

21世纪

高等学校

本科系列教材

工程测量学

Gongcheng Celiangxue

■ 总主编 罗固源 ■ 刘星 吴斌 主编
■ 王熔 主审

重庆大学出版社

工程测量学

刘星摇吴斌摇主编

王熔摇主审摇摇摇

重庆大学出版社

前言

本书是根据高等学校土木工程类教学大纲的要求,结合我校几十年来教学、测绘生产实践经验和当前现代测绘技术编写的。全书着重介绍测量学的基本概念、基本理论和基本方法,还介绍了现代测绘科学的新技术和新方法。本书除注意本学科必要的系统性外,还力求叙述简明、图文并茂、通俗易懂。本书可作为土木工程、道路与桥梁工程、建筑学、城市规划、城镇建筑、采矿工程、给水排水工程、环境工程、水利工程、供热通风与空调工程、工程管理、房地产管理等专业学生的教材,也可作为广大的工程技术人员参考用书。

本教材由重庆大学刘星、吴斌主编。编写者有刘星(第1章)、郑应亨(第2章)、吴斌(第3章)、张亚莉(第4章)、刘文谷(第5章)、谭家兵、刘星(第6章)、张伟富(第7章)、第8章(谭家兵、张亚莉、郑应亨)、第9章(吴斌、魏矿灵)。

王熔教授审阅了全书,并提了宝贵的修改意见。对此,我们表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在不少疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2008年 12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测量学概述	1
1.2 地面点的确定	4
1.3 用水准面代替水准面的限定	7
1.4 测量的工作概述	9
思考题与习题	10
第 2 章 水准测量	11
2.1 水准测量原理	11
2.2 水准测量的仪器和工具	14
2.3 普通水准测量	15
2.4 微倾式水准仪的检验与校正	18
2.5 自动安平水准仪	21
2.6 精密水准仪和水准尺	23
2.7 电子水准仪	25
思考题与习题	26
第 3 章 角度测量	27
3.1 水平角测量的原理	27
3.2 光学经纬仪	30
3.3 光学经纬仪盘部分的检验和校正	33
3.4 竖直角测量	35
3.5 电子经纬仪	37
思考题与习题	38
第 4 章 距离测量与直线定向	39
4.1 钢尺量距	39
4.2 电磁波测距	43
4.3 直线定向	45
4.4 罗盘仪及其使用	47
思考题与习题	48
第 5 章 测量误差理论的基本知识	49
5.1 测量误差概述	49

第 1 章 竣工测量	1
思考题与习题	1
第 2 章 线路工程测量	2
概述	2
中线测量	2
线路纵横断面测量	2
道路施工测量	2
管道工程测量	2
桥梁施工测量	2
隧道工程施工测量	2
习题与思考题	2
参考文献	2

第 1 章

绪论

测量学概述

测绘学是研究对地球整体及其表面和外层空间中的各种自然和人造物体与地理空间分布有关的信息进行采集、处理、管理、更新和利用的科学和技术。它是一门一级学科。若研究的对象不一样或者采用的技术手段不同,可把测绘学划分为多个学科。

大地测量学是研究和确定地球形状、大小、重力场、整体与局部运动和地表面点的几何位置以及它们的变化理论和技术的科学。

摄影测量与遥感学是研究利用电磁波传感器获取目标物的影像数据,从中提取语义和非语义信息,并用图形、图像和数字形式表达的科学。

工程测量学是研究工程建设和自然资源开发中各个阶段的控制和地形测绘、施工放样、变形监测的理论与技术的科学。

海洋测绘学是以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制工作。

地图制图学是研究模拟和数字地图的理论、设计、测绘、复制的技术方法以及应用的学科。

众所周知,地球是一个球体,其表面是有曲率的,若不考虑地球表面的曲率对测量的影响,在一个小范围来研究测绘学的理论和方法的范畴,称之为普通测量学。本教材主要介绍普通测量学的基本理论、方法和工程测量学中有关施工测量的基本内容,以及现代测绘技术的基本理论,因此可以称之为工程测量学。

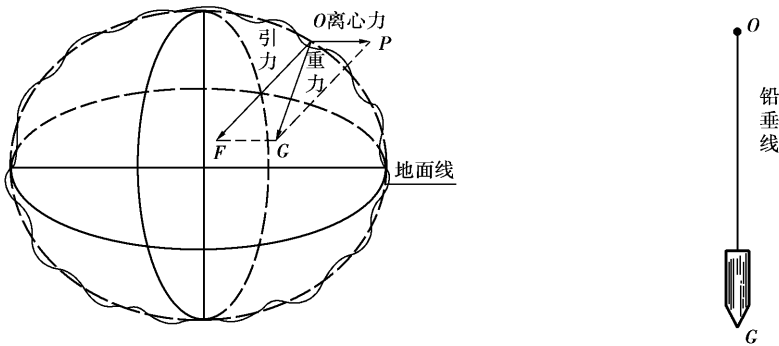
从本质上来讲,测量学的实质就是确定点的位置,并对点的位置信息进行处理、储存、管理。测量学的任务主要有两方面内容:测定和测设。测定就是采集描述空间点信息的工作,测设就是把设计好的建筑物(或者构筑物)细部点的信息标定在地面上的工作。

在当前信息社会中,测绘资料是管理机构重要的基础信息之一。测绘成果也是信息产业的重要内容。测绘技术及成果应用面很广,对于国民经济建设、国防建设和科学研究有着重要的作用。国民经济建设的发展总体规划、城市建设与改造、工矿企业建设、公路铁路修建、各种水利工程和输电线路的兴建、农业规划和管理、森林资源的保护和利用、地下矿产资源的勘探和开采都需要测量工作。在国防建设中,测绘技术不但对国防工程建设、作战战略部署和现代

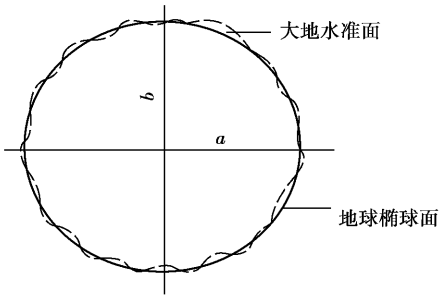
建立一个共同的坐标系统,而测量工作是在地球表面上进行,因此测量的坐标与地球的大小形状有密切关系。

我们知道,地球的自然表面有高山、丘陵、平原、盆地及海洋等起伏状态。就整个地球而言,海洋的面积约占 $\frac{7}{10}$,陆地的面积约占 $\frac{3}{10}$ 。虽然陆地上最高的山峰珠穆朗玛峰海拔 8848 米,海底最深的海沟太平洋西部的马里亚纳和菲律宾附近的海沟深达 11034 米,但和地球半径 6371 千米来比较,是可以忽略不计的。所以把地球的形状想象为一个处在静止状态的海洋面,延伸通过大陆后所包围的形体。

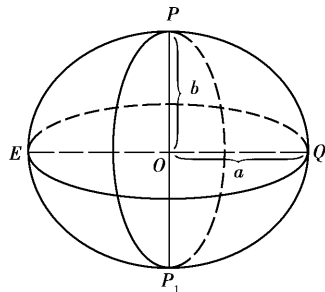
如图 1-1-1 所示,假想静止不动的水面延伸穿过陆地,包围了整个地球,形成一个闭合的曲面,这个曲面称为水准面。水准面是受地球重力影响而形成的,它的特点是面上任意一点的铅垂线都垂直于该点的曲面。水面可高可低,因此符合这个特点的水准面有无数个,其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面,如图 1-1-2 所示。



(a) 地球重力线



(b) 大地水准面



(c) 旋转椭球体

图 1-1-2 大地水准面与地球椭球面

由于地球内部质量分布不均匀,重力也受其影响,引起铅垂线方向的变动,致使大地水准面成为一个复杂的曲面。如果将地球表面上的图形投影到这个复杂的曲面上,在计算上是非常困难的。为了解决这个问题,选用一个非常接近大地水准面、并可用数学式表示的几何形体来代表地球总的形状。这个数学形体是由椭圆 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ 围绕其短轴 yy_1 旋转而成的旋转椭球体,又称地球椭球体。其旋转轴与地球自转轴重合,如图 1-1-3 所示,其表面称为旋转椭球面(参考椭球面)。

决定地球椭球体的大小和形状的元素为椭圆的长半轴 a 、短半轴 b 、扁率 α ,其关系式为:

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

(1-1-1)

随着测绘科学技术的进步,可以越来越精确地确定椭圆元素,目前我国采用的地球椭球体的参数为:

$$\begin{aligned} & \text{长半轴 } a \\ & \text{短半轴 } b \\ & \text{扁率 } f \end{aligned}$$

由于地球椭球体的扁率很小,当测区面积不大时,可以将其当做圆球看待,其半径按式(1-1-1)计算:

$$R = \frac{a+b}{2} \quad (1-1-1)$$

其近似值为 $R \approx 6371$ km。

1.1.2 确定地面点的方法

(1) 地理坐标系

地理坐标系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地理坐标和大地地理坐标两种。

1) 天文地理坐标

天文地理坐标又称天文坐标,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 1-1-1 所示: PP_1 为地球的自转轴(简称地轴), P 为北极, P_1 为南极。过地面上任意一点的铅垂线与地轴 PP_1 所组成的平面称为该点的子午面。子午面与球面的交线称为子午线(或称经线)。云点的经度 λ 是过云点的子午面 PP_1G 与首子午面 PP_1E 所组成的夹角(两面角),自首子午线向东或向西计算,数值为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。在首子午线以东者为东经,以西者为西经,同一子午线上各点的经度相同。

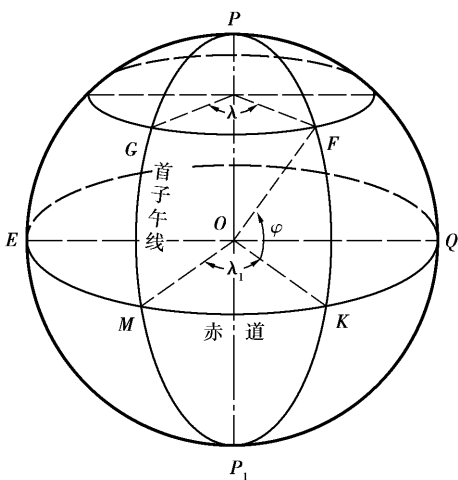


图 1-1-1 地理坐标

垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为纬线。垂直于地轴的平面并通过球心 O 与地球表面相交的纬线称为赤道。云点的纬度 φ 是云点的铅垂线 OG 与赤道平面 EOK 之间的夹角,自赤道起向南或向北计算,数值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。在赤道以北为北纬,以南者为南纬。

经度和纬度的值是用天文测量方法测定。例如我国首都北京中心地区的概括天文坐标为东经 $116^\circ 27'$ 、北纬 $39^\circ 54'$ 。

2) 大地地理坐标

大地地理坐标又称为大地坐标,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。云点的大地经度 L 就是包含云点的子午面和首子午面所夹的两面角;云点的大地纬度 B 就是过云点的法线(与旋转椭圆球面垂直的线)与赤道面的夹角。大地经、纬度是根据一个起始

的大地点(大地原点,该点的大地经纬度与天文经纬度一致)的大地坐标,再按大地测量所得的数据推算而得的。我国以陕西省泾阳县大地原点为起算点,由此建立新的统一坐标系,称为“1980年国家大地坐标系”。

(圆)平面直角坐标系

员)高斯平面直角坐标

地理坐标对局部测量工作来说是不方便的,测量计算最好在平面上进行。但地球是一个不可展的曲面,把地球面上的点位化算到平面上,称为地图投影,我国是采用高斯投影的方法。

高斯投影的方法首先是将地球按经线划分成带,称为投影带,投影带是从首子午线起,每隔经度 6° 划为一带(称为 6° 带),如图 1-1 所示,自西向东将整个地球划分为 60 个带。带号从首子午线开始,用阿拉伯数字表示,位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线(或称主子午线),如图 1-2 所示,第一个 6° 带的中央子午线的经度为 0° ,任意一个带的中央子午线经度 λ_0 ,可按式(1-1)计算:

$$\lambda_0 = 6n \quad (1-1)$$

式中 n 为投影带号。

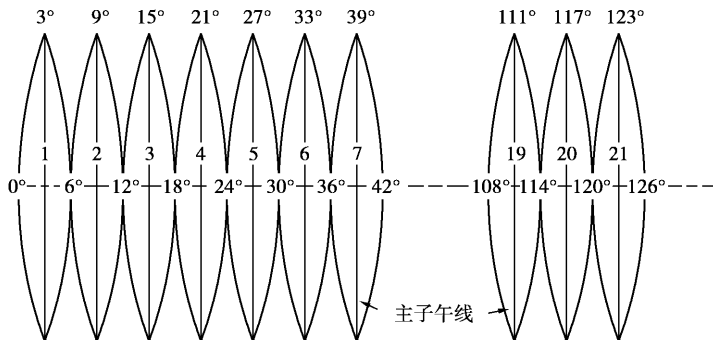


图 1-1 6° 带中央子午线及带号

投影时设想取一个空心圆柱体(图 1-3)与地球椭球体的某一中央子午线相切,在球面图形与柱面图形保持等角的条件下,将球面上图形投影在圆柱面上,然后将圆柱体沿着通过南北极母线切开,并展开成为平面。投影后,中央子午线与赤道为互相垂直的直线,以中央子午线为坐标纵轴,以赤道为坐标横轴,两轴的交点作为坐标原点,组成高斯平面直角坐标系,如图 1-4 所示。

在坐标系内,规定 x 轴向北为正, y 轴向东为正。我国位于北半球, x 坐标值为正, y 坐标值则有正有负。例如图 1-5 中, y 越东越负, y 越西越正,为避免出现负值,将每带的坐标原点向西移 500km ,则每点的横坐标值也均为正值,如图 1-6 中, y 越东越正, y 越西越负。

为了根据横坐标值能够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

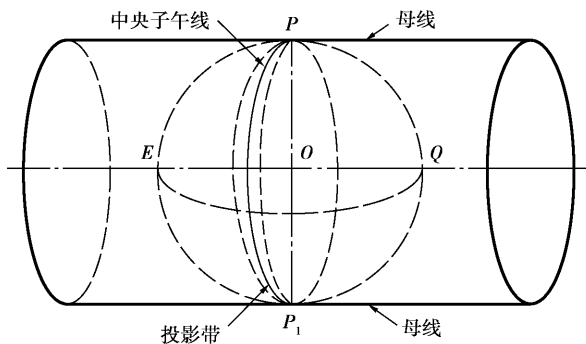


图 员圆瑶高斯平面直角坐标的投影

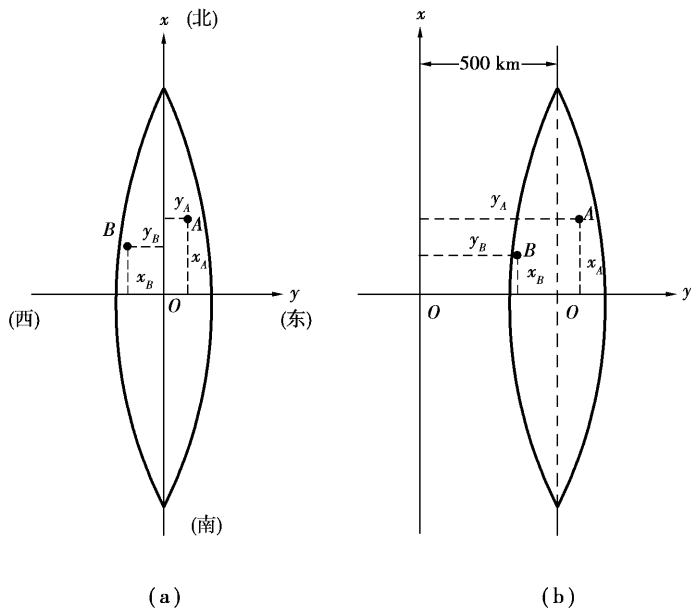


图 员圆瑶高斯平面直角坐标

如,粤点位于第 圆带内,则其横坐标值 赠越员缘切源皂。

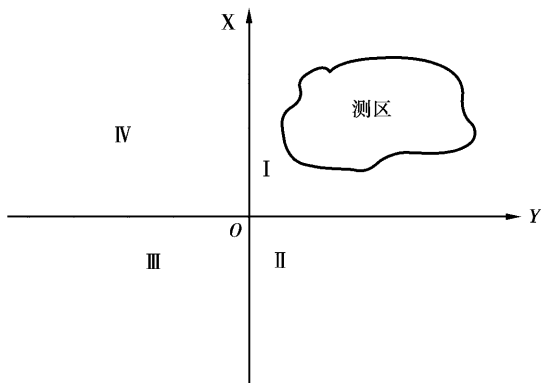


图 员圆瑶独立坐标系的建立

高斯投影中,能使球面图形的角度与平面图形的角度保持不变,但任意两点间的长度却产生变形(投影在平面上的长度大于球面长度)称为投影长度变形。离中央子午线愈远则变形愈大,变形过大对于测图和用图都是不方便的。透带投影后,其边缘部分的变形能满足 员缘切源皂或更小比例尺测图的精度,当进行 员缘切源皂或更大比例尺测图时,要求投影变形更小,可采用 猿分带投影法或 员缘切源皂分带投影法。

图 员圆瑶小地区平面直角坐标

当测量的范围较小时,可以不考虑地球表面的曲率对测量的影响,把该测区的地表一小块远

球面当作平面看待。将坐标原点选在测区西南角使坐标均为正值,以该测区中心的子午线方向为 X 轴方向。建立该地区的独立平面直角坐标系。

测量所用的平面直角坐标系(图 1-1-1)和数学所采用的平面直角坐标系有些不同:数学中的平面直角坐标的横轴为 X 轴、纵轴为 Y 轴,象限按顺时针方向编号;而测量学中则横轴为 X 轴、纵轴为 Y 轴,象限按逆时针方向编号。其原因是测量学中是以南北方向线为角度的起算方向,同时将象限按逆时针方向编号便于将数学中的公式直接应用到测量计算中去。

(二) 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),简称高程。如图 1-1-2 中, A 、 B 两点的绝对高程分别为 H_A 、 H_B 。

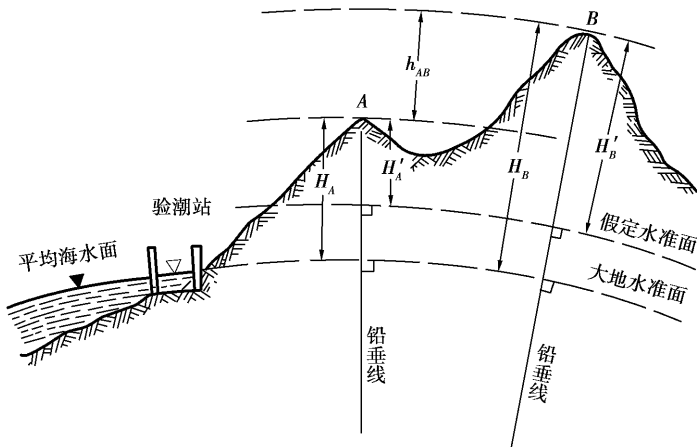


图 1-1-2 绝对高程和高差

在局部地区,若无法知道绝对高程时,也可以假定一个水准面作为高程起算面,地面点到假定水准面的铅垂距离称为相对高程(又称假定高程)。 A 、 B 两点的相对高程分别以 H'_A 、 H'_B 表示。

地面两点高程之差称为高差,用 h 表示。 A 、 B 两点的高差为:

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

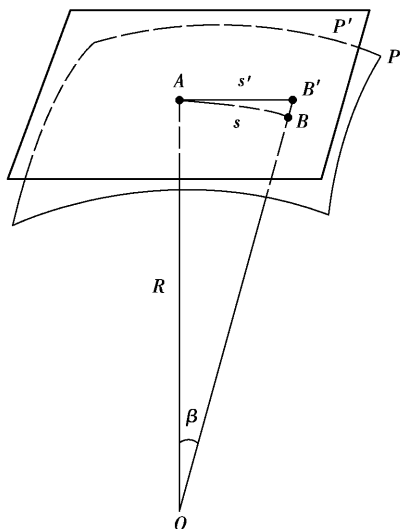
由此说明,高差的大小与高程起算面无关。

由于海水面受潮汐、风浪等影响,它的高低时刻在变化。通常是在海边设立验潮站,进行长期观测,求得海平面的平均高度作为高程零点,过该点的大地水准面作为高程基准面,即在大地上水准面上的高程为零。我国采用“1956年黄海平均海面”,它是根据青岛验潮站 1950—1956 年的观测资料确定的黄海平均海面(其高程为零)作为高程起算面,并在青岛建立了水准原点,水准原点的高程为 72.261 米,全国各地的高程均以它为基准进行推算。

二、用水平面代替水准面的限度

水准面是一个曲面,曲面上的图形投影到平面上,总会产生一定的变形。用水平面代替水准面,其产生的变形不超过测量容许的误差,则完全是可以的。以下讨论以水平面代替水准面

对距离和高程测量的影响,以便明确可以代替的范围,或者在什么情况下须加以改正。



水准面代替水准面的影响

如图 1-1 所示,设球面 P 与水平面 P' 在 O 点相切, A, B 两点在球面上的弧长为 s , 在水平面上的距离为 s' , 球的半径为 R , O 点所对球心角为 β (弧度) 则:

$$s = R \cdot \beta$$

$$s' = R \cdot \beta^2$$

以水平长度 s' 代替球面上弧长所产生的误差为

$$\Delta s = s - s' = R\beta - R\beta^2 = R\beta(1 - \beta)$$

将 β 按级数展开,并略去高次项,得

$$\beta = \beta - \frac{1}{2}\beta^3 + \frac{1}{24}\beta^5 - \dots$$

因而近似得到

$$\Delta s \approx R \left[\left(\beta - \frac{1}{2}\beta^3 + \dots \right) - \beta^2 \right] = R \cdot \frac{\beta^3}{6}$$

图 1-1 水准面代替水准面的影响

以 $\beta = \frac{s}{R}$ 代入上式,得

$$\Delta s \approx \frac{s^3}{6R} \quad (1-1)$$

或

$$\frac{\Delta s}{s} \approx \frac{1}{6} \left(\frac{s}{R} \right)^2 \quad (1-2)$$

取 $s = 1000$ 米,并以不同的 R 值代入上式,则可以得出距离误差 Δs 和相对误差 $\frac{\Delta s}{s}$,如表 1-1 所示。

表 1-1 水准面代替水准面的距离误差 Δs 和相对误差 $\frac{\Delta s}{s}$

距离 s (米)	距离误差 Δs (毫米)	相对误差 $\frac{\Delta s}{s}$
100	0.000000000167	1.67×10^{-10}
1000	0.0000000167	1.67×10^{-8}
10000	0.00000167	1.67×10^{-6}
100000	0.000167	1.67×10^{-4}

由表 1-1 可知,当距离为 100 米时,以平面代替曲面所产生的距离相对误差为 1.67×10^{-10} ,这样微小的误差,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 6370 km 的范围内,即面积约 5.1 亿 km^2 内,以水平面代替水准面所产生的距离相对误差可以忽略不计。

水准面代替水准面的影响

在图 1-2 中, A, B 两点在同一水准面上,其高程应相等。 A 点投影到水平面上得 A' , 愿

则 Δh 即为以平面代替水准面所产生的高程误差。设 Δh 越 Δh 则：

$$\left(\frac{\Delta h}{R} \right) \approx \frac{\Delta h}{R} \quad \left(\frac{\Delta h}{R} \right) \approx \frac{\Delta h}{R}$$

即

$$\Delta h \approx \frac{R}{2} \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^2$$

上式中,用 R 代替 R ,同时 Δh 与 R 相比可以忽略不计,则

$$\Delta h \approx \frac{R}{2} \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^2 \quad (1.1)$$

以不同的距离代入上式,则可以得出相应高程误差值,如表 1.1 所示。

表 1.1 以平面代替水准面所产生的高程误差

距离/km	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta h/m$	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000

由表 1.1 可知,以平面代替水准面,在 6 km 的距离上高程误差就有 0.0000000000 m。因此,当进行高程测量时,应顾及水准面曲率(又称地球曲率)的影响。

1.2 测量的工作概述

1.2.1 测量的原则和程序

测量工作应遵循两个原则:一是“由整体到局部,由控制到碎部”;二是“步步检核”。

第一项原则是对总体工作而言。任何测绘工作都应先总体布置,然后再分阶段、分区、分期实施。在实施过程中要先布设平面和高程控制网,确定控制点平面坐标和高程,建立全国、全测区的统一坐标系。在此基础上再进行细部测绘和具体建(构)筑物的施工测量。只有这样,才能保证全国各单位各部门的地形图具有统一的坐标系统和高程系统。减少控制测量误差的积累,保证成果质量。

第二项原则是对具体工作而言。对测绘工作的每一个过程、每一项成果都必须检核。在保证前期工作无误条件下,方可进行后续工作,否则会造成后续工作的困难,甚至全部返工。只有这样,才能保证测绘成果的可靠性。

1.2.2 测量的基本工作

以地形图的测绘为例说明。为了保证全国各地测绘的地形图能有统一的坐标系,并能减少控制测量误差积累,国家测绘局在全国范围内建立了能覆盖全国的平面控制网和高程控制网。在测绘地形图时,首先应在测区范围内布设测图控制网及测图用的图根控制点。这些控制网应与国家控制网联测,使测区控制网与国家控制网的坐标系统一致。图根控制点还应便于安置仪器进行测图。如图 1.2 中,粤,月,...,云为图根控制点,粤点只能测山前的地形图,山后要用悦,阅,耘等点测量。地物、地貌特征点也称为碎部点,地形图碎部测量中大多采用极坐标法,见图 1.3 设地面上有三个点 粤,月,悦,其中 粤,月为已知点,现要测定 悦点的平面坐

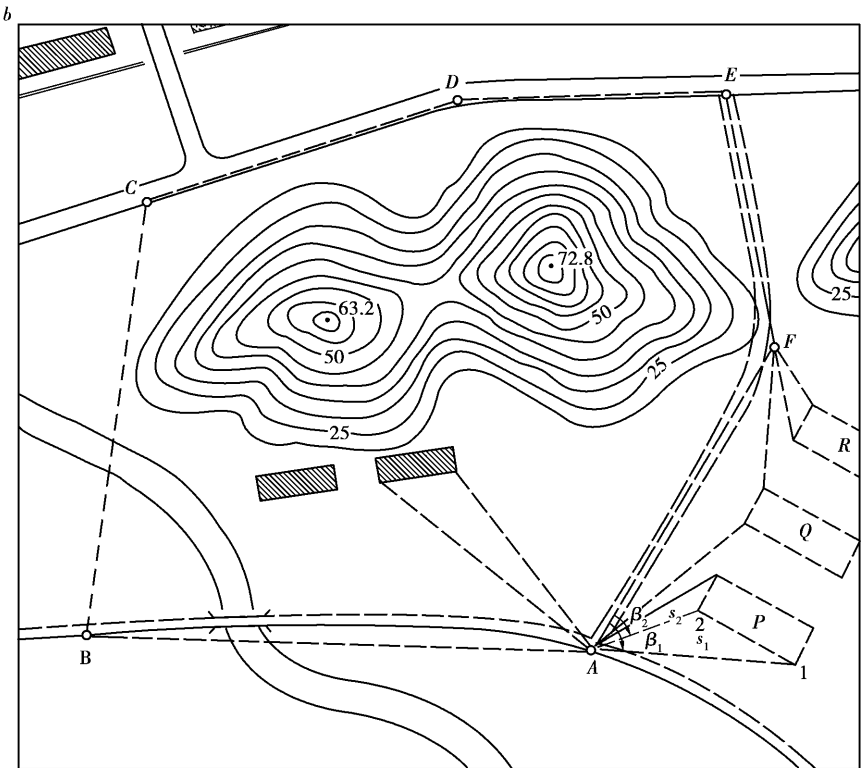
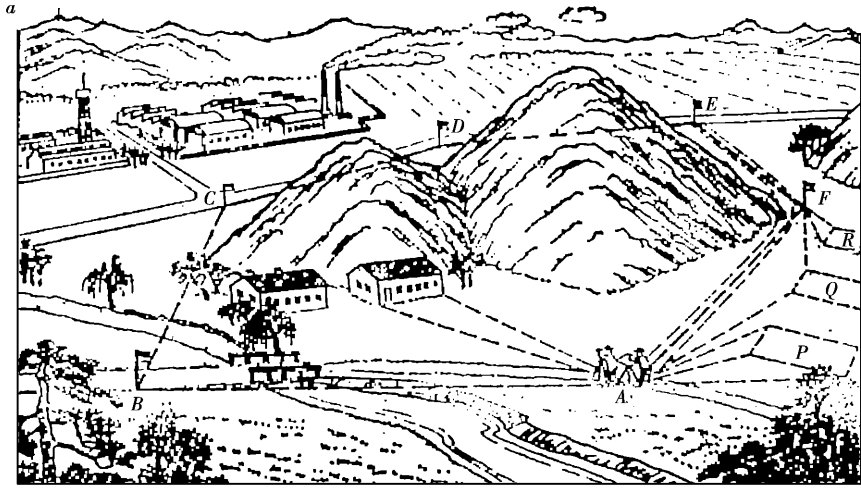


图 1.1 摄影控制点和地形测量

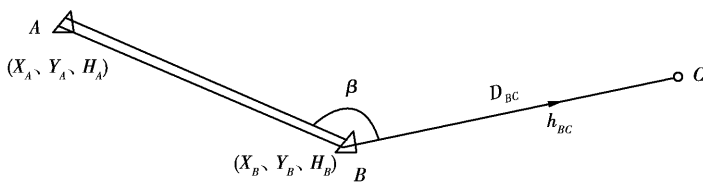


图 1.2 摄影测量的基本工作