

适用于高等院校非测绘类专业

测量学通用基础教程

CELIANGXUE TONGYONG JICHU JIAOCHENG

刘 谊 汪金花 吴长悦 编

测 绘 出 版 社

P21
L703.1

文献

高等学校教材

测量学通用基础教程

(适用于非测绘专业)

刘谊 汪金花 吴长悦 编

图书编目(CIP)数据

测量学通用基础教程\刘谊等编. —北京:测绘出版社, 2002.8.

ISBN 7-5030-1584-6

IV. P2
I. 刘... II. 汪... III. 吴...
测量学 — 教材 — 测绘出版社
中国版本图书馆CIP数据核字

地址: 北京市北关大街100号 邮编: 100000
电话: (010) 68213386 68231228 网址: www.sino-map.com

北京市北关大街100号

测绘出版社

开本: 890 mm × 1240 mm 1/16 印张: 11 字数: 320千字

测绘出版社

中图: 3001-5600册

ISBN 7-5030-1584-6

定价: 26.00元

如有印装质量问题, 请与本社发行部联系

内 容 简 介

本书为综合类高等院校非测绘类专业教学用书。

全书内容分为两个模块:通用模块和方向模块。通用模块共 八章,介绍测量学的基础知识、基本方法及仪器的使用。第一章绪论,对测量学研究的对象和内容进行概要介绍;第二章水准测量,第三章角度测量,第四章距离测量,讲述测量学三大外业的方法及仪器的操作;第五、第六章,分别介绍测量误差理论基础和控制测量概念;第七章大比例尺地形图的测绘和应用,第八章测设的基本工作,是在前六章的基础上介绍测绘、测设的相关内容。方向模块共六章,分别介绍测量基本方法在建筑施工、道桥工程、管线工程、地籍测绘、地质勘测工程、矿山工程中的应用。

本书可作为高等院校土建类、交通运输类、水利类、环境与安全类、地球物理学类、地质学类、地矿类等相关专业本专科的测量学教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

© 刘 谊 汪金花 吴长悦 2005

图书在版编目(CIP)数据

测量学通用基础教程/刘谊等编. —北京:测绘出版社,2005.8

ISBN 7-5030-1284-6

I. 测... II. 刘... III. 测量学—高等学校—教材
IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 096873 号

测量学通用基础教程

刘 谊 汪金花 吴长悦 编

测绘出版社出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045

电话:(010)68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京市北关闸印刷厂印刷

新华书店经销

开本:890 mm×1240 mm 1/16 印张:11 字数:320 千字

2005 年 8 月第 1 版

2005 年 10 月第 2 次印刷

印数:3001—7000 册

ISBN 7-5030-1284-6

定价:26.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

测绘科学是一门很有特色的学科,作为空间数据基础设施建设的高技术产业,产业队伍规模相对较小,因而在我国本科教育中测绘专业很少。然而,测绘行业服务面却相当宽。我国 21 世纪议程的 62 个优先发展项目中,就有 42 个需要现代测绘这一空间数据基础设施产业支撑;测量学是测绘科学中的基础学科,应用更加广泛。目前,我国高等学校本科教育中,开设测量学的已有 5 个学科门类,17 个二级类中的 40 个专业。

测量学教学的特点:

1. 传统测量学主要有两个方面的工作:测绘和测设。这两方面工作的实质是“点位”的确定。从这个意义上来说,不同专业所学的测量学在原理本质上都是相同的。

2. 不同的专业,在原理的应用和方法上,又有着相当大的差异。

本书的编写面向多学科(非测绘类)开设测量学课程的综合类院校。前八章为“通用模块”(第一章,绪论;第二章,水准测量;第三章,角度测量;第四章,距离测量;第五章,测量误差理论基础;第六章,控制测量概念;第七章,大比例尺地形图的测绘和应用;第八章,测设的基本工作),构成测量学的基础,各专业共用。设置“通用模块”,旨在院校测绘学教学中整合教学资源,与教材配套的多媒体课件共享,规范教学质量管理和教学过程管理。后六章为“方向模块”(第九章,建筑施工测量;第十章,道桥工程测量;第十一章,管线工程测量;第十二章,地籍测绘;第十三章,地质勘测工程测量;第十四章,矿山测量),供土建类、交通运输类、水利类、环境与安全类、地球物理学类、地质学类、地矿类等相关专业教学选用。

本书前八章及“方向模块”中选修一章,总计约 70 教学学时。本书亦可作为专科、高等职业教育用书及工程技术人员参考用书。

本书承宋伟东教授、冯仲科教授审阅,在此谨致衷心的感谢!

由于编者水平有限,对书中的错误和不足之处,敬请专家、读者指正。

编者
2004 年 12 月

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 测量学的任务与作用	(1)
§ 1.2 地球的形状与大小	(2)
§ 1.3 地面点位的确定	(2)
第二章 水准测量	(7)
§ 2.1 水准测量原理	(7)
§ 2.2 水准测量的仪器与工具	(7)
§ 2.3 水准仪的使用	(11)
§ 2.4 水准测量的作业	(12)
§ 2.5 水准测量误差	(16)
§ 2.6 精密水准仪和电子水准仪简介	(17)
第三章 角度测量	(20)
§ 3.1 角度测量原理	(20)
§ 3.2 经纬仪的构造	(20)
§ 3.3 水平角观测方法	(22)
§ 3.4 竖直角观测方法	(25)
§ 3.5 水平角测量的误差	(27)
§ 3.6 直线定向	(30)
§ 3.7 全站仪及其使用	(32)
第四章 距离测量	(35)
§ 4.1 距离测量概述	(35)
§ 4.2 视距测量	(35)
§ 4.3 普通钢尺量距	(37)
§ 4.4 电磁波测距	(40)
第五章 测量误差理论概念	(45)
§ 5.1 测量误差概念	(45)
§ 5.2 偶然误差的特性	(46)
§ 5.3 评定精度的标准	(47)
§ 5.4 误差传播定律及应用	(50)
第六章 控制测量概念	(53)
§ 6.1 控制测量概述	(53)
§ 6.2 导线测量	(56)
§ 6.3 三角测量	(64)
§ 6.4 交会法测定点位	(64)
§ 6.5 高程控制测量	(66)
§ 6.6 GPS 卫星定位测量简介	(69)
第七章 大比例尺地形图的测绘和应用	(73)
§ 7.1 地形图的基本知识	(73)
§ 7.2 地形图的符号	(75)
§ 7.3 大比例尺地形图的常规测绘方法	(79)
§ 7.4 全站仪数字化测图	(82)

§ 7.5	地形图的分幅与编号	(85)
§ 7.6	地形图的应用	(87)
§ 7.7	摄影测量与遥感简介	(91)
第八章	测设(放样)的基本工作	(95)
§ 8.1	测设水平距离	(95)
§ 8.2	测设水平角	(95)
§ 8.3	测设点的平面位置	(96)
§ 8.4	测设已知高程	(97)
§ 8.5	测设已知坡度线	(98)
第九章	建筑施工测量	(99)
§ 9.1	施工测量的特点	(99)
§ 9.2	建筑场地的施工控制测量	(99)
§ 9.3	工业与民用建筑中的施工测量	(102)
§ 9.4	高层建筑物施工测量	(105)
§ 9.5	竣工测量	(107)
§ 9.6	建筑物的变形观测	(108)
第十章	道桥工程测量	(112)
§ 10.1	道桥中线测量	(112)
§ 10.2	圆曲线测设	(112)
§ 10.3	纵横断面图测量	(116)
§ 10.4	道路施工测量	(119)
§ 10.5	桥梁工程测量	(121)
第十一章	管线工程测量	(124)
§ 11.1	管线工程测量概述	(124)
§ 11.2	管道中线测量	(124)
§ 11.3	管道纵横断面图测绘	(125)
§ 11.4	管道施工测量	(129)
§ 11.5	管道竣工测量	(132)
第十二章	地籍测绘	(134)
§ 12.1	概述	(134)
§ 12.2	地籍平面控制测量	(134)
§ 12.3	地籍要素调查	(135)
§ 12.4	地籍要素测量	(136)
§ 12.5	地籍成果整理	(139)
§ 12.6	地籍修测	(140)
第十三章	地质勘测工程测量	(142)
§ 13.1	勘探工程测量	(142)
§ 13.2	地质剖面测量	(145)
§ 13.3	地质填图测量	(147)
第十四章	矿山测量	(148)
§ 14.1	矿山测量概述	(148)
§ 14.2	井下控制测量	(149)
§ 14.3	联系测量	(153)
§ 14.4	巷道施工测量	(159)
§ 14.5	矿图	(163)
主要参考文献		(169)

第一章 绪论

§ 1.1 测量学的任务和作用

测量学是采集、量测、处理、应用与地球和空间分布有关数据的一门科学。它的研究对象非常广泛,从地球的形状、大小至地球以外的空间,到地面上局部的面积和点位等。测量学属于测绘科学中的一个分支,按照研究范围和对象的不同,测量学又包括了许多分支学科。

一、大地测量学

大地测量又可分为卫星大地测量、空间大地测量、几何大地测量(空间大地测量与几何大地测量又称为天文大地测量)、重力大地测量、海洋大地测量等。大地测量主要研究地球的形状与大小(精化水准面);地球的整体运动(地球的自转和极移等);地球的局部运动(板块运动和区域性地壳形变等);为地球表面(包括陆地和海洋)进行地表与地物测量提供定位控制。

大地测量为地球动态变化状态以及动力学机制提供理论研究依据;为研究海平面变化,保护人类生存环境,地震中长期预报提供依据和信息;为经济建设提供数据控制;为科学研究、航空、航天、航海提供定轨、定位;为国防建设,提高战略、战术武器的命中精度提供制导手段等等。

二、摄影测量与遥感

摄影测量与遥感又可分为航天摄影测量、航空摄影测量、地面立体摄影测量、遥感测量。摄影测量可以快速获取地球表面上地貌地物的影像。在当代通讯技术、计算机技术支持下,可以实时地获取各种纸质和数字地图。利用遥感技术(电磁波、光波、热辐射等)可以快速获取地球表面、地球内部、环境景象、天体等传感目标的信息特征信号,应用于农业调查、土壤性质分析、植被分布、地下资源、气象、环境污染等调查以及自然灾害预测等。

三、地形测量学

地形测量学主要研究地球表面局部地区的测绘问题。由于全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、当代遥感技术(RS)即 3S 技术为代表的测绘新技术的迅猛发展,地形测量学的产品已经开始由传统的纸质地图向 4D(数字高程模型 Digital Elevation Model,简称 DEM;数字正射影像图 Digital Orthophoto Map,简称 DOM;数字栅格地图 Digital Raster Graphic,简称 DRG;数字线划地图 Digital Line Graphic,简称 DLG)产品过渡。4D 产品在网络支持下,将成为国家空间数据基础设施(NSDI)的基础,给相关研究工作以及国民经济各行业、各部门应用地理信息带来巨大的方便。

四、工程测量学

工程测量学主要研究有关城市建设、矿山工厂、水利水电、农林牧业、道路交通、地质矿产等领域的勘测设计、建设施工、竣工验收、生产经营、变形监测等方面的测绘工作。工程测量学的特点是应用基本测量理论、技术、仪器设备,针对不同工程的特点,研究其具有特殊性的施工测绘方法。

此外,测量学还包括海洋测量学等等。

对于一般工程建设而言,测量学的基本工作内容包括两个部分:测定和测设。测定是通过使用专用仪器设备、采用一定的技术方法,将地貌地物转化成一列的数据,经过处理后成为各种纸质地图或数字地图。测设则是测定的反过程,即把图上的规划或设计(例如构筑物的位置、图形)在地面上标定出来,作

为建设施工的依据。

§ 1.2 地球的形状与大小

地球的形状,主要是指地球表面的几何形状。地球的自然表面极为复杂,有高山、丘陵、盆地、平原和海洋,所以人们习惯把平均海水面及其延伸到大陆内部所形成的大地水准面(图 1-1a、b)来代表地球的形状,这是因为大地水准面同地球表面的形状非常接近。大地水准面是一个处处与重力方向垂直的封闭曲面。重力的方向线又称铅垂线,是测量工作的基准线,而大地水准面则是测量工作的一个基准面。

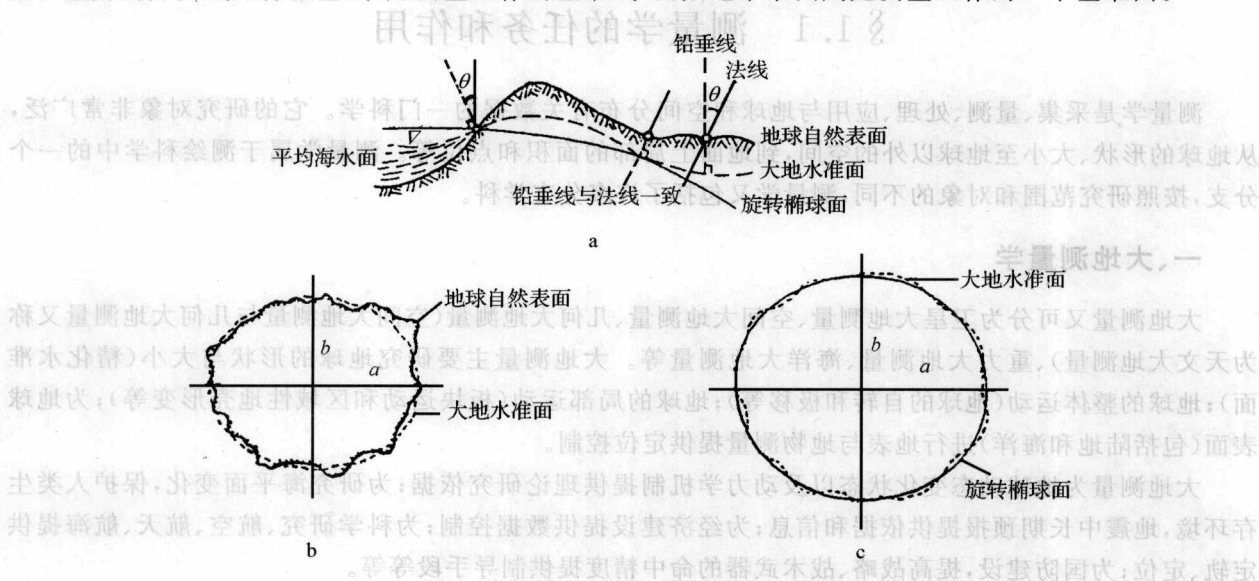


图 1-1 地球自然表面、大地水准面和旋转椭球

由于地球内部质量分布不均匀,引起铅垂线方向的变化,致使大地水准面成为一个复杂的曲面,人们无法在这个曲面上直接进行测绘和数据处理。但从力学角度看,地球是一个旋转的均质流体,其平衡状态是一个旋转椭球体,于是人们进一步利用一个合适的旋转椭球面来逼近大地水准面(图 1-1c)。

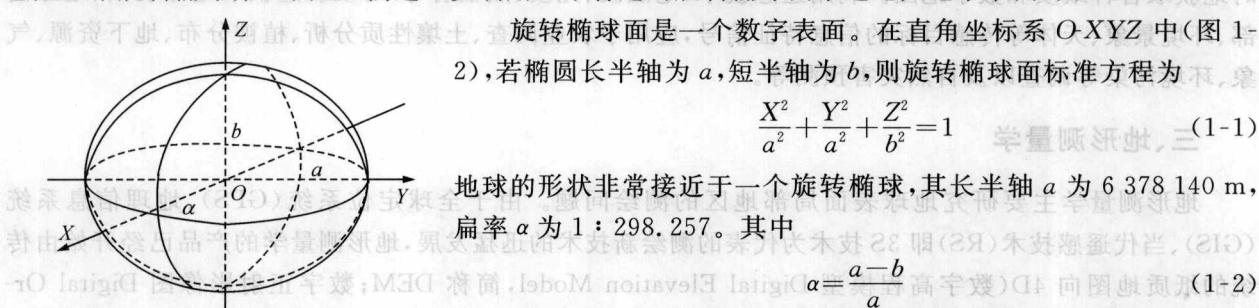


图 1-2 旋转椭球

10"之内(图 1-1a)。

由于地球椭球的扁率很小,当测区面积不大时,可以把地球当作圆球来看待,其平均半径为 6 371 km。

§ 1.3 地面点位的确定

测量工作的根本任务是确定地面点的位置。确定地面点的空间位置,通常是求出该点的球面位置或投影在水平面上的平面位置(称为坐标),以及求出该点到大地水准面的铅垂距离(称为高程或标高),也就是确定地面点的坐标和高程。

一、地面点的坐标

地面点的坐标,根据实际情况,可选用下列三种坐标系中的一种来确定。

1. 地理坐标

地面点在球面上的位置是用经纬度表示的,称为地理坐标。地理坐标又按坐标所依据的基本线和基本面的不同以及求坐标方法的不同,可分为天文坐标和大地坐标两种。

(1) 天文坐标

天文坐标又称天文地理坐标,是表示地面点在大地水准面上的位置,用天文经度 λ 和天文纬度 ϕ 表示,如图 1-3 所示。

地球的自转轴 NS 称为地轴。垂直于地轴的平面与球面的交线称为纬线,垂直于地轴的平面并通过球心 O 与球面相交的纬线称为赤道,经过 F 点的铅垂线和赤道平面的夹角,称为 F 点的纬度,常以 ϕ 表示。由于地球是椭球体,所以地面点的铅垂线不一定经过地球中心。纬度从赤道向北或向南自 0° 至 90° ,分别称为北纬或南纬。

(2) 大地坐标

大地坐标又称大地地理坐标,是表示地面点在旋转椭球面上的位置,用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。F 点的大地经度 L ,就是包含 F 点的子午面和首子午面所夹的两面角;F 点的大地纬度 B ,就是过 F 点的法线(与旋转椭球面垂直的线)与赤道面的交角。

天文经纬度是用天文测量的方法直接测定的,而大地经纬度是根据大地测量数据由椭球定位的数学关系推算而得。不同的椭球和定位方法得到不同的坐标系。目前我国同时使用着“1954 年北京坐标系”和“1980 年国家大地坐标系”。

地面上一点的天文坐标和大地坐标所以不同,是因为各自依据的基本面和基本线不同,前者依据的是大地水准面和铅垂线,后者是旋转椭球面和法线。由于旋转椭球面和大地水准面不一致,因此过同一点的铅垂线和法线也不一致,而产生垂线偏差 θ (图 1-1a)。

2. 高斯平面直角坐标

大地坐标只能用来确定地面点在旋转椭球面上的位置,不能直接用来测图。测量上的计算,最好在平面上进行。大家知道,旋转椭球面是一个曲面,不能简单地展成平面,那么如何建立一个平面直角坐标系呢?我国采用的是高斯投影的方法。

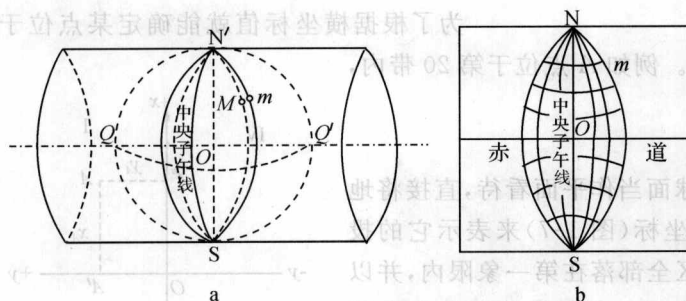


图 1-4 高斯投影

平面如图 1-4b 所示,这个平面称为高斯投影平面。

高斯投影平面上的中央子午线投影为直线且长度不变,其余的子午线均为凹向中央子午线的曲线,其长度大于投影前的长度,离中央子午线愈远长度变形愈大。为了将长度变形限制在测量精度允许的范围内,因此有投影带的划分,一般都采用 6° 分带法,即从格林尼治零子午线起每隔经差 6° 为一带,将旋转椭球面由西向东等分为六十带(图 1-5a), $0^\circ \sim 6^\circ$ 为第一带。第一带的中央子午线的经度为 3° (图 1-5b),任意带中央子午线经度 L_0 可按式计算:

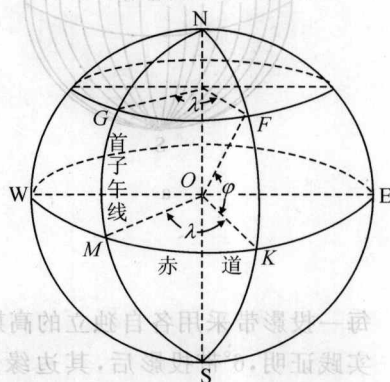


图 1-3 天文坐标

$$L_0 = 6n - 3$$

(1-3)

式中 n 为投影带的号数。

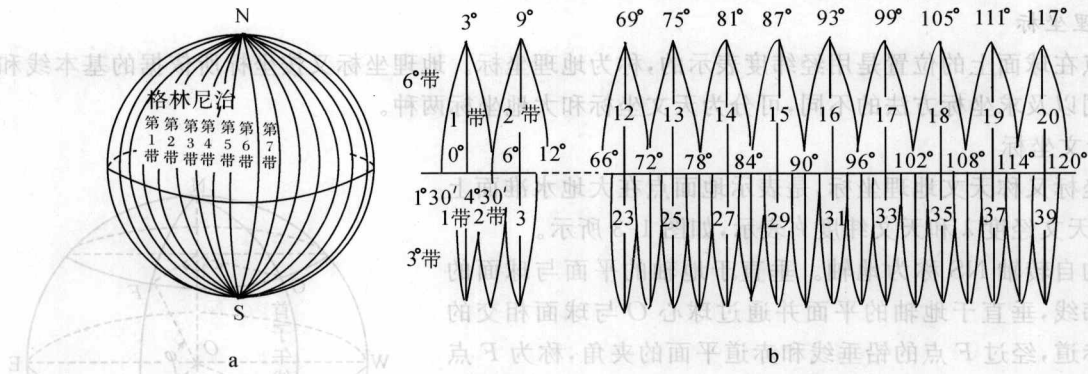


图 1-5 分带

每一投影带采用各自独立的高斯平面直角坐标系(图 1-6a)。

实践证明,6°带投影后,其边缘部分的变形能满足 1:25 000 或更小比例尺测图的精度。当进行 1:10 000 或更大比例尺测图时,要求投影变形更小,可用 3°分带法(图 1-5b)或 1.5°分带法。3°分带法是从东经 1°30' 起,每隔 3°划分一带,全球共划分为 120 带,每带中央子午线经度 L_0 可按下式计算

$$L_0 = 3n \quad (1-4)$$

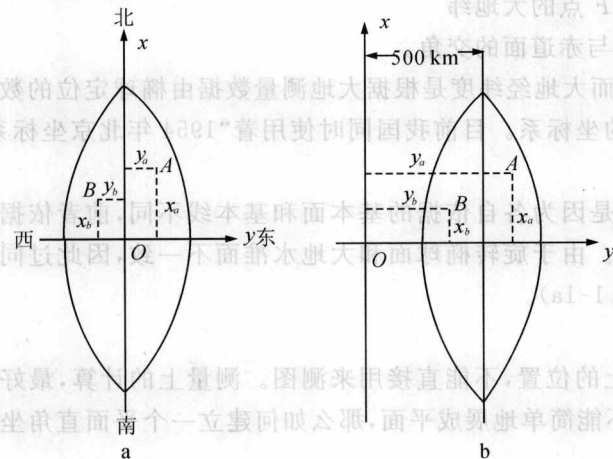


图 1-6 高斯平面直角坐标

测量上以每一带的中央子午线的投影为直角坐标系的纵轴 x , 向上为正, 向下为负; 以赤道的投影为直角坐标系的横轴 y , 向东为正, 向西为负; 两轴交点 O 为坐标原点, 由于我国领土全部位于赤道以北, 因此 x 值均为正值, 而 y 值则有正有负, 如图 1-6a, $y_a = +148\,680.54\text{ m}$, $y_b = -134\,240.69\text{ m}$ 。为了避免出现负值, 将每带的坐标原点向西移 500 km, 则每点的横坐标值均为正值, 如图 1-6b, $y_a = 500\,000 + 148\,680.54 = 648\,680.54\text{ m}$, $y_b = 500\,000 - 134\,240.69 = 365\,759.31\text{ m}$ 。

为了根据横坐标值就能确定某点位于哪一个 6°带内, 则在横坐标值前冠以带的编号。例如 A 点位于第 20 带内, 则其横坐标值 y_A 为 20 648 680.54 m。

3. 独立平面直角坐标

当测量的区域较小时, 可以把该测区的球面当作平面看待, 直接将地面点沿铅垂线投影到水平面上, 用平面直角坐标(图 1-7)来表示它的投影位置。将坐标原点选在测区西南角, 使测区全部落在第一象限内, 并以该地的子午线为 x 轴, 向北为正, y 轴向东为正。象限按顺时针方向编号, 这是与数学上的规定不同的。测量上取南北线为标准方向, 主要是为定向方便, 而象限采取顺时针方向编号, 其目的是便于将数学上的三角函数和解析几何的公式直接应用到测量计算, 不作任何改变。如地面上某点 A 的位置可用该点到横、纵坐标轴的垂直距离 x_A 和 y_A 来表示。

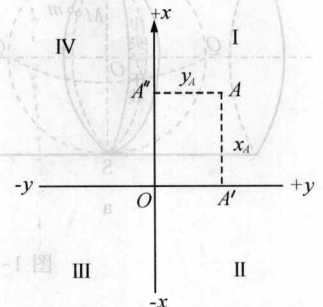


图 1-7 独立平面直角坐标

二、地面点的高程

地面点到大地水准面的铅垂距离, 称为绝对高程, 又称海拔。如图 1-8 中的 A、B 两点的绝对高程为 H_A , H_B 。海水面由于受潮汐、风浪等影响, 是个动态的曲面, 它的高低时刻都在变化, 通常是在海边设立

验潮站,进行长期观测,取海水面的平均高度作为高程零点。通过该零点的大地水准面称为高程基准面(即高程起算面)。建国后,我国曾采用从青岛验潮站求得的黄海平均海面作为高程基准面,称为“1956 年黄海高程系”,并在青岛市观象山上建立水准原点,其高程为 72.289 m。由于验潮资料不足等原因,我国自 1987 年启用“1985 国家高程基准”。它是采用青岛验潮站 1953 年至 1979 年验潮资料计算确定的。依此推算的青岛国家水准原点高程为 72.260 m。为了统一全国的高程系统,全国都应以新的原点高程为准。

在局部地区,也可以假设一个水准面作为高程起算面。地面点到假设水准面的铅垂距离,称为假设高程或相对高程。 A, B 点的相对高程分别为 H_A', H_B' 。

地面两点高程之差称为高差,以 h 表示,如图 1-8 中 A, B 两点的高差为

$$h_{ab} = H_B - H_A = H_B' - H_A' \quad (1-5)$$

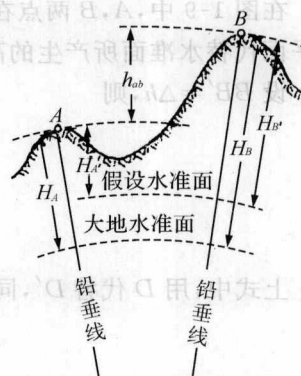


图 1-8 高程和高差

三、水平面代替水准面的限度

对于众多的工程来说,图纸是平面的,而且要求平面图上地貌、地物是实地地貌、地物按比例缩小的相似形。然而水准面是不可展开的曲面,如果一定要将水准面展开成平面,则会发生变形。

下面分别讨论不考虑地球曲率,直接用水平面代替水准面时这种变形对平面距离和高程的影响,以便确定在允许的精度内(变形产生的误差可以忽略不计)以水平面直接代替水准面的限度。

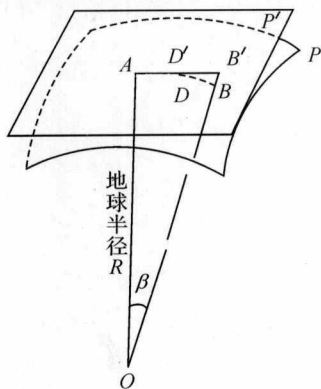


图 1-9 水平面代替水准面的影响

1. 对距离的影响

如图 1-9,设球面 P 与水平面 P' 在 A 点相切, A, B 两点在球面上的弧长为 D ,在水平面上的距离为 D' 则

$$D = R \cdot \beta \quad D' = R \cdot \tan \beta$$

以水平长度 D' 代替球面上弧长 D 所产生的误差为

$$\Delta D = D' - D = R \tan \beta - R \beta = R(\tan \beta - \beta)$$

将 $\tan \beta$ 按级数展开,并略去高次项,得

$$\tan \beta = \beta + \frac{1}{3}\beta^3 + \dots$$

因而

$$\Delta D = R[(\beta + \frac{1}{3}\beta^3 + \dots) - \beta] = R \cdot \frac{\beta^3}{3}$$

以 $\beta = \frac{D}{R}$ 代入上式,得

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

或

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

取 $R = 6\,371\text{ km}$,并以不同的 D 值代入上式,则可得出距离误差 ΔD 和相对误差 $\Delta D/D$,如表 1-1 所示。

由表 1-1 可知,当距离为 10 km 时,以平面代替曲面所产生的距离相对误差为 1 : 125 万,这样小的误差,就是在地面上进行最精密的距离测量也是容许的。因此,在半径为 10 km 的范围内,即面积约 320 km² 内,以水平面代替水准面所产生的距离误差可忽略不计。当精度要求较低时,还可以将测量范围的半径扩大到 25 km,即面积约为 2 000 km²。

表 1-1 水平面代替水准面的距离误差和相对误差

距离 D/km	距离误差 $\Delta D/\text{cm}$	相对误差 $\Delta D/D$
10	0.8	1 : 1 250 000
25	12.8	1 : 200 000
50	102.6	1 : 49 000
100	821.2	1 : 12 000

2. 对高程的影响 水准面的点零对水面。点零高式计更高等平均水面水准面，则取则计更，故水准

在图 1-9 中，A、B 两点在同一水准面上，其高程应相等。B 点投影到水平面上得 B' 点，则 BB' 即为水平面代替水准面所产生的高程误差，或称为地球曲率的影响。

设 $BB' = \Delta h$ ，则



$(R + \Delta h)^2 = R^2 + D'^2$

$2R\Delta h + \Delta h^2 = D'^2$

$\Delta h = \frac{D'^2}{2R + \Delta h}$

上式中，用 D 代替 D' ，同时 Δh 与 $2R$ 相比可忽略不计，则

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

以不同的距离 D 代入上式，则得相应的高程误差值，如表 1-2 所示。

表 1-2 水平面代替水准面的高程误差

D/km	0.1	0.5	1	2	3	4	5	10
$\Delta h/\text{cm}$	0.08	2	8	31	71	125	196	785

由表 1-2 可知，以水平面代替水准面，在 1 km 的距离内高程误差就有 8 cm。因此，当进行高程测量时，即使距离很短也必须顾及地球曲率的影响。

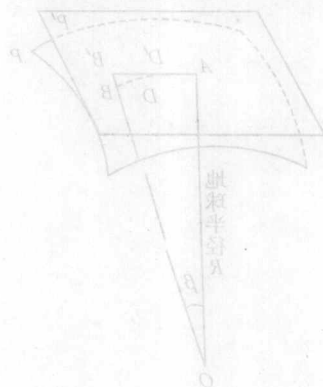


图 1-9 水平面代替水准面的影响

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

以 $\theta = \frac{D}{R}$ 代入上式，得

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2}$$

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2$$

取 $R = 6371 \text{ km}$ ，并以不同的 D 值代入上式，则可得出距离误差 ΔD 和相对误差 $\Delta D/D$ ，如表 1-1 所示。由表 1-1 可知，当距离为 10 km 时，以水平面代替水准面所产生的距离相对误差为 $1:12500$ ，这样小的误差，只要在面上进行最精密的距离测量也是容许的。因此，在半径为 10 km 的范围内，即所谓“测图范围”内，以水平面代替水准面所产生的距离误差可忽略不计。当精度要求较低时，还可以将测图范围的半径扩大至 25 km，即所谓“测图范围”。

表 1-1 水平面代替水准面的距离误差和相对误差

距离 D/km	距离误差 $\Delta D/\text{cm}$	相对误差 $\Delta D/D$
10	0.8	1:125000
25	12.8	1:200000
50	102.8	1:49000
100	821.2	1:12000

第二章 水准测量

测量地面上各点高程的工作,称为高程测量。根据所使用的测量方法及仪器的不同,高程测量分为水准测量、三角高程测量和气压高程测量。水准测量是高程测量中最基本并且精度较高的一种方法,用于建立国家高程控制网,并在工程勘测和施工测量中广泛采用。本章主要介绍水准测量。

§ 2.1 水准测量原理

水准测量的实质是测定两点之间的高程之差——高差,然后由已知点高程及已知点与未知点间的高差求出未知点高程。

设 A 点高程 H_A 已知, B 点为高程待定点,通过水准测量测出 A, B 两点之间的高差 h_{AB} , 则可按下式求出 B 点高程

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

为测出 A, B 两点之间的高差,可在 A, B 两点上分别竖立有刻划的尺子——水准尺;并在 A, B 点之间安置一架能提供水平视线的仪器——水准仪。根据仪器的水平视线,在 A 点尺上读数,设为 a ;在 B 点尺上读数,设为 b ,则 A, B 点的高差为

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

如果水准测量是由 A 到 B 进行的,如图 2-1 中的箭头所示,由于 A 点为已知高程点,故在 A 点尺(后尺)上的读数 a 称为后视读数;B 点为欲求高程的点,则 B 点尺(前尺)上的读数 b 为前视读数。则高差等于后视读数减去前视读数。 $a > b$ 时,高差为正;反之则为负。

式(2-1)和(2-2)是直接利用高差 h_{AB} 计算 B 点高程的,称为高差法。

还可通过仪器的视线高 H_i 计算 B 点的高程:

$$\left. \begin{aligned} H_i &= H_A + a \\ H_B &= H_i - b \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

式(2-3)是利用仪器视线高 H_i 计算 B 点高程的,称为仪器高法。

当需要通过很多站的观测,即通过建立水准路线求得较远处某点的高程时,采用高差法;若安置一次仪器需要测出多个点的高程时(如抄平工作),仪器高法更方便一些。

§ 2.2 水准测量的仪器与工具

水准测量所使用的仪器为水准仪,工具主要为水准尺和尺垫。

我国对大地测量仪器规定的总代号为“D”,水准仪的代号为“S”,即取汉语拼音的第一个字母,连接起来即为“DS”,通常可省略“D”而只写“S”。按仪器的精度(即仪器所能达到的每千米水准测量往返测高差中误差,以毫米计)来划分,可分为 S05、S2、S3 和 S10 等不同精度系列。水准仪按其结构又分为微倾式水准仪和自动安平水准仪。目前,我国工程测量一般使用的是 S3 级的微倾式水准仪和自动安平水准仪。因此,本节着重介绍此类仪器。

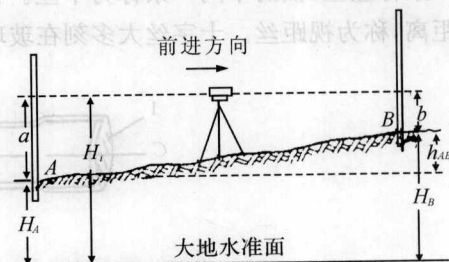
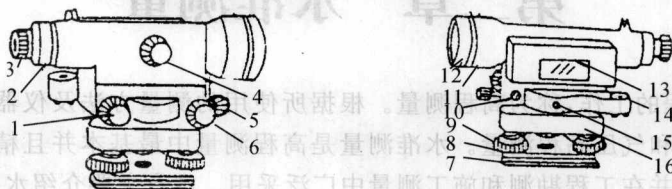


图 2-1 水准测量原理

一、水准仪

1. S3 级微倾式水准仪

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,水准仪主要由望远镜、水准器及基座三部分构成。图 2-2 所示是我国生产的 DS3 级微倾式水准仪。

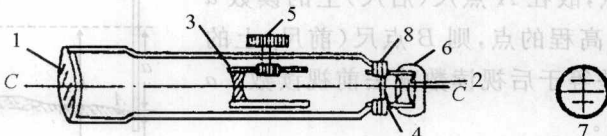


1. 微倾螺旋 2. 分划板护罩 3. 目镜 4. 物镜对光螺旋 5. 制动螺旋
6. 微动螺旋 7. 底板 8. 三角压板 9. 脚螺旋 10. 弹簧帽 11. 望远镜
12. 物镜 13. 管水准器 14. 圆水准器 15. 连接小螺丝 16. 轴座

图 2-2 微倾式水准仪

(1) 望远镜及其成像原理

图 2-3 是 S3 级水准仪望远镜的构造图。望远镜主要由图中 1 物镜、2 目镜、3 对光透镜和 4 十字丝分划板等组成。物镜的作用是将所照准的目标成像在十字丝面上形成一个倒立的缩小的实像。它由凸透镜或复合透镜组成。目镜的作用是将物镜所成的实像连同十字丝的影像放大成虚像。此时该实像与目镜之间的距离应小于目镜的焦距。由于目镜也是一个凸透镜,所以能得到放大的虚像。十字丝分划板是用于准确瞄准目标和读数的目的。在十字丝分划板上刻有两条相互垂直的长线,如图 2-3 中的 7,竖直的一条称竖丝,横的中间一条称为中丝。在中丝的上下还有对称的两根短横丝分别为上丝和下丝,用来测定距离,称为视距丝。十字丝大多刻在玻璃片上,玻璃片安装在分划板座上,分划板座由止头螺丝 8 固定。



1. 物镜 2. 目镜 3. 对光凹透镜 4. 十字丝分划板 5. 物镜对光螺旋
6. 目镜对光螺旋 7. 十字丝放大像 8. 分划板座止头螺丝

图 2-3 望远镜构成

十字丝交点与等效物镜(物镜与调焦透镜共同作用)光心的连线,称为视准轴(图 2-3 中的 C—C)。水准测量是在视准轴水平时,用十字丝的中丝截取水准尺上的读数。

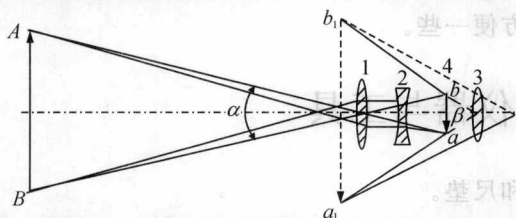


图 2-4 望远镜成像原理

图 2-4 为望远镜成像原理图。目标 AB 经过物镜后形成一个倒立且缩小的实像 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影像 a_1b_1 。

(2) 水准器

水准器是用来指示视准轴是否水平或仪器竖轴是否竖直的装置。水准器分为管水准器和圆水准器两种。

1) 管水准器

管水准器亦称水准管,它与望远镜连在一起,用于指示望远镜视准轴是否水平。水准管是把纵向内壁磨成圆弧形(圆弧半径一般为 7~20 m)的玻璃管,管内装酒精和乙醚的混合液,加热融封冷却后留有一个气泡(见图 2-5)。由于气泡轻,故气泡总是处于管内最高位置。

(2-5) 水准管上一般刻有间隔为 2 mm 的分划线,分划线的中点 O ,称为水准管零点(见图 2-5)。通过零点作水准管圆弧的纵切线,称为水准管轴(即图 2-5 中的 LL)。当水准管的气泡中点与水准管零点重合时,称为气泡居中。此时水准管轴 LL 处于水平位置。水准仪就是把望远镜与水准管连接在一起,并使视准轴 CC (见图 2-3)平行于水准轴 LL ,通过气泡居中,置平水准轴 LL ,达到视准轴 CC 水平,从而得到水平视线的。

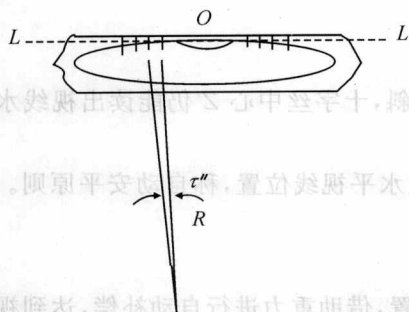


图 2-5 管水准器

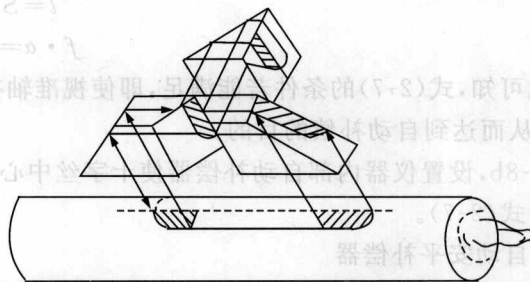


图 2-6 管水准器工作原理

水准管圆弧 2 mm 所对的圆心角 τ'' (见图 2-5),称为水准管分划值。用公式表示为

$$\tau'' = \frac{2}{R} \cdot \rho'' \quad (2-4)$$

式中: $\rho'' = 206\,265''$;

R ——水准管圆弧半径,单位: mm。

微倾式水准仪在水准管上方安装一组符合棱镜(如图 2-6 所示)。通过符合棱镜的折光作用,使气泡两端的像反映在望远镜旁的符合气泡观察窗中。若气泡两个半像吻合时,则表示气泡居中。若气泡的两个半像错开,则表示气泡不居中。这时,应转动目镜下方右侧的微倾螺旋,使气泡的像吻合。

2) 圆水准器

如图 2-7,圆水准器顶面的内壁是球面,其中有圆分划圈,圆圈的中心为水准器的零点。通过零点的球面法线为圆水准器轴线。当圆水准器气泡居中时,该轴线处于竖直位置。当气泡不居中时,气泡中心偏移零点 2 mm,轴线所倾斜的角值,称为圆水准器分划值,一般为 $8' \sim 10'$ 。它只用作仪器的概略整平。

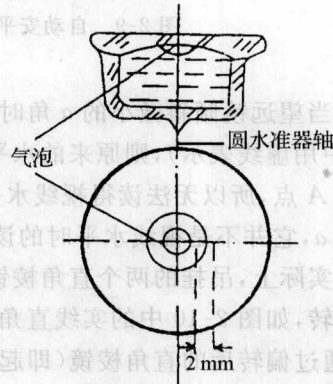


图 2-7 圆水准器

(3) 基座

基座的作用是支承仪器和上部并与三脚架连接。它主要由轴座、脚螺旋、底板和三角压板构成(如图 2-2)。

2. 自动安平水准仪

在用微倾式水准仪进行水准测量时,每次读数都要用微倾螺旋将水准管气泡调至居中位置,这不仅使观测起来十分麻烦,影响观测速度,而且由于延长了测站观测时间,将增加外界因素的影响,使观测成果的质量降低。为此,在 20 世纪 40 年代研制出了一种自动安平水准仪。经过不断的发展和完善,自动安平水准仪已得到了广泛的应用并成为水准仪的发展方向。

(1) 自动安平水准仪的原理

如图 2-8a 所示,当望远镜视准轴倾斜了一个小角 α 时,由水准尺上的 a_0 点过物镜光心 O 所形成的

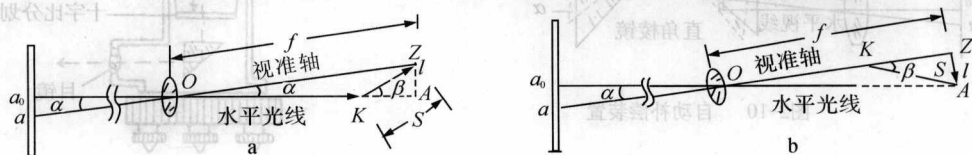


图 2-8 自动安平水准仪工作原理

水平光线,不再通过十字丝中心 Z ,而在离 Z 为 l 的 A 点处,显然

$$l = f \cdot \alpha \quad (2-5)$$

式中: f ——物镜的等效焦距

α ——视准轴倾斜的小角度

在图 2-8a 中, 设置仪器内部补偿器使水平视线在十字丝板上所成的像点位置移至十字丝中心位置, 称自动补偿原则。

$$l = S \cdot \beta \quad (2-6)$$

$$f \cdot \alpha = S \cdot \beta \quad (2-7)$$

由此可知, 式(2-7)的条件若能满足, 即使视准轴有微小倾斜, 十字丝中心 Z 仍能读出视线水平时的读数 a_0 , 从而达到自动补偿的目的。

图 2-8b, 设置仪器内部自动补偿器使十字丝中心自动移至水平视线位置, 称自动安平原则。安平的条件仍为式(2-7)。

(2) 自动安平补偿器

自动安平补偿器的种类很多, 但一般都是采用吊挂补偿装置, 借助重力进行自动补偿, 达到视线自动安平的目的。

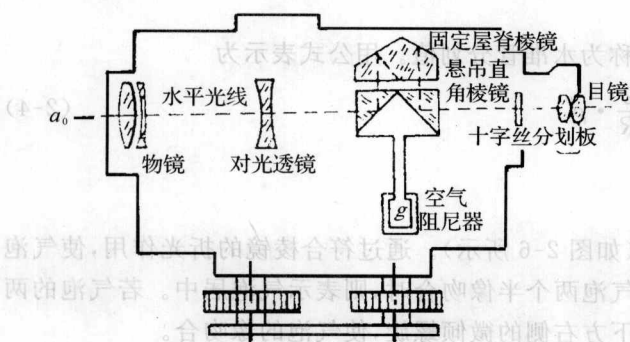


图 2-9 自动安平补偿器

图 2-9 是 DSZ3 自动安平水准仪的内部光路结构示意图。它是按照自动补偿原则设计的。它在对光透镜和十字丝分划板之间安设补偿器, 该补偿器是把屋脊棱镜固定在望远镜筒内, 在屋脊棱镜的下方, 用交叉的金属片(图上未画出)吊挂着两个直角棱镜, 在重量为 g 的物体作用下, 与望远镜作相对的偏转。

如图 2-9, 当该仪器处于水平状态, 视准轴水平时, 尺上的读数为 a_0 。随着水平光线进入望远镜后, 通过补偿器到达十字丝的中心 Z , 从而读得视线水平时的读数 a_0 。

当望远镜倾斜微小的 α 角时, 如图 2-10 所示, 如果两个直角棱镜随着望远镜一起倾斜了一个 α 角(图中用虚线表示), 则原来的水平光线经两个直角棱镜(虚线表示)反射后, 并不经过十字丝中心 Z , 而是通过 A 点, 所以无法读得视线水平时的读数 a_0 。此时, 十字丝中心 Z 通过虚线棱镜的反射, 在尺上的读数为 a , 它并不是视线水平时的读数。

实际上, 吊挂的两个直角棱镜在重力作用下并不随望远镜倾斜, 而是相对于望远镜的倾斜方向作反向偏转, 如图 2-10 中的实线直角棱镜, 它相对于虚线直角棱镜偏转了 α 角。这时, 原水平光线(粗线表示)通过偏转后的直角棱镜(即起补偿作用的棱镜)的反射, 到达十字丝中心 Z , 故仍能读得视线水平时的读数 a_0 , 从而达到补偿的目的。

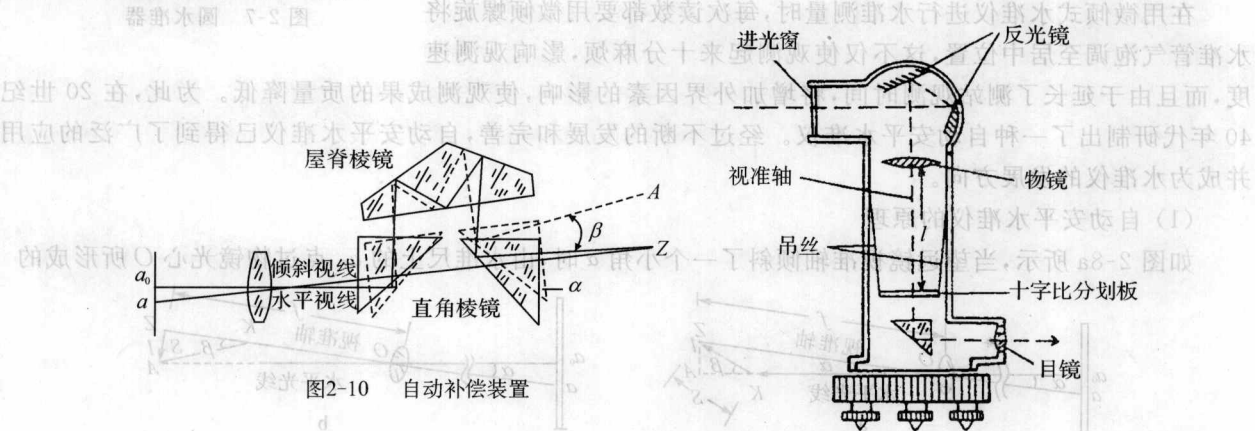


图 2-10 自动补偿装置

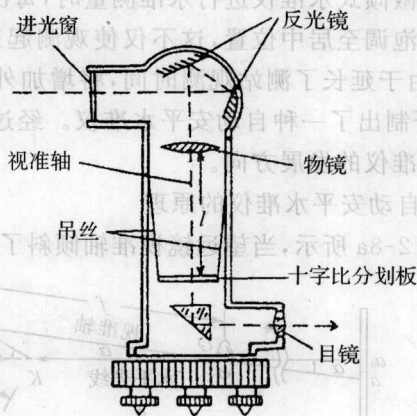


图 2-11 自动安平装置

图 2-11 是移动十字丝的自动安平原则的“补偿”装置。

二、水准尺和尺垫

水准尺是水准测量时使用的标尺。S3 水准仪所附的水准尺是用干燥木料或玻璃钢等制成,长度为 3~5 m,尺上每隔 1 cm 或 0.5 cm 涂有黑白或红白相间的分格,每分米注一数字。水准尺按尺形分为塔尺(图 2-12a)和直尺(图 2-12b)两种。直尺一般为双面尺,多用于三、四等水准测量。尺的分划一面是黑白相间的,称为黑色面;另一面是红白相间的,称为红色面。双面尺要成对使用。一对尺子的黑色分划,其

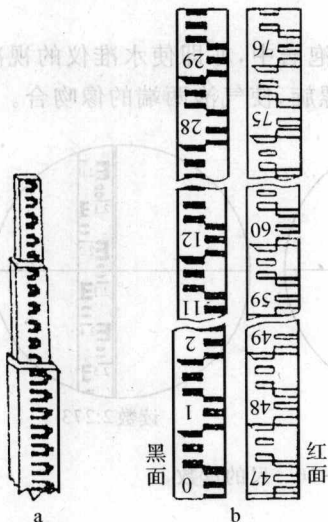


图 2-12 水准尺

起始数字都是从零开始,而红色面的起始数字分别为 4 687 mm 及 4 787 mm。使用双面尺的优点在于可以避免观测中因印象而产生的读数错误,并可检查计算中的粗差。

尺垫是用生铁铸成的,一般为三角形,中央有一个突起的半球体,如图 2-13 所示。突起的半球体的顶点作为竖直水准尺和标志转点之用。尺垫的作用是防止水准尺的位置和高度发生变化而影响水准测量的精度。

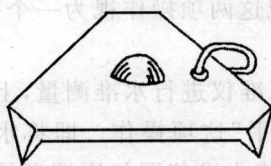


图 2-13 尺垫

§ 2.3 水准仪的使用

微倾式水准仪的基本操作步骤分述如下:

一、安置水准仪

打开三脚架并使高度适中,用目估的方法使架头大致水平,稳固地架设在地面上。然后打开仪器箱取出仪器,用连接螺旋将水准仪固连在三脚架头上。

二、粗略整平

粗平是利用圆水准器使气泡居中,使仪器竖轴大致铅垂,从而使视准轴粗略水平。

如图 2-14 所示,操作者双手各执一脚螺旋(第三只脚螺旋居于操作者正前方)。双手同时向内(或向外)旋转脚螺旋。此时圆水准器中的气泡左右方向移动,移动方向与左手拇指转动脚螺旋的方向一致,如图 2-14 中 a。当气泡移至两脚螺旋连线方向的中点时,以左手旋转第三只脚螺旋,如图 2-14 中 b,气泡移动方向与左手拇指动作方向一致。

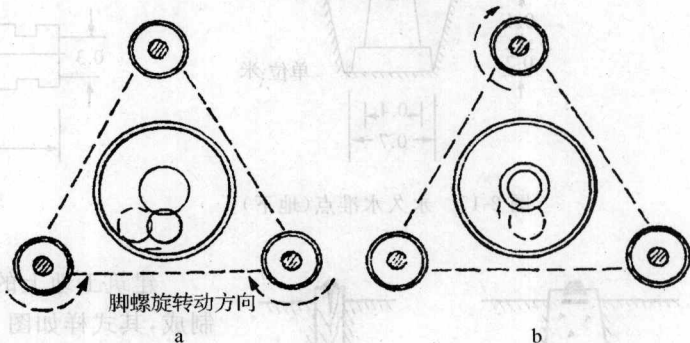


图 2-14 粗略整平方法

三、瞄准水准尺

瞄准前,先将望远镜对向明亮的背景,转动目镜对光螺旋,使十字丝清晰。再用望远镜筒上的缺口和准星瞄准水准尺,拧紧制动螺旋。然后从望远镜中观察,若物像不清楚,则转动物镜对光螺旋进行对光,使目标影像清晰。