



新世纪土木工程系列规划教材

# 土木工程测量



第2版

张凤兰 郭丰伦 范效来 编著

Education



免费电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 土木工程测量

第 2 版

张凤兰 郭丰伦 范效来 编著

RFID

机械工业出版社

本书根据高等学校土木工程专业“测量学”课程教学大纲及国家最新测量规范编写,并结合工程实例介绍工程测量的基本理论和最新方法。其内容包括:绪论、高程测量、角度测量、距离测量与直线定向、测量误差的基本理论、小区域常规平面控制测量、大比例尺地形图测绘、大比例尺地形图的应用、施工测量的基本工作、建筑工程施工测量、线路工程测量和3S技术简介等。本书具有较宽的专业适应面,既有较完整的理论,又注重工程实用性,并力求反映当前测量学科的最新技术。

本书可作为高等学校土木建筑类各专业的通用教材,也可用作自学考试和电大、函大教学参考书,并可供土木建筑类工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量/张凤兰,郭丰伦,范效来编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2017.7

新世纪土木工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-57210-7

I. ①土… II. ①张… ②郭… ③范… III. ①土木工程-工程测量-高等学校-教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第146447号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:马军平 责任编辑:马军平 责任校对:樊钟英

封面设计:张静 责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2017年8月第2版第1次印刷

184mm×260mm·19.25印张·471千字

标准书号:ISBN 978-7-111-57210-7

定价:48.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是按照高等学校土木工程专业“测量学”课程教学大纲的要求,在总结编者多年教学实践经验的基础上编写的。本书可作为高等学校土木工程、水利工程、道路与桥梁、环境工程、城市规划、建筑学、房产测量、农业与林业等有关专业的通用教材,也可供有关工程技术人员学习参考之用。

在编写过程中,以测量学的基本知识、基础理论和基本概念为重点,体现以基本技术和方法为主要内容的专业基础课特点。根据教学实际情况,对教材体系做了一些变动。主要变动有高程控制测量的内容归并到水准测量中,统称为高程测量;第6章只介绍了平面控制测量的内容。随着现代测绘技术的普及,本书加强了测绘新技术的内容学习,主要有电子水准仪、全站仪的使用,卫星定位系统,数字地形图的成图方法和使用等,尤其是全面详细介绍了全站仪的使用。

本书由张凤兰、郭丰伦、范效来编著,张凤兰主编并全书统稿。第1、2、3章和第11章由山东大学张凤兰编写;第5、6、7、8章由山东理工大学郭丰伦编写;第4、9、10、12章由青岛农业大学范效来编写。

在编写过程中,参考了许多专家、学者的一些书籍和文献资料,在此表示由衷的感谢。由于编者水平有限,书中可能存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 土木工程测量的任务及其在工程建设中的作用	1
1.2 确定地面点位的方法	3
1.3 用水平面代替水准面的限度	9
1.4 测量工作的基本内容及原则	11
习题	13
第 2 章 高程测量	14
2.1 水准测量原理	14
2.2 DS <sub>3</sub> 型水准仪和水准尺	15
2.3 精密水准仪和水准尺	19
2.4 自动安平水准仪	21
2.5 电子水准仪简介	23
2.6 水准测量方法和成果计算	25
2.7 微倾式水准仪的检验与校正	32
2.8 水准测量的误差来源及消减方法	34
2.9 三角高程测量	37
习题	40
第 3 章 角度测量	43
3.1 角度测量原理	43
3.2 光学经纬仪	44
3.3 电子经纬仪简介	47
3.4 水平角观测	51
3.5 竖直角观测	54
3.6 光学经纬仪的检验与校正	57
3.7 角度测量误差分析及注意事项	61
习题	63
第 4 章 距离测量与直线定向	66
4.1 钢尺量距	66
4.2 视距测量	71
4.3 电磁波测距	73
4.4 全站仪及其应用	77
4.5 直线定向	90
4.6 用罗盘仪测定磁方位角	91
4.7 陀螺经纬仪与真方位角的测定	93
习题	98
第 5 章 测量误差的基本理论	99
5.1 测量误差概述	99
5.2 评定精度的标准	102
5.3 观测值与算术平均值的中误差	106
5.4 误差传播定律及其应用	109
5.5 不等精度观测值平差	113
习题	118
第 6 章 小区域常规平面控制测量	120
6.1 国家控制网及图根控制网的概念	120
6.2 导线测量	122
6.3 小三角测量	130
6.4 交会定点测量	139
习题	142
第 7 章 大比例尺地形图测绘	144
7.1 地形图的比例尺	144
7.2 地形图的分幅与编号	145
7.3 地形图的图外注记	148
7.4 地形图图式	150
7.5 大比例尺地形图测绘	154
7.6 地形图的拼接、检查和整饰	161
7.7 数字地形图成图方法	162
习题	166
第 8 章 大比例尺地形图的应用	167
8.1 地形图的识读	167
8.2 地形图应用的基本内容	170
8.3 图形面积的量算	172

8.4 地形图在工程规划和设计中的应用	174	11.2 道路中线测量	224
8.5 数字地形图的应用	177	11.3 线路纵、横断面测量	229
习题	179	11.4 道路施工测量	236
<b>第9章 施工测量的基本工作</b>	<b>181</b>	11.5 管道工程测量	241
9.1 水平角、水平距离和高程的测设	181	11.6 全站仪在线路测量中的应用	245
9.2 点的平面位置测设	184	习题	248
9.3 已知坡度直线的测设	186	<b>第12章 3S技术简介</b>	<b>250</b>
9.4 圆曲线的测设	186	12.1 GNSS基础知识	250
9.5 缓和曲线的测设	191	12.2 GIS基础知识	262
9.6 全站仪和RTK在测设中的应用	192	12.3 RS基础知识	271
习题	193	12.4 3S技术的综合应用	278
<b>第10章 建筑工程施工测量</b>	<b>195</b>	习题	281
10.1 施工测量概述	195	<b>附录</b>	<b>282</b>
10.2 建筑工程施工控制测量	196	附录1 水准仪系列技术参数	282
10.3 民用建筑施工测量	199	附录2 经纬仪系列技术参数	283
10.4 工业建筑施工测量	216	附录3 地形图图式	283
习题	219	<b>参考文献</b>	<b>302</b>
<b>第11章 线路工程测量</b>	<b>220</b>		
11.1 线路工程测量概述	220		

# 绪论 第1章

## ■本章提要

主要讲述土木工程测量学的任务, 测量基准面, 常用的大地坐标系、天文地理坐标系的区别, 高斯平面直角坐标系和独立平面直角坐标系的建立方法以及与数学坐标系的区别, 确定地面点位的原理、方法, 以及测量工作的组织原则等内容。

## ■教学要求

熟悉土木工程测量学的任务, 掌握测量的基准面与基准线, 常用的大地坐标系、天文地理坐标系、高斯平面直角坐标系和独立平面直角坐标系的建立方法以及与数学坐标系的区别; 掌握测量所用的高程系统; 了解用水平面代替大地水准面的限度, 熟练掌握确定地面点位的原理、方法以及测量工作的组织原则。

## 1.1 土木工程测量的任务及其在工程建设中的作用

测量学是研究地球的形状和大小, 确定地面(包含空中、地表、地下和海洋等)物体的空间位置, 并对这些空间位置信息进行处理、储存、管理的科学。测量的内容包括测定和测设两部分。测定是指使用测量仪器和工具, 通过测量和计算, 得到一系列测量数据, 或把地球表面的地形缩绘成地形图, 供经济建设、规划设计、科学研究和国防建设使用。测设是指把在图纸上规划设计好的建筑物、构筑物的位置在地面上标定出来, 作为施工的依据。

测量学按照研究对象和范围及采用技术的不同, 又分为以下多个分支学科。

**大地测量学**——研究地球表面大范围区域的点位测定, 整个地球的形状、大小及地球重力场测定的理论和方法的科学。它是测量学各分支学科的基础, 其基本任务是建立地面控制网、重力网, 为地形测图和各类工程施工测量提供控制基础。按技术方法, 大地测量学又分为几何大地测量学、物理大地测量学和卫星大地测量学。

**地形测量学**——又称为普通测量学, 它是测量地球表面小范围地形图时, 不考虑地球曲率的影响, 把地球局部表面视为平面所进行的测量工作。

**工程测量学**——研究工程建设和自然资源开发中, 在规划、勘测设计、施工放样、竣工验收和安全使用各阶段中进行测量的理论和技术方法。

**摄影测量学与遥感**——研究利用摄影或遥感技术获取被测物体的影像信息, 以确定物体的形状、大小和空间位置的理论和方法。由于获得像片的方式不同, 摄影测量又分为地面摄影测量、水下摄影测量、航空摄影测量和航天遥感等。特别是遥感技术, 其摄影方式和研究对象日趋多样, 不仅有固体的、静态的对象, 而且有液体、气体及随时间变化的动态对象,

都可应用摄影测量方法进行研究。

**海洋测量学**——以海洋和陆地水域为研究对象，研究港口、码头、航道及水下地形测量的理论和方法。

**地图制图学**——研究各种模拟和数字地图的制作理论、原理、工艺技术和应用的学科。其研究内容主要包括地图编制、地图投影学、地图整饰、地图印刷等。地图是测绘工作的重要产品形式。现代地图制图学正向着制图自动化、电子地图制作及地理信息系统方向发展。

在信息社会中，测绘资料是重要的基础信息之一，测绘成果是信息产业的重要内容。测绘资料和测绘成果还是数字地球数据库的重要组成部分。国家级、地区级和全球性的空间数据基础设施是数字地球的一个核心。数字地球的数据不仅包括全球性的中、小比例尺的空间数据，还包括局部范围的大比例尺空间数据及元数据；不仅包括地球的各类多光谱、多时相、高分辨率的遥感卫星影像、航空影像、不同比例尺的专题图，还包括相应的以文本形式表现的有关可持续发展、农业、资源、环境、灾害、人口、全球变化、气候、生物、地理、生态系统、大气、水文、教育、人文和军事等不同类别的数据。测绘技术及成果的应用面很广，对国民经济建设、国防建设和科学研究有着重要作用。国民经济建设的发展总体规划，城市的建设与改造，工矿、企业的建设，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等都需要测绘工作。在国防建设中，测绘技术不但对国防工程建设、作战战役部署和现代化诸兵种协同作战起着重要的保证作用，而且对现代化的武器装备，如远程导弹、空间武器、人造卫星和航天器的发射也起着重要作用。测绘技术对于空间技术、地壳变形、地震预报、地球动力学等方面的科学研究也是不可缺少的工具。

土木工程测量学属于工程测量学范畴，广泛用于建筑、管线、环境、道路、桥梁、水电等工程的勘测、设计、施工和管理各阶段。其主要任务是：

(1) 研究测绘地形图的理论和方法 地形图是工程建设勘察、规划、设计的依据。在工程勘察阶段，土木工程测量研究确定地球表面局部区域建筑物、构筑物、天然地物和地貌、地面高低起伏形态的空间三维坐标的原理和方法；研究局部区域地图投影理论，以及将测量资料按比例绘制成地形图或制作成电子地形图的原理和方法。在工程竣工阶段，土木工程测量的任务是测绘竣工图。

(2) 研究在地形图上进行规划、设计的基本原理和方法 在工程规划设计阶段，利用地形图的成图方法和原理，如图幅大小、坐标轴系、各类图示符号的性质等，在图上进行点、线、面的量测，并把量测到的数据转换为现场地面相应的测量数据，并且研究在地形图上进行土地平整，土方计算，道路、管线选线，房屋设计和区域规划的基本原理和方法。

(3) 研究建（构）筑物施工测设、建筑质量检验的技术和方法 施工测设是工程施工的依据。测设又称放样。在工程施工阶段，土木工程测量的任务是将规划设计在图纸上的建筑物、构筑物的平面位置和高程，通过测量定位、放线、安装和检查，准确地标定和放样在地面上，为施工提供正确位置。研究施工过程及大型金属结构物安装中的监测技术，以保证施工质量和安全。

(4) 对大型建（构）筑物的安全性进行位移和变形监测 在大型建（构）筑物施工过程中和竣工后，为确保工程建设和使用的安全，应对建（构）筑物进行位移、变形监测。

总之，测量工作贯穿于工程建设的整个过程。从事土木工程的技术人员必须掌握工程测量的基本知识和技能。土木工程测量是工程建设技术人员必修的一门技术基础课。学习本课



程之后,要求掌握地形测量学和工程测量学的基本知识、基础理论;能熟练使用水准仪、经纬仪等测量仪器和工具;了解大比例尺地形图的测绘方法;培养正确应用地形图及有关测量资料的能力和进行一般工程施工测设的能力,能灵活使用所学的测量知识为专业工作服务。

## 1.2 确定地面点位的方法

测量工作中确定地面点的空间位置,通常是先选定基准面(球面或平面),然后将地面点投影到基准面上,在基准面上再建立坐标系,通过对地面点在基准面上的投影位置及地面点到基准面的铅垂距离的测量,得到地面点的坐标和高程。

### 1.2.1 测量的基准面

测量的工作对象主要是地球的自然表面,选定的基准面和建立的坐标系直接与地球的形状、大小有关。地球自然表面是很不规则的曲面,有高山、丘陵、平原、盆地和海洋、江河、湖泊等,一般可将地球看作是平均半径为6371km的球体。地球自然表面的海洋面积约占71%,陆地只占29%。因此,地球总的形状可视为由海水面包围着的球体。

人们设想将静止的海水面向整个陆地延伸而形成的一个封闭曲面称为水准面。地球表面任一质点都同时受到两个作用力:地球自转产生的惯性离心力和整个地球质量产生的引力,其合力称为重力。重力的作用线就是铅垂线。水准面是一个重力等位面,水准面上的各点处处与铅垂线垂直。与水准面相切的平面称为水平面。水准面有无限多个,其中与静止的平均海水面重合的重力等位面称为大地水准面。它所包围的地球形体称为大地体。平均海水面可通过在某处海洋面设立验潮站,观测一定时期内的海水面高低数值,并取平均值确定。大地水准面和铅垂线是测量外业工作所依据的基准面和基准线。

大地体非常接近一个两极扁平、赤道隆起的椭球。由于地球内部质量分布不均匀引起铅垂线方向变化,使大地水准面成为一个复杂而又不易用数学式表达的曲面,如图1-1a所示。为了便于正确地计算测量成果,准确地表示地面点的位置,测量上选用一个大小和形状接近大地体的旋转椭球体作为地球的参考形状和大小,如图1-1b所示。这个旋转椭球体称为参考椭球体,它是一个规则的曲面体。可以用数学公式表示为

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \quad (1-1)$$

式中, $a$ 、 $b$ 为参考椭球体几何参数, $a$ 为长半径, $b$ 为短半径。

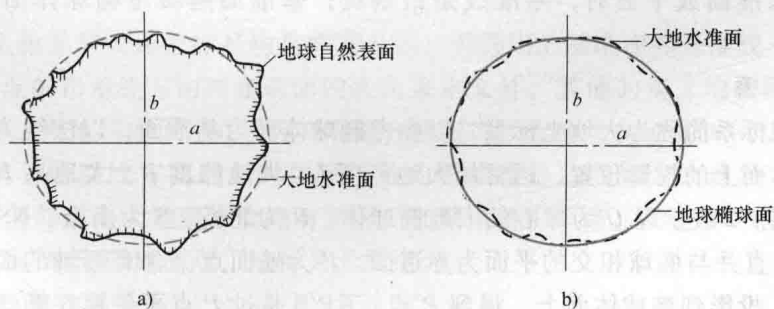


图1-1 大地水准面与地球旋转椭球体面示意图

参考椭球体扁率  $\alpha$  应满足下式

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

几个世纪以来,许多学者分别测算出参考椭球体的参数值,表 1-1 为有代表性的测算成果。

表 1-1 地球椭球体几何参数

椭球名称	年代	长半轴 $a/m$	扁率 $\alpha$	备注
德兰布尔	1800	6375653	1 : 334.0	法国
白塞尔	1841	6377397.155	1 : 299.1528128	德国
克拉克	1880	6378249	1 : 293.459	英国
海福特	1909	6378388	1 : 297.0	美国
克拉索夫斯基	1940	6378245	1 : 298.3	苏联
1975 大地测量参考系统	1975	6378140	1 : 298.257	IUGG 第 16 届大会推荐值
1980 大地测量参考系统	1979	6378137	1 : 298.257	IUGG 第 17 届大会推荐值
WGS—84	1984	6378137	1 : 298.257223563	美国国防部制图局(DMA)

我国采用的参考椭球体几何参数有:

1) 1954 年北京坐标系,采用克拉索夫斯基参考椭球体参数。

2) 1980 年国家大地坐标系,采用国际大地测量协会与地球物理联合会(简称 IUGG)在 1975 年推荐的 IUGG—75 地球椭球(见表 1-1)。

由于地球椭球的扁率很小,因此当测区范围不大时,如果测量精度要求不高,可以近似地把地球当作圆球体,其半径采用地球半径平均值 6371km。

### 1.2.2 测量坐标系

地面点的空间位置都对应一定的坐标系统。根据不同用途,在测量上常用的坐标系有空间直角坐标系、大地坐标系、天文地理坐标系、高斯投影平面直角坐标系、平面独立直角坐标系等。地面点位通常用三个量确定。在空间直角坐标系中用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示。在大地坐标系和高斯投影平面直角坐标系中,前两个量为坐标,它表示地面点沿着基准线投影到基准面上后在对应坐标系统中的位置;第三个量是高程,表示地面点沿着基准线到基准面的距离。基准面是大地水准面或平面时,基准线是铅垂线;基准面是参考椭球体面时,基准线是法线。

#### 1. 大地坐标系

大地地理坐标系简称为大地坐标系,以参考椭球体面为基准面,以法线为基准线。地面点在参考椭球体面上的投影位置,通常用大地经度  $L$ 、大地纬度  $B$ 、大地高  $H^*$  表示地面点的空间位置。图 1-2 表示以  $O$  为球心的大地椭球体,  $N$  为北极,  $S$  为南极,  $NS$  为短轴。过中心  $O$ 、与短轴垂直并与椭球相交的平面为赤道面。  $P$  为地面点。含有短轴的面为子午面。过  $P$  点沿法线  $PK_p$  投影到椭球体面上,得到  $P'$  点。  $NP'S$  是过  $P$  点子午面在椭球体面上投影的子午线。过格林尼治天文台子午线的为本初子午线。  $NP'S$  子午面与本初子午面所夹的两面

角  $L_P$  称为  $P$  点的大地经度。 $PK_P$  线与赤道面的交角  $B_P$  称为  $P$  点的大地纬度。 $P$  点沿法线到椭球体面的距离  $PP'$  称为  $P$  点的大地高  $H_P^*$ 。

国际规定, 过格林尼治天文台的子午面为零子午面, 向东经度为正, 向西为负, 其值为  $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 。纬度以赤道面为基准面, 向北称为北纬, 向南称为南纬, 其值为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。椭球体面上的大地高为零, 沿法线在椭球体面外为正, 在椭球体面内为负。我国版图处于东经  $74^\circ \sim 135^\circ$ , 北纬  $3^\circ \sim 54^\circ$ , 如北京位于北纬  $39^\circ 54'$ , 东经  $116^\circ 28'$ , 用  $B = 39^\circ 54' N$ ,  $L = 116^\circ 28' E$  表示。

地面点位也可以用空间直角坐标系  $(X, Y, Z)$  表示, 如图 1-3 所示。以球心  $O$  为坐标原点,  $ON$  为  $Z$  轴方向, 格林尼治子午线与赤道面交点与  $O$  的连线为  $X$  轴方向, 过  $O$  点与  $XOZ$  面垂直, 并与  $X, Z$  构成右手坐标系为  $Y$  轴方向, 点  $P$  空间直角坐标为  $(X_P, Y_P, Z_P)$ , 它与大地坐标  $L, B, H^*$  之间可用公式转换, 具体内容参考大地测量学的相关内容。

WGS—84 坐标系是全球定位系统 (GPS) 采用的坐标系, 属地心空间直角坐标系。WGS—84 坐标系采用 1979 年国际大地测量与地球物理联合会第 17 届大会推荐的椭球参数, 见表 1-1。WGS—84 坐标系的原点位于地球质心;  $Z$  轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极 (CTP) 方向;  $X$  轴指向 BIH1984.0 的零子午圈和 CTP 赤道的交点;  $Y$  轴垂直于  $X, Z$  轴。 $X, Y, Z$  轴构成右手直角坐标系。

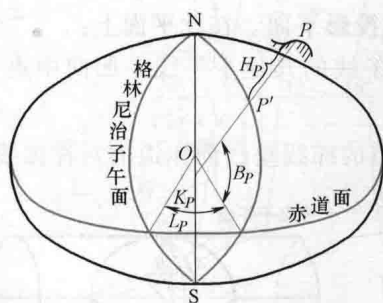


图 1-2 大地坐标系

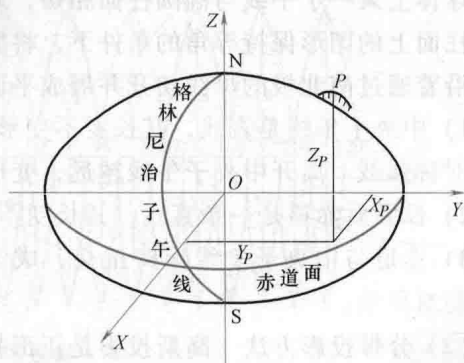


图 1-3 空间直角坐标系

## 2. 天文地理坐标系

用天文经度  $\lambda$  和天文纬度  $\Phi$  确定地面投影点在大地水准面上位置的坐标, 称为天文地理坐标。该坐标是以大地水准面和铅垂线为基准面和基准线, 用天文测量的方法测定的球面坐标系。

天文地理坐标系与大地坐标系均是球面坐标, 但选用的基准面和基准线不同, 除天文纬度  $\Phi$  是以过  $P$  点的铅垂线方向与赤道面的夹角来定义外, 其他的定义均相同。地表面上某点的大地经度  $L$ 、大地纬度  $B$ , 可用天文观测方法测得该点的天文经度  $\lambda$  和天文纬度  $\Phi$ , 再利用该点的法线与铅垂线方向的相对关系 (称为垂线偏差) 改算为大地经度  $L$ 、大地纬度  $B$ 。各地的天文经纬度与大地经纬度略有差异, 如精度要求不高, 其差异可忽略不计。

测定了天文经纬度的地面点, 统称为天文点。

## 3. 高斯平面直角坐标系

大地坐标系常用于大地问题的解算, 如研究地球的形状和大小, 编制地图, 火箭和卫星

发射及军事方面的定位及运算。若将其直接用于工程建设规划、设计、施工等很不方便。因为赤道上1"的经度差对应的地面距离约为30m。测量计算最好在平面上进行，所以要将椭球面上的点、线及其方位按地图投影的方法归算到平面上，即采用地图投影理论绘制地形图，才能用于规划建设。

椭球体面是一个不可直接展开的曲面，故将椭球体面上的元素按一定条件投影到平面上，必然产生变形。测量上常以投影变形不影响工程要求为条件选择投影方法。地图投影的方法有等角投影、等面积投影和任意投影三种。

等角投影又称正形投影（或相似投影），它保证在椭球体面上的微分图形投影到平面后将保持相似，这是地形图的基本要求。正形投影有两个基本条件：①保角条件，即投影后角度大小不变；②长度变形固定，即长度投影后会变形，但是在一点上各个方向的微分线段变形比  $m$  是个常数  $k$ ，即

$$m = \frac{ds}{dS} = k$$

式中， $ds$  为投影后的长度； $dS$  为球面上的长度。

(1) 高斯投影的概念 如图1-4所示，高斯投影是设想将一个横椭圆柱套在地球椭球体上，使圆柱的中心轴线位于赤道面内并且通过球心，椭球体南北极与圆柱面相切，并使地球椭球体上某一子午线与圆柱面相切，此子午线称为中央子午线。在椭球体面上的图形与圆柱面上的图形保持等角的条件下，将椭球体面上的点、线投影到圆柱面上，然后将圆柱沿着通过南北极的母线切开并展成平面，即得到高斯投影平面。在此平面上：

- 1) 中央子午线是直线，其长度不变形，离开中央子午线的其他子午线是凹向中央子午线的对称弧线。离开中央子午线越远，变形越大。
- 2) 投影后赤道是一条直线，其长度不变形，离开赤道的纬线是凸向赤道的对称弧线。
- 3) 赤道与中央子午线保持正交，成为其他经纬线投影后的对称轴。

(2) 分带投影方法 高斯投影是正形投影，其方法可以将椭球面变成平面，但是离开中央子午线越远变形越大，这种变形将会影响测图和施工精度。为了对长度变形加以控制，测量中采用限制投影带宽度的方法，即将投影区域限制在靠近中央子午线的两侧狭长地带，这种方法称为分带投影。投影带宽度是以相邻两个子午线的经差来划分，有6°带、3°带等不同投影方法。

6°带投影是从0°子午线开始，自西向东，每隔经差6°投影一次。这样将椭球分成60个带，带号  $N$  依次编为1~60，如图1-5、图1-6和图1-7所示。各带中央子午线经度可用下式计算

$$L_0^6 = 6N - 3 \quad (1-3)$$

已知某点大地经度  $L$ ，可按下式计算该点所属的带号

$$N = \frac{L}{6} \text{ (的整数商)} + 1 \text{ (有余数时)} \quad (1-4)$$

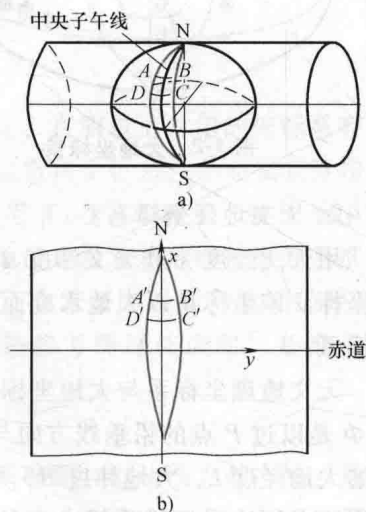


图 1-4 高斯投影方法

3°带是从东经 1°30'起，每隔经差 3°划分一带，共分为 120 带（见图 1-8），各带中央子午线经度为

$$L_0^3 = 3n \quad (1-5)$$

已知某点大地经度  $L$ ，可按下式计算该点所属 3°带的带号

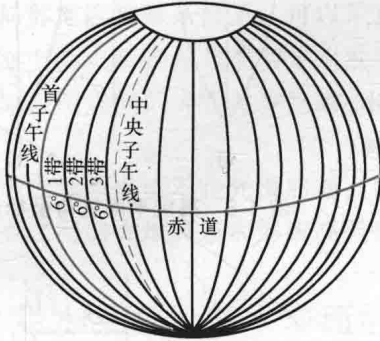


图 1-5 分带投影方法

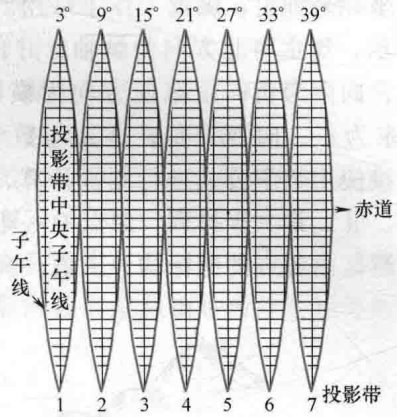


图 1-6 6°带投影

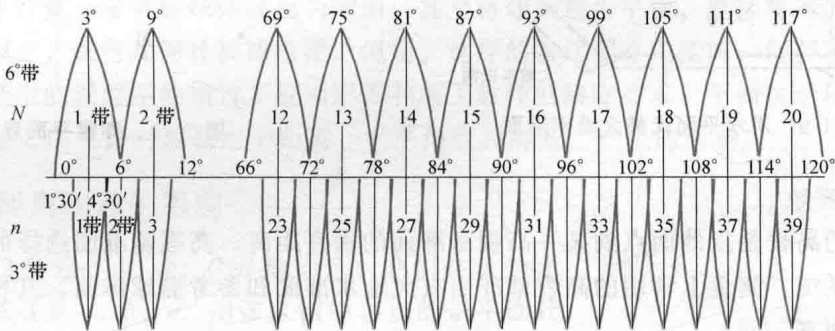


图 1-7 3°和 6°带投影

$$n = \frac{L-1.5}{3} \text{ (的整数商)} + 1 \text{ (有余数时)} \quad (1-6)$$

我国幅员辽阔，含有 11 个 6°带，即 13~23 带（中央子午线经度 75°~135°）；21 个 3°带，即 25~45 带，6°带和 3°带的带号没有重叠。北京位于 6°带的第 20 带，中央子午线经度为 117°。

(3) 高斯平面直角坐标系的建立 根据高斯投影的特点，建立高斯平面直角坐标系：以赤道和中央子午线的交点为坐标原点，中央子午线方向为纵轴  $x$  轴，北方向为正；赤道投影线为横轴  $y$  轴，东方向为正。象限按顺时针方向 I、II、III、IV 排列。我国位于北半球， $x$  坐标均为正值，而  $y$  坐标值有正有负。如图 1-8a 中， $y_A = +137680\text{m}$ ， $y_B = -274240\text{m}$ 。为避免横坐标出现负值，故规定把坐标纵轴向西平移 500km。

坐标纵轴西移后， $y_A = (500000 + 137680) \text{ m} = 637680\text{m}$ ； $y_B = (500000 - 274240) \text{ m} = 225760\text{m}$ 。为了区分某点位于哪一带中，在横坐标值前冠以带号。例如，A 点位于第 20 带内，则其横坐标  $y_A$  为 20637680m，其中 20 为 6°带的带号。

#### 4. 独立平面直角坐标系

当测量区域（半径不大于 10km 的范围）较小时，大地水准面可看作平面，用测区中心点的切平面来代替曲面（见图 1-9），地面点在投影面上的位置就可以用平面直角坐标来确定。测量工作中采用的直角坐标系如图 1-10 所示，规定南北方向为纵轴，并记为  $x$  轴， $x$  轴向北为正，向南为负；以东西方向为横轴，并记为  $y$  轴， $y$  轴向东为正，向西为负，这是与数学坐标系不同的。为了直接使用数学公式进行测量计算，其象限按顺时针方向 I、II、III、IV 排列。原点  $O$  一般选在测区的西南角，使测区内各点的坐标均为正值。

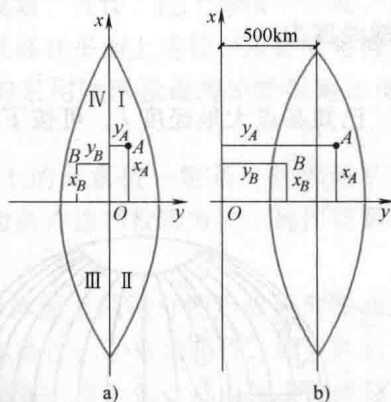


图 1-8 高斯平面直角坐标系

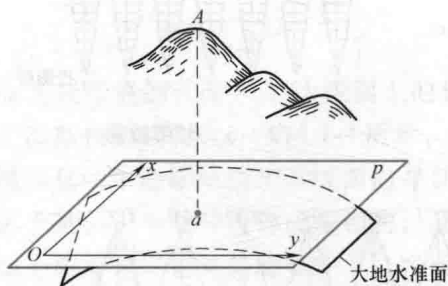


图 1-9 用水平面代替大地水准面

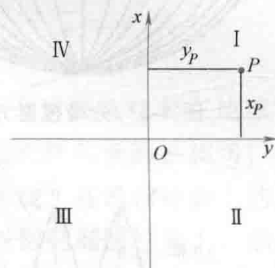


图 1-10 测量平面直角坐标系

#### 5. 高程系统

地面点的高程是指地面点到某一高程基准面的垂直距离。高程基准面选择的不同，就有不同的高程系统。测量上常用的高程基准面有大地水准面和参考椭球体面。其相应的高程为海拔高和大地高。

**海拔高：**是以大地水准面为高程基准面，即地面上某点沿重力铅垂线方向到大地水准面的垂直距离，用  $H$  表示，如图 1-11 所示。

**大地高：**是以参考椭球体面为高程基准面，即地面上某点沿法线方向到椭球体面的垂直距离，用  $H^{\text{大}}$  表示，如图 1-11 所示。

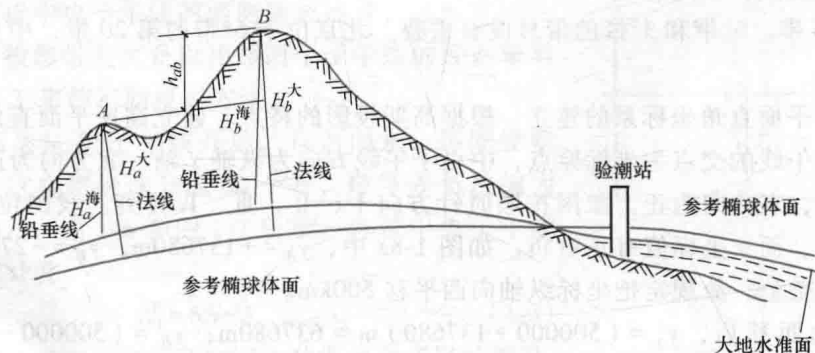


图 1-11 海拔高和大地高

海水面由于受潮汐、风浪的影响,是个动态曲面。所谓静止海水面是不存在的,常用平均海水面来代替,即在海边设立验潮站,进行长期潮汐观测,取海水面平均高度作为高程零点。新中国成立后,我国采用青岛验潮站 1949—1956 年观测资料求得的黄海平均海水面作为我国高程基准面,称为“1956 黄海高程系”。在青岛市观象山上建立水准原点,其高程为 72.289m。后又将 1952—1979 年的验潮资料进行归算,推算青岛国家水准原点高程为 72.260m,称为“1985 国家高程基准”。1988 年开始启用这个基准。

在局部地区特殊条件下,可以采用假定高程系统,即采用任意假定的水准面为高程起算面。地面上某点沿铅垂线到假定水准面的距离,称为相对高程,用  $H'$  表示。

地面上两点间的高程差称为高差,用  $h$  表示,如图 1-11 所示,  $A$ 、 $B$  两点高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-7)$$

由于大地水准面不是光滑曲面,所以一点的大地高和海拔高是不同的。这个差值不是常数。两点之间的大地高差和海拔高差也是不相同的,但海拔高差和相对高差是相等的。

### 1.3 用水平面代替水准面的限度

在地球表面上进行土木工程测量时,在测区范围小,或者工程对测量精度要求较低时,为了简化投影计算,常将椭球体面视为球面,甚至将球面视为平面,直接将地面点沿铅垂线投影到水平面上,进行几何计算或绘图。但是,这样的替代是有限度的,即要求将椭球体面作为平面所产生的误差不能超过工程地形图和施工放样的精度要求。下面讨论用水平面代替水准面对测量工作(即对测量水平距离、水平角度和高差)产生的影响。

#### 1.3.1 对距离测量的影响

如图 1-12 所示,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  是地面点,它们在大地上水准面上的投影点是  $a$ 、 $b$ 、 $c$ ,用该区域中心点的切平面代替大地水准面后,地面点在水平面上的投影点是  $a'$  ( $a$ )、 $b'$ 、 $c'$ ,现分析由此产生的影响。设  $A$ 、 $B$  两点在大地上水准面上的距离为  $D$ ,在水平面上的距离为  $D'$ ,两者之差  $\Delta D$ ,即用水平面代替水准面产生的距离差异。在推导公式时,近似地将大地水准面视为半径为  $R$  的球面,故

$$\Delta D = D' - D = R(\tan\theta - \theta) \quad (1-8)$$

在小范围测区  $\theta$  角很小,  $\tan\theta$  可用级数展开,略去五次方项,则

$$\Delta D = R \left[ \left( \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \dots \right) - \theta \right] = R \frac{\theta^3}{3} \quad (1-9)$$

用  $\theta = D/R$  代入上式,则

$$\Delta D = \frac{1}{3} \frac{D^3}{R^2}, \quad \frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{3} \frac{D^2}{R^2} \quad (1-10)$$

取地球平均半径  $R = 6371\text{km}$ ,  $D$  用不同距离代入,计算结果见表 1-2。

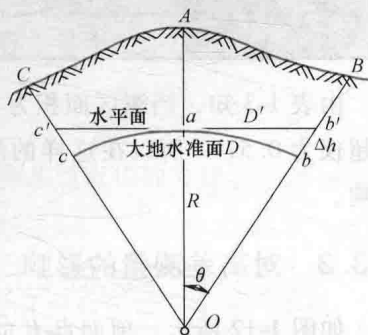


图 1-12 水平面代替水准面

表 1-2 不同  $D$  值对应的  $\Delta D$  及  $\Delta D/D$

$D/\text{km}$	1	10	15	20	25	50	100
$\Delta D/\text{cm}$	0.00	0.82	2.77	6.57	12.83	102.6	821.2
$\Delta D/D$	—	1/120 万	1/54 万	1/30 万	1/19 万	1/4.9 万	1/1.2 万

由表 1-2 知, 当两点相距 10km 时, 用水平面代替水准面所产生的距离误差为 0.82cm, 相对误差为 1/120 万, 相当于精密测距的精度 (1/100 万)。所以在 10km 为半径的测区内进行距离测量时, 可以用水平面代替大地水准面, 而不考虑地球曲率对距离的影响。

### 1.3.2 对水平角测量的影响

从球面三角测量中可知, 球面上多边形内角之和比平面上多边形内角之和多一个球面角超  $\varepsilon$ , 如图 1-13 所示, 其值可用多边形面积求得

$$\varepsilon = \rho \frac{P}{R^2} \quad (1-11)$$

式中,  $P$  为球面多边形面积;  $R$  为地球半径;  $\rho$  为一弧度相应的秒值,  $\rho = 206265''$ 。

以不同的球面多边形面积代入式 (1-11), 可求出球面角超, 见表 1-3。

表 1-3 不同球面多边形面积对应的角超

$P/\text{km}^2$	10	50	100	300
$\varepsilon/''$	0.05	0.25	0.51	1.52

由表 1-3 知, 当测区面积为  $100\text{km}^2$  时, 用水平面代替大地水准面, 对角度的最大影响角超仅为  $0.51''$ , 所以在这样的测区进行工程测量时可以不考虑地球曲率对水平角测量的影响。

### 1.3.3 对高差测量的影响

如图 1-12 所示, 地面点  $B$  的高程应是铅垂距离  $bB$ , 用水平面代替水准面后,  $B$  点的高程为  $b'B$ , 两者之差为  $\Delta h$ , 即为对高程的影响。由图得

$$\Delta h = bB - b'B = Ob' - Ob = R \sec \theta - R = R(\sec \theta - 1) \quad (1-12)$$

用级数展开, 则  $\sec \theta = 1 + \frac{\theta^2}{2} + \frac{5}{24}\theta^4 + \dots$ , 因  $\theta$  值很小, 仅取前两项代入式 (1-12), 且  $\theta = D/R$ , 故得

$$\Delta h = R \left( 1 + \frac{\theta^2}{2} - 1 \right) = \frac{D^2}{2R} \quad (1-13)$$

对于不同的距离, 产生的高程误差见表 1-4。计算表明, 地球曲率对高差影响较大, 即使在不长的距离如 150m, 也会产生 1.77mm 的高程误差。因此, 就高程测量而言, 即使距离很短, 也应顾及地球曲率对高程的影响。

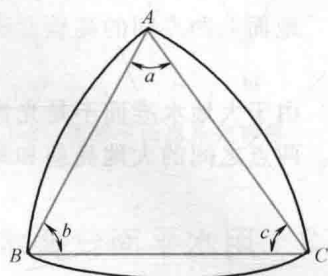


图 1-13 球面三角形和平面三角形角度差



表 1-4 不同的距离产生的高程误差

D/m	10	50	100	150	200	500	1000	2000	5000
$\Delta h/\text{mm}$	0.0	0.2	0.8	1.77	3.14	19.6	78.5	314	1962

## 1.4 测量工作的基本内容及原则

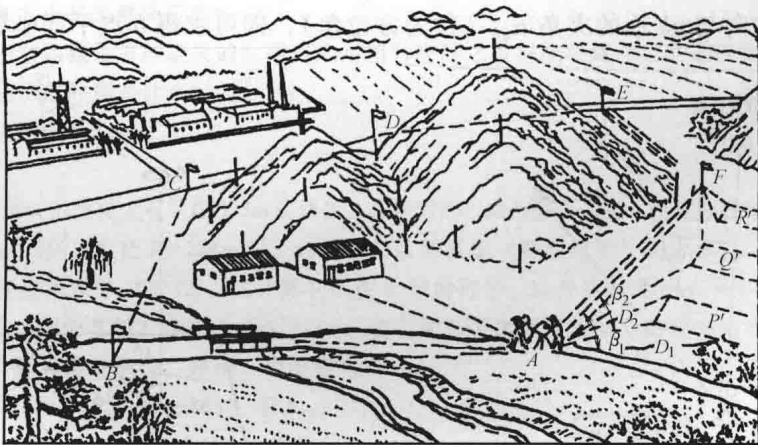
### 1.4.1 测量工作的基本内容

测量工作的基本内容，概括而言包括两方面，即测定和测设。地球表面复杂多样的形态可分为地物和地貌两类。地面上人工或天然形成的固定物体称为地物，如房屋、道路、河流、湖泊等。地球表面上高低起伏的形态称为地貌，如山峰、河谷、台地、悬崖等。地物和地貌统称为地形。测定地物和地貌特征点的三维坐标，并用平面图形表示，称为地形图。测绘地形图的过程实际是在地物和地貌上选择一些有代表性的点进行测量，将测量点投影到平面上，然后用点、折线、曲线连接起来表示地物和地貌，如房屋是用房屋地面轮廓折线围成的图形表示。地貌形态虽然复杂，但仍可以将其看成是有许多不同坡度、不同方向的面组成。只要选择能表现地貌特征的点如坡度变化点、山顶、鞍部、坡脚等，测定其三维坐标，然后投影到平面上，再将同等高度的点用曲线连接起来，就可将地貌的形态表示出来，如图 1-14a、b 所示。这些能表现地物和地貌特征的点称为地形特征点。所以测量工作实际是测定这些特征点的三维坐标。

施工测量的实质是测设点位。通过测量，将在图纸上设计好的建（构）筑物的特征点的平面位置和高程标定在实地上，以指导施工。施工测量贯穿于整个施工过程中。

### 1.4.2 测量工作的主要技术方法

测量特征点的方法有多种，在工程测量中常用卫星定位和几何定位的方法。



a)

图 1-14 地形图测绘方法