规律,测量误差分为系统误差和偶然误差两类。

(1)系统误差。在相同的观测条件下进行一系列的观测,如果误差在大小、符号上表现出一定的规律变化,那么这种误差就称为系统误差。

①系统误差的产生。产生系统误差的原因很多,主要是使用的仪器不够完善及外界条件的影响。例如,量距时所用钢尺的长度比标准尺略长或略短,则每量一整尺均存在尺长误

差,误差的大小和正负号是一定的,量的整尺数越多,误差就越大。因此,应尽可能全部地或部分地消除系统误差的影响。

②系统误差的消除。系统误差具有累积性,对测量结果的影响很大,但是又具有一定的规律性,可以用以下方法进行处理:

a. 用计算的方法加以改正。例如,在量距前将所用钢尺与标准长度进行比较得出差数,进行尺长改正。

b. 用一定的观测方法加以消除。例如,进行水准测量时,将仪器安置在离两把水准尺大致相等的地方,可以消除水准仪视准轴不平行于水准管轴的误差;在经纬仪测角中,用盘左、盘右观测值取中数的方法可以消除视准轴误差、横轴误差和竖盘指标差等的影响。

c. 将系统误差限制在允许范围内。有的系统误差既不便于计算改正,又不能采用一定的观测方法加以消除,如经纬仪照准部管水准器轴不垂直于仪器竖轴的误差对水平角的影响。对于这类系统误差,只能按规定的要求对仪器进行精确检校,并在观测中仔细整平,将其影响减小到允许的范围内。

(2)偶然误差。在相同的观测条件下做一系列的观测,如果误差在大小和符号上都表现出偶然性,即误差的大小不等,符号不同,那么这种误差就称为偶然误差。

①偶然误差的产生及消除。偶然误差是由于人的感觉器官和仪器的性能受到一定的限制,以及观测时受到外界条件的影响等原因所造成的。例如,用望远镜瞄准目标时,由于观测者眼睛的分辨能力和望远镜的放大倍数有一定的限度,观测时受光线强弱的影响,照准目标不会绝对正确,可能偏左一些,也可能偏右一些。又如,水准测量估读至毫米时,每次估读也不绝对相同,其影响可大可小,存在偶然性,但在相同条件下重复观测某个量出现的大量偶然误差却具有一定的规律性。

为了提高观测成果的质量,同时也为了发现和消除错误,在测量工作中,一般都要进行多余观测。例如,测量一个平面三角形的内角,只需要测得其中的任意两个内角值即可确定其形状,但实际上也应测出第三个内角值,以便检校内角和,从而判断观测结果是否正确。

②偶然误差的特性。偶然误差从表面上看,其数值的大小和符号的正负没有什么规律。但从统计学角度来看,偶然误差还是有规律的。为了便于理解,先从下述实例进行分析。

在相同的观测条件下,独立地观测了 217 个三角形的全部内角,每个三角形内角之和应等于它的真值 180° ,但由于观测值存在误差,因此往往不相等。三角形内角和的真误差(观测值与真值之间的差值)应为

$$\Delta_i = (L_1 + L_2 + L_3)_i - 180^\circ$$

式中, $(L_1 + L_2 + L_3)_i$ 为第 i 个三角形内角观测值之和; $i = 1, 2, \dots, n$ 。

现取误差区间的间隔 $d\Delta = 3''$,将这一组误差按其正负号与误差值的大小进行排列,出现在某区间内误差的个数称为频数,用 K 表示,频数与误差的总个数 n 的比值 K/n ,称为误差在该区间的频率。统计结果列于表 1-4 中,此表称为误差频率分布表。

表 1-4 误差频率分布表

误差区间 $d\Delta$	+ Δ		- Δ	
	K	K/n	K	K/n
$>0''\sim 3''$	30	0.138	29	0.134
$>3''\sim 6''$	21	0.097	20	0.092
$>6''\sim 9''$	15	0.069	18	0.083
$>9''\sim 12''$	14	0.065	16	0.074
$>12''\sim 15''$	12	0.055	10	0.046
$>15''\sim 18''$	8	0.037	8	0.037
$>18''\sim 21''$	5	0.023	6	0.028
$>21''\sim 24''$	2	0.009	2	0.009
$>24''\sim 27''$	1	0.005	0	0
$>27''$	0	0	0	0
合计	108	0.498	109	0.503

从表 1-4 中可以看出,小误差出现的百分比较大误差出现的百分比大,绝对值相等的正负误差出现的百分比相仿,绝对值最大的误差不超过某一个定值(本例为 $27''$)。在其他测量结果中也显示出上述同样的规律。大量实验统计结果表明,特别是当观测次数较多时,偶然误差具有以下规律性。

- 在一定条件下的有限观测值中,偶然误差的绝对值不会超过一定的限度。
- 绝对值较小的误差比绝对值较大的误差出现的可能性大。
- 绝对值相等的正误差与负误差出现的次数大致相等,或者说,它们出现的概率相等。
- 当观测次数无限增多时,偶然误差的算术平均值趋近于零,即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[\Delta]}{n} = 0 \quad (1-10)$$

式中, $[\Delta]$ 为误差总和,即 $[\Delta] = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n = \sum_{i=1}^n \Delta_i$; n 为观测次数。

换言之,偶然误差的理论平均值为零。

特性 a 说明误差出现的范围,即误差的有限性;特性 b 说明误差呈单峰性,或称小误差的密集性;特性 c 说明误差方向的规律,称为对称性;特性 d 是由特性 c 导出的,说明误差具有抵偿性。

3. 测量误差产生的原因

测量误差产生的原因很多,概括起来有以下三方面。

- (1) 仪器误差。由于精度上的限制和结构上的缺陷,或校正不完善而引起的误差,称为

仪器误差。如水准仪的水准管轴不平行于视准轴,不论校正工作做得多么仔细,总是不可避免地会有 i 角(见“2.4 微倾式水准仪的检验与校正”)存在,这样在观测时就必然会由此而产生误差。

(2)周围环境的影响。观测时,受周围环境条件,如温度、湿度、风、雾、照明、大气折光等的影响会产生测量误差。例如,温度不仅会给钢尺丈量带来误差,也会给水平角观测和水准测量带来误差。周围环境条件复杂多变,难以准确地掌握其规律。

(3)观测者的影响。由于观测者的感觉器官的鉴别能力有限,因此在进行仪器的安置、照准、读数等操作时都会产生误差。

上述三个因素是引起观测误差的根源。通常将这三方面因素总称为观测条件。观测条件好,测量误差就小,观测质量就高;反之,观测条件差,测量误差就大,观测质量就差。测量工作中,在观测条件基本相同的情况下进行的观测,可以认为其观测质量也基本上是一致的,称为等精度观测;在不同观测条件下进行的各项观测,则认为其观测质量是不一致的,称为非等精度观测。

4. 粗差

在观测结果中,有时还会出现错误,如读错、记错或测错等,这些统称为粗差。粗差在观测结果中是不允许出现的。为了杜绝粗差,除应认真仔细作业外,还必须采取必要的检核措施。例如,对距离进行往、返测量,对角度进行重复观测,对几何图形进行必要的多余观测,用一定的几何条件进行检核等。

1.5.2 评定精度的标准

在一定观测条件下进行一组观测,必然对应着一种偶然误差分布。若分布较为密集,则表示该组观测质量较好,也即观测精度较高;若分布较为离散,则表示该组观测质量较差,也即观测精度较低。精度是指偶然误差分布密集或离散的程度。

在相同的观测条件下所进行的一组观测,由于它对应着同一种误差分布,故这一组中的每个观测值均称为等精度观测值。若两组观测成果的误差分布相同,则这两组观测成果的精度相等;反之,则精度不等。

既然精度是指一组误差分布的密集或离散的程度,那么分布越密集,就表示在该组误差中绝对值较小的误差所占的个数相对就越多。在此情况下,该组误差的平均大小就反映了该组观测精度的高低。

用一组误差的平均大小作为衡量精度的指标,实际上有几种不同的定义。以下是几种常用的精度指标。

1. 中误差

中误差即观测误差的标准差 σ ,其定义为

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{[\Delta\Delta]}{n} \quad (1-11)$$

式中, $[\Delta\Delta]$ 为一组同精度观测误差 Δ_i 自乘的总和; n 为观测数。

用式(1-11)求 σ 值时要求观测数 n 趋近无穷大,但这在实际测量工作中是很难做到的。在实际测量工作中,观测数总是有限的,故一般采用式(1-12)计算。

$$m = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n}} \quad (1-12)$$

式中, m 为中误差。

比较式(1-11)与式(1-12)可以看出,标准差 σ 与中误差 m 的不同在于观测个数的多少,标准差为理论上的观测精度指标,而中误差则是观测数 n 有限时的观测精度指标。所以,中误差实际上是标准差的近似值,统计学上称为估值,随着 n 的增加, m 将趋近 σ 。

【例 1-1】 设有甲、乙两组观测值,其真误差如下。

甲组: $-4''$ 、 $-2''$ 、 $0''$ 、 $-4''$ 、 $+3''$

乙组: $+6''$ 、 $-5''$ 、 $0''$ 、 $+1''$ 、 $-1''$

试分别求出两组观测值的中误差。

【解】 甲、乙两组观测值的中误差分别为

$$m_{\text{甲}} = \pm \sqrt{\frac{16+4+0+16+9}{5}} = \pm 3.0''$$

$$m_{\text{乙}} = \pm \sqrt{\frac{36+25+0+1+1}{5}} = \pm 3.5''$$

由【例 1-1】可以看出甲组观测值比乙组观测值的精度高,因为乙组观测值中有较大的误差,用平方能反映较大的影响,所以在测量工作中采用中误差作为衡量精度的标准。

再次指出,中误差 m 是表示一组观测值的精度。例如, $m_{\text{甲}}$ 是表示甲组观测值中每一个观测值的精度,而不能通过将每次观测所得的真误差(如 $-4''$ 、 $-2''$ 、 $0''$ 、 $-4''$ 、 $+3''$)与中误差($\pm 3.0''$)相比较,来说明一组中哪一次的精度高或低。

2. 极限误差

中误差不代表个别误差的大小,因此,在衡量某个观测值的质量,决定其取舍时,还要引入极限误差的概念,极限误差又称为允许误差,简称限差。偶然误差的特性 a 说明,在一定条件下,误差的绝对值有一定的限值。根据误差理论可知,在等精度观测的一组误差中,误差落在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 、 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 、 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 中的概率分别为

$$\left. \begin{aligned} P(-\sigma < \Delta < +\sigma) &\approx 68.3\% \\ P(-2\sigma < \Delta < +2\sigma) &\approx 95.4\% \\ P(-3\sigma < \Delta < +3\sigma) &\approx 99.7\% \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式(1-13)说明,绝对值大于两倍中误差的误差出现的概率约为 4.6%,而绝对值大于三倍中误差的误差出现的概率约为 0.3%,已经是概率接近于零的小概率事件,或者说是不可能事件。因此,在《工程测量规范》(GB 50026—2007)中,为确保观测成果的质量,通常规定以三倍或两倍中误差为偶然误差的允许误差或限值,即

$$\Delta_{\text{允}}(\text{或 } \Delta_{\text{限}}) = 3m \quad (1-14)$$

式中, $\Delta_{\text{允}}$ (或 $\Delta_{\text{限}}$)为偶然误差的允许值(或限值)。

超过式(1-14)中限差的观测值应舍去不用,或返工重测。

3. 相对误差

中误差和极限误差都是带有测量单位的数值,在测量上称为绝对误差。在某些测量工作中,绝对误差不能完全反映出观测的质量。例如,分别丈量了 1 000 m 及 50 m 两段距离,其中误差均为 ± 0.1 m,显然不能认为这两段距离的精度相同。这时为了更客观地反映实际情

况,引进了一个新的评定精度标准,即相对误差。

相对误差等于中误差的绝对值与相应观测值的比值,常用分子为 1 的分数形式来表示。显然,相对误差没有量纲,即

$$\text{相对误差} = \frac{\text{误差的绝对值}}{\text{观测值}} = \frac{1}{T} \quad (1-15)$$

例如,分别丈量了 1 000 m 及 50 m 两段距离,其中误差均为 ± 0.1 m,前者的相对误差为 $\frac{0.1}{1\,000} = \frac{1}{10\,000}$,后者的相对误差为 $\frac{0.1}{50} = \frac{1}{500}$,由比值可知,前者的丈量精度高。

思考与练习

1. 测绘学研究的对象是什么?
2. 水利工程测量的任务是什么?
3. 名词解释:水准面、大地水准面、绝对高程、相对高程、高差。
4. 已知 $H_A = 12\,934.231$ m, $H_B = 12\,954.531$ m,试求 h_{AB} 和 h_{BA} 。
5. 如何理解水平面代替水准面的限度问题?
6. 测量工作的基本内容和原则分别是什么?
7. 国内某地点高斯平面直角坐标 $x = 2\,053\,423.342$ m, $y = 35\,431\,356.134$ m。该高斯平面直角坐标系的意义是什么?
8. 研究测量误差的目的是什么?
9. 系统误差与偶然误差有什么区别? 在测量工作中,对这两种误差应如何处理?
10. 通常用什么标准来衡量一组观测结果的精度?
11. 甲组丈量 A、B 两点间的距离,往测为 158.260 m,返测为 158.270 m。乙组丈量 C、D 两点间的距离,往测为 202.840 m,返测为 202.828 m。计算两组丈量结果,并比较其精度高低。

模块 2 水准测量

学习目标

【知识目标】 了解水准仪的基本结构及组成;了解水准测量的误差来源和消除方法;掌握水准测量的原理与方法;熟悉 DS3 型水准仪的读数方法与使用方法。

【技能目标】 能够熟练掌握水准仪的操作方法;能够进行水准测量的成果计算;能够进行水准仪的检校。

本模块主要介绍水准测量的原理和方法、水准仪的使用和检校、水准测量的误差等内容。本模块的重点内容是水准测量原理、水准器的作用、水准仪的操作与检校、水准测量的施测程序及成果计算、水准测量误差的影响和消除方法。本模块的难点是高差闭合差的调整和水准仪的检校。

2.1 水准测量概述

2.1.1 水准测量的原理

测定地面点高程的工作称为高程测量,它是测量的基本工作之一。高程测量按所使用的仪器和施测方法的不同,可以分为水准测量、三角高程测量、GPS 高程测量和气压高程测量。水准测量是目前一种精度较高的高程测量方法,它广泛应用于国家高程控制测量、工程勘测和施工测量中。

水准测量是利用水准仪提供的一条水平视线读取竖立于地面两个点上水准尺的读数,测定出两点间的高差,然后,根据已知点的高程推算出待定点的高程。

如图 2-1 所示,已知 A 点的高程 H_A ,欲求 B 点的高程 H_B ,可在 A、B 两点的中间安置一台能提供水平视线的仪器——水准仪,并分别在 A、B 两点上竖立带有刻划的标尺——水准尺,当水准仪视线水平时,依次照准 A、B 两点上的水准尺并读数。若沿 AB 方向测量,规定 A 为后视点,其标尺读数 a 称为后视读数;B 为前视点,其标尺读数 b 称为前视读数。根据几何学中平行线的性质可知,A、B 两点的高差为

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

显然,地面上两点间的高差等于后视读数减去前视读数。根据式(2-1)算得的高差可能为正也可能为负。因此,在高差值前须注上相应的“+”“—”符号。高差为正,说明前视点比后视点高;高差为负,说明前视点比后视点低。

在计算高程的过程中,高差应连同符号一并运算。由图 2-1 可知,待定点 B 的高程为

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

在工程测量中还有一种应用比较广泛的计算方法,即由视线高程计算 B 点的高程。由图 2-1 可知, A 点的高程加上后视读数等于水准仪的视线高程,简称视线高,设为 H_i ,即

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

则 B 点的高程等于视线高减去前视读数,即

$$H_B = H_i - b = (H_A + a) - b \quad (2-4)$$

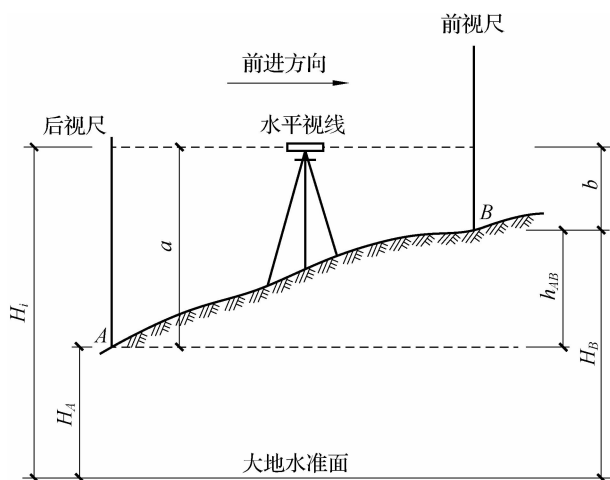


图 2-1 水准测量图示

2.1.2 测站和转点

在水准测量中,每安置一次仪器进行观测的地点,称为一个测站。在实际工作中,已知点和待定点往往距离较远或高差较大,仅安置一次仪器不可能测得它们的高差,必须分成若干站,逐站安置仪器连续进行观测。如图 2-2 所示,当 A 、 B 两点相距较远或高差较大且安置一次仪器无法测得其高差时,就需要在两点间增设若干个作为传递高程的临时立尺点进行连续设站观测。这些立尺点称为转点(turning point, TP),如图 2-2 中的 TP_1 、 TP_2 、 \dots 、 TP_n 点。

设图 2-2 中测出的各站高差为

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= a_1 - b_1 \\ h_2 &= a_2 - b_2 \\ &\dots \\ h_n &= a_n - b_n \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

则 A 、 B 两点间高差的计算公式为

$$h_{AB} = \sum_{i=1}^n h_i = \sum_{i=1}^n a_i - \sum_{i=1}^n b_i \quad (2-6)$$

式(2-6)表明, A 、 B 两点间的高差等于各测站后视读数之和减去前视读数之和。式(2-6)可以用来检核高差计算的正确性。

这种连续多次设站测定高差,最后取各站高差代数和求得两点间高差的方法,称为附和水平测量或连续水准测量。

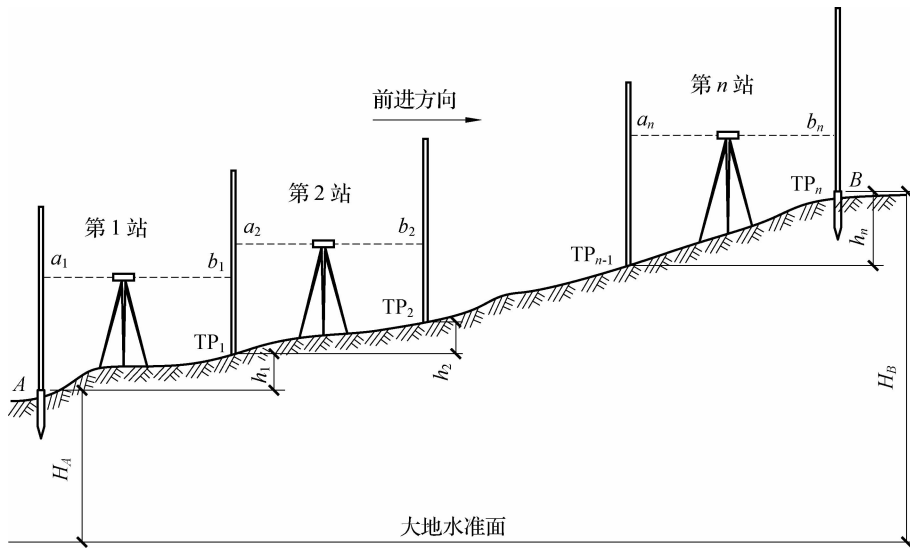


图 2-2 连续设站水准测量原理

2.2 水准测量的器具及其使用

水准测量所用的仪器为水准仪,工具有水准尺和尺垫等。目前工程测量中常用的水准仪有微倾式水准仪、自动安平水准仪、精密水准仪和电子水准仪。

2.2.1 微倾式水准仪

国产微倾式水准仪的型号有 DS05、DS1、DS3 和 DS10 四个等级。其中,“D”和“S”分别是“大地测量”和“水准仪”的首字汉语拼音的声母;数字是指各等级水准仪每千米往返测高差中数(平均高差)的中误差,以毫米(mm)为单位。在工程建设中使用最多的是 DS3 型普通水准仪。

图 2-3 为我国生产的 DS3 型微倾式水准仪,数字 3 表示用这种仪器进行水准测量时,每千米往返测高差中数的中误差为 ± 3 mm。

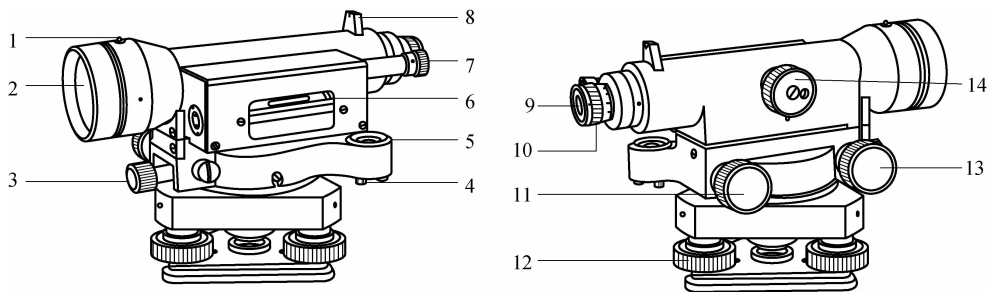


图 2-3 DS3 型微倾式水准仪

- 1—准星; 2—物镜; 3—水平制动螺旋; 4—圆水准器校正螺丝; 5—圆水准器; 6—管水准器;
7—管水准气泡观察窗; 8—照门; 9—目镜; 10—目镜调焦螺旋; 11—微倾螺旋;
12—脚螺旋; 13—水平微动螺旋; 14—物镜调焦螺旋

水准仪主要由望远镜、水准器和基座三个部分组成。

1. 望远镜

望远镜是用来照准目标和对水准尺进行读数的设备。它由物镜、调焦对光透镜、十字丝分划板及目镜等组成,如图 2-4 所示。镜筒外面装有准星,用来初步照准目标。目标通过物镜在望远镜内形成倒立的小物像(实像);转动物镜调焦螺旋,调焦对光透镜则随之前后移动,可使物像落到十字丝平面上。再经过目镜的放大作用,使物像和十字丝同时放大成虚像。放大后的虚像与眼睛直接看到的目标大小的比值,称为望远镜放大率,通常用 V 表示。放大率是鉴别望远镜质量的主要指标。DS3 型水准仪的望远镜放大率一般不低于 28 倍。

如图 2-4 所示,物镜光心与十字丝交点的连线 CC 称为视准轴。视准轴是水准仪在测量中用来读数的视线。

十字丝分划板的形式较多,常见的几种形式如图 2-5 所示。一般是在玻璃平板上刻有相互垂直的纵横细线,称为横丝(或中丝)和竖丝(或纵丝)。与横丝平行而等距的上下两根短细线,称为视距丝,用于测量距离。调节目镜调焦螺旋,可使十字丝成像清晰。

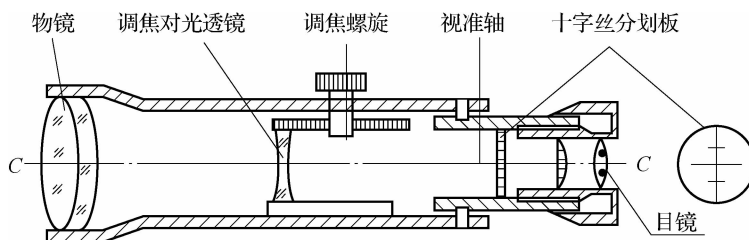


图 2-4 望远镜的构造

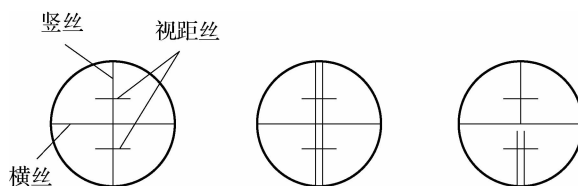


图 2-5 十字丝分划板的常见形式

2. 水准器

水准仪上的水准器是利用液体受重力作用后气泡居于高处的特性来判断望远镜的视准轴是否水平及仪器竖轴是否竖直的装置。水准器通常分为管水准器(简称水准管)和圆水准器两种。

(1) 水准管。

① 水准气泡、分划线及分划值。水准管是一个两端封闭的玻璃管,外形如图 2-6(a)所示。管的内壁被研磨成有一定半径的圆弧状,管内装有黏滞性小而易流动的液体(酒精或乙醚),装满后加热使液体膨胀而排出一小部分,然后将两端封住,待冷却后管内便形成一个小空间,这个空间即水准气泡。由于气体比液体轻,因此,无论水准管处于水平还是倾斜位置,气泡总处于管内最高点。

水准管壁上刻有 2 mm 间隔的分划线,用来判断气泡居中的位置,如图 2-6(b)所示。分

划线的对称中心是水准管圆弧的中点,称为水准管的零点,如图 2-6 中的 O 点。过零点与水准管圆弧相切的直线 LL 称为水准管轴。当气泡两端与零点对称,即气泡中点与水准管零点重合时,称为气泡居中,这时水准管轴 LL 一定处于水平位置。

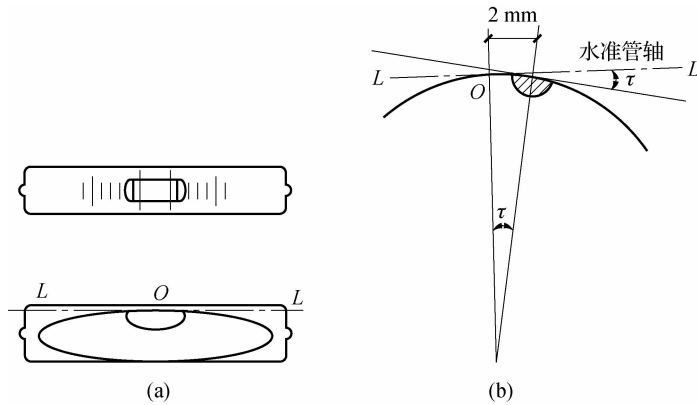


图 2-6 水准管与分划

水准管上 2 mm 间隔的弧长所对的圆心角称为水准管分划值,一般用 τ 表示,其值为

$$\tau = \frac{2}{R} \rho \quad (2-7)$$

式中, τ 为水准管分划值($''$); R 为水准管圆弧半径(mm);其他符号意义同前。

水准管分划值与圆弧半径成反比,半径越大,分划值越小,整平的精度越高,气泡移动也越灵活。因此,一般把水准气泡移动至最高点的能力称为水准器的灵敏度。DS3 型水准仪的水准管分划值一般为 $20''/2\text{ mm}$,它的几何意义为当水准气泡移动 2 mm 时,水准管轴倾斜的角度为 $20''$ 。

②符合水准器。为了提高水准管气泡居中的精度,目前水准仪多采用符合水准器,如图 2-7(a)所示。符合水准器就是在水准器上设置一组符合棱镜,当气泡两端的半边影像经过三次反射后,其影像反映在望远镜的符合水准器的放大镜内。当气泡不居中时,气泡两半边的影像错开,如图 2-7(b)所示;当转动微倾螺旋使气泡两半边的影像吻合时,气泡完全居中,如图 2-7(c)所示。

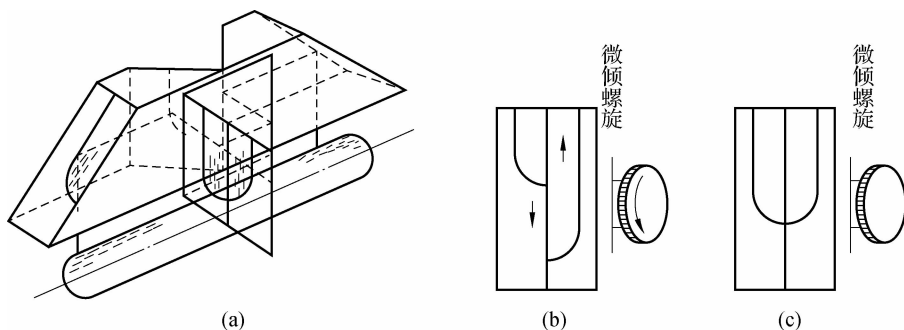


图 2-7 符合水准器的构造及调整居中

③水准管的安装与校正。制造水准仪时,应使水准管轴平行于望远镜的视准轴。当旋

转微倾螺旋使水准管气泡居中时,水准管轴处于水平位置,从而使望远镜的视准轴也处于水平位置。

水准管一般装在圆柱形的、上面开有窗口的金属管内,用石膏固定。如图 2-8 所示,一端用球形支点 A ,另一端用四个校正螺丝将金属管连接在仪器上。用校正针拨动校正螺丝,可以使水准管相对于支点 A 做升降或左右移动,从而使校正水准管轴平行于望远镜的视准轴。

(2)圆水准器。圆水准器由玻璃圆柱管制成,其顶面内壁为磨成一定半径 R 的球面,中央刻有小圆圈,其圆心 O 为圆水准器的零点,过零点 O 的球面法线为圆水准器轴 $L'L'$,如图 2-9 所示。当圆水准气泡居中时,圆水准器轴处于竖直位置;当气泡不居中,气泡偏移零点 2 mm 时,轴线倾斜的角度值称为圆水准器的分划值,一般为 $8' \sim 10'$ 。圆水准器的分划值大于管水准器的分划值,它通常用于粗略整平仪器。

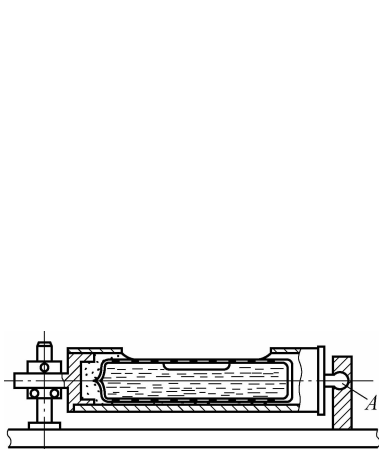


图 2-8 水准管的安装

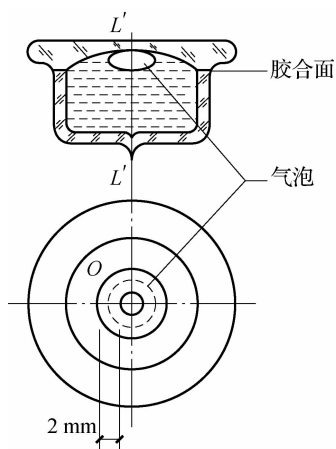


图 2-9 圆水准器

制造水准仪时,应使圆水准器轴平行于仪器竖轴。当旋转基座上的三个脚螺旋使圆水准气泡居中时,圆水准器轴处于竖直位置,从而使仪器竖轴也处于竖直位置。

3. 基座

基座的作用是支承仪器的上部,其被中心螺旋连接到三脚架上。基座主要由轴座、脚螺旋、底板和三角压板构成。

2.2.2 水准尺和尺垫

1. 水准尺

水准尺一般用优质木料或玻璃钢制成,长度为 $2 \sim 5\text{ m}$ 。根据构造可以分为直尺、折尺和塔尺,其中,直尺又分为单面尺和双面尺两种,如图 2-10 所示。

钢钢尺通常是单面尺,一般尺长为 3 m 或 2 m ,常与精密水准仪配套使用,用于国家一、二等水准测量。

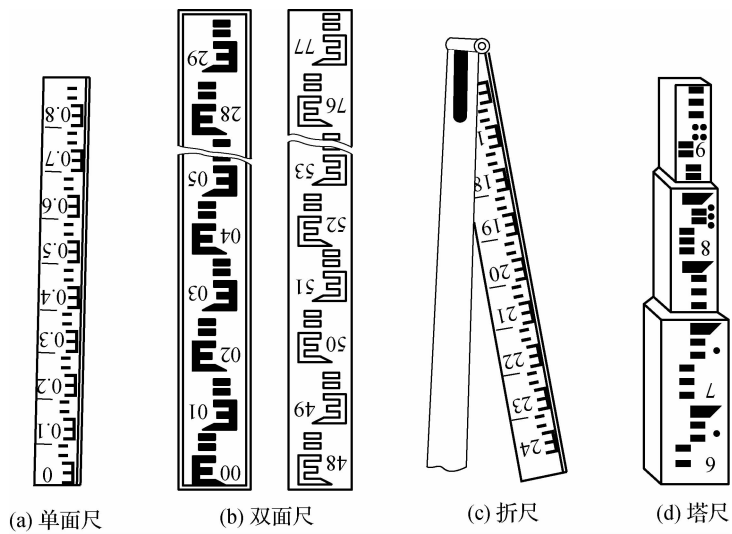


图 2-10 水准尺

双面尺一般尺长为 3 m, 尺面每隔 1 cm 涂以黑白或红白相间的分格, 每分米处注有数字。尺子底面钉有铁片, 以防磨损。双面尺的一面为黑白相间, 称为黑面尺; 另一面为红白相间, 称为红面尺。在水准测量中, 水准尺必须成对使用。每对双面水准尺黑面尺底部的起始数均为零, 而红面尺底部的起始数分别为 4.687 m 和 4.787 m。为使水准尺更精确地处于竖直位置, 多数水准尺的侧面装有圆水准器。塔尺和折尺常用于图根水准测量, 尺面上的最小分划为 1 cm 或 0.5 cm, 在每 1 m 和每 1 dm 处均有注记。因塔尺和折尺连接处的稳定性较差, 故仅适用于普通水准测量。

2. 尺垫

尺垫如图 2-11 所示, 其用生铁铸成, 一般为三角形, 中央有一个凸出的半圆球, 水准尺立于半圆球上, 尺垫下方有三个尖脚可以插入土中。尺垫通常用于转点上, 使用时应放在地上踩稳固。

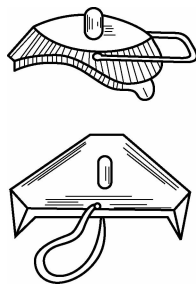


图 2-11 尺垫

2.2.3 微倾式水准仪的使用

1. 安置仪器

在测站上,首先松开三脚架架腿的固定螺旋,伸缩三个架腿使高度适中,再拧紧固定螺旋。在平坦地面上,通常使三个脚架腿与地面交点的连线大致成等边三角形,使架腿高度适中,脚架顶面大致水平,用脚踩实架腿,使脚架稳定、牢固;在斜坡地面上,应将两个架腿安置在坡下,另一架腿安置在斜坡方向上,踩实各个架腿,这样安置仪器比较稳固;在较光滑的地面上安置仪器时,三脚架的三个腿一定不能分得太开,以防止滑动。三脚架安置好后,从仪器箱中取出仪器,旋紧中心连接螺旋将仪器固定在架头上。

2. 粗略整平

松开水平制动螺旋,转动仪器,将圆水准器置于两个脚螺旋之间。如图 2-12(a)所示,当气泡中心偏离零点位于 m 处时,用两手同时相对(向内或向外)转动 1、2 两个脚螺旋(此时气泡的移动方向与左手拇指的移动方向相同),使气泡沿 1、2 两个脚螺旋连线的平行方向移至中间 n 处,然后转动第三个脚螺旋,使气泡居中,如图 2-12(b)所示。

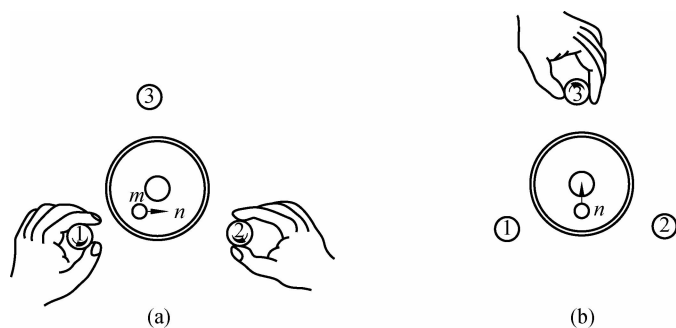


图 2-12 粗略整平水准仪

3. 照准水准尺

照准水准尺的操作步骤如下。

- (1) 目镜对光。松开制动螺旋,将望远镜转向明亮的背景,调节目镜,使十字丝清晰。
- (2) 粗略照准。利用望远镜镜筒上面的准星,照准水准尺,然后拧紧制动螺旋。
- (3) 物镜对光。转动物镜调焦螺旋,使水准尺成像清晰。
- (4) 精确照准。转动微动螺旋,用十字丝的纵丝照准水准尺的中央或边缘。

(5) 消除视差。经过物镜对光后,尺像应落在十字丝平面上;否则,当视线微微上下移动时,将看到十字丝的横丝相对于水准尺的读数也随之变化,这种现象称为十字丝视差(简称视差),如图 2-13(a)和图 2-13(b)所示。视差的存在将严重影响读数的正确性,因此必须予以消除。为此,应反复调节目镜和物镜调焦螺旋,直至无论在哪个位置观察,横丝所照准的读数始终清晰不变,如图 2-13(c)所示。

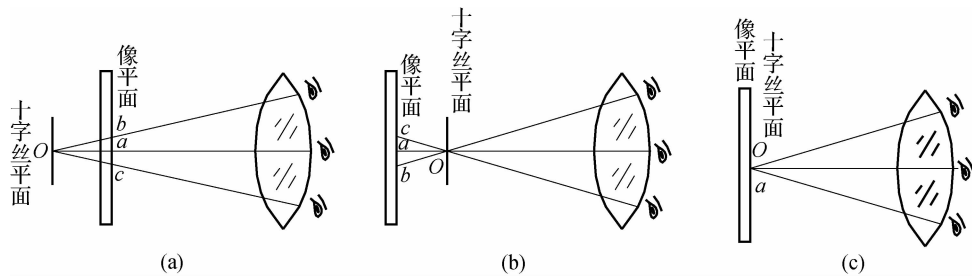


图 2-13 十字丝视差

4. 精确整平

转动微倾螺旋,同时由气泡观察窗进行观察,至两半边气泡符合为止。精确整平时应注意,若需右半边气泡往下,应按顺时针方向转动微倾螺旋;若需右半边气泡往上,应按逆时针方向转动微倾螺旋。

5. 读数

精确整平后,用中丝读取水准尺读数,如图 2-14 中的读数为 1.608 m。先估出毫米数,再看清所注米数、分米数和厘米数,然后一次性全部读出。读数后再检查气泡是否符合,若不符合应再精确整平,重新读数。

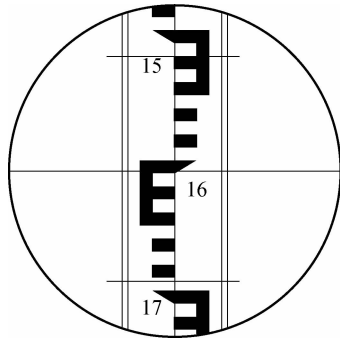


图 2-14 水准尺读数

2.2.4 自动安平水准仪

用水准仪进行水准测量的特点是通过水准管的气泡居中来获得水平视线。因此,在水准尺上读数时,要用微倾螺旋将水准管气泡居中,这样将会影响水准测量的速度。自动安平水准仪则不需要水准管和微倾螺旋,只要有一个圆水准器即可。安置仪器时,只要使圆水准器的气泡居中,再借助一种称为“补偿器”的特别装置就可以使视线自动处于水平状态。因此,使用这种仪器不仅操作简单,而且能大大缩短观测时间,还可以对水准仪安置不当、地面有微小的震动或脚架的不规则下沉等影响视线水平的因素进行迅速调整,从而得到正确的读数,提高水准测量的精度。

1. 视线自动安平的原理

自动安平水准仪通过补偿器得到视准轴水平时的读数。如图 2-15 所示,视准轴水平时,与视准轴重合的水平视线落在 X' 处,此时可获得正确的读数。当视准轴倾斜一个 α 角后,假设原来的水平视线不经过补偿器,还是通过 X' 处,此时十字丝的交点已经移到 X 处了,也就是说,十字丝交点上的读数不再是正确的。如果在水平视线中途设置一个补偿器,使光线偏转一个 β 角,让光线恰好通过十字丝的交点,那么在十字丝交点上的读数仍然是正确的,即相当于视准轴水平时的读数。由此可见,设计自动安平水准仪补偿器的实质在于使光线通过物镜后路径发生偏转,偏转角的大小能够正好补偿视准轴倾斜后所引起的读数误差。因为 α 和 β 的值都很小,所以 XX' 可以表示为

$$XX' = f_{\alpha} \text{ 或 } XX' = s_{\beta}$$

即

$$f_{\alpha} = s_{\beta} \quad (2-8)$$

式中, f_{α} 为望远镜物镜的焦距(mm); s_{β} 为补偿器到十字丝交点的距离(mm)。

凡满足式(2-8)条件的,都能达到补偿的目的。

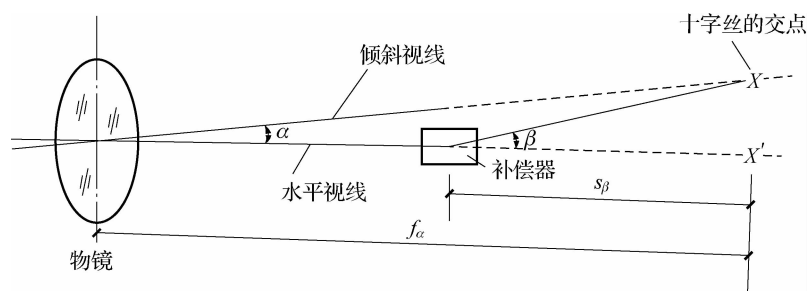


图 2-15 自动安平水准仪的原理

2. 自动安平水准仪的操作

自动安平水准仪的操作分为四步,即粗平、检查、照准、读数。其中,粗平、照准、读数的方法和微倾式水准仪相同,具体操作方法参阅“2.2.3 微倾式水准仪的使用”。

检查的方法就是按动自动安平水准仪目镜下方的补偿控制按钮,查看补偿器是否正常工作。在粗平时,按动一次按钮,如果目标影像在视场中晃动,就说明补偿器正常工作,可以获得水平视线的读数。

2.2.5 精密水准仪与精密水准尺

1. 精密水准仪

精密水准仪主要用于国家一、二等精密水准测量、大型建(构)筑物的沉降观测、地震监测、大型精密机械的安装等。图 2-16 所示为我国生产的 DS1 型精密水准仪,该仪器主要包括望远镜、水准管、符合棱镜系统、光学测微器、读数系统、微倾机构及制动和微动机构等。该仪器望远镜的放大率为 40 倍,水准管的分划值为 $10''/2 \text{ mm}$,转动测微螺旋可使水平视线在 5 mm 范围内平移,测微器分划尺刻有 100 个分格,测微器分划尺的最小格值为 0.05 mm。

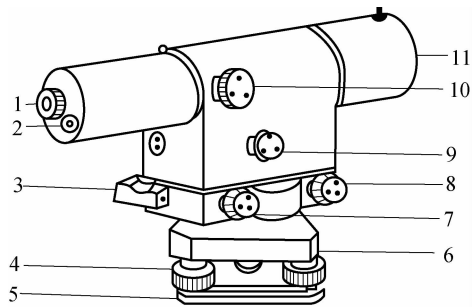


图 2-16 DS1 型精密水准仪的结构

1—目镜；2—测微读数镜；3—水准管；4—脚螺旋；5—底板；6—基座；7—微倾螺旋；
8—水平微动螺旋；9—测微螺旋；10—物镜调焦螺旋；11—物镜

精密水准仪和普通水准仪的主要区别是精密水准仪上装有光学测微器，如图 2-17 所示。光学测微器由平行玻璃板、测微分划尺、测微螺旋及读数显微镜等构成。平行玻璃板放在物镜前面，它与测微分划尺的传动杆相连接。当旋转测微螺旋时，传动杆推动平行玻璃板绕其轴俯仰，测微分划尺也随之转动，可使水平视线上下平移。当用望远镜照准水准尺后，十字丝横丝一般不会恰好与尺上某一整分划线对齐。这时，通过旋转平行玻璃板来平移视线，可使十字丝横丝对齐尺上的一整条分划线，其转动量即视线平移量（由测微尺读出）。这样，将水准尺上横丝所对分划的读数（m、dm、cm）和测微尺上的读数（1 mm、0.1 mm、0.01 mm）组合在一起，即得到完整读数。

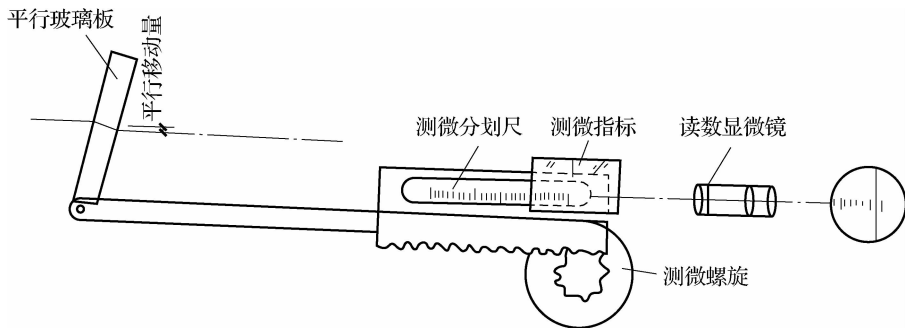


图 2-17 光学测微器的结构

测微分划尺上刻有 100 个分格，在另一块固定棱镜上刻有指标线，测微分划尺的读数以指标线为准，通过目镜右下方的测微放大镜读出。测微尺的一个分格反映视线平移 0.05 mm，100 个分格恰好为 5 mm，5 mm 以下的小数可由分划尺读出，最小读数可达 0.05 mm。

2. 精密水准尺

配合精密水准仪做精密水准测量的精密水准尺如图 2-18 所示，其刻划印刷在因瓦合金钢带上，这种合金钢的膨胀系数小，能保证水准尺的尺长准确而稳定。为使因瓦钢带尺不受木质尺身的伸缩影响，应以一定的拉力将其引张在木质尺身的凹槽内。带尺上刻有 5 mm 或 10 mm 间隔的刻划线，数字注记在木尺上。

图 2-18(a)所示为 DS1 型和 Ni004 型精密水准仪配套用尺。在同一因瓦钢尺面上,两排刻划线彼此错开,左边一排分划为奇数值,注记为分米数,右边一排分划为偶数值,注记为米数,小三角形指示半分米处,大的长三角指示整分米的起始线。分划线的实际间隔为 5 mm,但表面注记值为实际的 2 倍,因此读数时必须除以 2 才是实际读数。

图 2-18(b)所示是 N₃ 型精密水准仪配套用尺,右侧刻划的注记为 0~300 cm 的基本分划,左侧一排注记为 300~600 cm 的辅助分划,左右注记差为一个常数 $k=301.550\text{ cm}$,称为基辅差,它的作用是检查读数是否正确。

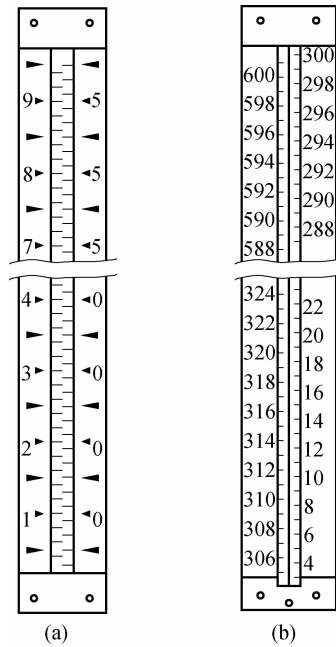


图 2-18 精密水准尺

3. 精密水准仪的操作方法与精密水准尺的读数方法

精密水准仪的操作方法与一般水准仪基本相同,不同之处是每次读数时都要用光学测微器测出不足一个分格的数值。

先用望远镜照准水准尺,转动微倾螺旋使水准管气泡居中,如图 2-19(a)所示;再转动测微螺旋,带动物镜前的平行玻璃板转动,从而使尺子的像在十字丝面上移动,当十字丝横丝一侧的楔形丝精确地夹住最靠近中丝的分划线时,即可读数。图 2-19(a)所示尺上的直接读数为 304 cm,测微目镜中测微分划尺上的读数为 150(1.50 mm),则全部读数为 304.150 cm (3.041 50 m),实际读数应为 $3.041\ 50 \div 2 = 1.520\ 75\text{ m}$ 。在测量时,不必将每一个读数都除以 2,算得高差后再除以 2 即可。

若采用图 2-19(b)所示的楔丝夹在 176 cm 处,测微分划尺上的读数为 650(6.50 mm),则水准尺的全部读数为 176.650 cm,这是实际读数,不需要除以 2。

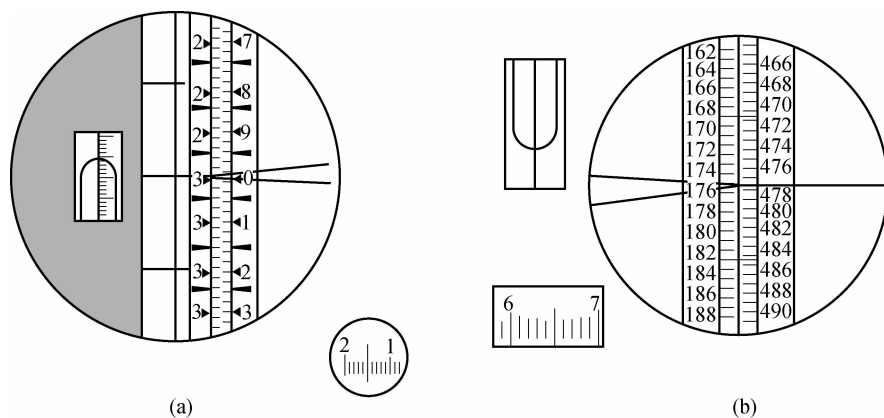


图 2-19 水准仪读数

2.2.6 电子水准仪

电子水准仪又称为数字水准仪,它是在自动安平水准仪的基础上发展起来的。它采用条码标尺,各厂家标尺编码的条码图案不相同,不能互换使用。目前照准标尺和调焦仍需通过人工目视进行。人工完成照准和调焦之后,一方面标尺条码被成像在望远镜分划板上,供目视观测;另一方面通过望远镜的分光镜,标尺条码又被成像在光电传感器(探测器)上,即线阵电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)上,供电子读数。因此,如果使用传统水准标尺,那么电子水准仪就可以像普通自动安平水准仪一样被使用。

1. 电子水准仪的特点

电子水准仪具有如下特点。

- (1) 自动读数、自动测量。只需照准专用的条码标尺,便可自动读数,自动测量视距与中丝读数,自动计算高差,自动进行高差、距离和高程放样测量。
- (2) 快速进行多次测量并自动计算平均值。
- (3) 轻便的标尺。专用的条码标尺采用玻璃钢或因瓦合金钢条材料制成,携带和使用都十分方便。
- (4) 作业效率高。自动读数提高了测量速度和工作速率。
- (5) 大显示屏。电子数字水准仪采用的大显示屏,使得信息的显示、阅读及菜单的使用都十分便利。
- (6) 操作简便。较少的操作键结合自动读数功能大大地简化了测量过程。
- (7) 无疲劳观测及操作。只要照准标尺聚焦,按动测量键即可完成标尺读数和视距测量。即使聚焦欠佳也不会影响标尺读数,因为标尺读数在很大程度上并不依赖于标尺编码的清晰度,但调焦清晰后可以提高测量速度。
- (8) 自动记录和存储数据。使用后处理软件可实现水准测量从外业数据采集到最后成果计算的一体化。
- (9) 将标尺倒立可测出房间或隧道顶部的距离,可做粗略的水平角测量。
- (10) 含有用户测量程序、视准差检测改正程序及水准网平差程序。

2. 电子水准仪的测量原理

电子水准仪使用的标尺与传统的标尺不同,它采用条形编码尺,条形码印制在因瓦合金钢条或玻璃钢的尺身上,可用于一等水准测量。如图 2-20 所示,观测时,标尺上的条形码由望远镜接收后,探测器将采集到的标尺编码光信号转换成电信号,并与仪器内部存储的标尺编码信号进行比较,若两者信号相同,则读数可以确定。条形码在探测器内成像的“宽窄”不同,转换成的电信号也随之不同,这就需要处理器按一定的步距改变一次电信号的“宽窄”与仪器内部存储的信号进行比较,直到相同为止,这将花费较长时间。为了缩短比较时间,通过调焦使标尺成像清晰,传感器通过采集调焦镜的移动量对编码电信号进行缩放,使其接近仪器内部存储的信号。因此,可以在较短的时间内确定读数,使其一次读数时间不超过 4 s。图 2-21 所示为电子水准仪数字化图像处理原理,其主要的处理过程为图像—数字化—信号译释,数据化算—结果。

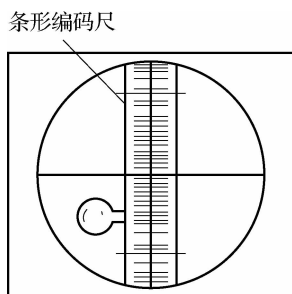


图 2-20 条形编码尺的影像

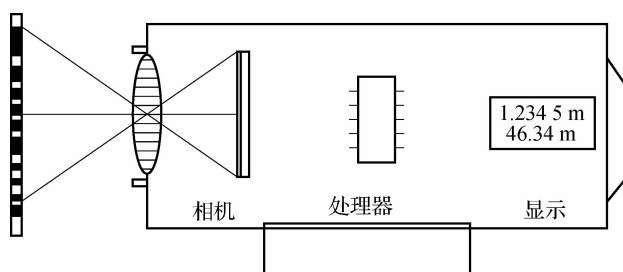


图 2-21 电子水准仪数字化图像处理原理

2.3 普通水准测量

2.3.1 水准点和水准路线

1. 水准点

水准点是高程控制点,其高程是通过水准测量的方法来测定的,水准点常用 BM 表示。水准点应选在土质坚实、观测方便和便于长期保存的地点。水准点有永久性水准点和临时性水准点两种。永久性水准点一般用石料或钢筋混凝土制成,深埋在地面冻土线以下,顶面设有用不锈钢或其他不易腐蚀的材料制成的半球形标志。永久性水准点标石的类型可分为基岩水准标石、基本水准标石、普通水准标石和墙脚水准标志四种,其中,普通水准标石和墙脚水准标志的埋设要求分别如图 2-22(a)和图 2-22(b)所示(图中单位为 mm,本书各图中未标注单位处默认为 mm)。临时性水准点可用地面上凸出的坚硬岩石做记号,也可在松软的地面上打入木桩,在桩顶钉一个小铁钉来表示水准点,如图 2-22(c)所示。在坚硬的地面上也可以用油漆画出标记作为临时性水准点。

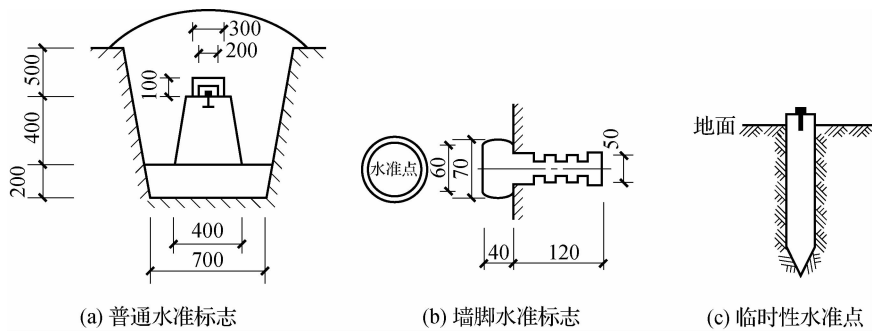


图 2-22 水准标志埋设图

埋设完水准点后,应绘出水准点与附近地物的关系图,在图上还应写明水准点的编号和高程,即点之记,以便于日后寻找水准点的位置。

2. 水准路线

在水准点之间进行水准测量所经过的路线,称为水准路线。按照已知高程的水准点的分布情况和实际需要,水准路线一般布设为闭合水准路线、附合水准路线和支水准路线,如图 2-23 所示。

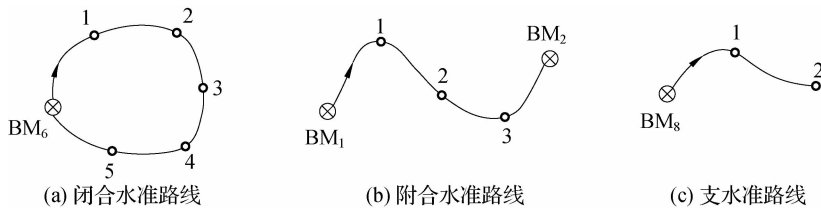


图 2-23 水准路线

(1) 闭合水准路线。如图 2-23(a) 所示,闭合水准路线是指从一个已知高程的水准点 BM_6 出发,沿各高程待定点 1、2、3、4、5 进行水准测量,最后返回到原来的水准点 BM_6 的路线。各站所测高差之和的理论值应等于零,即

$$\sum h_{理} = 0 \quad (2-9)$$

(2) 附合水准路线。如图 2-23(b) 所示,符合水准路线是指从一个已知高程的水准点 BM_1 出发,沿各高程待定点 1、2、3 进行水准测量,最后附合到另一个已知高程的水准点 BM_2 上的路线。各站所测高差之和的理论值应等于由已知水准点的高程计算出的高差,即

$$\sum h_{理} = H_{BM_2} - H_{BM_1} \quad (2-10)$$

(3) 支水准路线。如图 2-23(c) 所示,支水准路线是指从一个已知高程的水准点 BM_8 出发,沿各高程待定点 1、2 进行水准测量,测量完成后既不回到原已知高级水准点上,也不附合到另一个已知高级水准点的路线。支水准路线应进行往返观测。理论上,往测高差总和与返测高差总和应大小相等、符号相反,即

$$\sum h_{往} + \sum h_{返} = 0 \quad (2-11)$$

式(2-9)、式(2-10)和式(2-11)可以分别用于闭合水准路线、附合水准路线和支水准路线

观测正确性的检核。

附和水准路线和闭合水准路线因有检核条件,一般采用单程观测;由于支水准路线没有检核条件,故对其必须进行往返观测,利用往返两个结果检核观测成果。

2.3.2 外业观测程序和注意事项

我国国家水准测量依精度不同分为一、二、三、四等,一等精度最高。不属于国家规定的水准测量一般称为普通(或等外)水准测量。等级水准测量对所用仪器、工具及观测、计算方法都有特殊要求,但和普通水准测量相比,因两者的基本原理相同,故在基本工作方法上也有很多相似之处。

1. 外业观测程序

(1)在起始水准点上竖立水准尺,将该尺上的读数作为后视读数。

(2)在路线上的适当位置处安置水准仪(普通水准测量中测站离水准尺最远距离不应超过 150 m),粗略整平,照准后视尺,消除视差,精确整平,用中丝读数并记入手簿的“后视”栏,见表 2-1。

(3)在适当高度和距离处选定一个转点,将尺垫踩实,在尺垫上竖立水准尺,将该尺上的读数作为前视读数。

(4)转动水准仪,照准前视尺,消除视差,精确整平,用中丝读数并将其记入手簿的“前视”栏。

(5)前视尺位置不动,将其变作后视;将原来的后视尺移到前面去。

(6)将水准仪移到前面适当高度和距离处安置好后,按照(2)、(3)、(4)、(5)步的方法进行操作。

表 2-1 普通水准测量手簿

名称: 测区: 观测者: 记录者: 年 月 日 天气: 仪器型号:

测 站	测点 (立尺点)		中丝读数 /m	每站高差 (后-前)	高程 /m	备 注
1	后视	BM _A	2.655	+1.203	456.816	已知
	前视	TP ₁	1.452			
2	后视	TP ₁	2.339	+0.521		
	前视	TP ₂	1.818			
3	后视	TP ₂	1.876	+1.041		
	前视	TP ₃	0.835			
4	后视	TP ₃	1.556	+0.228		
	前视	TP ₄	1.328			
5	后视	TP ₄	1.485	-0.351	459.458	
	前视	临 1	1.836			

续表

测 站	测点 (立尺点)		中丝读数 /m	每站高差 (后-前)	高程 /m	备 注
校核计算	后视	$\sum a$	9.911			$H_{\text{后}} - H_{\text{前}} = 459.458 - 456.816 = +2.642(\text{m})$
	前视	$\sum b$	7.269			
	$\sum a - \sum b = 9.911 - 7.269$ $= +2.642(\text{m})$					

2. 外业观测的注意事项

外业观测时应注意以下事项。

(1) 在水准点(包括已知点和待测点)上立尺时,不能放置尺垫。

(2) 水准尺应竖直,不能左右偏斜,更不能前后俯仰。

(3) 在观测员未迁移测站之前,不能提动后视转点尺垫。

(4) 前、后视距应大致相等。

(5) 记录、计算字迹要工整清晰,读错或记错的数据应用横线或斜线划去,并将正确的数据记在它的上方,不能就字改字,不能连环涂改。

2.3.3 水准测量的校核方法

1. 水准测量的计算校核

由式 $\sum h = \sum a - \sum b = h_{AB}$ 可以看出, B 点对 A 点的高差等于各转点之间高差的代数和,也等于后视读数之和减去前视读数之和的差值,即

$$h_{AB} = \sum h = \sum a - \sum b \quad (2-12)$$

经式(2-12)校核无误后,说明高差计算是正确的。

根据各站观测高差和 A 点已知高程推算出各转点的高程,最后求得终点的高程。终点 B 的高程 H_B 减去起点 A 的高程 H_A 应等于各站高差的代数和,即

$$H_B - H_A = \sum h \quad (2-13)$$

经式(2-13)校核无误后,说明各转点高程的计算是正确的。

校核计算过程可参见表 2-1 的“校核计算”栏。

2. 水准测量的测站校核

水准测量的连续性很强,一个测站的误差或错误会对整个水准测量成果产生影响。为了保证各个测站工作的正确性,可采用以下方法进行校核。

(1) 变更仪器高法。在一个测站上用不同的仪器高度测出两次高差,即在测得第一次高差后改变仪器高度(至少 10 cm),再测一次高差,当两次所测高差之差不大于 ± 6 mm 时,则认为观测值符合普通水准测量的要求,取两次高差的平均值作为最后结果。若两次所测高差之差大于 ± 6 mm,则需要重测。

(2) 双面尺法。双面尺法是保持仪器高度不变,用水准尺的红面和黑面高差进行校核的

方法。对于普通水准测量,红、黑面高差之差也不能大于 ± 6 mm。

3. 水准测量的路线校核

水准测量的计算校核和测站校核只能检查单个测站的观测精度及计算是否正确,因此还必须对水准测量成果进行进一步检核,即通过将测量结果与理论值进行比较,来判断观测精度是否符合要求。实际测量得到的该段高差与该段高差的理论值之差即测量误差,称为高差闭合差,用 f_h 表示,计算式为

$$f_h = \sum h_{\text{测}} - \sum h_{\text{理}} \quad (2-14)$$

式中, $\sum h_{\text{测}}$ 为实际测量的高差(m); $\sum h_{\text{理}}$ 为高差的理论值(m)。

(1)闭合水准路线的高差闭合差。对于闭合水准路线, $\sum h_{\text{理}} = 0$,因此

$$f_h = \sum h_{\text{测}} \quad (2-15)$$

(2)附和水准路线的高差闭合差。对于附和水准路线, $\sum h_{\text{理}} = H_{\text{终}} - H_{\text{始}}$ ($H_{\text{终}}$ 、 $H_{\text{始}}$ 分别为终点和起点的高程),因此

$$f_h = \sum h_{\text{测}} - (H_{\text{终}} - H_{\text{始}}) = \sum h_{\text{测}} + H_{\text{始}} - H_{\text{终}} \quad (2-16)$$

(3)支水准路线的高差闭合差。支水准路线中往返测量值之和理论上应等于零,因此

$$f_h = \sum h_{\text{测}} = \sum h_{\text{往}} + \sum h_{\text{返}} \quad (2-17)$$

如果高差闭合差在允许限差范围之内,说明观测结果正确,精度符合要求;否则应当重测。水准测量的高差闭合差的允许值随水准测量的等级不同而异。表2-2为工程测量的限差规定表。当闭合差在允许误差范围之内时,认为精度合格,成果可用。当闭合差超过允许范围时,应查明原因进行重测,直至符合要求。

表 2-2 工程测量的限差规定表

等 级	允许闭合差/mm	一般应用范围举例
三等	$f_{h\text{允}} = \pm 12\sqrt{L}$ 或 $f_{h\text{允}} = \pm 4\sqrt{n}$	有特殊要求的较大型工程、城市地面沉降观测等
四等	$f_{h\text{允}} = \pm 20\sqrt{L}$ 或 $f_{h\text{允}} = \pm 6\sqrt{n}$	综合规划路线、普通建筑工程
图根(普通)	$f_{h\text{允}} = \pm 40\sqrt{L}$ 或 $f_{h\text{允}} = \pm 12\sqrt{n}$	山区线路工程、排水沟疏浚工程、小型农田等

注1: L 为水准路线单程千米数(km), n 为单程测站数(站)。

注2:高差允许闭合差 $f_{h\text{允}}$ 在平地按水准路线的单程千米数 L 计算,在山地按单程测站数 n 计算。

2.3.4 内业成果计算与高差闭合差的调整

1. 内业成果计算

水准测量的外业观测数据经检核无误后,才能进行内业成果的计算。内业成果的计算步骤如下。

(1)计算实测高差闭合差和高差闭合差的允许值。当 $f_h \leq f_{h\text{允}}$ 时,可进行后续计算;若 $f_h > f_{h\text{允}}$,则说明外业成果不符合要求,必须重测,不能进行内业成果的计算。

(2)对高差闭合差进行调整和分配。高差闭合差的调整和分配原则是将高差闭合差反符号后,按与测站数或距离成正比的原则分配到各观测高差中。

根据以上原则,对于附和或闭合水准路线,每段高差的改正数 v_i 应按式(2-18)或式(2-19)计算。

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum L} L_i \quad (2-18)$$

或

$$v_i = -\frac{f_h}{\sum n} n_i \quad (2-19)$$

式中, v_i 为测段高差的改正数(m); f_h 为高差闭合差(m); $\sum L$ 为水准路线总长度(m); L_i 为测段长度(m); $\sum n$ 为水准路线测站数总和(站); n_i 为测段的测站数(站)。

高差改正数的总和应与高差闭合差大小相等、符号相反,即

$$\sum v_i = -f_h \quad (2-20)$$

用式(2-20)检核计算的正确性。

(3)计算改正后的高差。将各段高差观测值加上相应的高差改正数,求出各段改正后的高差,即

$$h_{i\text{改}} = h_{i\text{测}} + v_i \quad (2-21)$$

对于支水准路线,当闭合差符合要求时,可按式(2-22)计算各段平均高差,即

$$h = \frac{h_{\text{往}} - h_{\text{返}}}{2} \quad (2-22)$$

式中, h 为平均高差(m); $h_{\text{往}}$ 为往测高差(m); $h_{\text{返}}$ 为返测高差(m)。

(4)计算各点的高程。根据改正后的高差,由起点的高程逐一推算出其他各点的高程。最后一个已知点的推算高程应等于它的已知高程,以此检查计算是否正确。

2. 闭合水准路线高差闭合差的调整

【例 2-1】 某一闭合水准路线的观测成果如图 2-24 所示,试按普通水准测量的精度要求计算待定点 A、B、C 的高程($H_{\text{BM}_1} = 152.358 \text{ m}$)。

【解】 将图 2-24 中的数据按高程顺序填入表 2-3,并进行计算。计算步骤如下。

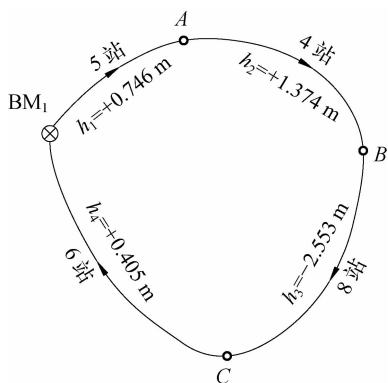


图 2-24 【例 2-1】图

(1)高差闭合差的计算与检核。

$$f_h = \sum h_{\text{测}} = -0.028(\text{m}) = -28(\text{mm})$$

$$f_{h\text{允}} = \pm 12\sqrt{n} = \pm 12\sqrt{23} = \pm 57.5(\text{mm})$$

$f_h < f_{h\text{允}}$,符合普通水准测量的要求,可以进行闭合差调整。

(2)高差改正数和改正后的高差计算。根据式(2-19)计算每一测段的高差改正数。计算过程如下。

$$v_1 = -\frac{-0.028}{23} \times 5 = +0.006(\text{m})$$

$$v_2 = -\frac{-0.028}{23} \times 4 = +0.005(\text{m})$$

$$v_3 = -\frac{-0.028}{23} \times 8 = +0.010(\text{m})$$

$$v_4 = -\frac{-0.028}{23} \times 6 = +0.007(\text{m})$$

$\sum v_i = +0.028(\text{m}) = -f_h$, 说明计算正确。

根据式(2-21)计算每一测段改正后的高差。计算过程如下。

$$h_{1\text{改}} = +0.746 + 0.006 = +0.752(\text{m})$$

$$h_{2\text{改}} = +1.374 + 0.005 = +1.379(\text{m})$$

$$h_{3\text{改}} = -2.553 + 0.010 = -2.543(\text{m})$$

$$h_{4\text{改}} = +0.405 + 0.007 = +0.412(\text{m})$$

(3) 高程的计算。高程的计算过程如下。

$$H_A = 152.358 + 0.752 = 153.110(\text{m})$$

$$H_B = 153.110 + 1.379 = 154.489(\text{m})$$

$$H_C = 154.489 - 2.543 = 151.946(\text{m})$$

$$H_{\text{BM}_1} = 151.946 + 0.412 = 152.358(\text{m})$$

推算的 H_{BM_1} 等于该点的已知高程, 以此作为计算检核。

表 2-3 闭合水准路线测量的成果计算表

点 名	测 站 数	实测高差/m	高差改正数/m	改正后高差/m	高程/m
BM ₁	5	+0.746	+0.006	+0.752	152.358
A					153.110
B	4	+1.374	+0.005	+1.379	154.489
					154.489
C	8	-2.553	+0.010	-2.543	151.946
					151.946
BM ₁	6	+0.405	+0.007	+0.412	152.358
					152.358
Σ	23	-0.028	+0.028	0	
辅助计算		$f_h = \sum h = -0.028(\text{m}) = -28(\text{mm})$ $f_{h允} = \pm 12\sqrt{n} = \pm 12\sqrt{23} = \pm 57.5(\text{mm})$			

3. 附和水准路线高差闭合差的调整

【例 2-2】 图 2-25 为按普通水准测量要求施测的某附和水准路线观测成果略图。BM_A 和 BM_B 为已知高程的水准点, 图中的箭头表示水准测量的前进方向, 路线上方的数字为测得的两点间的高差, 路线下方的数字为该段路线的长度, 试计算待定点 1、2、3 的高程。

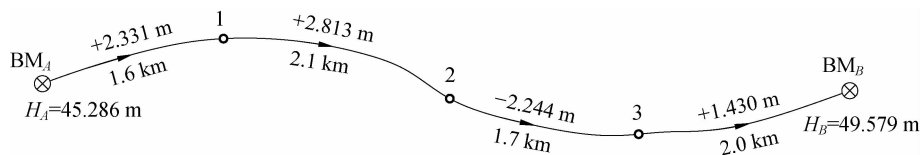


图 2-25 【例 2-2】图

【解】 依次将图 2-25 中的点名、距离、实测高差及已知水准点 A、B 的高程填入附和水准路线测量的成果计算表的有关各栏内,见表 2-4。

(1)高差闭合差的计算与检核。

$$f_h = \sum h - (H_B - H_A) = 4.330 - (49.579 - 45.286) = 0.037(\text{m}) = 37(\text{mm})$$

$$f_{h允} = \pm 40 \sqrt{L} = \pm 40 \sqrt{7.4} = \pm 109(\text{mm})$$

$f_h < f_{h允}$,符合图根水准测量的要求,可以分配闭合差。

(2)高差改正数和改正后的高差计算。已知每一测段的长度,利用式(2-18)计算高差改正数,计算结果见表 2-4。

通过计算可知高差改正数的总和应与高差闭合差大小相等,即 $\sum v_i = -f_h = -0.037 \text{ m}$,说明改正数计算正确。

利用式(2-21)计算改正后的高差,计算结果见表 2-4 的“改正后高差”栏。

改正后各段高差的代数和应等于高差的理论值,以此作为计算检核,即 $\sum h_{i改} = H_B - H_A = 49.579 - 45.286 = +4.293 \text{ m}$,说明计算正确。

(3)高程的计算。点 1 的高程为 $H_1 = H_A + h_1 = 45.286 + 2.323 = 47.609 \text{ m}$,其余点的高程计算依此类推。作为检核,最后推算出的 B 点的高程等于其已知高程。

表 2-4 附和水准路线测量的成果计算表

点 名	路线长度/km	观测高差/m	高差改正数/m	改正后高差/m	高程/m
BM _A	1.6	+2.331	-0.008	+2.323	45.286
1					47.609
2	2.1	+2.813	-0.011	+2.802	50.411
	1.7	-2.244	-0.008	-2.252	
3	2.0	+1.430	-0.010	+1.420	48.159
BM _B					49.579
\sum	7.4	+4.330	-0.037	+4.293	

4. 支水准路线高差闭合差的调整

【例 2-3】 图 2-26 为支水准路线略图。已知水准点 A 的高程为 86.785 m,图中的箭头表示水准测量的往测方向,往、返测站的平均值为 16 站,试求 B 点的高程。

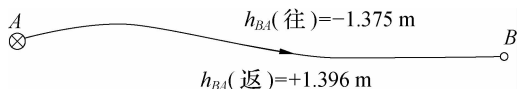


图 2-26 【例 2-3】图

【解】 (1)求往、返测高差闭合差。理论上,往、返两次测得的高差应绝对值相等、符号

相反,即高差代数和应等于零。否则,其值为闭合差 f_h 。

$$f_h = h_{往} + h_{返} = -1.375 + 1.396 = 0.021(\text{m})$$

$$f_{h允} = \pm 12\sqrt{n} = \pm 12\sqrt{16} = \pm 48(\text{mm})$$

$f_h < f_{h允}$,其精度符合要求。

(2)求改正后的高差。支水准路线采用往测高差减去返测高差后取平均值,以作为改正后往测方向的高差。

$$h_{AB(往)} = \frac{h_{往} - h_{返}}{2} = \frac{-1.375 - 1.396}{2} = -1.386(\text{m})$$

(3)计算待定点的高程。待定点 B 的高程为

$$H_B = H_A + h_{AB(往)} = 86.785 - 1.386 = 85.399(\text{m})$$

必须指出,如果将支水准路线起始点的高程抄录错误或将该点的位置弄错,那么计算出的待定点的高程也是错误的。因此,应用此法时应特别注意检查。

2.4 微倾式水准仪的检验与校正

2.4.1 水准仪的轴线及其应满足的条件

如图 2-27 所示,水准仪的主要轴线有视准轴 CC 、水准管轴 LL 、圆水准器轴 $L'L'$ 和仪器竖轴 VV 。

为保证水准仪能提供一条水平视线,能正确工作,水准仪的轴线应该满足下列三个条件。

(1)圆水准器轴应平行于仪器竖轴 ($L'L' // VV$)。

(2)十字丝的横丝应垂直于仪器竖轴。

(3)水准管轴应平行于视准轴 ($LL // CC$)。

虽然这些条件在仪器出厂时经检验已都满足了,但由于长期使用和在运输过程中产生的振动,仪器各部分的螺丝发生了松动,从而使各轴线之间的几何关系发生了变化。因此,在水准测量作业前,应对水准仪进行检验,如有问题,应及时校正。

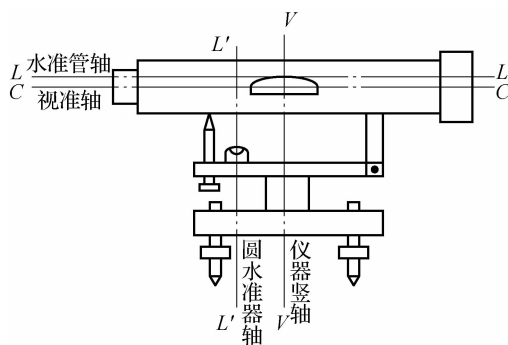


图 2-27 水准仪的轴线关系

2.4.2 圆水准器的检验与校正

1. 检验目的

使圆水准器轴平行于仪器竖轴。

2. 检验原理

假设竖轴 VV 与圆水准器轴 $L'L'$ 不平行,那么当气泡居中时,圆水准器轴竖直,竖轴则偏离竖直位置 α 角,如图 2-28(a) 所示。将仪器旋转 180° ,如图 2-28(b) 所示,此时圆水准器轴从竖轴右侧移至左侧,与铅垂线夹角为 2α 。圆水准器气泡偏离中心位置,气泡偏离的弧长

所对的圆心角应等于 2α 。

3. 检验方法

转动脚螺旋使圆水准器气泡居中,然后将仪器旋转 180° ,若气泡仍居中,说明此项条件满足;若气泡偏离中心位置,则说明此项条件不满足,需要校正。

4. 校正方法

用校正针拨动圆水准器下面的 3 个校正螺丝,如图 2-29 所示,使气泡退回偏离中心距离的一半,此时圆水准器轴与竖轴平行,如图 2-28(c)所示;再旋转脚螺旋使气泡居中,此时竖轴处于竖直位置,如图 2-28(d)所示。校正工作须反复进行,直到仪器旋转至任何位置气泡都居中为止。

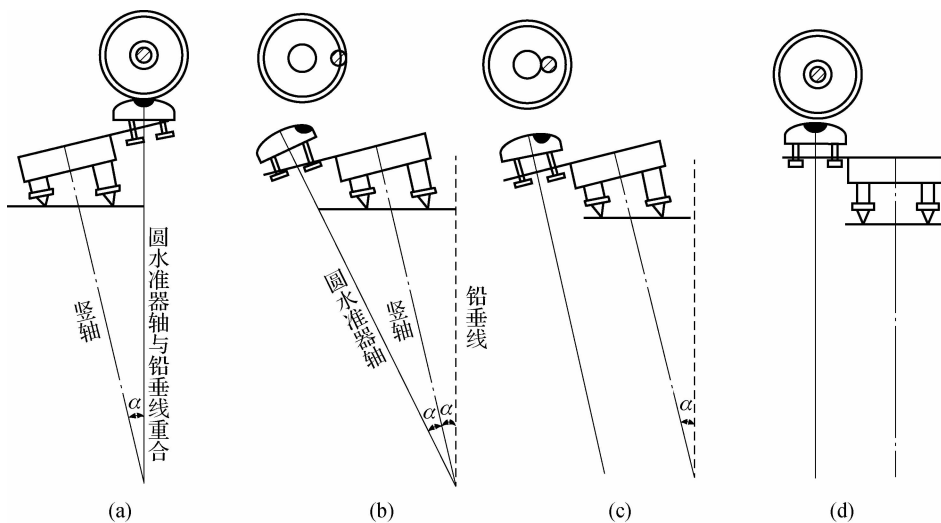


图 2-28 圆水准器的检验与校正

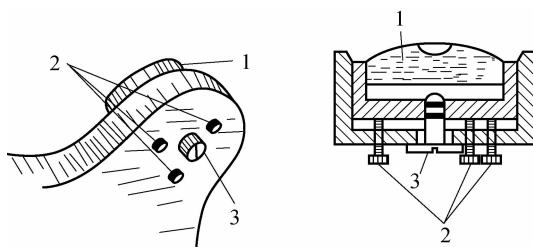


图 2-29 圆水准器校正螺丝的位置

1—圆水准仪; 2—校正螺丝; 3—紧固螺丝

2.4.3 十字丝横丝的检验与校正

1. 检验目的

使十字丝横丝垂直于仪器的竖轴。

2. 检验原理

如果十字丝横丝不垂直于仪器的竖轴,那么当竖轴竖直时,十字丝的横丝是不水平的,这时用横丝的不同部位在水准尺上读数将产生误差。

3. 检验方法

将仪器整平后,在望远镜视场内选择一个清晰的目标点,用十字丝的交点照准目标点,拧紧制动螺旋,转动水平微动螺旋,若目标点始终沿横丝做相对移动,如图 2-30(a)、(b)所示,则说明横丝垂直于竖轴;若目标偏离横丝,如图 2-30(c)所示,则表明横丝不垂直于竖轴,需要校正。

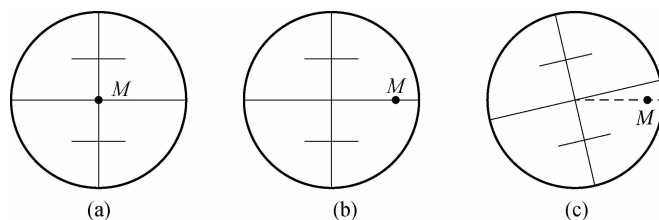


图 2-30 十字丝横丝的检验

4. 校正方法

校正方法因十字丝分划板装置形式的不同而异。如图 2-31(a)所示,这种仪器在目镜端镜筒上有三个固定螺丝,可直接用螺丝刀松开相邻两个固定螺丝,转动分划板座让横丝水平,再将螺丝拧紧。如图 2-31(b)所示,这种仪器必须卸下目镜处的外罩,再用螺丝刀松开十字丝分划板座上的四个固定螺丝,轻轻转动分划板座,使横丝水平。最后,旋紧固定螺丝,并旋上外罩。

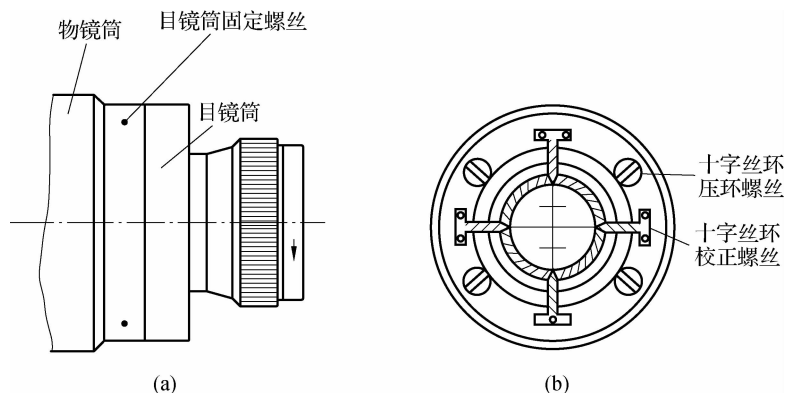


图 2-31 十字丝的校正

2.4.4 水准管轴的检验与校正

1. 检验目的

使水准管轴平行于视准轴。

2. 检验原理

如图 2-32 所示,若水准管轴与视准轴不平行,则会出现一个交角 i ,由于 i 角的影响而产生的读数误差称为 i 角误差,此项检验也称为 i 角检验。DS3 型水准仪的 i 角不得大于 $20''$,否则需要校正。

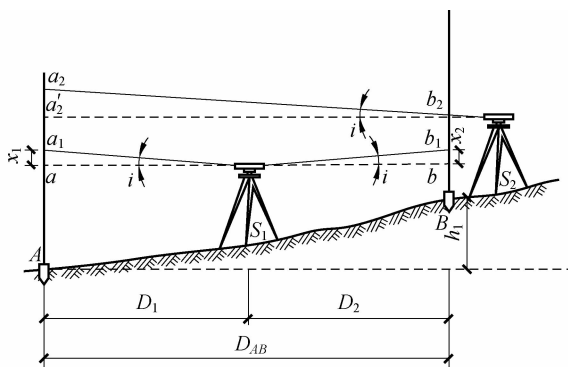


图 2-32 水准管轴的检验

3. 检验方法

在一处平坦地面上选择相距 $80\sim 100$ m 的两点 A、B,分别在 A、B 两点打入木桩,在木桩上竖立水准尺。将水准仪安置在 A、B 两点的中间,使前、后视距相等,即 $D_1 = D_2$,如图 2-32 所示。精确整平仪器后,依次照准 A、B 两点的水准尺读数,设读数分别为 a_1 和 b_1 ,因前、后视距相等,所以 i 角对前、后视读数的影响相等,即 $x_1 = x_2$,A、B 两点的高差为

$$h_{AB} = (a_1 - x_1) - (b_1 - x_2) = a_1 - b_1$$

因抵消了 i 角误差的影响,所以由 a_1 、 b_1 算出的高差是正确高差。

为了进行测站检核,可采用变动仪器高法或双面尺法测出 A、B 两点的高差,若两次测得的高差之差不超过 3 mm,则取其平均值作为最后的结果 h_{AB} 。

将仪器移至离前视点 B 约 3 m 处,如图 2-32 所示。精平后读得前、后尺读数分别为 a_2 、 b_2 。因仪器离 B 点很近,故两轴不平行引起的读数误差可忽略不计,根据 b_2 和 A、B 两点的正确高差 h_{AB} 算出 A 点尺上应有的读数为 $a'_2 = b_2 + h_{AB}$ 。若 a_2 与 a'_2 相等,则说明两轴平行;否则,存在 i 角,其值为

$$i = \frac{\Delta h}{D_{AB}} \rho \quad (2-23)$$

式中, $\Delta h = a_2 - a'_2$; $\rho = 206\ 265''$; D_{AB} 为 A、B 两点间的水平距离。

当 i 角大于 $20''$ 时,需要校正。

4. 校正方法

水准仪不动,转动微倾螺旋使十字丝的横丝切于 A 尺的正确读数 a'_2 处,此时视准轴水

平,但水准管气泡偏离中心。用校正针先松开水准管的左右校正螺丝,然后拨动上下校正螺丝(见图 2-33),一松一紧,升降水准管的一端,使气泡居中。此项校正需反复进行,直到符合要求为止。最后再拧紧松开的校正螺丝。

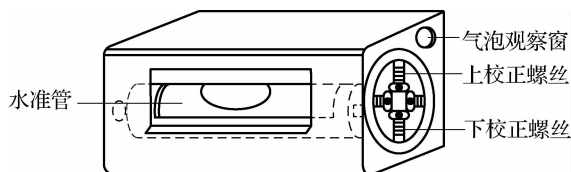


图 2-33 水准管轴的校正

对于自动安平水准仪,当 i 角误差不大时,可用十字丝进行校正。方法是:将水准仪照准 A 尺不动,旋下十字丝环护罩,微松左右两个十字丝环校正螺丝[见图 2-31(b)],用校正针拨动上下两个十字丝环校正螺丝,一松一紧,直至十字横丝照准正确读数 a'_2 。当 i 角误差较大,利用上述方法不能完全校正时,应交由专业维修人员处理。

2.5 水准测量误差

水准测量误差主要有器具误差、观测误差及外界条件影响产生的误差三个方面。为了提高水准测量精度,必须分析和研究误差的来源及其影响规律,找出消除或削弱这些误差影响的措施。

2.5.1 器具误差

1. 仪器校正后的残余误差

仪器虽经过校正,但仍会有微小的残余误差,在测量时如能保持前视和后视的距离相等,那么这种误差就能消除。当因某种原因使某一测站的前视(或后视)距离较大时,应使下一测站的后视(或前视)距离变大,这样误差才能得到补偿。

2. 水准尺误差

水准尺误差包括分划误差、水准尺零点差和尺身弯曲等误差,所以使用前应对水准尺进行检验。由于水准尺零点差的影响对于一个测段的测站数为偶数的水准路线,可自行抵消,因此在一个测段内应使测站数为偶数。

2.5.2 观测误差

1. 水准尺倾斜误差

如图 2-34 所示,在水准测量时,若水准尺发生倾斜,则倾斜水准尺上的读数(如 b' 、 b'')总是比正确的水准尺读数 b 要大。为减少水准尺竖立不直产生的读数误差,可使用安装有圆水准器的水准尺,并注意在测量工作中认真扶尺,使水准尺竖直。

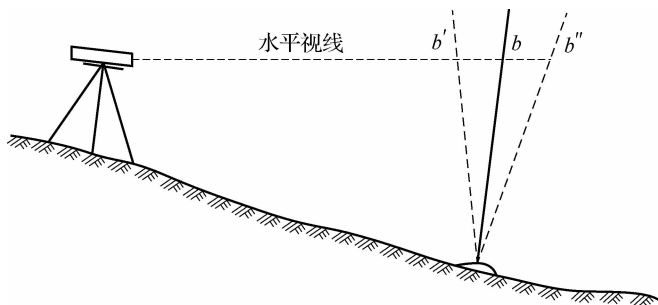


图 2-34 水准尺倾斜对读数的影响

2. 整平误差

水准测量是利用水平视线测定高差的,如果仪器没有精确整平,那么倾斜的视线将使标尺读数产生误差。

如图 2-35 所示,设水准管的分划值为 $20''$,若气泡偏离半格($i=10''$),则当距离 $D=50\text{ m}$ 时, $\Delta=2.4\text{ mm}$;当距离 $D=100\text{ m}$ 时, $\Delta=4.8\text{ mm}$ 。误差随距离的增大而增大。因此,在读数前,必须使符合水准气泡精确吻合。

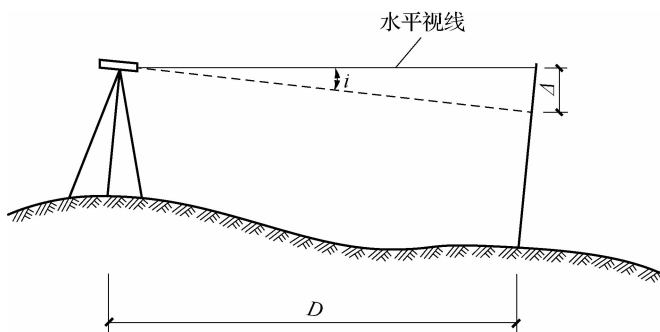


图 2-35 整平误差对读数的影响

3. 读数误差

读数误差产生的原因有两个:一是存在视差,二是估读毫米数不准确。视差可通过重新调节目镜和物镜调焦螺旋进行消除。估读误差与望远镜的放大率和视距长度有关,因此各级水准测量所用仪器的望远镜放大率和最大视距都有相应的规定,在普通水准测量中,要求望远镜的放大率在 20 倍以上,视距不超过 150 m。

2.5.3 外界条件影响产生的误差

1. 仪器下沉(或上升)所引起的误差

如图 2-36(a)所示,假设仪器下沉(或上升)的速度与时间成正比,从读取后视读数 a_1 到读取前视读数 b_1 ,仪器下沉了 Δ ,则此次得到的高差 h_1 为

$$h_1 = a_1 - (b_1 - \Delta)$$

为了削弱此项误差的影响,可在同一测站进行第二次观测,而且在第二次观测时先读前视读数 b_2 ,再读后视读数 a_2 。则此次得到的高差 h_2 为

$$h_2 = (\alpha_2 - \Delta) - b_2$$

取两次高差的平均值,即

$$h = \frac{h_1 + h_2}{2} = \frac{(a_1 - b_1) + (a_2 - b_2)}{2}$$

经第二次观测后,可消除仪器下沉对高差的影响。一般称上述操作为“后、前、前、后”的观测程序。

2. 水准尺下沉(或上升)所引起的误差

如图 2-36(b)所示,若往测与返测水准尺下沉的量是相同的,则由于误差符号相同,而往测与返测高差符号相反,因此,取往测和返测高差的平均值即可消除其影响。

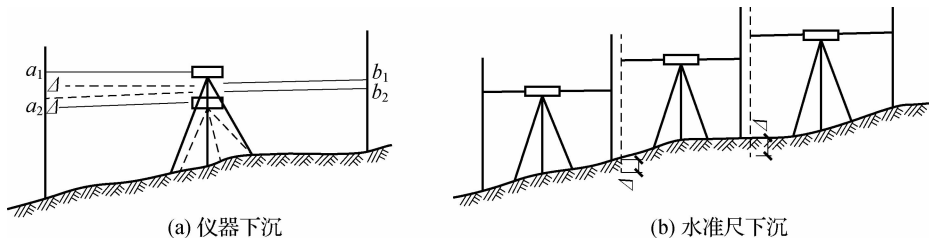


图 2-36 仪器和水准尺下沉对误差的影响

3. 地球曲率和大气折光的影响

在模块 1 中已经介绍了用水平面代替大地水准面的限度,地球曲率对测量高差的影响与距离成正比。而大气折光的作用使得水准仪本应水平的视线成为一条曲线,它对测量高差的影响规律与地球曲率的影响相同(实验证明,在稳定的气象条件下,大气折光对水准尺读数的影响约为地球曲率影响的 1/7,且符号相反),如图 2-37 所示。地球曲率和大气折光对测量高差的综合影响为

$$f = c - r = \frac{D^2}{2R} - \frac{D^2}{2 \times 7R} = 0.43 \frac{D^2}{R} \quad (2-24)$$

式中, c 为用水平面代替大地水准面对水准尺读数的影响(mm); r 为大气折光对水准尺读数的影响(mm); D 为仪器到水准尺的距离(m); R 为地球的平均半径, $R=6\,371\text{ km}$ 。

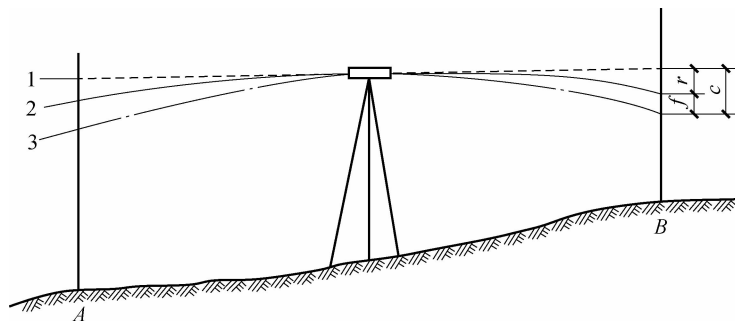


图 2-37 地球曲率和大气折光对高差的影响图示

1—水平视线;2—折光后视线;3—与大地水准面平行线

观测时,可使后视与前视距离相等,从而减少地球曲率和大气折光的影响;视线离地面

过低,受折光的影响会有所增加,故一般应使视线离地面的高度不小于 0.3 m。

除了上述各种误差外,气象因素的影响也会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。因此,观测时应注意这些因素带来的影响。为了防止日光暴晒,对仪器应打伞保护。无风的阴天是最理想的观测天气。

以上各项误差都是按单独影响的原则分析的,而实际情况则是综合性的影响。因此,在作业中应注意上述误差,按规范要求施测,在熟练操作和提高观测速度的条件下达到施测的精度要求。

思考与练习

1. 设地面点 A、B 分别为后视点、前视点, A 点的高程为 36.115 m, 当后视读数为 1.228 m、前视读数为 1.626 m 时, 两点的高差是多少? A 点比 B 点高还是低? B 点的高程是多少?
2. 什么是视准轴、水准管轴、圆水准器轴?
3. 什么是水准管分划值? 圆水准器和管水准器的作用有何不同?
4. 试述使用水准仪的操作步骤。
5. 什么叫作视差? 它是怎样产生的? 如何消除?
6. 什么是精平? 为什么微倾水准仪必须在精平后才能读数?
7. 在水准测量中, 在什么点上应安放尺垫?
8. 如何判断自动安平水准仪的补偿器是否处于正常状态?
9. 水准测量的主要误差有哪些? 可分别各采取什么措施和方法削弱其影响?
10. 将图 2-38 所示的水准路线中的各有关数据填入表 2-5, 并计算各测站的高差和 B 点的高程。

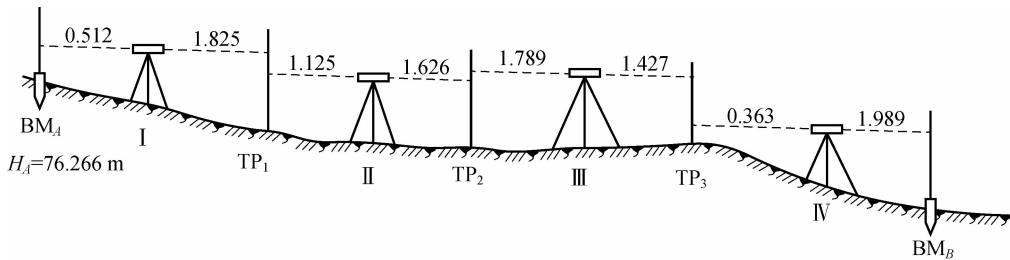


图 2-38 题 10 用图

表 2-5 题 10 用表

测 站	测 点	水准尺读数		高差/m		高程/m	备 注
		后视/m	前视/m	+	-		
I	BM _A						
	TP ₁						
II	TP ₁						
	TP ₂						

续表

测站	测点	水准尺读数		高差/m		高程/m	备注
		后视/m	前视/m	+	-		
III	TP ₂						
	TP ₃						
IV	TP ₃						
	BM _B						
计算校核							

11. 根据表 2-6 中的数据,计算高差、高程并进行校核。

表 2-6 题 11 用表

测站	测点 (立尺点)		中丝读数/m	每站高差(后-前)/m	高程/m	备注
1	后视	BM ₆	1.442		73.123	已知点
	前视	TP ₁	1.002			
2	后视	TP ₁	0.857			
	前视	TP ₂	1.412			
3	后视	TP ₂	2.456			
	前视	TP ₃	0.685			
4	后视	TP ₃	1.876			
	前视	临 1	2.443			
检核计算	后视	$\sum a$		$\sum h =$		
	前视	$\sum b$				

12. 图 2-39 为附和水准路线的观测成果和简图。试在表 2-7 中完成水准测量成果计算。

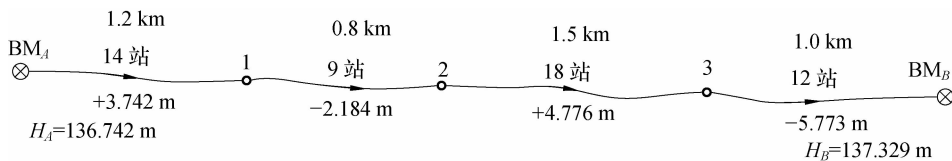


图 2-39 题 12 用图

表 2-7 题 12 用表

测段编号	点 名	测 站 数	实测高差/m	高差改正数/m	改正后高差/m	高程/m	备 注
	Σ						

13. 调整图 2-40 所示的闭合水准路线的观测成果, 在表 2-8 中完成水准测量成果计算, 并求出各点高程。

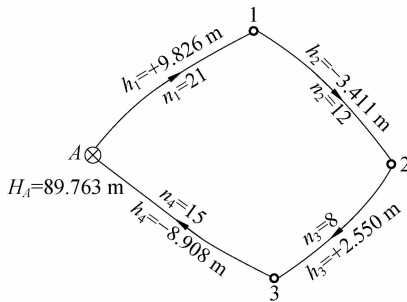


图 2-40 题 13 用图

表 2-8 题 13 用表

点 名	测站数或距离	观测高差/m	高差改正数/m	改正后高差/m	高程/m	备 注
	Σ					

14. 将水准仪安置在 A、B 两点的中间, 读得后视读数 a_1 为 1.564 m, 前视读数 b_1 为 1.762 m。当将水准仪搬到前视点 B 的附近时, 读得后视读数 a'_2 为 1.204 m, 前视读数 b'_2 为 1.456 m, 问水准管轴是否平行于视准轴? 若不平行, 视线是上倾还是下倾? 应如何进行校正?

模块3 角度测量

学习目标

【知识目标】 了解光学经纬仪、电子经纬仪的基本结构；了解测角误差的影响和误差的消除方法；掌握水平角、竖直角测量的原理与方法；熟悉光学经纬仪的读数方法与使用方法。

【技能目标】 能熟练操作 DJ₆ 型光学经纬仪，并能进行水平角和竖直角测量；能进行水平角和竖直角的记录、计算；能进行光学经纬仪的校验与校正。

本模块主要介绍角度测量的基本原理、角度测量的仪器和操作方法、经纬仪的使用和检验校正、测角误差的影响和消除误差的方法。本模块的学习重点是测角原理、经纬仪的操作与检验校正、测角误差的影响和误差消除方法。本模块的难点是水平角和竖直角的计算、经纬仪的检验与校正。

3.1 角度测量的基本原理

为了确定一点的空间位置，角度是基本要素之一，角度测量是测量的一项基本工作。

3.1.1 水平角测量的原理

地面上一点到两目标方向线的垂直投影在水平面上所形成的夹角，称为水平角。如图 3-1 所示，地面上有测站点 O ，目标点 A 、 B ，将 OA 、 OB 投影到水平面 H 上，其投影直线 O_1A_1 与 O_1B_1 所形成的夹角 β 即水平角。因此，水平角就是通过 OA 、 OB 的两个竖直面 V_1 、 V_2 所夹的二面角。

为了测定水平角，可以在地面点 O 上水平安置一个带有刻度的圆盘水平度盘，并使圆盘中心在过 O 点的铅垂线上；通过 OA 和 OB 各作一个铅垂面 V_1 、 V_2 ，设这两个铅垂面在刻度盘上截取的读数分别为 a 和 b ，则所求水平角值为

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

水平角 β 的角值为右读数 b 减去左读数 a ，若观测者面向观测角方向，则左侧为

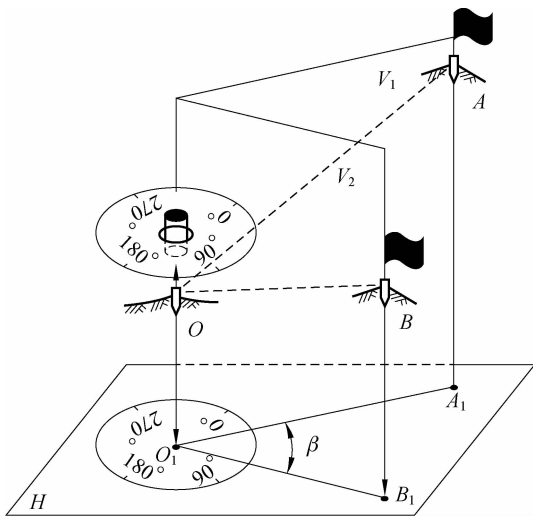


图 3-1 水平角测量的原理图示

左目标,右侧为右目标,若右目标的读数小于左目标的读数,即 $b < a$,则要先加上 360° ,即

$$\beta = b + 360^\circ - a \quad (3-2)$$

水平角没有负值,取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

3.1.2 竖直角测量的原理

在同一竖直面内,一点至观测目标的视线与水平线所夹的锐角称为竖直角,也称为高度角,通常用 α 表示。如图 3-2 所示,若倾斜视线在水平线之上,则竖直角为正,称为仰角;若倾斜视线在水平线之下,则竖直角为负,称为俯角。竖直角的取值范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。目标方向与天顶方向(该点的铅垂线方向)所构成的角称为天顶距,一般用符号 Z 表示,其角值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

竖直角与天顶距的关系为

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

因此,在测量工作中,竖直角和天顶距只需测出一个即可。

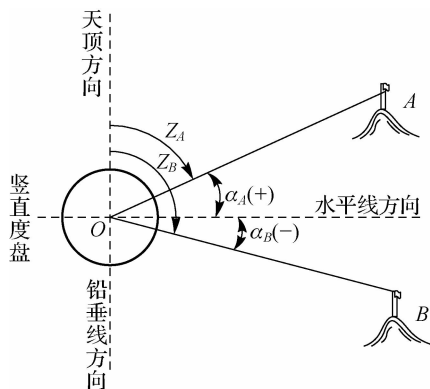


图 3-2 竖直角测量的原理图示

为了测定竖直角,可在照准设备(望远镜)旁安置一个带有刻度的竖直圆盘(称为竖直度盘,简称竖盘),竖直度盘的中心与望远镜旋转横轴的中心重合,度盘平面与横轴轴线垂直,视线水平时指标线为一个固定读数,当望远镜照准目标时,竖盘随之转动,则望远镜照准目标的方向线读数与水平方向上的固定读数之差为竖直角。对观测仪器而言,水平视线方向的竖直度盘读数应为 90° 的整倍数。因此,在测量竖直角时,只要瞄准目标,读取竖直度盘的读数,就可以计算出竖直角。

3.2 角度测量的仪器及其使用

3.2.1 经纬仪的型号

根据测角原理设计制造的用以观测水平角、竖直角的仪器称为经纬仪。经纬仪是工程测量中最常用的一种仪器,根据读数系统的不同,经纬仪可分为光学经纬仪和电子经纬仪;按测角精度划分,光学经纬仪可分为 DJ₀₇、DJ₁、DJ₂、DJ₆、DJ₁₅ 五个等级。其中, DJ 为“大地测量”和“经纬仪”首

字汉语拼音的声母,下标 07、1、2、6、15 分别为该仪器一测回方向观测中误差[以秒(")为单位],即测角精度。不同精度的经纬仪所使用的场合不同,DJ₀₇、DJ₁、DJ₂ 型光学经纬仪用于精密角度测量,DJ₆、DJ₁₅ 型光学经纬仪用于普通角度测量。

3.2.2 DJ₆ 型光学经纬仪

水平度盘和竖直度盘都采用光学玻璃制造,利用光学系统读数的经纬仪称为光学经纬仪。每个等级的经纬仪,由于生产厂家的不同而有各种型号,仪器的部件和结构也不完全一样,但其主要部件的构造大致相同。北京光学仪器厂生产的 DJ₆ 型光学经纬仪如图 3-3 所示。

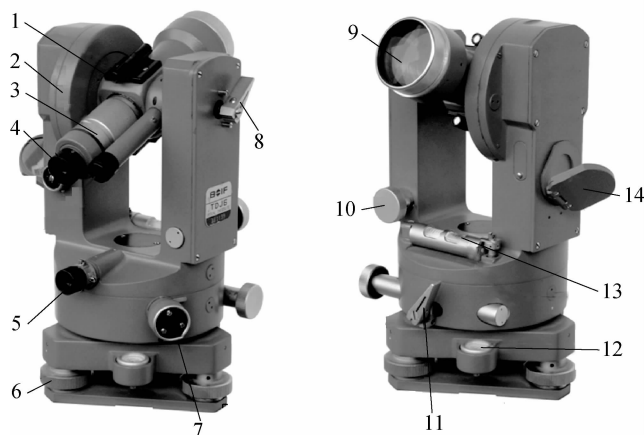


图 3-3 DJ₆ 型光学经纬仪

- 1—粗瞄器; 2—竖直度盘; 3—物镜调焦螺旋; 4—目镜调焦螺旋; 5—对点器; 6—脚螺旋;
7—度盘拨动手轮; 8—竖盘制动; 9—物镜; 10—水平微动螺旋; 11—水平制动扳钮;
12—圆水准器; 13—水准管气泡; 14—反光镜

1. 基本构造

光学经纬仪主要由照准部、水平度盘部分和基座组成。

(1)照准部。照准部的主要部件有望远镜、照准部水准管、竖直度盘、读数设备等。

①望远镜。望远镜由物镜、目镜、十字丝分划板、调焦透镜等组成。望远镜的主要作用是照准目标,其与横轴固连在一起,在制动螺旋和微动螺旋的控制下做上下转动。照准部可绕竖轴在水平方向上转动,在水平制动扳钮和水平微动螺旋的控制下做水平转动。

②照准部水准管。照准部水准管用于精确整平仪器。

③竖直度盘。竖直度盘是为了测竖直角而设置的,可随望远镜一起转动。另设竖盘指标自动补偿器装置和开关,借助自动补偿器使读数指标处于正确位置。

④读数设备。读数设备通过一系列光学棱镜将水平度盘和竖直度盘及测微器的分划都显示在读数显微镜内,通过仪器反光镜将光线反射到仪器内部,以便读取度盘读数。

另外,为了能将竖轴中心线安置在过测站点的铅垂线上,在经纬仪上都设有对点装置。一般光学经纬仪都设置有垂球对点装置或光学对点装置,垂球对点装置是在中心螺旋下面装垂球挂钩,将垂球挂在钩上的对点装置;光学对点装置是通过安装在旋转轴中心的转向棱镜,将地面点成像在对点分划板上,通过对中目镜放大,同时看到地面点对点分划板的影像,

若地面点位于对点分划板的刻划中心,且水准管气泡居中,则说明仪器中心与地面点位于同一条铅垂线上。

(2)水平度盘部分。水平度盘部分主要有水平度盘和复测扳手或度盘拨动手轮。

①水平度盘。水平度盘是一个光学玻璃圆环,圆环上按顺时针刻划注记 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 分划线,主要用来测量水平角。

②复测扳手。复测扳手又称为离合器。在观测水平角时,经常需要将某个起始方向的读数配置为预先指定的数值,称为水平度盘的配置。复测扳手就是水平度盘的配置机构,它可以控制水平度盘与照准部之间的离与合。将复测扳手往上扳时,度盘与照准部分离,照准部转动,度盘不动,此时读数就会随照准部的转动而变化;将复测扳手往下扳时,度盘与照准部结合在一起随照准部一起转动,读数保持不变。所以,在观测时,复测扳手应保持向上。

③度盘拨动手轮。有的仪器没有离合器装置,而单独设有拨动手轮,转动手轮可以使水平度盘转动。

(3)基座。与水准仪类似,经纬仪的基座主要由轴座、脚螺旋、圆水准器和连接板组成。

①轴座。轴座用于支撑仪器的上部结构,将竖轴轴套插入到轴座内,用轴座固定螺旋紧固,即可将仪器上部固定连接在基座上。使用仪器时,切勿松动轴座的固定螺旋,以防仪器因与基座脱离而摔坏。

②脚螺旋。脚螺旋用来整平仪器,通过调节脚螺旋可使照准部水准管的气泡居中,竖轴竖直,水平度盘水平。

③圆水准器。圆水准器用于粗略整平仪器。

④连接板。通过连接板可将仪器固定在脚架上。

2. 测微装置

由于受到度盘尺寸的限制,光学经纬仪的度盘分划线的最小分划值难以直接刻划到秒,一般只能刻划到 1° 或 $30'$,为了实现精密测角,要借助光学测微技术制作测微装置来测量不足度盘分划值的微小角值,所以,测微装置就是用来测定不足度盘格值的读数装置。DJ₆型光学经纬仪常用的测微装置有分微尺和单平板玻璃测微器两种。使用不同的测微装置,读数方法也不相同。

(1)分微尺。分微尺为一块平板玻璃,上面一般刻有60格分划线,并每隔10格注记,安装在光路上的读数窗之前。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,分微尺就可将这一间隔等分为60格。图3-4所示为在读数显微镜中看到的度盘影像和分微尺影像,上面注有“H”或“水平”的窗口为水平度盘读数窗,下面注有“V”或“竖直”的窗口为竖直度盘读数窗。通常DJ₆型光学经纬仪的度盘分划间隔为 1° ,所以分微尺上的一格就代表 $1'$,每10格注记表示整 $10'$ 。读数时,先读出落在分微尺间的度盘线注记的整度数(如图中的水平度盘为 57°),再以度盘分划线为指标线,读取微小角值的整 $10'$ 数(分微尺注记数,如图中为 $30'$),再读出分数,并估读到 $0.1'$ (如图中可读为 $7.7'$);然后,将这三部分相加就可得到完整的读数(如图中为 $57^{\circ}37.7'$,记为 $57^{\circ}37'42''$)。同理,图3-4中竖直度盘的读数为 $97^{\circ}17'30''$ 。

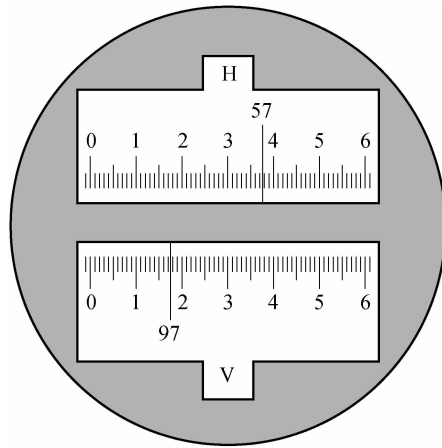


图 3-4 分微尺的读数窗

(2)单平板玻璃测微器。单平板玻璃测微器主要由平板玻璃、测微尺、测微轮和传动装置等组成。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,可以使平板玻璃与测微尺同轴旋转,平板玻璃将随之倾斜。根据光学原理,此时出射光线与入射光线不共线而是偏移一个量,这个量可以在测微尺上读出。图 3-5 所示为在单平板玻璃测微器经纬仪读数显微镜中看到的影像,共有三个读数窗,上面的小窗口为测微窗,有一根单指标线;中间的窗口为竖直度盘,下面的窗口为水平度盘,均有双指标线。度盘格值为 $30'$,测微尺分为 30 个大格,每大格分为 3 个小格,因此大格为 $1'$,小格为 $20''$ 。读数前,应先转动测微轮,使某一度盘的分划线位于双指标线的中间读出度数和整 $30'$ 数[图 3-5(a)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读数[图 3-5(a)的读数为 $8'47''$],两者相加即水平度盘的读数 $7^\circ 38'47''$ 。竖直度盘的读数方法与此相同,如图 3-5(b)中竖直度盘的读数为 $97^\circ 20'40''$ 。

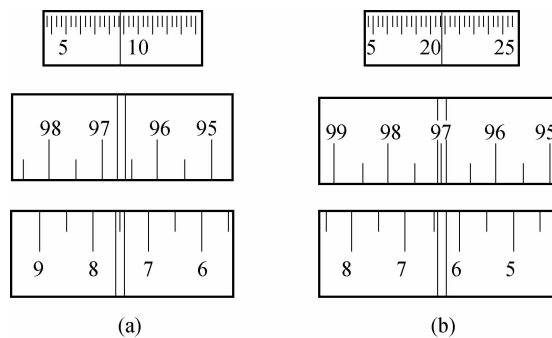


图 3-5 单平板玻璃测微器的读数窗

3.2.3 电子经纬仪

传统的光学经纬仪采用的是玻璃度盘刻划并注记,配以光学测微器读取角值的读数系统;随着科技的发展,采用光电度盘读数系统,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的电子经纬仪已逐渐普及开来。如图 3-6 所示,电子经纬仪与光学经纬仪具有相似的外形结构,在仪器的操作方面也具有相同之处。



图 3-6 南方 DT-05 电子经纬仪

相比光学经纬仪,电子经纬仪具有以下特点。

- (1) 实现了测量的读数、记录、计算、显示自动一体化,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) 储存的数据可通过输入/输出(in/out,I/O)接口输入计算机进行相应的数据处理。
- (4) 与光电测距仪联机可组成组合式全站仪,进行各种测量工作。

电子经纬仪的关键部件是光电度盘,仪器获取的电信号与光电度盘的形式有关。目前,电子经纬仪有编码度盘、光栅度盘和格区式度盘三种测角形式的光电度盘。

3.2.4 经纬仪的基本使用方法

在进行角度测量时,应先将经纬仪安置在测站点(角顶点)上,使水平度盘居于水平位置,然后进行观测。经纬仪的技术操作有对中、整平、照准、读数与配置度盘读数(或置数)等步骤。

1. 对中

对中的目的是使水平度盘的中心与测站点(标志中心)位于同一条铅垂线上。对中时可采用垂球对中或光学对中器对中,垂球对中的精度一般在 3 mm 以内,光学对中器的对中精度可达到 1 mm。

(1) 用垂球对中。打开三脚架并调整到合适高度(平胸),将架头大致水平地安放在测站点上,架腿与地面约成 75° 角。在脚架连接螺旋的下方悬挂垂球,如果垂球尖离中心太远,可以先固定一个脚架尖移动另外两个脚架尖,或将三脚架整体平移,使垂球尖大致对准测站点的中心,再踏紧脚架尖。然后装上经纬仪,旋上连接螺旋(不要旋紧),双手扶好基座,在架头上平移仪器,使垂球尖精确对准测站点。最后,将连接螺旋拧紧。若在架头上移动仪器无法精确对中时,则需要重新调整三脚架的脚位,此时应注意先旋紧中心螺旋,以防仪器摔落。

(2) 用光学对中器对中。由于垂球容易摆动,有风时操作更加困难,因此一般采用光学

对中器安置经纬仪。利用光学对中器对中时,应先平移脚架,使仪器大致对中,调节光学对中器的目镜,使地面点的影像清晰。此时,可根据对面情况固定一个脚架尖,移动另外两个脚架尖,使地面点的影像进入对中器圆圈中心,若还有微小偏差,可稍松开中心连接螺旋,在架头上移动仪器,使其精确对中,再将脚架的三个架腿踩紧。

2. 整平

整平的目的是使仪器竖轴铅垂,使水平度盘处于水平位置。在操作时,分为粗略整平和精确整平两步。

(1)粗略整平。经纬仪的粗略整平主要靠调节脚架达到目的,特别是使用光学对中器的仪器,尤其需要注意不能随便转动脚螺旋。操作时,根据圆水准器中气泡的位置判断脚架各个方向的高低情况,一般保留偏高的架腿不动,将两条偏低的架腿升高,使圆水准器中的气泡居中。在调节过程中,应注意不可使脚架的位置发生变化。

(2)精确整平。将圆水准器中的气泡居中之后,需进一步调节仪器。操作时,松开水平制动螺旋,转动照准部使照准部水准管与任意两个脚螺旋的连线平行。双手相向转动这两个脚螺旋使气泡居中,如图 3-7(a)所示(注意气泡移动方向与左手大拇指的移动方向一致);再将照准部旋转 90° ,调整第三个脚螺旋使气泡居中,如图 3-7(b)所示。如此反复操作,直到将仪器转至任意位置,水准管气泡均居中且不超过 1 格时为止。

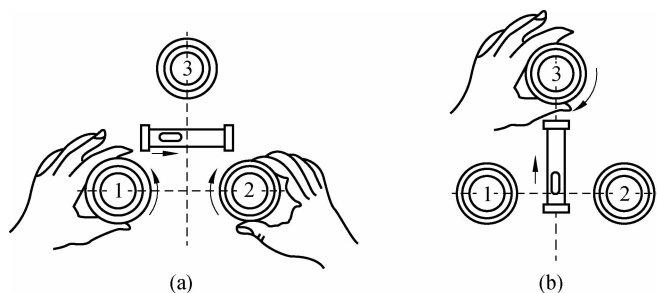


图 3-7 经纬仪的精确整平

需要注意的是,整平与对中是相互影响的,操作时应交替、反复进行,完成整平后,应再次观察对中器是否还在点位中心,如不在中心,应先稍微松开连接螺旋,在架头上轻轻移动仪器,使对中器精确对准点位,再拧紧连接螺旋,重复整平步骤,直至仪器既对中又整平。

3. 照准

照准的目的是使望远镜十字丝交点和目标的影像重合。照准时,先松开水平和竖直制动螺旋,调节目镜,使十字丝清晰;再通过望远镜上的照门、准星或光学瞄准器粗略对准目标,拧紧水平和竖直制动螺旋;再进行物镜调焦,以达到能通过望远镜看到最清晰的目标,并消除视差。最后,转动水平和竖直微动螺旋,使十字丝分划板的竖丝精确地照准(纵丝平分或夹准)目标,如图 3-8 所示。测量水平角时,应尽量对准目标底部。

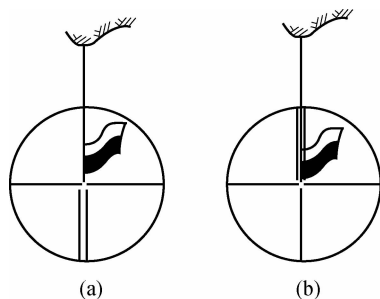


图 3-8 目标的照准

4. 读数与置数

读数的目的是读出照准方向的度盘数字。读数时,先将进光反光镜张开适当角度,并转动使镜面朝向光源,使读数窗明亮且亮度均匀;旋转显微镜调焦螺旋,使分划和注记清晰,然后读数。

为了减小误差和方便测设,有时需要将水平度盘的读数调整到 $0^{\circ}00'00''$ 或某个指定读数(如 $167^{\circ}35'36''$),这一操作称为置数。当把水平度盘的读数调整为零时,称为置零。由于仪器的不同,置数的方法也有所不同。

(1)复测经纬仪置数。装有度盘离合器的经纬仪称为复测经纬仪。复测经纬仪一般采用“先配盘后瞄准”的方法置数。即先转动测微轮,使测微尺的读数为 $0^{\circ}00'00''$ (或置为指定读数中小于度盘分划值的微小角值,如 $5'36''$);然后将复测扳手往上扳,转动照准部,用水平微动螺旋将度盘 0° (或指定读数的度数和整 $30'$ 数,如 $167^{\circ}30'$)分划线准确夹在双指标线的中央,再将复测扳手往下扳;接着转动照准部准确照准目标后,再将复测扳手往上扳。此时,照准目标方向的水平度盘的读数为 $0^{\circ}00'00''$ (或 $167^{\circ}35'36''$)。

(2)方向经纬仪置数。装有度盘拨动手轮的经纬仪称为方向经纬仪,一般采用“先瞄准后配盘”的方法置数。即先转动照准部准确照准目标,制动仪器;再打开度盘拨动手轮的护盖,转动度盘拨动手轮使水平度盘读数为 $0^{\circ}00'00''$ (或欲配置数,如 $167^{\circ}35'36''$),最后盖上度盘拨动手轮的护盖。

3.3 水平角观测

普通角度测量中常用的水平角测量方法有测回法和方向观测法。测回法常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 3-9 所示,设 O 为测站, A 、 B 为观测目标,欲测定水平角 $\angle AOB$ 可采用测回法,其观测步骤和数据记录、计算方法如下。

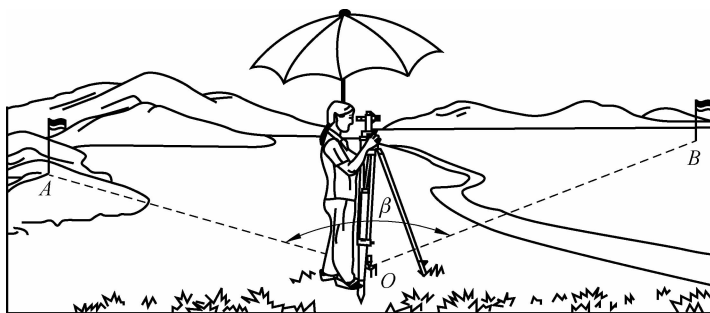


图 3-9 测回法测水平角

1. 安置仪器

在顶点 O 处安置经纬仪, 对中、整平; 并在 A 、 B 两个目标点处设置标志(竖立测钎或花杆)。

2. 盘左观测

将经纬仪的竖直度盘放置在望远镜的左侧(称为盘左或正镜), 转动照准部, 先精确照准 A 点, 制动仪器; 并调节目镜和望远镜调焦螺旋, 使十字丝和目标成像清晰, 消除视差; 读取水平度盘的读数 $a_L(0^\circ 03' 18'')$, 称为方向读数, 记入手簿的相应位置(见表 3-1); 接着松开制动螺旋, 顺时针旋转照准部, 精确照准 B 点, 读取水平度盘的读数 $b_L(97^\circ 19' 36'')$, 记入手簿的相应位置。以上称为盘左上半测回, 由此计算得到上半测回的角值 β_L 为

$$\beta_L = b_L - a_L = 97^\circ 16' 18''$$

3. 盘右观测

松开制动螺旋, 纵转望远镜, 使竖直度盘位于望远镜的右侧(称为盘右或倒镜), 先照准 B 点, 读取水平度盘的读数 $b_R(277^\circ 19' 36'')$; 再逆时针旋转照准部照准 A 点, 读取水平度盘的读数 $a_R(180^\circ 03' 24'')$, 记入手簿。以上称为盘右下半测回, 其角值 β_R 为

$$\beta_R = b_R - a_R = 97^\circ 16' 12''$$

4. 取平均值

上、下半测回合称为一测回, 从理论上讲, 两次测得的角值应该相等, 但由于各种误差的影响, 使其相差一个 $\Delta\beta(\Delta\beta = \beta_L - \beta_R)$, 称为较差, 当 $\Delta\beta$ 在容许范围内时(DJ₆型经纬仪为 $\pm 36''$, 表 3-1 中相差 $6''$, 在容许范围内), 观测结果合格, 取盘左、盘右观测的两个半测回值的平均值作为一测回角值 β , 即

$$\beta = \frac{1}{2}(\beta_L + \beta_R) = 97^\circ 16' 15''$$

当 $\Delta\beta$ 超过容许范围时, 说明观测有误, 应检查数据, 重新观测。当要提高测角精度时, 往往要对一个角度观测若干个测回。为了减小度盘分划不均匀误差的影响, 在各测回之间, 应按测回数 n 将水平度盘的位置依次变换 $180^\circ/n$ 。例如, 对于某角, 要求观测三个测回, 则各测回的起始度盘读数应按 60° 递增, 第一测回起始方向(左目标)的水平度盘位置应配置在略大于 0° 处, 第二、三测回起始方向的水平度盘的位置应分别配置在略大于 60° 、 120° 处。由表 3-1 可知, 该观测共观测两测回, 故第二测回起始方向的水平

度盘的读数应为 $97^{\circ}02'06''$ 。各测回之间的角值之差称为测回差,应不超过 $\pm 24''$ 。

表 3-1 测回法观测手簿

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		
			°	'	''	°	'	''	°	'	''	°	'	''
O	左	A	0	03	18	97	16	18	97	16	15	97	16	12
		B	97	19	36									
	右	B	277	19	36	97	16	12						
		A	180	03	24									
	左	A	90	02	06	97	16	06	97	16	09			
		B	187	18	12									
	右	B	7	18	24	97	16	12						
		A	270	02	12									

另外,由于水平度盘是顺时针刻划和注记的,因此在计算水平角时,总是用右目标的读数减去左目标的读数,如果不够减,应先在右目标的读数上加 360° ,再减去左目标的读数,决不可以倒过来减。

例如,在表 3-1 的第二测回中,盘右对准右目标(B 点)读数小于对准左目标(A 点)的读数,故该半测回角值应为 $7^{\circ}18'24'' + 360^{\circ} - 270^{\circ}02'12'' = 97^{\circ}16'12''$ 。

3.3.2 方向观测法

当测量三个及以上方向交汇于测站点所构成的几个角度时,使用方向观测法更为方便,因为使用这种方法测量时,照准部要旋转 360° ,所以方向观测法又称为全圆方向观测法。

1. 方向观测法的观测步骤

如图 3-10 所示,方向观测法的观测步骤如下。

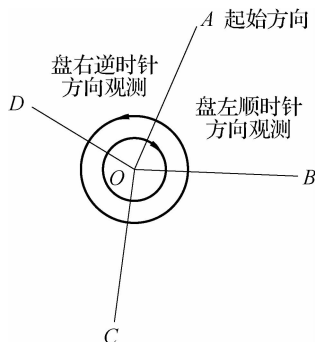


图 3-10 方向观测法测水平角

(1) 在 O 点安置好仪器,盘左照准起始方向 A 点,设置水平度盘读数稍大于 0° ,读数并记入表 3-2 中。

(2) 按顺时针方向依次照准 B、C、D 各点,分别读取各读数,记入表 3-2 中。

(3)继续按顺时针方向旋转照准部,照准 A 方向读数,称为归零,记入表 3-2 中。两次瞄准起始方向 A 的读数差称为归零差。

(4)纵转望远镜,盘右照准起始方向 A 点,读取水平度盘的读数,记入表 3-2 中。

(5)按逆时针方向依次照准 D、C、B 各点分别读取水平度盘的读数,记入表 3-2 中。

(6)继续按逆时针方向旋转照准部,照准 A 方向读数(归零),记入表 3-2 中。

以上顺时针方向、逆时针方向观测分别为上、下半测回,构成一个测回。

表 3-2 方向观测法记录手簿

测站	测点	水平度盘读数		2c	平均读数	归零后 方向值	各测回归 零方向值 的平均值	备 注
		盘左	盘右					
		° ' "	° ' "					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
O	A	00 15 00	180 15 12	-12	(00 15 03) 00 15 06	0 00 00	0 00 00	
	B	41 51 54	221 52 00	-6	41 51 57	41 36 54	41 36 51	
	C	111 43 18	291 43 30	-12	111 43 24	111 28 21	111 28 15	
	D	253 36 06	73 36 12	-6	253 36 09	253 21 06	253 21 03	
	A	00 14 54	180 15 06	-12	00 15 00			
	A	90 03 30	270 03 36	-6	(90 03 33) 90 03 33	0 00 00		
	B	131 40 18	311 40 24	-6	131 40 21	41 36 48		
	C	201 31 36	21 31 48	-12	201 31 42	111 28 09		
	D	343 24 30	163 24 36	-6	343 24 33	253 21 00		
	A	90 03 30	270 03 36	-6	90 03 33			

2. 记录手簿的计算

方向观测法记录手簿的计算如下。

(1)半测回归零差的计算。计算表 3-2 中第(3)栏和第(4)栏中起始方向 A 的两次读数之差,即半测回归零差,看其是否符合表 3-3 的要求。

(2)两倍照准误差 2c。同一方向上盘左、盘右读数之差计为 2c,即

$$2c = \text{盘左读数} - (\text{盘右读数} \pm 180^\circ) \quad (3-4)$$

式中,当盘右读数大于 180°时取“-”号,反之取“+”号。

《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)只规定了 DJ₆ 型以上经纬仪的 2c 值的变化范围的限值,对于 DJ₆ 型未做具体规定。

(3)计算各方向的平均读数。

$$\text{平均读数} = \frac{1}{2} [\text{盘左读数} + (\text{盘右读数} \pm 180^\circ)] \quad (3-5)$$

将计算结果填入表 3-2 中的第(6)栏。该栏括号内的读数为各测回起始方向的平均读数。

(4) 计算各方向归零后的方向值。将各方向的平均读数减去起始方向的平均读数(括号中的数)后即得各方向归零后的方向值,填入表 3-2 中的第(7)栏。

(5) 计算各测回归零后方向值的平均值。各测回归零后同一方向值的互差应符合表 3-3 的要求,在符合要求后取其平均值作为该方向的最后结果,填入表 3-2 中的第(8)栏。

《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)规定,方向观测法的限差应符合表 3-3 的规定。

表 3-3 方向观测法的限差

仪器型号	半测回归零差	各测回同方向 $2c$ 值互差	各测回同一方向值互差
DJ ₂	12"	18"	12"
DJ ₆	18"	—	24"

3.4 竖直角的相关计算及观测

3.4.1 竖盘的结构及读数系统

由前述可知,竖直角是在同一竖直面内、一点至目标的视线与水平线所夹的锐角,即竖直角等于照准目标时倾斜视线的读数与水平视线读数的差值。因为水平视线在竖盘上的读数是个定值,所以竖直角就等于照准目标时倾斜视线的读数与该固定值的差值。

简单地说,竖直角测量装置包括竖直度盘、竖盘指标水准管和竖盘指标水准管微动螺旋,如图 3-11 所示。竖直度盘被固定在望远镜横轴的一端,随望远镜在竖直面内一起俯仰转动,为此,必须有一个固定的指标来读取望远镜视线倾斜和水平时的读数。竖盘指标水准管与由一系列棱镜、透镜组成的光具组为一个整体,被固定在竖盘指标水准管微动架上,即竖盘指标水准管微动螺旋可使竖盘指标水准管做微小的俯仰运动。当水准管气泡居中时,水准管轴水平,光具组的光轴,即竖盘读数指标处于铅垂位置,用以指示竖盘读数。测角时,度盘随望远镜的旋转而旋转,而指标则固定不动,因而可读得不同位置的竖盘读数,得到不同目标的竖直角。

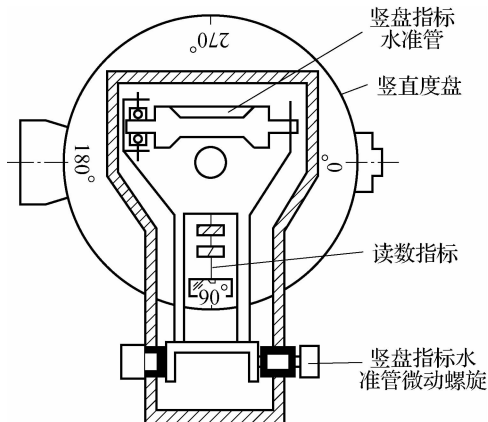


图 3-11 竖盘构造

光学经纬仪的竖直度盘为玻璃圆盘,其分划与水平度盘相似,但其注记形式较多,对于DJ₆型光学经纬仪,竖盘刻度通常有0°~360°顺时针和0°~360°逆时针注记两种形式,如图3-12所示。当视线水平(视准轴水平)且竖盘水准管气泡居中时,竖盘盘左位置竖盘指标的正确读数应为90°;当视线水平且竖盘水准管气泡居中时,竖盘盘右位置竖盘指标的正确读数应为270°。

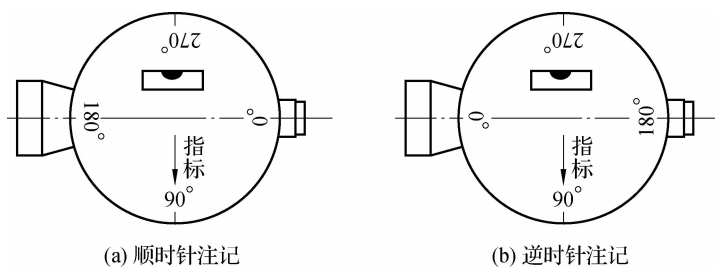


图3-12 竖盘刻度注记形式

现在常用的光学经纬仪多采用自动归零装置(补偿器)来取代指标水准管的功能。自动归零装置为悬挂式(摆式)透镜,安装在竖盘光路的成像透镜组之后。当仪器稍有倾斜、读数指标处于不正确位置时,归零装置靠重力作用使悬挂透镜的主平面倾斜,通过悬挂透镜的边缘部分折射,使竖盘成像透镜组的光轴到达读数指标的正确位置,实现读数指标自动归零(自动补偿)。其补偿原理与自动安平水准仪类似。使用自动归零经纬仪测量竖直角时无须调节指标水准管,照准目标即可立即读取竖盘读数,提高了工作效率。但该装置的补偿范围有限(一般为±2′),所以作业时应注意将仪器整平;同时,使用前应检查补偿器的有效性,避免失灵造成读数错误。带有补偿器锁紧钮的仪器,使用前应打开锁紧钮让其处于悬挂的工作状态,用后再将其锁紧,以防搬站、运输时损坏补偿器。

3.4.2 竖直角计算

图3-13所示为常用的DJ₆型光学经纬仪(顺时针注记)在盘左时的三种情况。若指标位置正确,则当视准轴水平且指标水准管气泡居中时,指标所指的竖直度盘的读数 $L_{\text{始}}=90^\circ$,如图3-13(a)所示;当视准轴仰起,测量仰角时,读数 L 比 $L_{\text{始}}$ 小,如图3-13(b)所示;当视准轴俯下,测量俯角时,读数 L 比 $L_{\text{始}}$ 大,如图3-13(c)所示。由此可知,盘左时竖直角 α_L 的计算公式为

$$\alpha_L = 90^\circ - L \quad (3-6)$$

由式(3-6)可知,当 $\alpha_L > 0$ 时,观测角为仰角;当 $\alpha_L < 0$ 时,观测角为俯角。

图3-14所示为常用的DJ₆型经纬仪(顺时针注记)在盘右时的三种情况, $R_{\text{始}}=270^\circ$,与盘左相反,仰角时读数 R 比 $R_{\text{始}}$ 大,俯角时读数比 $R_{\text{始}}$ 小。因此,盘右时竖直角计算公式为

$$\alpha_R = R - 270^\circ \quad (3-7)$$

由于盘左、盘右一般都含有误差, α_L 和 α_R 不相等。我们取两者的平均值作为竖直角 α 的最后结果,则

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_R) \quad (3-8)$$

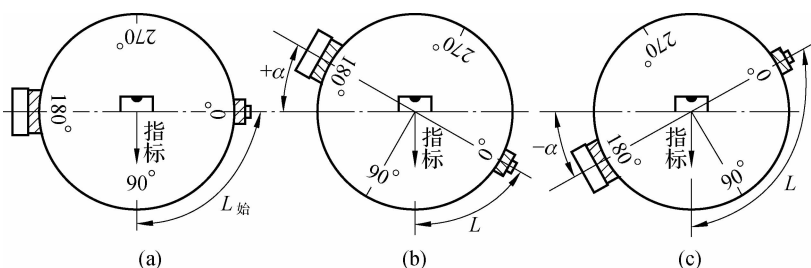


图 3-13 竖直角计算示意图(盘左)

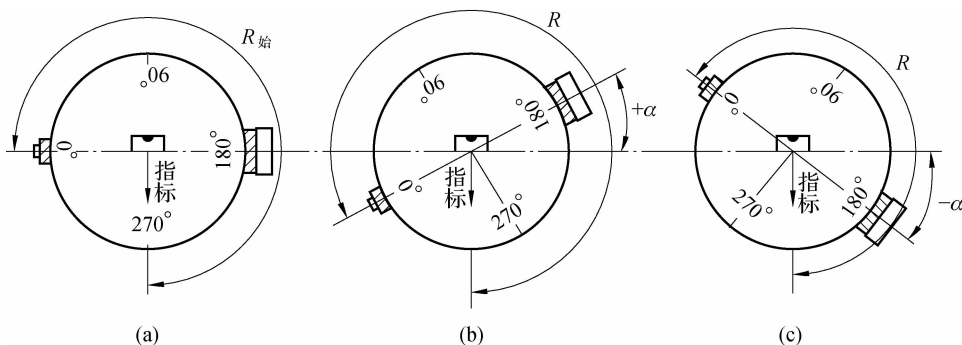


图 3-14 竖直角计算示意图(盘右)

3.4.3 竖盘指标差的计算

按照竖盘结构可知,望远镜视线水平且竖盘水准管气泡居中时,竖盘指标的正确读数应是 90° 的整倍数。但是由于各种原因,竖盘水准管与竖盘读数指标的关系难以完全正确。视线水平且竖盘水准管气泡居中时的竖盘读数与应有的竖盘指标正确读数之间有一个小的角度差 x ,称为竖盘指标差,即竖盘指标偏离正确位置引起的差值,如图 3-15 所示。竖盘指标差 x 本身有正负号,一般规定当竖盘读数指标偏移方向与竖盘注记方向一致时, x 取正号,反之 x 取负号。

图 3-15(a)所示为盘左位置,由于存在指标差,其正确的竖直角计算公式为

$$\alpha_L = (90^\circ + x) - L \quad (3-9)$$

图 3-15(b)所示为盘右位置,其正确的竖直角计算公式为

$$\alpha_R = R - (270^\circ + x) \quad (3-10)$$

将式(3-9)和式(3-10)相加并除以 2,得

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_R) = \frac{1}{2}(R - L - 180^\circ) \quad (3-11)$$

由此可见,在测量竖直角时,用盘左、盘右观测,取平均值作为竖直角的观测结果,可以消除竖盘指标差的影响。

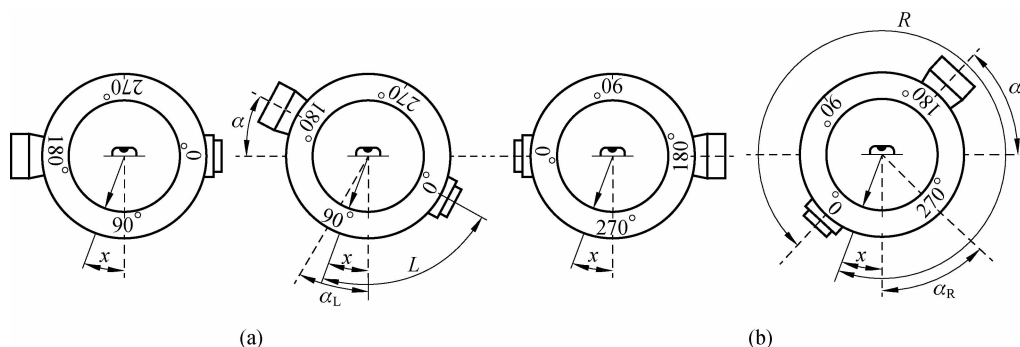


图 3-15 竖盘指标差

如果观测没有误差,从理论上讲,盘左测得的竖直角 α_L 与盘右测得的竖直角 α_R 应相等,即 $\alpha_L = \alpha_R$,则有

$$90^\circ + x - L = R - (270^\circ + x)$$

可得指标差的计算公式为

$$x = \frac{1}{2}(L + R - 360^\circ) \quad (3-12)$$

式(3-12)为竖盘指标差的计算公式。指标差互差(所求指标差之间的差值)可以反映观测成果的精度。

3.4.4 竖直角的观测

1. 竖直角的观测步骤

竖直角的观测方法有两种,一种是中丝法,另一种是三丝法。现在工程中常用的是中丝法,故这里只介绍中丝法的观测方法。

中丝法是指用十字丝的中丝切准目标进行竖直角观测的方法。现以测量实例介绍其操作步骤。

设 O 点为测站, A 、 B 分别为仰角、俯角目标,观测步骤如下。

(1) 安置仪器。在测站上安置经纬仪,对中整平;在目标点上设置标志,将竖直度盘置于盘左位置,将望远镜大致放平,然后将望远镜上仰,如果竖盘读数减小,说明竖直度盘为顺时针注记(反之为逆时针注记)。照准目标,固定照准部和望远镜,转动水平微动螺旋与望远镜微动螺旋,使十字丝的中丝精确对准目标的特定位置,如标杆的顶部或标尺上的某一位置。

(2) 盘左观测。照准目标 A ,转动竖盘指标微动螺旋,使指标水准管气泡居中;若仪器安装有自动归零装置,则直接照准目标 A 即可,读取竖盘读数 $L = 66^\circ 45' 23''$,记入表 3-4。根据式(3-6),得 $\alpha_L = 90^\circ - L = 90^\circ - 66^\circ 45' 23'' = 23^\circ 14' 37''$ 。

(3) 盘右观测。倒转望远镜,照准原目标 A ,转动竖盘指标微动螺旋,使指标水准管气泡居中,读取竖盘读数 $R = 293^\circ 14' 55''$,记入表 3-4。根据式(3-7),该半测回角值为

$$\alpha_R = R - 270^\circ = 293^\circ 14' 55'' - 270^\circ = 23^\circ 14' 55''$$

(4) 竖直角计算。

① 指标差计算。根据竖盘指标差计算公式式(3-12)可得

$$x = \frac{1}{2} (66^{\circ}45'23'' + 293^{\circ}14'55'' - 360^{\circ}) = +9''$$

②测回角计算。根据式(3-8)计算平均值,即

$$\alpha = \frac{1}{2} (23^{\circ}14'37'' + 23^{\circ}14'55'') = 23^{\circ}14'46''$$

用同样的方法观测目标 B ,并用指标差 x 检核观测中误差是否超限,如果超出限差要求应重测。若精度要求较高,可测若干测回取平均值作为最终观测结果。操作过程中,将观测数据及计算结果依次填入表 3-4 中。

表 3-4 竖直角观测记录手簿

测站	目标	竖盘位置	竖盘读数	半测回竖直角	指标差	一测回竖直角	备注
O	A	左	66°45'23"	23°14'37"	+9"	23°14'46"	竖直角 盘为顺时 针注记
		右	293°14'55"	23°14'55"			
	B	左	98°38'24"	-8°38'24"	-5"	-8°38'29"	
		右	261°21'26"	-8°38'34"			

2. 竖直角观测的限差要求

竖直角观测主要对以下两方面有限差要求。

(1)竖盘指标差互差。竖盘指标差可用来检查观测质量,竖盘指标差属于仪器误差。在同一测站上,竖盘指标差 x 可视为常数,各个方向的指标差在理论上应该相等,取盘左、盘右观测角值的平均值可消除 x 的影响。但在观测中,由于照准、整平和读数的影响, x 是不尽相同的,若 x 的变化(最大值与最小值之差)超过一定范围,则表明观测质量较差,就不可能消除其影响,必须返工重测。按《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011)规定,DJ₆型经纬仪的竖盘指标差互差的限差为 25"。

(2)竖直角互差。对同一目标不同测回间竖直角的互差,从理论上讲,对同一目标的竖直角观测所得数值应该相等,但在实际观测中,由于各种误差的影响,结果并不完全一致。按规定,DJ₆型经纬仪不同测回间竖直角的互差不应超过 25"。

3.5 光学经纬仪的检验与校正

为了测得正确、可靠的水平角和竖直角,使之达到规定的精度标准,作业开始之前必须对经纬仪进行检验和校正。

3.5.1 经纬仪的主要轴线及应满足的几何条件

如图 3-16 所示,经纬仪的主要几何轴线有视准轴 C_1C_1 、横轴 H_1H_1 、照准部水准管轴 L_1L_1 和仪器竖轴 V_1V_1 。为使经纬仪正确工作,其轴线应满足下列条件。

- (1)照准部水准管轴应垂直于竖轴($L_1L_1 \perp V_1V_1$)。
- (2)十字丝竖丝应垂直于横轴。

- (3) 视准轴应垂直于横轴($C_1C_1 \perp H_1H_1$)。
- (4) 横轴应垂直于竖轴($H_1H_1 \perp V_1V_1$)。
- (5) 竖盘指标差 x 应为零。
- (6) 光学对中器的视准轴应与竖轴重合。

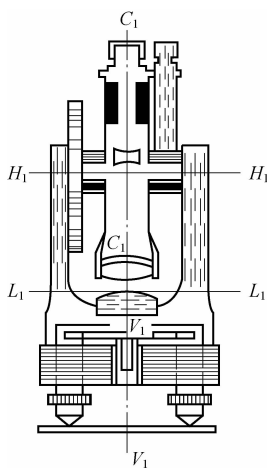


图 3-16 经纬仪的几何轴线

3.5.2 照准部水准管轴垂直于竖轴的检验与校正

1. 检校目的

整平仪器后(照准部水准管气泡居中后),应保证竖轴和垂线方向一致($L_1L_1 \perp V_1V_1$),从而使水平度盘处于水平位置。

2. 检验方法

先将仪器粗略整平后,使水准管平行于任意两个脚螺旋,并用两个脚螺旋使水准管气泡精确居中。然后将照准部旋转 180° ,若气泡仍然居中,则说明此条件满足。若偏移量超过 1 格则应进行校正。

若 L_1L_1 不垂直于 V_1V_1 ,则气泡居中时(L_1L_1 水平), V_1V_1 不铅垂,它与铅垂线有一个夹角 α ,如图 3-17(a)所示;当绕倾斜的 V_1V_1 旋转 180° 后, L_1L_1 便与水平线形成 2α 的夹角,如图 3-17(b)所示,它反映为气泡的总偏移量。

3. 校正方法

调节与水准管平行的脚螺旋,使气泡回移总偏移量的一半,如图 3-17(c)所示。用校正针拨动水准管一端的校正螺丝,使气泡居中,如图 3-17(d)所示。反复检校几次,直至满足要求。

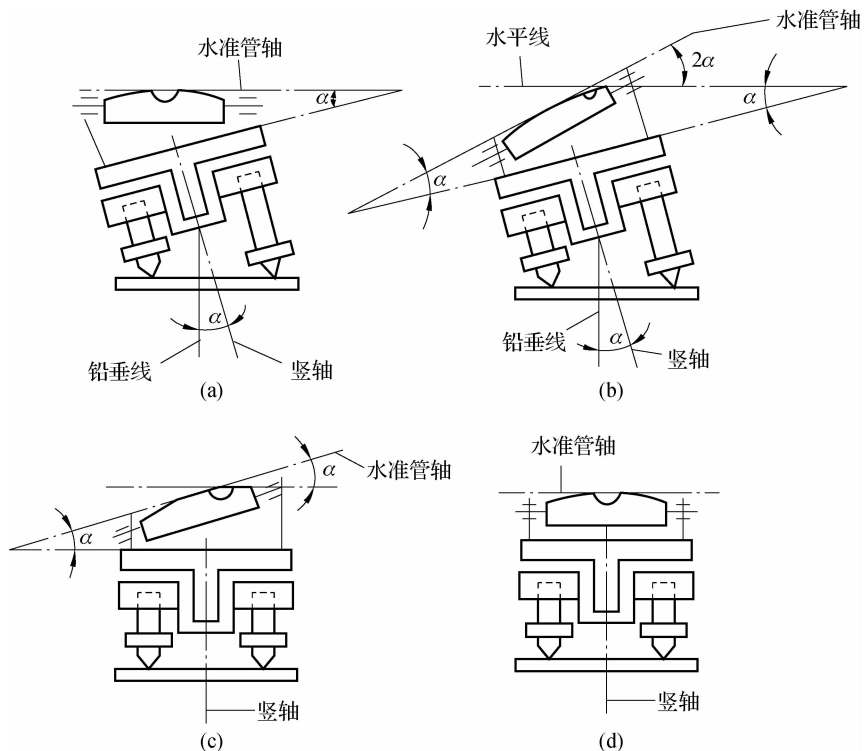


图 3-17 照准部水准管轴垂直于竖轴的检验与校正

3.5.3 十字丝竖丝垂直于横轴的检验与校正

1. 检验目的

满足在水平角测量时,保证十字丝竖丝与照准面一致,满足十字丝竖丝垂直于横轴 HH 。

2. 检验方法

整平仪器后,用十字丝竖丝的一端照准一个小而清晰的目标点,拧紧水平制动螺旋和望远镜制动螺旋,再用望远镜的微动螺旋使目标点移动到竖丝的另一端,如图 3-18(a)所示。若目标点此时仍位于竖丝上,则此条件满足;否则,需要校正。或者在墙壁上挂一根细垂线,用望远镜竖丝瞄准该垂线,若竖丝与垂线重合,则此条件满足;否则,需要校正。

3. 校正方法

校正十字丝分划板的位置,它位于望远镜的目镜端。将护罩打开后,有四个分划板固定螺旋,如图 3-18(b)所示。稍稍拧松这四个螺旋,慢慢转动分划板,直至条件满足。最后,旋紧固定螺旋,并将护罩盖好。

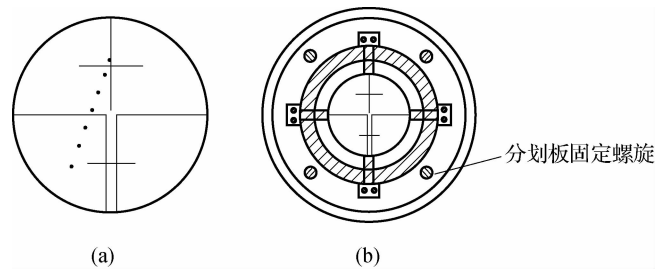


图 3-18 十字丝竖丝垂直于横轴的检验与校正

3.5.4 视准轴垂直于横轴的检验与校正

1. 检验目的

望远镜视准轴是物镜光心与十字丝交点的连线。望远镜物镜光心是固定的，而十字丝交点的位置是可以变动的。所以，视准轴是否垂直于横轴，取决于十字丝交点是否处于正确位置。当十字丝交点不在正确位置时，使得视准轴与横轴不垂直，偏离一个小角度 c ，称为视准轴误差。这个视准轴误差使视准面不是一个平面而成为一个锥面，这样对于同一铅垂面内不同高度的目标，其水平度盘的读数将不同，导致测角误差的出现，所以这项检验工作的目的就是保证经纬仪视准轴垂直于横轴 ($C_1C_1 \perp H_1H_1$)，从而使视准面成为平面。

2. 检验方法

如图 3-19 所示，选一块长约 100 m 的平坦地面，在一条直线上确定 A 、 O 、 B 三点 (OB 长度大于 10 m)，将仪器安置在 O 点。在 A 点设一个照准目标，在 B 点横放一把有毫米分划的小尺。先以盘左位置照准 A 点目标，固定照准部，纵转望远镜，在 B 点小尺上读数得 B_1 点。然后用同样方法以盘右照准 A 点，固定照准部，再纵转望远镜，在 B 点小尺上读数得 B_2 点，若 B_1 和 B_2 重合则条件满足，若不重合则条件不满足，需要进行校正。视准轴不垂直于横轴，相差一个 c 角，则盘左照准 A 时纵转望远镜后照准 B_1 点所得 B_1B 长为 $2c$ 的反映，盘右照准 A 时纵转望远镜后照准 B_2 点所得 B_2B 长也为 $2c$ 的反映，所以 B_1B_2 长为 $4c$ 的反映。则视准误差 c 为

$$c = \frac{1}{4} \frac{B_1B_2}{OB} \rho$$

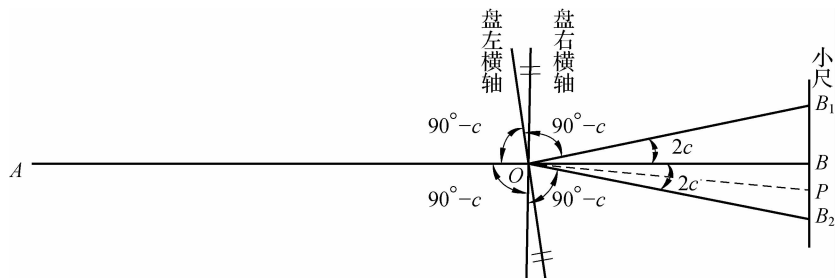


图 3-19 视准轴垂直于横轴的检验与校正

3. 校正方法

在图 3-19 中,若视线与横轴不垂直,存在视准误差 c , $\angle B_1OB_2 = 4c$,则只需校正一个 c 角。取靠近 B_2 点的 B_1B_2 的 $1/4$ 处 P 点,认为 $\angle POB_2 = c$,在照准部不动的条件下,校正分划板校正螺旋,使十字丝交点左右移动,使其对准 P 点,则此条件即可满足。

另外,也可采用水平度盘读数法进行检验,方法是分别用盘左和盘右照准同一目标,得盘左和盘右读数,两读数应相差 180° ,若不相差 180° ,则存在视准误差,即 $c = (a_L - a_R \pm 180^\circ) / 2$ 。校正时,盘右位置水平度盘的读数应为 $a'_R = a_R + c$,用水平微动螺旋使水平度盘读数为应读数 a'_R ,此时十字丝交点不再对准目标,利用十字丝校正螺丝校正十字丝分划板的位置,使交点对准目标即可。这种校正方法只对水平度盘无偏心或偏心差影响小于估读误差时有效;若偏心差过大,则用这种校正方法将得不到正确结果。

3.5.5 横轴垂直于竖轴的检验与校正

1. 检验目的

当仪器整平后,使横轴处于水平位置,在满足上述几个条件的前提下,上下转动望远镜将形成一个铅垂平面。若横轴不垂直于竖轴,则仪器整平后,即竖轴处于铅垂位置时,横轴不水平而是与水平线有一个夹角 i ,此时即使上述几个条件均满足,望远镜照准面也将为一个倾斜平面,其倾角也为 i ,此角称为横轴误差。横轴误差产生的原因是横轴两端的高度不相等。因此,该检验目的是使仪器满足 $H_1H_1 \perp V_1V_1$ 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

在竖轴铅垂的情况下,若横轴不与竖轴垂直,则横轴倾斜。若视准轴已垂直于横轴,则视准轴绕横轴旋转时构成的是一个倾斜平面。在进行这项检验时,应将仪器架设在一个高墙附近,如图 3-20 所示。在距离墙面 $20 \sim 30$ m 处将仪器整平以后,盘左照准墙壁高处一个清晰的目标点 P (倾角大于 30°),然后将望远镜放平,在墙上标出一点 P_1 ,再将望远镜改为盘右,仍然照准 P 点,放平视线,在墙上标出一点 P_2 ,若 P_1 和 P_2 两点重合,则此条件满足;否则需计算 i 值, i 值的计算式为

$$i = \frac{\overline{P_1P_2}}{2d \tan \alpha} \rho$$

式中, $\overline{P_1P_2}$ 为 P_1P_2 的距离(m); d 为仪器到目标的水平距离(m); $\rho = 206\,265''$ 。

对于 DJ₆ 型经纬仪,当 i 值超过 $20''$ 时,需要进行校正。

3. 校正方法

取 P_1 、 P_2 的中点 P_M ,则 P 与 P_M 在同一条铅垂线上。照准 P_M 点,将望远镜抬高使其与 P 点同高,则视线必然偏离 P 点。校正时保持仪器不动,校正横轴的一端,将横轴支架的护罩打开,松开偏心轴承的三个固定螺旋,转动轴承,使横轴端点上下移动。使视线落在 P 点上,校正好后,旋紧固定螺旋,并上好护罩。这项校正需打开支架护罩,不宜在室外进行,应在无尘的室内环境中进行,并使用专用的平行光管进行操作。

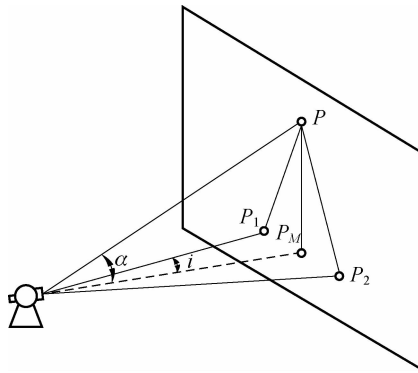


图 3-20 横轴垂直于竖轴的检验与校正

3.5.6 竖盘指标差的检验与校正

1. 检验目的

使竖盘指标差 x 为零,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

检验竖盘指标差的方法是用盘左、盘右照准同一个目标,并读得其读数 α_L 和 α_R 后,按指标差的计算公式来计算其值 x ,若不符合限差则需校正。

3. 校正方法

保持盘右照准原来的目标不变,这时的正确读数应为 $\alpha_R - x$ 。用指标水准管微动螺旋将竖盘读数安置在 $\alpha_R - x$ 的位置上,这时水准管气泡不再居中,调节指标水准管校正螺旋使气泡居中即可。对有竖盘指标自动补偿器的仪器应校正竖盘自动补偿装置。

3.5.7 光学对中器的检验与校正

1. 检验目的

满足光学对中器视准轴与仪器竖轴重合的条件。安置好仪器后,水平度盘的刻划中心、仪器竖轴和测站点应位于同一条铅垂线上。

2. 检验方法

在平坦的地面上安置仪器,严格整平,在地面脚架中央固定一张白纸,用光学对中器调焦,在纸上标记出视线的位置 P ,将光学对中器旋转 180° ,观察视线的位置 P 是否离开原来的位置或偏离超限;若是,则需要校正。

3. 校正方法

在纸板上画出分划圈的中心与 P 点的连线,取中点 P' 。通过调节对中器上相应的校正螺丝使 P 点移至 P' 点。反复 $1\sim 2$ 次,直到照准部旋转到任何位置时目标都落在分划圈的中心为止。

上述的每一项校正,一般都需要反复进行几次,直到误差在容许范围内且满足条件为止。

3.6 角度测量误差及注意事项

3.6.1 角度测量误差

在角度测量中存在着各种各样的误差。仪器误差和作业各环节产生的观测误差及外界条件的影响都会给角度测量的精度带来影响,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,对这些误差进行分析研究,采取相应的措施将其消除或控制在容许范围内。

测角误差有三类,即仪器误差、观测误差和外界条件影响造成的误差。

1. 仪器误差

仪器误差主要包括两个方面:一是仪器检校不完善,留有残余误差;二是仪器加工与制造不完善而引起误差。

经纬仪的各轴线之间如果不满足应有的几何条件,将会产生仪器误差,即使经过校正,也难免会存在残余误差,但只要仔细地检验和校正,采用正确的观测方法,大部分仪器误差的影响均可得到消除。

主要的仪器误差有水准管轴不垂直于竖轴造成的误差、视准轴不垂直于横轴造成的误差、横轴不垂直于竖轴造成的误差、照准部偏心造成的误差、竖盘指标差及度盘分划误差等。

(1)水准管轴不垂直于竖轴造成的误差。这项误差主要影响仪器的整平,竖轴不能严格铅垂,横轴也不水平,但在安置好仪器后,它的倾斜方向是固定不变的,不能用盘左、盘右消除。如果存在这一误差,可先在仪器整平且在一个方向上使气泡居中后,将照准部水平旋转 180° ,这时气泡必然偏离中央;然后用脚螺旋使气泡移回偏离值的一半,则可以使竖轴处于铅垂状态。这项操作要在互相垂直的两个方向上进行,直至照准部旋转至任何位置时,气泡虽不居中,但偏移量保持不变。

(2)视准轴不垂直于横轴造成的误差。这项误差又称为视准轴误差。因该误差对水平方向观测的影响值为 $2c$,并且盘左、盘右观测时该值符号相反,故在水平角测量时可采用盘左、盘右观测,取一测回平均值的方法予以消除。

(3)横轴不垂直于竖轴造成的误差。这项误差又称为横轴误差,盘左、盘右测量均含有此项误差,且大小相等、方向相反。故在水平角测量时,同样可采用盘左、盘右观测,并用取一测回平均值作为最后结果的方法来消除横轴误差。

(4)照准部偏心造成的误差。该误差由仪器零部件加工、安装不完善造成。照准部旋转中心 O' 与水平度盘刻划中心 O 不重合而产生的误差,又称为照准部偏心差。如图3-21所示,不存在该项误差时照准目标的盘左正确读数为 α_L ,存在该项误差时盘左的读数为 α'_L , α'_L 将比 α_L 大 x ,盘右读数将比正确读数小 x , x 即该项误差的影响,该影响的大小及符号是根据偏心方向与照准方向的关系而变化的。如果照准方向与偏心方向一致,其影响为零;当两者互相垂直时,影响最大。对于DJ₆型单指标读数类型的仪器,同一目标盘左、盘右观测取平均值即可消除照准部偏心差的影响。

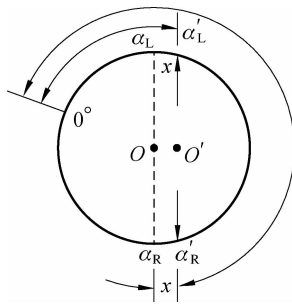


图 3-21 照准部偏心对读数的影响

(5) 竖盘指标差。竖盘指标差是由竖盘指标线不处于正确位置而引起的。其原因可能是竖盘指标水准管没有整平, 气泡没有居中, 也可能是经检校之后的残余误差。因此, 观测竖直角时, 首先应调节竖盘指标水准管, 使气泡居中。若此时竖盘指标线仍不在正确位置, 则可采用盘左、盘右观测一测回取其平均值作为竖直角度的方法来消除竖盘指标差。

(6) 度盘分划误差。由于仪器加工工艺不完善, 度盘的刻划总是或多或少存在误差。现代光学测角仪器的度盘分划误差很小, 一般可忽略不计。要提高测角精度, 可在观测水平角时先利用复测器扳手或水平度盘位置变换手轮在多个测回之间按一定方式 $(180^\circ/n)$ 变换水平度盘起始位置的读数, 使各测回间的方向值分布在度盘的不同区间, 然后取各测回角值的平均值, 即可有效地减小度盘分划误差的影响。

2. 观测误差

造成观测误差的原因有两个: 一个是工作时不够细心, 另一个是受到人的感官和仪器性能限制而产生误差。观测误差主要有测站偏心差、目标偏心差、照准误差、读数误差及竖盘指标水准器的整平误差(针对竖直角观测)。

(1) 测站偏心差。测站偏心差又称为对中误差, 是由于仪器中心与测站中心不重合而引起的误差。如图 3-22 所示, A 、 C 为目标点, B 为测站点, B' 为仪器中心, e 为偏心距, 若实际测得的角为 β' 而非应测的 β , δ_1 、 δ_2 为对中误差产生的测角影响, 则有测站偏心差为

$$\Delta\beta = \beta - \beta' = \delta_1 + \delta_2 = \left[\frac{\sin\theta}{d_1} + \frac{\sin(\beta' - \theta)}{d_2} \right] e \rho \quad (3-13)$$

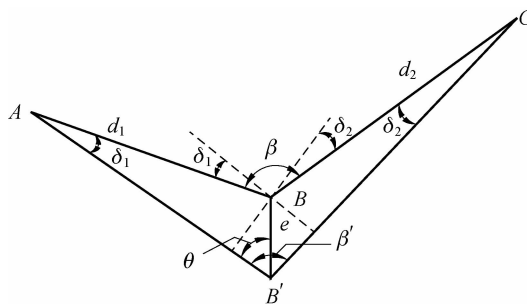


图 3-22 测站偏心差

由式(3-13)可知, 对中误差与偏心距成正比, 与边长成反比, 还与测角的大小有关, 测角

越接近 180° 其影响越大。对中误差不能通过观测方法消除,所以在观测水平角时要仔细对中,对于短边、钝角尤其要注意。

(2) 目标偏心差。观测水平角时,望远镜所瞄准的目标标志应处于铅垂位置。如图 3-23 所示,如果标志发生倾斜,瞄准目标标志的上部时,其投影 A' 与地面目标点 A 不重合,而产生目标偏心差。由图 3-23 可知,在测站 O 点上观测 $\angle AOB$ 的大小应该是 β ,但由于观测者瞄准了 A 目标的上部,由此而测得的水平角将不是 β ,而是 β' ,两者的差值即目标偏心差,其值为

$$\Delta\beta = \beta - \beta' = \delta = e_1 \frac{\sin \theta}{S} \rho \quad (3-14)$$

式中, e_1 为目标偏心距(m); S 为仪器至目标点的距离(m); θ 为目标偏心方向与观测方向的夹角($^\circ$)。

由式(3-14)可知, δ 与目标偏心距 e_1 成正比,与仪器至目标点的距离 S 成反比,当 $\theta = 90^\circ$ 时,即目标偏心方向与观测方向垂直时,目标偏心的影响最大。

因此,为了减少目标偏心对水平角观测的影响,提高测角精度,立在目标点上的标志应尽可能竖直,且瞄准时应尽可能瞄准目标点标志的底部。当边长短且看不到底部时,可以在目标点上悬挂垂球,通过瞄准垂球线进行读数。

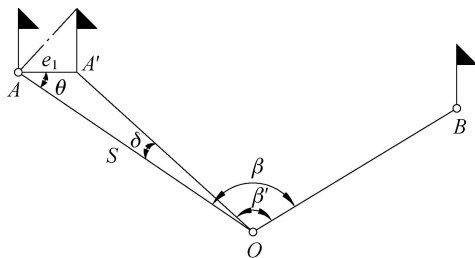


图 3-23 目标偏心差

(3) 照准误差。视准轴偏离目标理想瞄准线的夹角称为照准误差,照准误差的大小主要取决于人眼的分辨能力和望远镜的放大率。

照准误差无法消除,只能从照准标志的形状、大小、颜色、亮度等方面进行改进,来削弱其影响。照准时应仔细操作,对粗的目标宜用双丝照准,对细的目标宜用单丝照准。

(4) 读数误差。读数误差主要取决于仪器读数设备的照明度和判断的准确性。对于微尺读法,主要是估读最小分划的误差,对于 DJ_6 型经纬仪,读数的最大误差为 $\pm 12''$,而对于 DJ_2 型仪器,一般为 $\pm 2'' \sim \pm 3''$ 。电子经纬仪则不受读数误差的影响。

(5) 竖盘指标水准器的整平误差。在读取竖盘读数时,须先将指标水准器整平。 DJ_6 型仪器的指标水准器分划值一般为 $30''$, DJ_2 型仪器一般为 $20''$ 。这项误差对竖直角观测影响很大,操作时应特别注意。有自动归零装置的经纬仪则需注意是否超过其补偿范围。

3. 外界条件影响造成的误差

外界条件的影响因素很多,如温度变化、风力、大气折光、大气透明度等,这些因素均会影响观测结果的精度。具体情况如下。

- (1) 温度变化会影响仪器(如视准轴位置)的正常状态。
- (2) 大风会影响仪器和目标的稳定。
- (3) 大气折光会导致视线改变方向。
- (4) 大气透明度(如雾气)会影响照准精度。
- (5) 地面的坚实与否、车辆的振动等都会影响仪器的稳定。

为此,在测量角度时应采取措施,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,为仪器撑伞遮阳,尽可能使视线远离建筑物、水面及烟囱顶等,以防止这些部位因气温变化引起大气密度变化而产生大气折光等。

3.6.2 角度测量的注意事项

在进行角度测量时,应注意以下事项。

- (1) 观测前应先检验仪器,如不符合要求应进行校正。
- (2) 安置仪器要稳定,脚架应踩实,应仔细对中和整平。尤其对短边应特别注意仪器对中,在地形起伏较大的地区进行观测时,应严格整平,一测回内不得再次对中、整平。
- (3) 目标应竖直,仔细对准地面上标志的中心,根据远近选择不同粗细的标杆,尽可能瞄准目标杆的底部,最好直接瞄准地面上标志的中心。
- (4) 严格遵守各项操作规定和限差要求。采用盘左、盘右位置观测取平均值的观测方法。照准时应消除视差,一测回内观测应避免碰动度盘。在进行竖直角观测时,应先使竖盘指标水准管气泡居中,然后才能读取竖盘读数。
- (5) 应该对一个水平角进行 n 个测回(次)的观测,各测回间应变换度盘起始位置,每测回观测时度盘起始读数的变动值为 $180^\circ/n$ 。
- (6) 观测水平角时,应用十字丝交点附近的竖丝仔细照准目标底部;观测竖直角时,应以十字丝交点附近的中丝照准目标的顶部(或某一个标志)。
- (7) 读数应果断、准确,要特别注意估读数,应及时将观测结果记录到正规的记录手簿中,当场进行计算。直到确认各项限差都满足规定要求时,方能搬站。如有超限或者错误,应立即重测。
- (8) 选择有利的观测时间和避开不利的外界因素干扰。

思考与练习

1. 什么叫水平角? 什么叫竖直角? 它们的取值范围有什么不同?
2. DJ₆ 型经纬仪由哪几部分组成?
3. 经纬仪对中、整平的目的是什么?
4. 分微尺读数与单平板玻璃测微器读数有何不同之处? 现有使用分微尺读数装置与使用单平板玻璃测微器 DJ₆ 型经纬仪各一台,照准目标后的读数窗口分别如图 3-24 和图 3-25 所示,试分别读取其水平度盘和竖直度盘的读数。

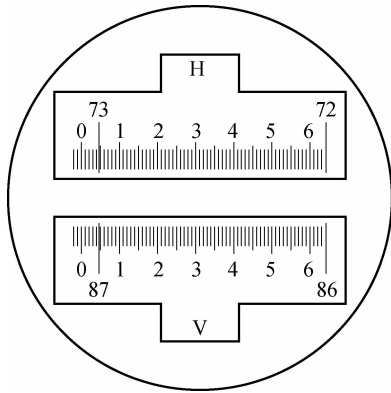


图 3-24 题 4 用图(一)

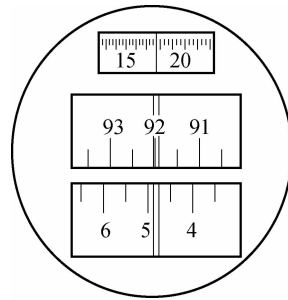


图 3-25 题 4 用图(二)

5. 如何利用经纬仪上的复测机构(度盘配置装置)进行置数?
6. 简述用测回法观测水平角的操作步骤。
7. 测量水平角时,采用盘左、盘右观测取平均值的方法可以消除哪些仪器误差?
8. 测量竖直角时,为什么在每次竖盘读数前应转动竖盘指标水准管的微动螺旋使气泡居中?
9. 用经纬仪照准同一竖直面内不同高度的两点时,水平度盘上的读数是否相同? 此时在竖直面度盘上的两读数差是否就是竖直角? 为什么?
10. 什么叫竖盘指标差? 如何消除?
11. 经纬仪有哪些主要轴线? 它们之间应满足哪些几何关系?
12. 在角度测量的过程中,有哪些方面的误差会对测量结果造成影响,如何消除或削弱这些影响?
13. 用 DJ₆ 型光学经纬仪按测回法观测水平角,观测数据见表 3-5,试进行水平角的各项计算。

表 3-5 题 13 用表

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
			° / ' / "	° / ' / "	° / ' / "	° / ' / "
O	左	A	0 00 24			
		B	58 48 54			
	右	B	238 49 18			
		A	180 00 54			
O	左	A	90 00 12			
		B	148 48 48			
	右	B	328 49 24			
		A	270 00 36			

14. 用 DJ₆ 型光学经纬仪按全圆方向观测法观测水平角, 观测数据见表 3-6, 试进行水平角的各项计算。

表 3-6 题 14 用表

测站号	测回数	目标	水平度盘读数		2 <i>c</i>	$\frac{L+(R \pm 180^\circ)}{2}$	一测回 归零方向值	各测回 平均方向值	水平角
			盘左(L)	盘右(R)					
			° / ' "	° / ' "	"	° / ' "	° / ' "	° / ' "	
O	1	A	00 00 26	180 00 22					
		B	60 00 00	239 59 54					
		C	131 49 32	311 49 30					
		D	167 34 18	347 34 10					
		A	00 00 28	180 00 28					
	2	A	90 02 36	270 02 32					
		B	150 02 18	330 02 14					
		C	221 51 44	41 51 38					
		D	257 36 30	77 36 24					
		A	90 02 36	270 02 34					

15. 用 DJ₆ 型光学经纬仪按中丝法观测竖直角, 观测数据见表 3-7, 试进行水平角的各项计算。

表 3-7 题 15 用表

测站	目标	竖盘位置	竖盘读数	半测回竖直角	指标差	一测回竖直角	备注
			° / ' "	° / ' "	"	° / ' "	
O	A	左	79 20 24				 盘左竖盘注记
		右	280 40 00				
	B	左	98 32 18				
		右	261 27 30				

16. 用 DJ₆ 型光学经纬仪观测某一目标, 盘左竖度盘的读数为 $71^\circ 45' 24''$, 该仪器竖盘注记为顺时针注记, 测得竖盘指标差 $x = +24''$, 试求该目标正确的竖直角 α 的值。