

高等院校土建工程专业教材

工 程 测 量

主 编 黄双华 汪 杰 付 建 唐雪英

副主编 王宁军 王 伟 钟 丹 肖 欢 刘 茜

参 编 王 涛 袁清浏 谢冰莹 梁月华

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

序

随着我国经济的快速发展，工程建设项目日渐增多，工程测量技术的应用极其普遍，是紧密地与生产实践相结合的学科。一方面，随着测绘科技的飞速发展，工程测量技术也发生着快速而深刻的变化；另一方面，改革开放后城市建设不断扩大，出现了很多大型建筑物和特种精密建设工程等，使得工程测绘技术服务的领域不断增加，有力推动和促进了工程测量事业的发展和技术进步。所以，不论是目前在校学习的土建类专业的学生，还是已经在施工现场的技术管理人员，都非常有必要系统地、深入地学习并掌握工程测量的相关知识。

工程测量是工程类、工程管理类、测绘工程类等专业的专业基础课之一。本书编者积极收集实践资料，发挥集体智慧，编写出了这本教材。

该教材系统性较强，前后知识连贯，具有完整的知识体系。特点如下：

(1) 本书在重点章节中坚持理论教学与案例教学相结合，通过大量工程实例介绍强化理论知识学习，增强了本书的实用性和可读性。

(2) 本书内容充实，结构清晰，对工程建设过程中涉及的各类工程测量问题进行了较详细的阐述，并辅以大量图片。

(3) 本书的主要编者有丰富的实践经验，在高校主讲过多年的土木工程测量，本书作为他们多年教学经验的总结，提出了一些颇有价值的理论见解。

相信本书在专业教学过程中定能发挥应有的积极作用。

攀枝花学院土木与建筑工程学院测绘专业负责人，副教授

江俊福

前 言

2017年2月以来,教育部为主动应对新一轮科技革命与产业变革,积极推进新工科建设,发布了《关于开展新工科研究与实践的通知》《关于推荐新工科研究与实践项目的通知》,为高等院校特别是以工科为主的高等院校指明了面向新时代发展的方向。本书是基于新工科研究与实践背景下,以OBE成果导向输出为路径的面向高等本科院校及高职高专院校土建类专业的专门教材。

本书基于高等院校土建类专业卓越工程师教育培养,重点为地方经济社会发展和区域资源综合开发利用服务,重点为培养具有创新精神、创业意识和职业能力的高级专门人才服务。

本书以地面点坐标的确定和应用为核心,前半部分讲述地面点坐标的确定,后半部分讲述地面点坐标的应用。本书突出应用型人才培养,知识脉络清晰,重难点突出,本书内容全面,主要包括水准测量、角度测量、距离测量、现代化测量技术、测量误差基本知识、小地区控制测量、大比例尺地形图测绘及应用、摄影测量与遥感的基本知识、施工放样基本方法、道路工程测量、桥涵测量、隧道施工测量、民用与工业建筑施工测量和建筑物变形观测等。

由于编者水平有限,书中疏漏之处难免存在,敬请广大读者批评指正,以便完善和提高。

编 者

2019年12月

目 录

1	绪 论	1
1.1	工程测量学的定义和作用	1
1.2	地面点位的表示方法	3
1.3	用水平面代替水准面的限度	10
1.4	测量工作概述	12
2	水准测量	15
2.1	水准测量的原理	15
2.2	水准测量的仪器和工具	17
2.3	水准测量实施	24
2.4	微倾式水准仪的检验与校正	31
2.5	自动安平水准仪	34
2.6	电子水准仪及其使用	37
2.7	水准测量的误差及注意事项	39
3	角度测量	44
3.1	角度测量原理	44
3.2	光学经纬仪的构造与使用方法	46
3.3	水平角观测	50
3.4	竖直角观测	54
3.5	经纬仪检验与校正	58
3.6	角度测量误差及注意事项	60
4	距离测量	64
4.1	钢尺量距	64
4.2	视距测量	67
4.3	光电测距原理	71
5	现代化测量技术	73
5.1	全站仪的测量原理	73
5.2	全站仪的构造	79
5.3	全站仪的基本测量方法	81

5.4	GPS 的组成及轨道的大地参考坐标系	84
5.5	GPS-RTK 测量	88
5.6	误差源及其对定位精度的影响	91
6	测量误差基本知识	94
6.1	误差的来源和分类	94
6.2	偶然误差的特性	96
6.3	评定测量精度的标准	98
6.4	观测值的算术平均值及改正值	100
6.5	误差传播定律及应用	103
7	小地区控制测量	107
7.1	控制测量概述	107
7.2	直线定向	110
7.3	导线测量	113
7.4	交会定点	123
7.5	高程控制测量	126
8	大比例尺地形图测绘及应用	132
8.1	地形图的基本知识	132
8.2	测图前的准备工作	144
8.3	大比例尺地形图测绘	145
8.4	地形图测绘的技术要求	152
8.5	碎部点测量方法	153
8.6	地形图的检查、拼接与整饰	154
8.7	地形图的应用	155
9	摄影测量与遥感的基本知识	166
9.1	摄影测量与遥感的基本概念与发展概述	166
9.2	摄影测量的基本原理与方法	170
9.3	遥感原理简介	179
9.4	航空摄影测量	188
10	施工放样基本方法	194
10.1	施工放样概述	194
10.2	施工控制测量	195
10.3	距离的放样	196
10.4	水平角的放样	198
10.5	高程的放样	199

10.6	平面位置放样	202
10.7	坡度的放样	206
11	道路施工测量	209
11.1	道路施工测量概述	209
11.2	道路中线测量	210
11.3	道路曲线的测设	215
11.4	道路的纵、横断面测量	223
11.5	道路施工测量	228
12	桥涵施工测量	234
12.1	桥涵施工测量概述	234
12.2	涵洞施工测量	234
12.3	桥梁控制网的形式	235
12.4	桥梁墩台定位测量	238
12.5	墩台纵、横轴线的测设	244
12.6	桥梁细部放样	245
13	隧道施工测量	248
13.1	隧道概述	248
13.2	洞外控制测量	249
13.3	隧道洞口联系测量	251
13.4	地面与地下联系测量	253
13.5	隧道施工测量	258
14	民用与工业建筑施工测量	260
14.1	民用建筑施工测量	260
14.2	工业厂房施工测量	265
14.3	烟囱、水塔施工测量	271
15	建筑物变形观测	274
15.1	建筑物变形观测概述	274
15.2	沉降位移观测	278
15.3	水平位移观测	280
15.4	倾斜观测	283
15.5	特殊变形观测	285
	参考文献	288

1 绪 论

工程测量是高等院校土建类专业和城市规划类专业的一门技术基础课程，其研究对象主要是地球的形状、大小和地球表面上各种物体的几何形状及空间位置。工程测量可为国民经济建设和国防建设提供一系列的大地坐标、高程和重力值，各种比例尺的地形图和地图，是规划设计、工程施工和编制各种专用地图的基础。

1.1 工程测量学的定义和作用

1.1.1 工程测量学的定义

工程测量学（Engineering Surveying 或 Engineering Geodesy）是测绘学的二级学科，归纳起来，有以下三种定义：

（1）工程测量学是研究在工程建设的勘察设计、施工和运营管理等阶段进行的各种测量工作的理论、方法和技术的学科。按工程建设的进行程序，工程测量可分为勘察设计阶段的测量、施工阶段的测量和竣工后运营管理阶段的测量。

（2）工程测量学主要研究在工程建设各阶段、环境保护及资源开发中进行的地形和其他有关信息的采集及处理，施工放样、设备安装和变形监测的理论、方法与技术，对测量资料及与工程有关的各种信息进行管理和使用。它是测绘学在国家经济建设和国防建设中的一门应用性学科。

地形信息采集主要表现为各种大比例尺地形图测绘；施工放样是将工程的室内设计放样实现到实地；变形监测（亦称安全监测）贯穿于工程建设的三个阶段，还包括变形分析与预报。

（3）工程测量学是研究地球空间中（包括地面、空中、地下和水中）具体几何实体的测量描绘和抽象几何实体的测设实现的理论、方法和技术的一门应用性学科。它主要以建筑工程和机器设备为研究对象。

具体几何实体指一切被测对象，包括存在的地形、地物，已建的各种工程及附属物；抽象几何实体指一切设计的但尚未实现的各项工程。

比较上述三种定义，定义（1）比较大众化，易于理解，工程测量学翻译成 Engineering Surveying 比较恰当。定义（2）较定义（1）更具体、准确，上升到了理论、方法与技术层次，且范围更大，包括了环境保护及资源开发。从学术意义上讲，定义（3）更加概括、抽象、严密和科学。定义（2）（3）除建筑工程外，机器设备乃至其他几何实体都是工程测量学的研究

对象，而且都上升到了理论、方法和技术层面，强调工程测量学所研究的是与几何实体相联系的测量、测设的理论、方法和技术，而不仅仅是研究各阶段的各种测量工作。按定义（2）（3），工程测量学当翻译成 Engineering Geodesy。

1.1.2 工程测量学的学科地位

工程测量学是测绘学的二级学科。测绘学又称测绘科学与技术，是一门具有悠久发展历史和现代科技含量的一级学科。测绘学的二级学科可做如下划分：

（1）大地测量学。包括天文大地测量学、几何大地测量学（或称大地测量学基础）、物理大地测量学、地球物理大地测量学、卫星大地测量学、空间大地测量学和海洋大地测量学等。

（2）工程测量学。包括矿山测量学、精密工程测量学、工程的变形监测分析与预报。国际上，许多矿山测量工作者认为他们所从事的工作与工程测量不同，应从工程测量中分离出来，并成立了矿山测量协会。但一般来说，把矿山测量看作工程测量的分支更恰当一些。

（3）摄影测量学与遥感。可分为摄影测量学、遥感学。摄影测量与遥感有许多相同之处，也有本质上的不同之处。摄影测量学包括航空摄影测量学和地面摄影测量学（也称近景摄影测量学或工程摄影测量学），遥感学包括航空遥感学和航天遥感学。

（4）地图制图学。亦称地图学，包括地图投影、地图综合、地图编制和地图制印等。

（5）地理信息系统。是测绘学、大气科学、地理学和资源科学等一级学科的二级学科。

（6）不动产测绘（或称地籍测绘）。国外许多国家将其作为测绘学的二级学科，因为在经济、法律上有特殊意义；在测量技术方面，它与工程测量的技术方法基本相同，且较之更简单。因此，国内有人将不动产测绘纳入工程测量的范畴。

1.1.3 工程测量的任务和作用

工程测量的任务可以概括为一句话：为工程建设提供测绘保障，满足工程建设各阶段的各种测绘需求。具体地讲，在工程勘测设计阶段，提供设计所需要的地形图等测绘资料，为工程的勘测设计、初步设计和技术设计服务；在施工建设阶段，建立施工控制网、设计目标的位置放样、设备安装测量、竣工测量以及施工中的变形监测，保证施工的进度、质量和安全；在运营管理阶段，进行建筑物的维护测量和变形观测，保障工程的安全高效运营。

工程测量在工程建设中，起尖兵和卫士的作用。工程测量关系到工程设计的质量，关系到工程建设的速度和质量、关系到工程运营的效益和安全。以变形监测为例，它贯穿于工程建设和工程运营的始终，变形监测是长久性的工作，监测是基础，分析是手段，预报是目的。工程的变形监测，不仅是工程和设备正常和安全运营的保障，其数据处理结果也是对设计正确性的检验，变形分析资料是建设中修改设计或新建类似工程设计的重要依据。

1.1.4 工程测量学的应用领域

工程测量学是一门应用性很强的工程学科，在国家经济建设、国防建设、环境保护及资

源开发中都必不可少，其应用领域，可按工程建设阶段和服务对象划分。

按工程建设的勘测设计、施工建设和运营管理三个阶段，工程测量可分为工程勘测、施工测量和安全监测。工程勘测主要是提供各种大、中比例尺（如 1：500 和 1：2 000）的地形图，为工程地质、水文地质勘探等提供测量服务；或进行重要工程的地层稳定性观测等。施工测量包括建立施工控制网、施工放样、施工进度和质量监控、开挖与建筑方量测绘、施工期的变形监测、设备安装及竣工测量等。运营管理阶段的测量工作主要是安全监测。

工程测量按所服务的对象可分为建筑工程测量、水利工程测量、线路工程测量、桥隧工程测量、地下工程测量、海洋工程测量、军事工程测量、三维工业测量以及矿山测量、城市测量等。

工程测量学的应用领域还可以扩展到工业、农业、林业和国土、资源、地矿、海洋等国民经济中的各行各业。现代工程测量已经远远突破了为工程建设服务的概念，向所谓的“广义工程测量学”发展，认为“一切不属于地球测量、不属于国家地图集范畴的地形测量和不属于官方的测量，都属于工程测量”。我们可以说：哪里有人类，哪里就有工程测量，哪里有建设，哪里就离不开工程测量。

1.2 地面点位的表示方法

1.2.1 地球的形状及大小

大部分测量工作是在地球表面上进行的。地球表面是一个形状极其复杂而又不规则的曲面，地面上不但有高山、丘陵和平地，还有江河、湖泊和海洋。最高的珠穆朗玛峰，2005 年中国国家测绘局测量的岩面高为 8 844.43 m，最低的太平洋西部的马里亚纳海沟最深处达 11 034 m，但与地球的半径 6 371 km 相比，是微不足道的。

又由于海洋面积约占整个地球表面的 71%，陆地面积只占 29%，因此，我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体。由于地球的自转运动，地球上任一点都要受到离心力和地球引力的双重作用，这两个力的合力称为重力，重力的方向线称为铅垂线，如图 1-1 所示。静止的海水面称作水准面。由于海水受潮汐风浪等影响而时高时低，故水准面有无穷多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称作大地水准面。由大地水准面所包围的形体称为大地体。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

同一水准面上各点的重力位相等，故又将水准面称为重力等位面，水准面和铅垂线就是实际测量工作所依据的面和线。

由于地球内部质量分布不均匀，致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化，所以，大地水准面是一个不规则的无法用数学式表述的曲面，如图 1-2 所示。因此人们进一步设想，用一个与大地体非常接近的又能用数学式表述的规则球体，即旋转椭球体来代表地球的形状。旋转椭球体的形状和大小由椭球基本元素确定，即长半轴 a 和短半轴 b ，由此计算出另一参数——扁率

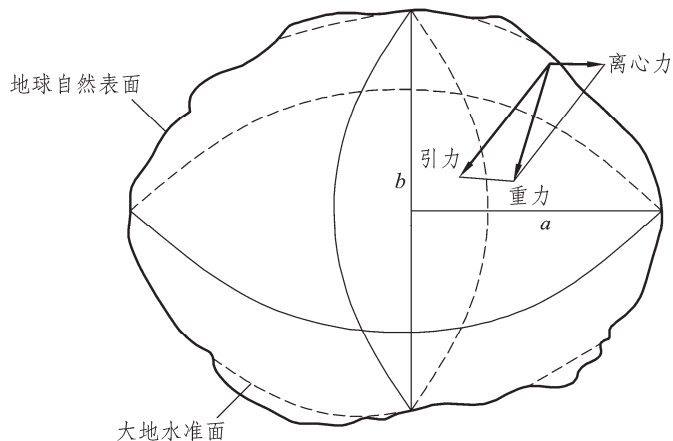


图 1-1 地球自然表面与铅垂线

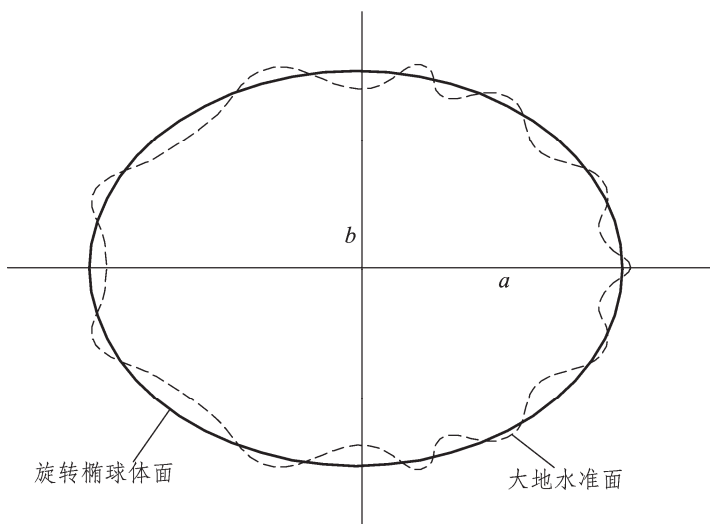


图 1-2 大地水准面与地球旋转椭球

$$\alpha = \frac{a-b}{a} \quad (1-1)$$

我国使用的椭球参数如表 1-1 所示。

表 1-1 常用椭球参数

参数	克拉索夫斯基椭球	1975 年国际椭球	WGS84 椭球体	2000 中国大地坐标系
a/m	6378245	6378140	6378137	6378137
b/m	6356863.0187730473	6356755.2881575287	6356752.3142	6356752.3141
α	1/298.3	1/298.257	1/298.257223563	1/298.257222101
e	0.006693421622966	0.006694384999588	0.00669437999013	0.00669438002290
e'	0.006738525414683	0.006739501819473	0.00673949674227	0.00673949677548

由于参考椭球的扁率很小，在小区域的普通测量中可将地（椭）球看作圆球，其半径为 6 371 km。

1.2.2 地面点位置的确定

测量的基本工作就是确定地面的点位。地面点的位置需用三维坐标来确定。在工程测量中，一般将该点的空间位置用水准面或水平面（球面或平面）的位置（二维）坐标和该点到大地水准面的铅垂距离（一维）高程来表示。根据不同的需求可以采用不同的坐标系和高程系。

1. 地理坐标

当研究和测定整个地球的形状或进行大区域的测绘工作时，可用地理坐标来确定地面点的位置。地理坐标是一种球面坐标，视依据球体的不同分为天文坐标和大地坐标。

1) 天文坐标

以大地水准面为基准面，地面点沿铅垂线投影在该基准面上的位置，称为该点的天文坐标。该坐标用天文经度（ λ ）和天文纬度（ φ ）表示。如图 1-3 所示，将大地体看作地球， NS 即为地球的自转轴， N 为北极， S 为南极， O 为地球体中心。

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为赤道面。它是纬度计量的起始面。赤道面与地球表面的交线称为赤道。其他垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为纬线。过点 P 的铅垂线与赤道面之间所夹的线面角就称为 P 点的天文纬度。用 φ 表示，其值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，在赤道以北的叫北纬，以南的叫南纬。天文坐标（ λ, φ ）是用天文测量的方法实测得到的。

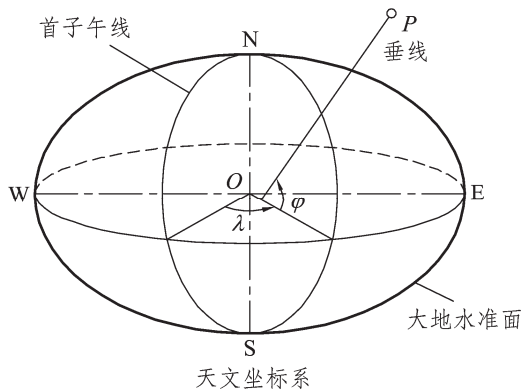


图 1-3 天文坐标系

2) 大地坐标

以参考椭球面为基准面，地面点沿椭球面的法线投影在该基准面上的位置，称为该点的大地坐标。该坐标用大地经度（ L ）和大地纬度（ B ）表示。由首子午面和赤道面构成大地坐标系统的起算面。过参考椭球面上任一点 P 的子午面与首子午面的夹角 L ，称为该点的大地经度。过 P 点的法线与赤道面的夹角 B ，称为该点的大地纬度。如图 1-4 所示，包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 的大地子午面。

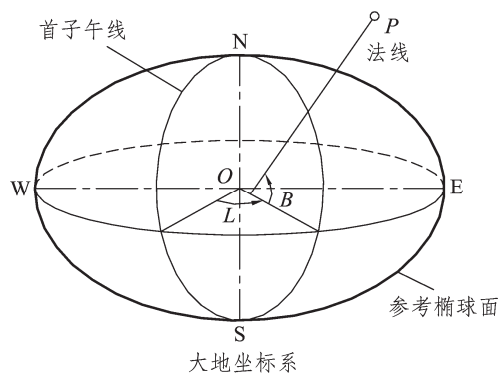


图 1-4 大地坐标系

大地坐标 (L, B) 因所依据的椭球体面不具有物理意义而不能直接测得，只可通过计算得到。我国采用的大地坐标系统有：

(1) 1954 北京坐标系。

采用克拉索夫斯基椭球参数，并与苏联 1942 年坐标系进行联测，通过计算建立了我国大地坐标系，定名为 1954 北京坐标系。大地原点在普尔科沃天文台。由于该大地原点离我国甚远，在我国范围内该参考椭球面与大地水准面存在着明显的差距，最大处超过 69 m。

(2) 1980 西安坐标系。

1978 年 4 月在西安召开全国天文大地网平差会议，确定重新定位，建立我国新的坐标系，即 1980 年国家大地坐标系。1980 年国家大地坐标系采用地球椭球基本参数为 1975 年国际大地测量与地球物理联合会 (IGU) 第十六届大会推荐的数据，即 IAG75 地球椭球体。该坐标系的大地原点设在我国中部的陕西省泾阳县永乐镇，位于西安市西北方向约 60 km，故称 1980 西安坐标系。其主要优点在于：采用多点定位原理建立，理论严密，定义明确；椭球参数为现代精确的地球总椭球参数；椭球面与我国大地水准面吻合得较好；椭球短半轴指向明确；经过了整体平差，点位精度高。

(3) WGS-84 坐标系。

WGS-84 坐标系 (World Geodetic System) 是一种国际上采用的地心坐标系。坐标原点为地球质心，其地心空间直角坐标系的 Z 轴指向国际时间局 (BIH)1984.0 定义的协议地极 (CTP) 方向， X 轴指向 BIH1984.0 的协议子午面和 CTP 赤道的交点， Y 轴与 Z 轴、 X 轴垂直构成右手坐标系，称为 1984 世界大地坐标系。这是一个国际协议地球参考系统 (ITRS)，是目前国际上统一采用的大地坐标系。

(4) 2000 国家大地坐标系。

为了适应空间时代我国经济社会发展及测绘科技本身的发展，适应大地坐标系的发展趋势，我国大地坐标系应当更新换代，应当现代化。2008 年 3 月，由原国土资源部正式上报国务院《关于中国采用 2000 国家大地坐标系的请示》，英文缩写为 CGCS2000。2000 国家大地坐标系是全球地心坐标系在我国的具体体现，其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心。我国从 2008 年 7 月 1 日起采用。

2. 高斯平面直角坐标系

地理坐标是球面坐标，不能直接用于测图，工程建设规划、设计、施工，因此需要将球

面坐标按照一定的数学算法归算到平面上去，即采用地图投影的方法，把球面坐标转换成平面坐标。目前，我国大部分地区采用的是高斯-克吕格投影（简称高斯投影）。

高斯投影方法首先将地球按经线划分成带，称为投影带。投影带从首子午线起，每隔经度 6° 划分为一带，称为 6° 带，如图 1-5 所示，自西向东将整个地球划分为 60 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（或称为轴子午线），如图 1-6 所示，第一个 6° 带的中央子午线经度为 3° ，任意一个 6° 带的中央子午线经度， λ_0 可按式（1-2）计算。

$$\lambda_0 = 6N - 3 \quad (1-2)$$

式中： N ——投影带号。

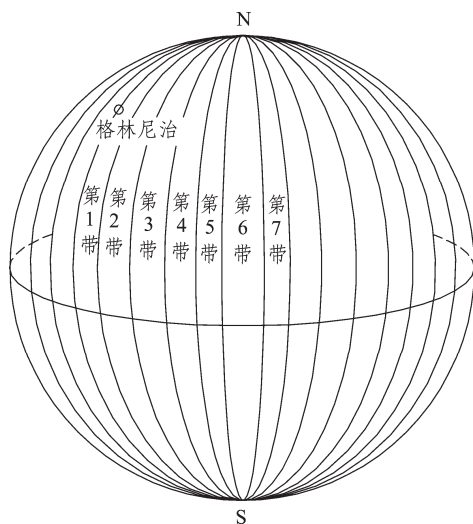


图 1-5 高斯投影分带

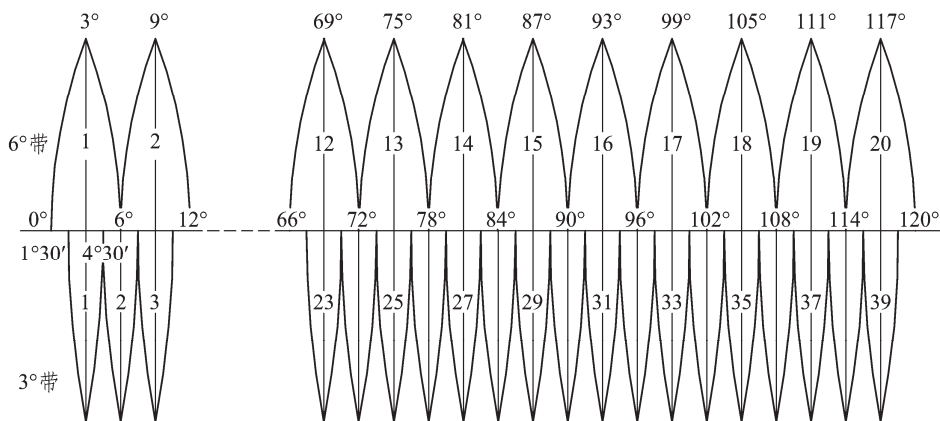


图 1-6 6° 带和 3° 带中央子午线及带号

高斯投影属于等角投影。能够使球面图形的角度和投影到平面的图形角度保持不变，但任意两点间的长度产生了变形（中央子午线除外），离中央子午线越远，变形越大。为了提高测图精度，减小长度变形，可采用 3° 带投影。 3° 投影分带是从东经 1.5° 开始，每隔经度 3° 划分为一带，自西向东将整个地球划分为 120 个带，如图 1-6 所示。任意一个 3° 带的中央子午

线经度， λ'_0 可按式(1-3)计算。

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

式中： N ——投影带号。

高斯投影的基本原理是：假想一个椭圆柱横套在地球椭球体上，使其与某一中央子午线相切，椭圆柱的中心轴通过地球椭球的中心，如图1-7所示。用解析法按等角条件，将椭球面上中央子午线东西两侧按每一带投影到椭圆柱面上，再沿着过极点的母线将椭圆柱剪开，然后将椭圆柱展开成平面，即获得投影后的平面图形。

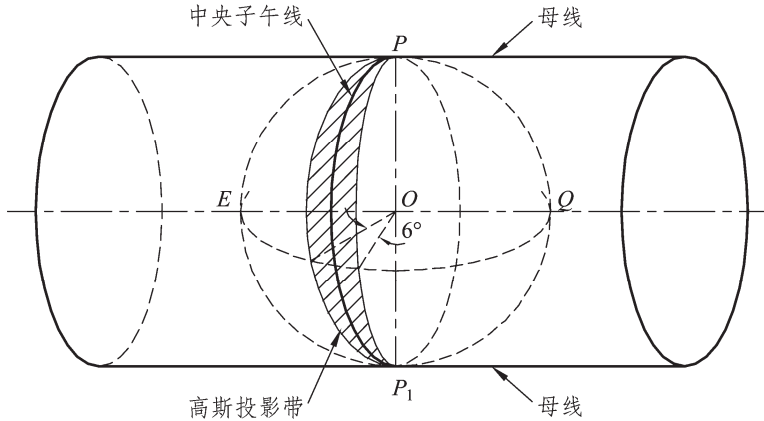


图 1-7 高斯投影基本原理

在平面图形上，中央子午线与赤道形成相互垂直的直线，将中央子午线的投影作为纵坐标轴，用 x 表示，将赤道的投影作为横坐标轴，用 y 表示，两轴的交点作为坐标原点，由此构成的平面直角坐标系称为高斯平面直角坐标系。如图1-8(a)所示。由于我国位于北半球，在每一投影带内， X 坐标恒为正值， Y 坐标值有正有负，例如，图1-8(a)中， $y_A=71\,236\text{ m}$ ， $y_B=-82\,261\text{ m}$ 。为了使 y 坐标都为正值，故将纵坐标轴向西平移 500 km (半个投影带的最大宽度不超过 500 km)，图1-8(b)中， $y_A=71\,236+500\,000\text{ m}=571\,236\text{ m}$ ， $y_B=-82\,261+500\,000=417\,739\text{ m}$ 。为了确定某一点在哪个 6° 带内，在 y 坐标前加上投影带的带号。设 B 点位于 18 投影带，则其横坐标为 $y_B=18\,417\,739\text{ m}$ 。

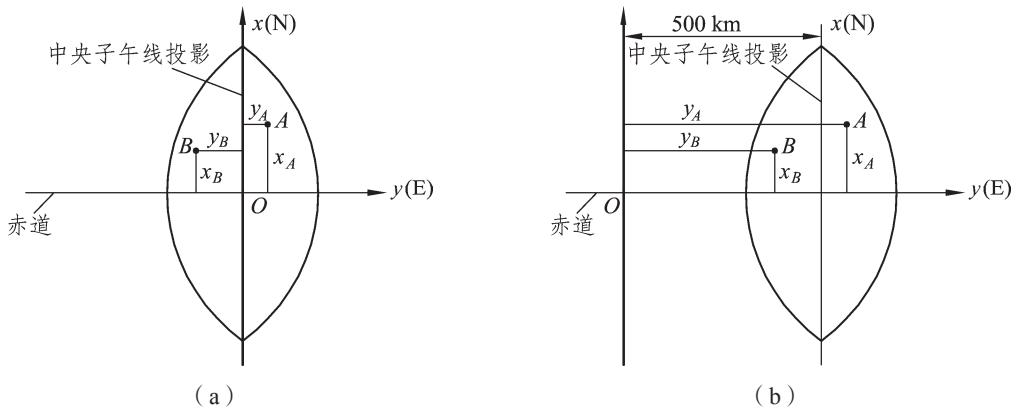


图 1-8 高斯平面直角坐标系

3. 独立平面直角坐标系

当测区的范围较小，能够忽略该区地球曲率的影响而将其当作平面看待时，可在此平面上建立独立的直角坐标系。一般选定南北方向的纵轴为 x 轴，自原点向北为正，向南为负；以东西方向的横轴为 y 轴，自原点向东为正，向西为负，如图 1-9 所示。这与数学上笛卡儿平面坐标系的 x 轴与 y 轴正好相反，如图 1-10 所示。测量与数学上关于坐标象限的规定也有所不同，二者均以北东为第一象限，但数学上的四个象限为逆时针递增，而测量上则为顺时针递增。

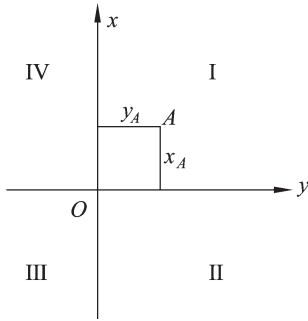


图 1-9 测量坐标系

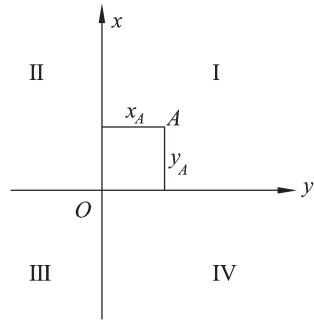


图 1-10 数学坐标系

4. 高程系

在一般的测量工作中都以大地水准面作为高程起算的基准面。因此，地面任一点沿铅垂线方向到大地水准面的距离就称为该点的绝对高程或海拔，简称高程，用 H 表示。如图 1-11 所示，图中的 H_A 、 H_B 分别表示地面上 A 、 B 两点的高程。中华人民共和国成立初期，采用 1950—1956 年验潮资料，求得平均海面位置，进而测得水准原点的高程为 72.289 m，此高程系统称为 1956 年黄海高程系。由于验潮资料时间周期短，不甚精确，为提高大地水准面的精度，国家又根据青岛验潮站 1952—1979 年的验潮资料组合成了 10 个周期共 19 年的验潮资料，经精确计算，于 1985 年重新确定了黄海平均海面的位置和原点的高程 (72.260 m)，并决定从 1988 年起，一律按此原点高程推算全国控制点的高程，称为“1985 国家高程基准”。

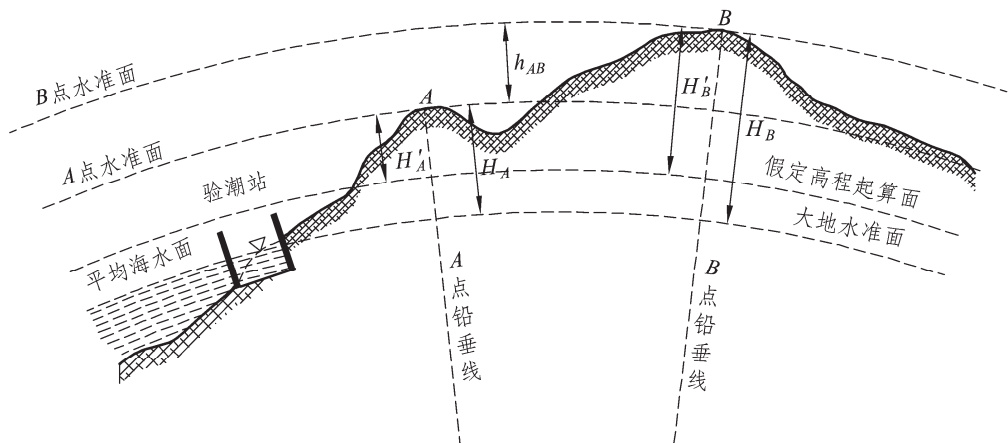


图 1-11 地面点的高程

当测区附近暂没有国家高程点可联测时，也可临时假定一个水准面作为该区的高程起算

面。地面点沿铅垂线至假定水准面的距离，称为该点的相对高程或假定高程。如图 1-11 中的 H'_A 、 H'_B 分别为地面上 A 、 B 两点的假定高程。地面上两点之间的高程之差称为高差，用 H_{AB} 表示，例如， A 点至 B 点的高差可写为

$$H_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-4)$$

1.3 用水平面代替水准面的限度

水准面是一个曲面，曲面上的几何图形，包括基本观测量（距离、角度、高差），投影到平面上会产生变形，称为水准面曲率的影响。当测区范围较小且地球曲率的影响不超过测量或制图的容许误差的范围时，将地面视为平面，可以不考虑地球曲率的影响。本节将针对地球曲率对基本观测元素的影响来讨论研究测区范围的限度。

1.3.1 对距离的影响

设水准面 L 与水平面 P 在 A 点相切，如图 1-12 所示， A 、 B 两点在水准面的弧线长为 S ，在水平面上的距离为 D ，设地球的半径为 R ，水平距离 D 代替弧线距离 L 所产生的误差为 ΔS ，则

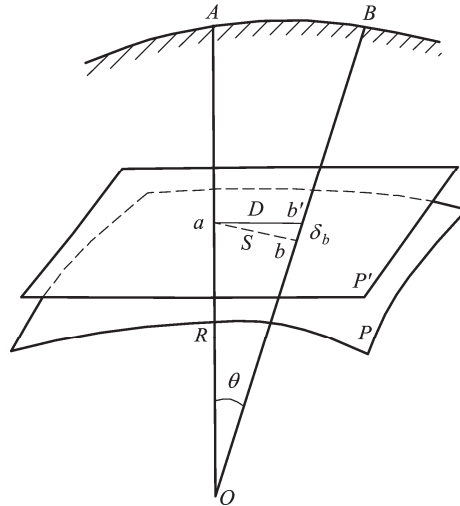


图 1-12 水平面代替水准面对距离和高程的影响

$$\Delta S = D - S = R \tan \theta - R\theta = R(\tan \theta - \theta)$$

将 $\tan \theta$ 按级数展开，由于 θ 角度很小，略去三次方以上的高次项，得

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3$$

由于 $S = R\theta$ ， $D = R \tan \theta$ ，则

$$\Delta S = \frac{S^3}{3R^2} \quad (1-5)$$

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

取地球半径为 6 371 km，并以不同的 S 值代入式中，得到水平面代替水准面产生的距离误差 ΔS 和相对误差 $\Delta S/S$ ，如表 1-2 所示。

表 1-2 水平面代替水准面的距离误差和相对误差

距离 S/km	距离误差 $\Delta S/\text{mm}$	相对误差 $\Delta S/S$
1	0	0
5	1	1 : 4 870 000
10	8	1 : 1 220 000
25	128	1 : 200 000
50	1 026	1 : 49 000

由表 1-2 可知，在距离为 10 km 的范围内，水平面代替水准面所产生的距离相对误差为 1/120 万，精密的距离测量对这样的误差是容许的。因此，在半径为 10 km 范围内，即面积约 300 km² 内，以水平面代替水准面所产生的距离误差可以忽略不计。

1.3.2 对水平角的影响

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 。其值为

$$\varepsilon = \frac{P}{R^2} \cdot \rho \quad (1-7)$$

式中： ε ——球面角超值（"）；

P ——球面多边形的面积（km²）；

R ——地球半径（km）；

ρ ——弧度的秒值， $\rho=206\,265''$ 。

表 1-3 水平面代替水准面的水平角误差

球面多边形的面积 P/km^2	球面角超值 ε
10	0.05
50	0.25
100	0.51
300	1.52

由表 1-3 可知，当面积 P 为 100 km² 时，用水平面代替水准面所产生的角度误差仅为 0.51"，所以在一般的测量工作中，当测区面积在 100 km² 范围内，可以忽略不计。

1.3.3 对高程的影响

在图 1-12 中, a 、 b 两点在同一水准面 P 上, 则两点高程相同。 b' 为 b 点在水平面上的投影点, 则 bb' 为水平面代替水准面所产生的高差误差, 设 $bb' = \Delta h$, 则

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

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

式中, 由于 S 和 D 相差很小, Δh 相对于 $2R$ 可以忽略不计, 则

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

以不同的距离代入式 (1-8) 中, 取地球半径 R 为 6 371 km, 则可得到高差误差 Δh , 如表 1-4 所示。

表 1-4 水平面代替水准面的高差误差

距离 S/km	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	5	10
$\Delta h/\text{mm}$	0.8	3	7	13	20	78	314	1 962	7 848

由表 1-4 可知, 水平面代替水准面, 在 500 m 的距离上, 有 2 cm 的高差误差; 在 1 km 的距离上, 有 8 cm 的高差误差。因此, 在高程测量中, 即使距离很短, 也应考虑地球曲率对高程的影响, 并加以改正。

1.4 测量工作概述

在测量过程中, 一般将地球表面分成两类: 地面上天然或人工形成的固定的物体, 如湖泊、河流、海洋、房屋、道路、桥梁等, 称为地物; 地表高低起伏的形态, 如山地、丘陵和平原等, 称为地貌; 地物和地貌总称为地形。

1.4.1 测量的基本工作

地球上测量工作的基本任务是要确定地面点的几何位置。确定地面点的几何位置需要进行一些测量的基本工作。如图 1-13 所示, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为地面上高低不同的一系列点, 构成空间多边形 $ABCDE$ 。从 A 、 B 、 C 、 D 、 E 分别向水平面作铅垂线, 这些垂线的垂足在水平面上构成多边形。水平面上各点就是空间相应各点的正射投影, 水平面上多边形的各边就是各空间斜边的正射投影, 水平面上的角就是包含空间两斜边的两面角在水平面上的投影。地形图就是将地面点正射投影到水平面上后再按一定的比例尺缩绘至图纸上而成的。由此看出, 地形图上各点之间的相对位置是由水平距离、水平角和高差决定的, 若已知其中一点的坐标 (x ,

y) 和过该点的标准方向及该点高程 H ，则可借助水平距离、水平角和高差将其他点的坐标和高程算出。因此，不论进行任何测量工作，距离、角度、高程（高差）是测量基本观测量。

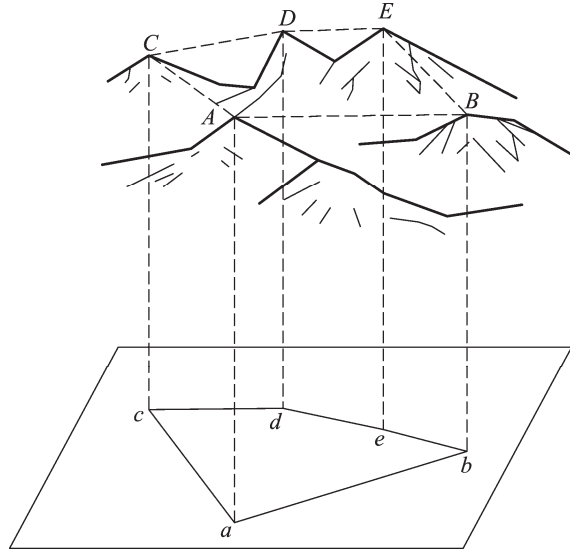
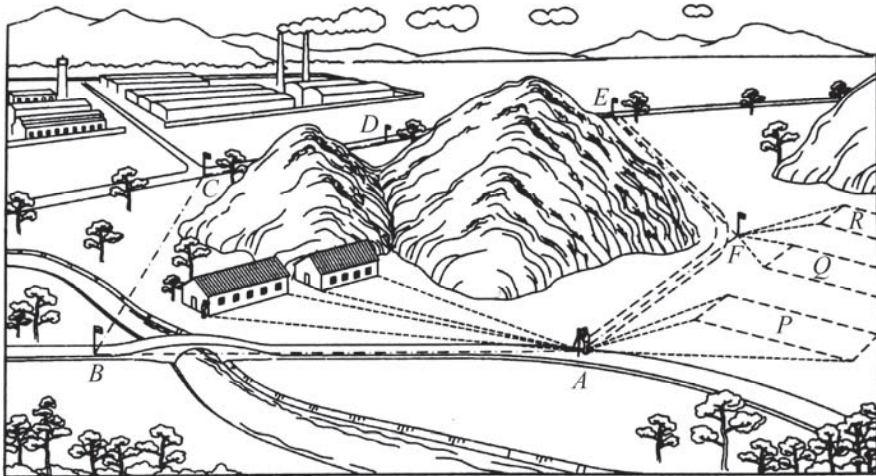


图 1-13 测量的基本工作

1.4.2 测量工作的原则

测量工作的目的之一是测绘地形图，地形图是通过测量一系列碎部点（地物点和地貌点）的平面位置和高程，然后按一定的比例，应用地形图符号和注记缩绘而成。如图 1-14 所示，要测绘该地区的地形图，由于测量过程中有误差产生，为了防止误差的积累和传播，保证测图精度，要先在测区内统一选择一些起控制作用的点 A 、 B 、 C 、 D 、 E ，将它们的平面位置和高程精确地测量计算出来，这些点被称作控制点，由控制点构成的几何图形称作控制网，然后再根据这些控制点分别测量各自周围的碎部点，进而绘制成图。



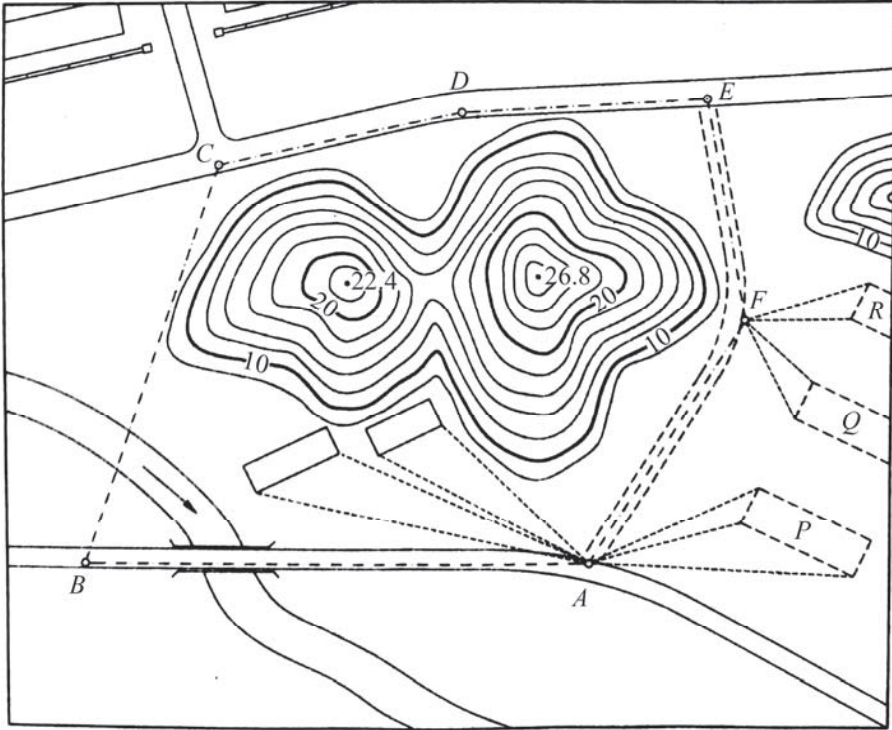


图 1-14 控制测量与碎部测量

因此，在测量工作中应遵循布局上，“整体到局部”；次序上，“先控制后碎步”；精度上，“从高级到低级”的基本原则。



思考题与习题

1. 测量学研究的对象是什么？
2. 测量学的任务是什么？
3. 何谓水准面？何谓大地水准面？何谓大地体？
4. 地球的形状为何要用大地体和旋转椭球体来描述？
5. 确定地面点位常用哪几种坐标系？
6. 球面坐标与平面坐标有何区别？天文坐标与大地坐标有何区别？
7. 何谓绝对高程？何谓相对高程？何谓高差？
8. 用水平面代替水准面时，地球曲率对距离、高差有何影响？
9. 测量工作的基本原则是什么？

2 水准测量

确定地面点高程的测量工作，称为高程测量。高程测量按使用的仪器和测量办法的不同，可分为水准测量、三角高程测量、气压高程测量和 GPS 测量等。在工程建设中进行高程测量主要用水准测量。

2.1 水准测量的原理

水准测量是利用水准仪提供的水平视线，根据水准仪在两点竖直的水准尺上的读数，求得两点之间的高差。如果其中一个点的高程已知，则根据高差可以推算出另一个点的高程。

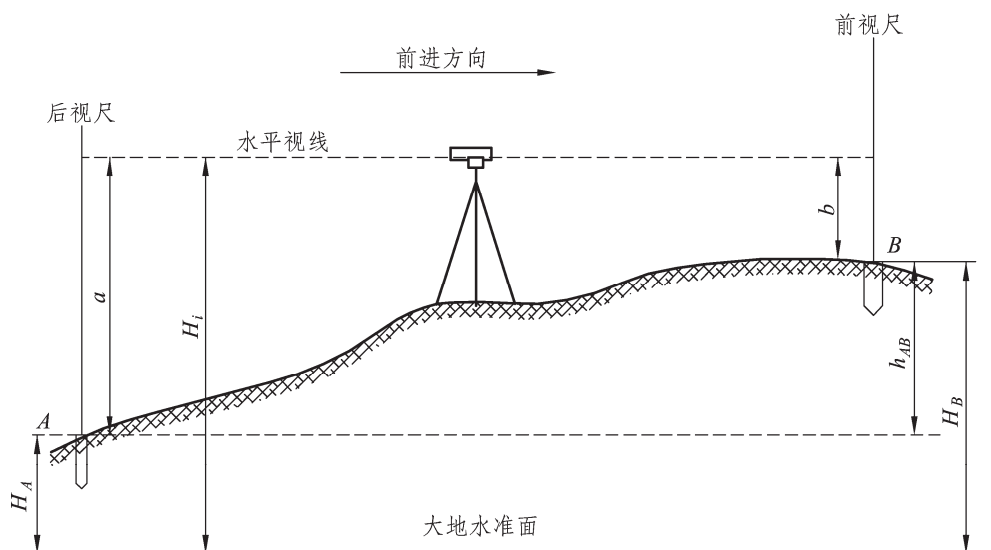


图 2-1 水准测量原理

如图 2-1 所示，已知 A 点高程 H_A ，求 B 点高程 H_B ，可在 A 、 B 两点分别竖立水准尺，在 A 、 B 之间安置水准仪，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，则规定 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， A 点到 B 点的高差为

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

即后视读数减去前视读数。由式 (2-1) 知，当后视读数 a 大于前视读数 b 时， h_{AB} 值为正，说