



普通高等教育“十二五”规划教材

工程测量

主 编 卢修元

副主编 倪福全 吴敬花 杨 敏



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

工 程 测 量

主 编 卢修元

副主编 倪福全 吴敬花 杨 敏



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书为非测绘专业基础课教材,共分10章。第1章绪论,介绍有关测量的基础理论知识;第2~4章分别介绍水准测量、角度测量和距离测量;第5章介绍测量误差的基本知识;第6章介绍控制测量,主要讲述导线及平差易软件;第7章介绍大比例尺地形图测绘,主要讲述碎部测量及CASS成图软件;第8章介绍地形图的阅读与应用;第9章介绍施工测量,介绍测量知识在各类工程建设中的应用;第10章介绍变形监测。

本书适合作为土木工程、农业水利工程、水利水电工程、建筑工程、交通工程等非测绘专业本科教材,也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测量 / 卢修元主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2014. 6
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-2157-5

I. ①工… II. ①卢… III. ①工程测量—高等学校—教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第131265号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 工程测量
作 者	主编 卢修元 副主编 倪福全 吴敬花 杨敏
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 12.25印张 290千字
版 次	2014年6月第1版 2014年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书为普通高等院校土木、水利、农业工程、建筑等非测绘类学科“工程测量”课程教材。本教材内容充实、图文并茂，充分反映了当前常用的测绘仪器和测量方法；对不再常用的钢尺量距、光学经纬仪不作详细介绍，而结合当前测绘工作使用的主流仪器、软件及测量方法，侧重介绍了全站仪测角、测距、放样等常用功能、平差易以及 CASS 地形图成图软件在控制网平差、地形图成图过程中的操作程序，满足数字化测图、成图的全过程要求，保证了本书介绍的内容能学以致用。

全书共分 10 章，第 1~5 章主要介绍有关测量的基础知识及基本工作，包括绪论、水准测量、角度测量、距离测量、误差的基本知识；第 6~7 章主要介绍地形图测量的过程，包括控制测量、大比例尺地形图测绘；第 8~10 章介绍测量知识和地形图在建筑物设计、施工、投产运行阶段的应用，包括地形图的阅读与应用、施工测量、变形监测。

本书由四川农业大学卢修元担任主编，四川农业大学倪福全、吴敬花、杨敏担任副主编。各章分工如下：四川大学魏新平编写第 1 章；四川农业大学吴敬花编写第 2~3 章；沈阳农业大学高振东编写第 4 章；贵州大学史文兵编写第 5 章；四川农业大学卢修元编写第 6~7 章；四川农业大学田奥编写第 8 章；四川农业大学杨敏编写第 9 章；四川农业大学倪福全编写第 10 章。全书由卢修元统稿。

编者参阅并引用了大量的教材、论文，在此对这些文献的作者们表示诚挚的感谢。

由于编写水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不妥甚至错误之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2014 年 3 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 测量学的任务及在工程建设中的作用	1
1.2 地面点位的确定	3
1.3 测量工作概述	11
1.4 测量常用的计量单位及数字处理原则	13
习题	14
第 2 章 水准测量	15
2.1 水准测量原理	15
2.2 水准测量的仪器及工具	16
2.3 水准测量的一般方法和要求	21
2.4 三、四等水准测量	25
2.5 水准测量的内业计算	28
2.6 水准仪的检验与校正	29
2.7 水准测量误差来源及消减方法	33
2.8 电子水准仪简介	34
习题	35
第 3 章 角度测量	37
3.1 水平角测量原理	37
3.2 角度测量仪器	37
3.3 角度测量仪器的基本操作	43
3.4 水平角测量方法	45
3.5 竖直角测量方法	49
3.6 测角仪器的检校	52
3.7 角度测量中产生误差的原因及其消减方法	55
习题	57
第 4 章 距离测量	58
4.1 视距测量	58
4.2 测距仪	60

4.3 直线定向	62
4.4 坐标正反算	63
习题	64
第5章 测量误差的基本知识	65
5.1 测量误差的来源及其分类	65
5.2 评定精度的指标	67
5.3 误差传播定律	68
5.4 同精度观测	73
5.5 不同精度观测	75
习题	76
第6章 控制测量	78
6.1 概述	78
6.2 导线测量	80
6.3 控制网加密	89
6.4 三角高程测量	92
6.5 平差易软件	95
6.6 全球定位系统 (GPS) 简介	100
习题	105
第7章 大比例尺地形图测绘	107
7.1 地形图的成图原理	107
7.2 地形图的基本知识	108
7.3 碎部测量	115
7.4 地形图的绘制	120
7.5 数字化测图	122
习题	131
第8章 地形图的阅读与应用	132
8.1 概述	132
8.2 地形图的分幅与编号	132
8.3 地形图阅读	135
8.4 地形图的应用	136
习题	143
第9章 施工测量	145
9.1 施工控制测量	145
9.2 施工测量的基本工作	148
9.3 放样点位的基本方法	156
9.4 工业与民用建筑施工中的测量工作	160

9.5 隧洞测量	164
9.6 道路工程测量	166
9.7 水利工程施工测量	169
习题	173
第 10 章 变形监测	175
10.1 概述	175
10.2 变形监测方案设计	176
10.3 变形监测方法	179
10.4 沉陷监测	180
10.5 倾斜监测	181
10.6 挠度监测	183
10.7 裂缝监测	184
10.8 变形监测分析	185
习题	186
参考文献	187

第 1 章 绪 论

1.1 测量学的任务及在工程建设中的作用

1.1.1 现代测绘科学技术发展概况

古埃及尼罗河每年洪水泛滥,淹没了土地界限,洪水退后又重新对土地进行划界,这开始了人类最先的测量工作。从我国出土的相关文物可看出,早在两三千年前的商周时代,甲骨文中已有与测绘有关的“弓、规、距”的记载,青铜器上铭文也记述了军事地图和封疆测绘工作。公元 724 年,中国张遂(一行)、南宫说等主持进行了天文测量,在今河南省滑县、开封、扶沟、上蔡测量了同一时刻的日影长度,推算出了纬度 1° 的子午线长,这是人类历史上第一次用弧度测量的方法测定了地球的形状及大小。

随着社会的进步、科学技术的发展,测绘科学也得到迅速的发展。从测量的仪器设备、测量方法,到记录、计算及成图方法、测量工作的效率、测绘成果的载体等方面均发生了根本性的变化。

20 世纪 60 年代电磁波测距技术的兴起,根本性地提升了测量效率。在工程中使用的中短程测距仪已达到很高的精度,精密导线测量技术日趋成熟,使得测量工作更加简便和精确。综合电子经纬仪、测距仪及相应计算功能模块于一体的全站仪的出现及日渐完善使得测量方法及手段发生了根本的变化。采用全站仪野外采集数据,内业利用计算机基于成图软件对采集的数据进行分析、处理、自动成图,利用绘图仪出图,减少了制板、印刷等复杂的程序,提高了成图的速度和质量。

20 世纪 80 年代全球定位系统(简称 GPS)的出现,不仅使导航技术得到根本性的发展,而且对于大地测量工作也产生了深远的影响。利用 GPS 不仅可以在短时间内以较高的精度进行精密的大地定位测量,而且打破了传统大地测量测站间相互通视的要求。因此使得大地测量的作业范围、布网方案、作业手段和操作系统发生了根本性的改变。

随着电子计算机科学和信息科学的迅速发展,使得数据采集、数据分析的方法和手段产生了革命性的变化。全球定位系统、地理信息系统、遥感(GPS、GIS、RS,简称“3S”)的发展,使得传统的测绘科学产生了质的飞跃。目前,测量学、制图学、遥感、地图学、摄影测量学和地理信息系统已融合成为一门新的学科,即“地球空间信息学”(Geomatics),采取星载、机载、舰载和地面等方法,对空间数据和空间信息进行采集、量测、分析、存储、管理、显示和应用,是对地球空间信息的多学科、多方法的技术使用集成。

美国前副总统戈尔于 1998 年 1 月在加利福尼亚科学中心开幕典礼上发表的题为《数字地球:认识 21 世纪我们所居住的星球》演说时提出“数字地球”(Digital Earth)的概

念,现已被越来越多的科学家、政府官员所接受,逐渐成为人们认识地球的新方式。数字地球就是把地球上任一点的所有信息组织起来,其中不仅包括自然方面,如地质、地貌、山川、河流、气候、动物、植物的分布,而且还包括人文方面,如风土人情、历史沿革、交通、文教、人口等方面的信息。将这些信息,按照地球上的地理坐标建立完整的信息模型,对整个地球进行数字化描述,以便人们迅速、准确地了解全球各地的各种宏观和微观情况。数字地球的实现不是一件简单的事,它需要诸多学科,特别是信息科学技术的支撑。这其中主要包括:信息高速公路和计算机宽带高速网络技术、高分辨率卫星影像、空间信息技术、大容量数据处理与存储技术、科学计算以及可视化和虚拟现实技术。

数字地球可用于人类应对自然灾害、国家基础设施建设规划、精细农业、智能交通等方面;值得注意的是“数字地球”概念的提出也是后冷战时期“星球大战”计划的继续和发展。在现代化战争和国防建设中,数字地球具有十分重大意义。建立服务于战略、战术和战役的各种军事地理信息系统,并运用虚拟现实技术建立数字化战场,这是数字地球在国防建设中的应用。美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)、苏联的GLONASS卫星导航系统(Global Navigation Satellite System)、欧盟的“伽利略”系统都是为未来战争抢占战略先机的系统工程。为了保障我国的国防安全、维护地区和平、满足海洋渔业导航的需要等,我国开发建设了“北斗导航”系统。

1.1.2 测量学的任务及学科分类

测绘学是研究地理信息的获取、处理、描述和应用的一门科学。其内容包括:研究测定、描述地球的形状、大小、重力场、地表形态以及它们的各种变化,确定自然和人工物体、人工设施的空间位置及属性,制成各种地图(含地形图)和建立有关信息系统。根据研究的对象、内容、区域大小和使用的仪器设备、测量方法的不同形成如下一些分支:

(1) 大地测量学。研究和测定地球的形状、大小及其重力场的理论和测量方法,并在此基础上建立一个统一的坐标系,用以表示地表任一点在地球上的准确几何位置。地球的外形非常近似于椭球,在测绘学中即用一个同地球外形极为接近的旋转椭球来代表地球,称为地球椭球。地面上任一点的几何位置即用这点在地球椭球面上的经纬度和点的高程表示。大地测量学是以地球表面大区域或整个地球为研究对象,考虑到地球曲率,在全国范围内布设大地控制网和重力网,精密测定控制点的三维坐标和重力值,为各行业提供控制依据。

(2) 摄影测量学。研究采用摄影方法或电磁波成像的方法,获取研究对象的各种图像,根据摄影测量的理论和方法,对图像进行处理、量测、判释和调绘,解决地形图测绘和了解自然、地理环境信息的理论和技术。根据获取相片的方法不同,又可划分为地面摄影测量学和航空摄影测量学。其研究区域较大,研究对象不局限于地表静态的对象,还可以对大气、降水等液态、气态进行动态监测。目前已被广泛应用于矿产资源勘察、环境污染监测、农业估产、灾害预报、降雨、洪水预报等各个领域。

(3) 普通测量学。研究在面积不大的测区内,不考虑地球曲率,也不顾及地球重力场的微小变化,对地表形态、人类社会活动所产生的各种地物进行测绘的理论和技術。

(4) 工程测量学。研究在经济建设和国防工程建设的规划设计、施工和部分建筑物建成后的运营管理工作中,所需要的测绘资料或利用测绘手段来指导工程的施工,监测建筑

物的变形等工作的理论和技术。

(5) 地图制图学。研究利用测量资料,如何投影编汇成地图,以及地图制作的理论、工艺技术和应用等方面的测绘科学的学科。地图制图学为国民经济各部门提供各种比例尺的普通地图、专用地图、三维地图模型等。

(6) 海洋测绘。海洋测绘是研究测绘海岸、水面及海底自然与人工形态及其变化状况,制作各类海图和编制航行资料的理论、方法和技术。海洋测绘综合性很强,广泛涉及现代测绘技术、空间定位技术、海底探测、水下定位与测距等技术。

(7) 测绘仪器学。测绘仪器学是以光学、精密机械、电子和计算机等技术和工具为手段,研究解决各种测绘仪器的设计、制造、使用和维护等理论与技术的学科。

上述测量学的各个分支,既相互联系,又独成系统。本教材主要讲授工程测量学的部分内容,着重讲述工程建设中测量工作的主要任务,即测量和放样两个方面。测量(也称为测定)就是使用测量仪器和工具,按照一定的测量方法和比例尺,将测区内地物和地貌测绘成地形图,供规划设计、工程建设使用;放样(也称为测设)就是把图纸上设计好的建筑物或构筑物的位置在实地上标定出来,指导施工。

1.1.3 测量学在工程建设中的作用

测绘科学技术应用范围很广,在国民经济建设的各行各业、各个建设阶段中,测绘技术、测绘产品、资料及控制点位等发挥着重要的作用。

在工程建设的规划、设计阶段,测绘工作为建设规划和工程设计提供空间信息基础资料。其他工程任务、工种都要以地形图作为基础资料才能展开工作,所以要求测绘工作走在其他任务的前列。由于测绘工作的超前服务性,测绘工作通常被人们称为建设的排头兵。例如:在水利工程中的水库设计阶段,需要坝址以上整个流域的地形资料,以便进行地质勘探,经济调查、汇水面积量算、水文计算等项工作;坝址确定以后则需要坝址区域大比例尺地形图,以便进行大坝、取水口、泄洪建筑物的布置、土石方开挖量计算等。

在工程施工阶段,需要将图纸上设计的水工建筑物位置在地面上标定下来以便进行施工。如水利枢纽的施工过程中,需要事先基于地形图计算截流工程量、施工月报量中的工程量计算、施工场地布置、建筑材料上坝方案的确定等都需要测量工作。

工程竣工后,要进行检查、验收和质量评定,并进行竣工测量,绘制竣工图,供日后扩建、维修和日常管理使用。大型重要建筑物在竣工后因自重和外力作用而产生下沉变形,如大坝可能位移、高层建筑物可能沉降、倾斜,为保证建设和使用安全,需要按照行业技术要求的规定开展建筑物的变形量和变形速度的监测工作。

1.2 地面点位的确定

1.2.1 地球的形状与大小

测量工作是在地球表面进行的,地球自然表面是凸凹不平、极不规则的曲面,有高山大川、江河湖海,其中位于我国西藏与尼泊尔王国边界的喜马拉雅山的主峰高达8844.43m,地球的最深点位于太平洋西部的马里亚纳海沟斐查兹海渊,位于海面以下

11034m, 但这样大的高低变化相对于地球的平均半径 6371km 来说是微不足道的。代表整个地球形状和大小的数学体称作为地球形体。在地球表面采集、处理和利用地球空间信息, 必然涉及地球形体的一些基准线、基准面和有关参数。

水准面: 地球表面的每个水分子都受到重力作用, 水面处于静止状态时位于水面的每个水分子的重力位相等, 由这个处于静止状态的水面向陆地延伸所形成的闭合曲面称为水准面。同一水准面上处处重力位相等。水准面上任一点的铅垂线垂直于该水准面。在风浪、潮汐、海流等外力的作用下, 水面的高低呈动态变化状态, 因此不同时刻的水准面处于不同的高度, 水准面可有无穷多个, 而且互不相交。

大地水准面: 在测绘工作中, 设想一个处于静止状态 (即无波浪、潮汐、海流和大气压等作用引起水面扰动) 的平均海面, 向内陆地区延伸且包围整个地球的闭合水准面称为大地水准面。大地水准面也是等位面, 过大地水准面任意一点的切面均与重力线正交。大地水准面具有唯一性。大地水准面所包围的形体为大地体。大地水准面是测量外业工作的基准面。

铅垂线: 地球上任意一个质点, 都同时受到两个力的作用, 即地球自转的离心力和地心引力, 它们的合力称为重力 (图 1-1), 重力方向即为铅垂线方向, 简称铅垂线。一根细线下端挂一重物 (或垂球), 当重物下垂并稳定时, 细线的方向即为铅垂线方向。铅垂线是测量外业工作的基准线。

水平线: 与铅垂线正交的直线称水平线。

水平面: 与铅垂线正交的平面称水平面。

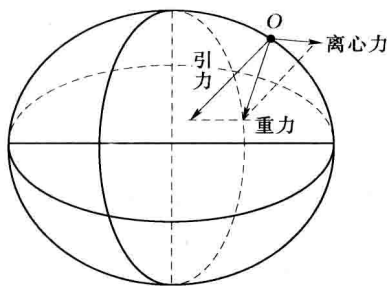


图 1-1 地球表面物体所受力

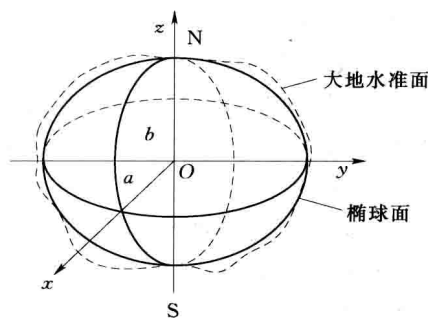


图 1-2 大地水准面与旋转椭球面

地球椭球体: 由于地球表面凹凸不平、地球内部物质分布不均匀, 大地水准面各处的重力线方向随之产生不规则的变化, 致使大地水准面成为一个有微小起伏且不规则的曲面。因此, 大地水准面也是一个不规则的曲面。将地球表面地物、地貌投影到这个不规则的曲面上将非常困难。为了正确计算测绘成果, 准确表示地面点的位置, 必须采用非常接近于大地体而且可以用数学式表示的几何形体来表示实际的地球形体。在测量工作中, 通常取一个与大地水准面相接近, 并且可以用数学公式表达的规则椭球体来代替大地体 (图 1-2), 将其表面作为测量内业计算、绘图的基准面。该椭球面也称为参考椭球面, 为一椭圆绕其短半轴 NS 旋转而成, 因此也称为旋转椭球面, 该旋转椭圆对应的球体称为旋转椭球体。旋转椭球体是由长半径 a , 短半径 b 所决定, $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 称为扁率。目前我国

“1980 年大地坐标系”采用的参考椭球数据是 1975 年国际大地测量与地球物理联合会的推荐值，见表 1-1。

表 1-1 1980 年大地坐标系采用的参考椭球参数

长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	年代和推荐者
6378140	6356755.3	1/298.257	1975 年国际大地测量与地球物理联合会

由表 1-1 可知参考椭球的扁率很小。因此当测量区域比较小，或者对测量工作精度要求不太高的时候，可以把地球椭球体看作为圆球体，其平均半径为：

$$R = \frac{a+b}{2} = 6371(\text{km})$$

1.2.2 地面点位的表示方法

一个点的空间位置，是用它的平面坐标和高程来表示，是一个三维坐标。这三个量是该点沿投影方向投影到基准面（参考椭球）上的投影位置（平面位置，二维，通常用地理坐标表示）和从该点沿投影方向到基准面（大地水准面）的距离（高程，一维）。表示平面位置的坐标系统主要有地理坐标系统、WGS-84 坐标系统、直角坐标系统；表示高程的我国目前采用的是 1985 年国家高程系统。

1.2.2.1 地理坐标系统

地面点在地球表面的位置用经纬度来表示时，称为地理坐标。地理坐标按确定该位置所依据的基准线、基准面不同，又可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，用大地体代替地球，N 为北极，S 为南极，NS 即为地球的自转轴，O 为地球体中心。包含过地面点 P 的铅垂线和地球自转轴的平面称为 P 点的天文子午面。天文子午面与地球表面的交线称为天文子午线，也称经线。通过英国格林尼治天文台的子午面称为起始子午面（也称首子午面），相应的子午线称为起始子午线或零子午线，并作为经度计量的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的角度就称为 P 点的天文经度，用 λ 表示。从起始子午面向东 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为东经，向西 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为西经。

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为赤道面，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) 通过天文测量的方法实测。

(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。如图 1-4 所示，包含过地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 的大地子午面。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的角度就称为 P 点的大地经度，用 L 表示，从起始子午面向东 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为东经，向西 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为西经。过点 P 的法线与椭球赤道面所夹的线面角就称为 P 点的大地纬度，用 B 表示，其值为北纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

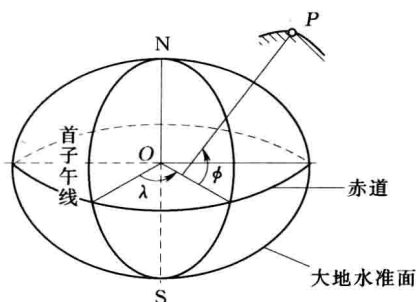


图 1-3 天文坐标系

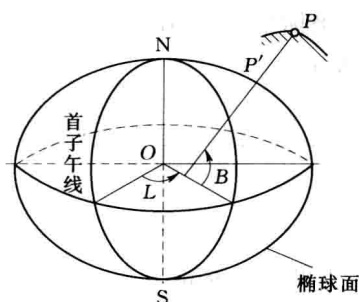


图 1-4 大地坐标系

1.2.2.2 WGS-84 坐标系

大地坐标系是以参考椭球体几何中心为原点的坐标，属于参心坐标系。为适应卫星大地测量的发展，需建立以地球质心为原点的空间直角坐标系，称地心坐标系。较常用的是适用于全球定位系统（GPS）的 WGS-84 坐标系，它是以地球质心为原点，以指向某一时北极平均地位为 Z 轴，以指向首子午线与赤道交点为 X 轴， Z 轴、 X 轴垂直构成右手直角坐标系。

1.2.2.3 平面直角坐标系

一般的建设工程都在小区域进行，为了确定点位的平面位置，通常采用平面直角坐标系，该系统忽略地球曲率的影响、以水平面代替水准面。工程测量直角坐标系如图 1-5 所示，其纵轴为 X 轴，与实地的南北方向一致，横轴为 Y 轴，与实地的东西方向一致。地面上任意一点 A 的平面位置，用 x_A 、 y_A 来表示。

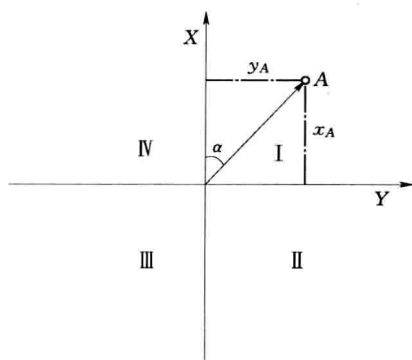


图 1-5 平面直角坐标系

平面直角测量坐标系与数学上常用直角坐标系的纵横轴互换，这主要是在测量工作中，以极坐标表示点位时，其方位角度值是以坐标纵轴（北方）为基准，按顺时针方向计算其方位角，而数学中则是以坐标横轴为准，逆时针计算的缘故，两轴互换后，有关坐标计算的三角函数公式可直接在测量中应用。为使用方便、工程项目小或者与国家控制网联测比较困难，有时候测量上使用假定平面坐标系，

其坐标系的原点和坐标纵轴的实际指向都是假定的，但假定原点的位置及坐标纵轴的实际方位应避免测区内各点的坐标出现负值。

1.2.2.4 高斯-克吕格平面直角坐标系

当测区范围比较大，则必须考虑地球曲率的影响，要采用适当的投影方法，将地球曲面展绘成平面。投影的方法很多，各自适用于不同的地区 and 行业，我国的国家基本地形图采用高斯分带投影的方法将地球表面展绘成平面图形。

高斯-克吕格分带投影是将地球看成一个椭球体，自首子午线开始，自西向东按经差每 6° 划分为一带，将整个地球表面划分为 60 带，分别用 1~60 来表示其带号，如图 1-6 所示，然后对每个带进行投影。

如图 1-7 所示, 设想用一个空心椭圆柱面横套在椭球体的外表面, 椭圆柱体的轴心通过椭球体的中心, 椭圆柱面的内表面与投影带的中央子午线相切。然后将 6° 带上的点、线按正形投影的方式, 投影到椭圆柱面上, 投影后将椭圆柱面沿通过南北两极点的母线切开、展平, 就得到投影后的 6° 带平面图形, 如图 1-8 所示。

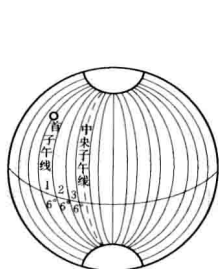
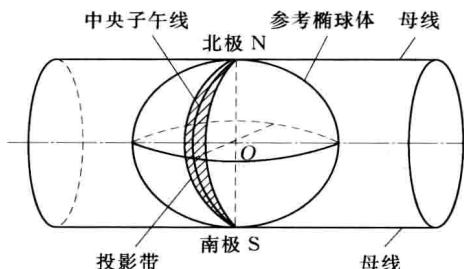
图 1-6 高斯 6° 分带

图 1-7 高斯投影方法

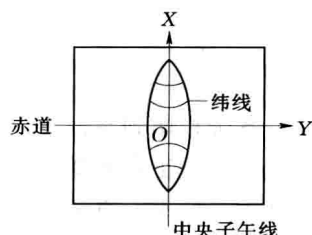


图 1-8 高斯投影变形

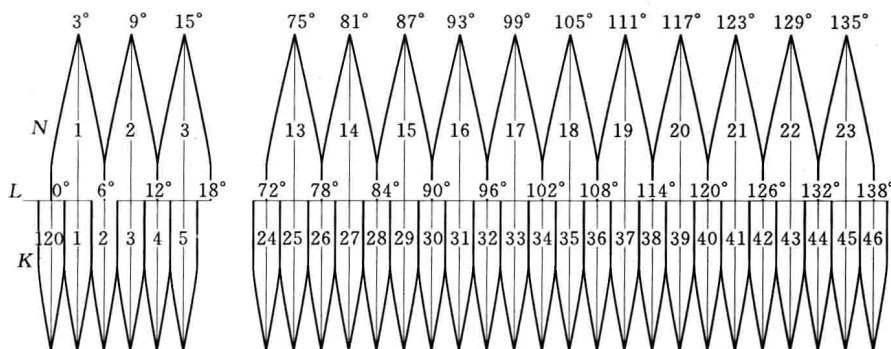
高斯投影具有以下几个特性:

(1) 中央子午线投影后是一条直线, 长度不变, 其余的经线投影后是凹向中央子午线的对称曲线, 距中央子午线越远变形越大。

(2) 赤道线投影后是一条直线, 且与中央子午线垂直, 其余的纬线是凸向赤道线的对称曲线。

(3) 经线、纬线投影后, 仍旧保持原来相互垂直的几何关系, 即投影前后无角度变形。

高斯投影没有角度变形, 但有长度和面积变形, 距中央子午线越远变形越大。 6° 带投影其边缘子午线长度变形可以满足 $1:2.5$ 万或更小比例尺地形图的测图精度要求, 当测图比例尺大于 $1:1$ 万, 其长度变形超过了允许值, 相应采用 3° 分带进行投影。 3° 带是以 6° 带的中央子午线和边缘子午线作为 3° 带的中央子午线, 将整个地球划分为 120 带, 分别用 $1\sim120$ 来表示其带号, 其中 3° 带的第 1 带的中央子午线与 6° 带的第 1 带的中央子午线为同一条经线。 6° 带、 3° 带各带间的关系见图 1-9。

图 1-9 6° 带、 3° 带各带间的关系

6° 带、 3° 带各带的中央子午线的经度可按式 (1-1) 计算:

$$\left. \begin{aligned} L_0^6 &= 6N - 3 \\ L_0^3 &= 3K \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 L_0^6, L_0^3 ——6°带、3°带中央子午线经度；

N, K ——6°带、3°带的带号。

已知地表某点的经度 L ，计算其所属相应 6°带、3°带的带号可按式 (1-2) 计算：

$$\left. \begin{aligned} N &= \text{Int}\left(\frac{L}{6}\right) + 1 \\ K &= \text{Int}\left(\frac{L - 1.5^\circ}{3}\right) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 Int ——取整函数。

各带投影到平面上以后，以赤道位置为 Y 轴，规定向东为正；以中央子午线为 X 轴，规定向北为正，赤道、中央子午线相交的位置为坐标系的原点 O ，这样建立起来的坐标系即为高斯平面直角坐标系 [图 1-10 (a)]。

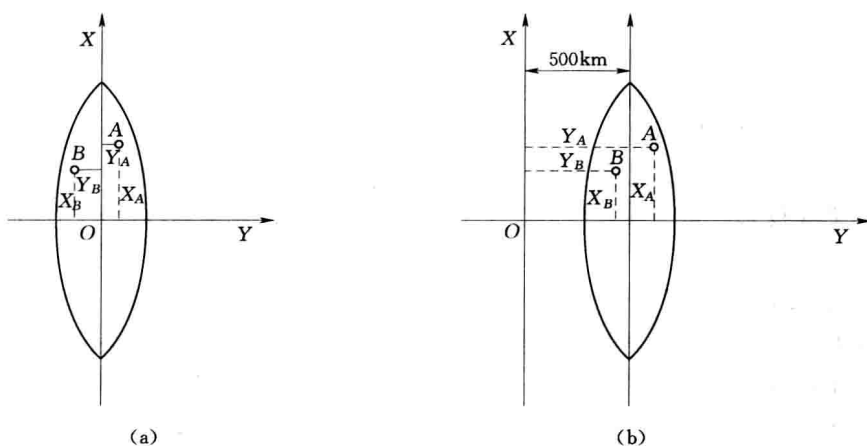


图 1-10 高斯平面直角坐标系 Y 坐标自然值与通用值的比较

我国位于北半球，在任意一带范围内，所有点的纵坐标全部为正，而横坐标则不同。在中央子午线以东的横坐标为正，以西为负。这种以中央子午线为纵轴确定的坐标值称为自然值 [图 1-10 (a)]。坐标值出现负值，给数据处理带来一定的不便，为避免横坐标出现负值，规定每带坐标纵轴向西平移 500km，以保证 6°带内任一点的 Y 坐标均为正值 [图 1-10 (b)]，经过这种坐标纵轴平移处理后得到的点坐标称为通用值。

如图 1-10 中点 B ，假设其 Y 坐标自然值为 $Y_B = -258398.552\text{m}$ ，坐标纵轴向西平移 500km 后， Y 坐标通用值为 $Y_B = -258398.552 + 500000 = 241601.448\text{m}$ 。为了确定该点属于哪一带，在点的 Y 坐标通用值前加上代号。假如 B 点位于 6°分带的第 22 带内，则 $Y_B = 22241601.448\text{m}$ 。

1.2.2.5 地面点的高程

高程系是一维坐标系，其基准面是大地水准面。通常在海边设立验潮站，进行长期观测，求得海水面多年的平均高度位置作为高程零点，通过该点的水准面称为大地水准面，即高程基准面。地面点沿铅垂线方向至大地水准面的距离称为绝对高程，亦称为海拔。如图 1-11 中，地面点 A 和 B 的绝对高程分别为 H_A 和 H_B 。

我国境内测定点的高程值是以青岛验潮站多年观测的黄海平均海水面为基准面。由于

平均海水面不便于随时联测使用，故在青岛观象山建立了“中华人民共和国水准原点”，作为全国推算高程的依据，通过水准测量的方法以验潮站确定的高程零点为起算零点，测定水准原点的高程，然后再从水准原点通过水准测量的方法来测定其他高程点的高程。以1950~1956年测定的黄海平均海水面为基准建立的高程系，称为“1956年黄海高程系”，水准原点在该高程系里的高程为72.289m。随着观测数据的积累，20世纪80年代，我国又根据青岛验潮站1952~1979年的观测资料计算出新的平均海水面作为高程零点，并测得水准原点的高程为72.2604m，称为“1985年国家高程基准”。

在工程建设中，一般应采用绝对高程。如果工程项目在偏远地区而且规模小，引测高程困难，也可以建立假定高程系统，即假定一个水准面作为高程起算面，地面点到假定水准面的垂直距离称为相对高程或假定高程。如图1-11中，A、B两点的假定高程分别为 H'_A 和 H'_B 。

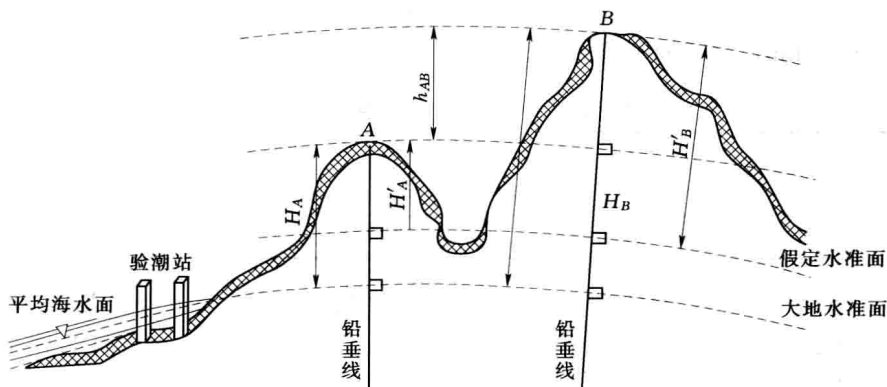


图 1-11 绝对高程与相对高程

1.2.3 水平面代替水准面的影响

一般的建设工程是在小区域内进行的，测量工作可以忽略地球曲率的影响，用水平面来代替水准面。但是用水平面来代替水准面总有一定限度，而且这样的代替，对地球表面点间的水平距离、高差、水平角都有一定的影响，这就有必要分析用水平面来代替水准面对水平距离、高差、水平角影响的大小。

1.2.3.1 对水平距离的影响

如图1-12所示，设地面上两点A、B，沿各自铅垂线方向分别投影到大地水准面上得到A'、B'，如果用过A'点与大地水准面相切的水平面代替大地水准面，A、B两点在大地水准面上的投影点A'、B'的弧长为D，投影到代替水平面上的距离为D'，两者之差即为A、B两点用水平面代替大地水准面所引起的距离差，用 ΔD 表示，则：

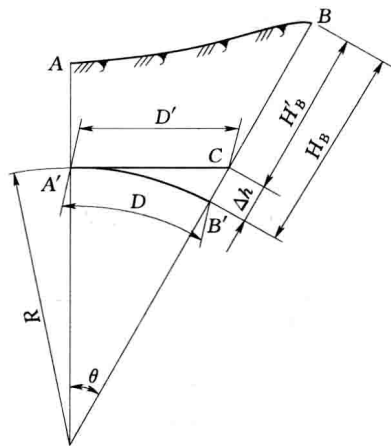


图 1-12 水平面代替水准面对水平距离、高差的影响

$$\Delta D = D' - D = R \tan \theta - R \theta = R (\tan \theta - \theta) \quad (1-3)$$

式中 R ——地球曲率半径 6371km;

θ ——弧长 D 对应的圆心角, 弧度。

将 $\tan \theta$ 用级数展开, 得:

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots$$

由于 θ 很小, 取前两项:

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

又 $\theta = \frac{D}{R}$, 得:

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \text{ 或 } \frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-4)$$

取 $R=6371\text{km}$, 将不同 D 值代入式 (1-4), 计算结果见表 1-2。

表 1-2 水平面代替水准面对水平距离的影响

D/km	2.0	5.0	10.0	15.0
$\Delta D/\text{cm}$	0.007	0.103	0.821	2.772
$\Delta D/D$	1: 3044 万	1: 487 万	1: 121 万	1: 54 万

由表 1-2 可以看出, 当距离为 10km 时, 水平面代替水准面产生的距离相对误差为 1/121 万, 精度高于精密距离测量精度的允许误差 1/100 万。因此可以认为在半径 10km 范围内, 地球曲率对距离的影响可以忽略不计, 可用水平面代替水准面。

1.2.3.2 对高程的影响

如图 1-12 所示, 地面点 B 的绝对高程为 H_B , 当用水平面代替水准面时, B 点的高程为 H'_B , 则其差值 Δh 即为用水平面代替水准面所产生的高程差, 可得:

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

展开可得:

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

即:

$$\Delta h = \frac{D'^2}{2R + \Delta h} \approx \frac{D^2}{2R} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可得不同距离情况下, 用水平面代替水准面对高程的影响, 见表 1-3。

表 1-3 水平面代替水准面对高程的影响

D/km	0.2	0.5	1.0	2.0
$\Delta h/\text{mm}$	3.1	19.6	78.4	313.9

表 1-3 的计算结果表明, 地球曲率对高程的影响很大。高程测量的精度要求很高, 国家四等水准测量要求每千米水准路线的高差全中误差不得大于 $\pm 10\text{mm}$, 因此在进行高程测量的时候, 即使距离不大, 也必须考虑地球曲率对高程的影响。