

普通高等院校
地理科学专业系列教材

测量学

付迎春 李长辉 胡华科 高照忠 速云中 编著



科学出版社

普通高等院校地理科学专业系列教材

测 量 学

付迎春 李长辉 胡华科 高照忠 速云中 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共9章,主要是针对当代测量学技术现状与发展趋势、基础理论与应用实践结合情况,系统阐述了测量坐标系、仪器观测原理、误差处理理论、区域控制测量和数字地形图测绘等基础知识以及城市数字测图的特色应用案例;同时,简要介绍了北斗卫星导航系统、多载体LiDAR测图和高分辨率卫星遥感测图、无人机和InSAR等新兴测绘技术及其应用案例。

本书可作为地理学、测绘科学与技术、土地科学、城市规划、旅游管理、建筑学、环境科学及相关专业的本科生或专科生作为测量学原理的核心教材使用,也可供相关研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测量学/付迎春等编著. —北京:科学出版社, 2015.6

普通高等院校地理科学专业系列教材

ISBN 978-7-03-044761-6

I. ①测… II. ①付… III. ①测量学-高等学校-教材 IV. ①P2

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第123220号

责任编辑:杨 红/责任校对:桂伟利

责任印制:徐晓晨/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:12 7/8

字数:298 000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

测量学是测绘和地理学科的基础课程，旨在帮助学习者建立空间坐标系和空间数据获取处理的基本概念，掌握仪器操作和数字化测绘的熟练技能，培养具有现代测绘技术专业素质的技术人才。事实上，测量是作为测绘地图的基本手段发展起来的，目前基于各种测绘装备的现代测量技术已经得到迅速发展，有数字水准仪、数字全站仪、测量机器人、无人机、移动激光测量系统等测绘新方法和新技术。在测量学基本原理与知识基础上，测量技术的日新月异和信息测绘内涵与外延的拓展，丰富了测绘学科的理论知识和方法学，提升了测绘学科在各行业领域的地位与应用。因此，测绘学、地理学及相关专业都离不开测量，从事专业学习和研究的学生及工程技术人员都需要了解和掌握测绘的基本原理、技术和应用方法，并对现代测绘学科的发展趋势有所了解。

本书编写内容涵盖了测量学基础知识、仪器观测原理、区域控制测量和大比例尺数字地形图测绘，并全面介绍了现代测绘新技术及其应用案例；在教材内容和文字组织上尽可能的通俗易懂，并强调原理、技能和实际案例结合，内容详实，深入浅出，紧密围绕测量学课程的基本目标来组织教材编写。

本书主要由从事测量学教学及现代测绘应用的相关研究人员和技术人员编写完成。本书由付迎春拟定编写大纲和统稿，具体分工为：付迎春编写第1至4章，胡华科编写第5、6章，高照忠编写第7章，李长辉编写第8、9章。研究生卢雪玉和戴舒参与了部分章节的编写工作，于洋参与了部分插图处理工作。在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏之处，请读者不吝指教。

作 者
2015年5月

目 录

前言

第 1 章 测量坐标系和高程	1
1.1 地球形状、大小和基准面	1
1.2 测量常用坐标系和参考椭球定位	2
1.3 地图投影和高斯平面直角坐标系	4
1.4 高程与方位角	8
1.5 用水平面代替水准面的限度	10
思考题	11
第 2 章 测量误差理论的基本知识	12
2.1 观测误差的分类	12
2.2 误差分布的正态性检验	17
2.3 衡量精度的标准	21
2.4 误差传播定律	23
2.5 平差基本知识	28
2.6 算术平均值及其中误差	29
2.7 权与加权平均值理论及应用	31
思考题	33
第 3 章 水准测量和水准仪	35
3.1 水准测量原理与方法	35
3.2 水准测量仪器与工具	36
3.3 水准测量实施	43
3.4 水准测量的误差分析	49
思考题	51
第 4 章 角度、距离测量与全站仪	52
4.1 角度测量原理	52
4.2 光学经纬仪	53
4.3 水平角观测的误差分析	63
4.4 光电测距	64
4.5 电子全站仪及其测量功能	73
思考题	79
第 5 章 小区域控制测量	82
5.1 控制测量概述	82
5.2 导线测量	85
5.3 交会测量	93
5.4 高程控制测量	95

思考题	101
第 6 章 地形图基本知识	103
6.1 地形图概述	103
6.2 地形图的分幅与编号	109
6.3 地形图的应用	115
6.4 地形图阅读与野外使用	122
思考题	127
第 7 章 大比例尺数字地形图测绘	129
7.1 大比例尺测图的技术设计	129
7.2 图根控制测量和测站点测定	130
7.3 野外采集数据	131
7.4 地物平面图测量	134
7.5 地貌测绘	137
7.6 数字地形图编辑和输出	142
7.7 大比例尺数字地形图质量控制	146
7.8 地形图的数字化	147
思考题	150
第 8 章 城市数字测图应用	151
8.1 城市规划	151
8.2 数字城管及数字城市	158
8.3 地籍调查	160
8.4 土石方计算及调配	161
8.5 地图册/集编制	162
8.6 地理信息系统	164
8.7 工程建设	165
8.8 水下地形图的作用	165
8.9 其他行业	166
思考题	167
第 9 章 现代测绘技术	168
9.1 北斗卫星导航系统	168
9.2 机载 LiDAR 测图技术	171
9.3 高分辨率卫星遥感测图技术	174
9.4 无人机摄影测量技术	180
9.5 移动道路测量技术	187
9.6 测量机器人 TCA2003 自动变形监测技术	195
9.7 InSAR 地面形变监测技术	197
思考题	199
主要参考文献	200

第 1 章 测量坐标系和高程

1.1 地球形状、大小和基准面

测量学的主要研究对象是地球的自然表面，但是，地球表面极不规则，由具体的测量结果可知：高耸于世界屋脊上的珠穆朗玛峰与太平洋海底深邃的马里亚纳海沟之间的高差竟有近 20km。尽管有这样大的高低起伏，但是，相对于地球庞大的体积来说仍然可以忽略不计。就整个地球表面而言，海洋面积约占 71%，陆地面积约占 29%，可以认为是一个由水面包围的球体。

1.1.1 地球自然形体

无论是天文大地测量、地球重力测量，还是卫星大地测量等精密测量，都提供这样一个事实：地球并不是一个正球体，而是一个极半径略短、赤道半径略长，北极略突出、南极略扁平，近于梨形的椭球体。这里所谓的近于“梨形”，其实是一种形象化的夸张，因为地球南北半球的极半径之差仅在几十米范围之内，这与地球固体地表的起伏，或地球极半径与赤道半径之差都在 20km 左右相比，是十分微小的。况且，已经有证据表明，这种“梨形”还不一定会长期保持下去。这样一个复杂的形状，我们是无法用数学公式来表达的。

1.1.2 大地水准面及其特性

由于地球的自然表面凹凸不平，形态极为复杂，显然不能作为测量与制图的基准面。因此，应该寻求一种与地球自然表面非常接近的规则曲面，来代替这种不规则的曲面。

处于静止状态的水面称为水准面。由物理学可知，这个面是一个重力等位面，水准面上处处与重力方向（铅垂线方向）垂直。在地球表面重力的作用空间，通过任何高度的点都有一个水准面，因而水准面有无数个。把一个假想的、与静止的平均海水面重合并向陆地延伸且包围整个地球的特定重力等位面称为大地水准面。大地水准面和铅垂线可作为野外测量的基准面和基准线。

1.1.3 参考椭球面及其特性

地球引力的大小与地球内部的质量有关，而地球内部的质量分布又不均匀，致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则的变化，因而大地水准面实际上是一个略有起伏的不规则面，无法用数学公式精确表达，必须寻求一个与地球体极其接近的形体来代替地球体。

地球是一个近似椭球体，一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体，即旋转椭球体，或称地球椭球体。地球椭球体表面是一个可以用数学模型定义和表达的曲面，这就是我们所讲的地球数学表面。测量与制图工作将以地球

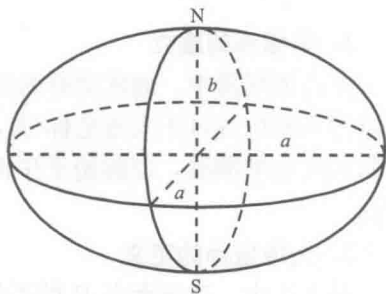


图 1.1 旋转椭球体

椭球体表面作为几何参考面,将进行的大地测量结果归算到这一基准面上(图 1.1)。

代表地球形状和大小的旋转椭球体称为“地球椭球体”。与大地水准面最接近的地球椭球体称为总地球椭球体;与某个区域如一个国家大地水准面最为密合的椭球体称为参考椭球体,其椭球面称为参考椭球面。由此可见,参考椭球体有许多个,而总地球椭球体只有一个。

地球椭球体有长轴和短轴之分。长半轴(a)即赤道半径,短半轴(b)即极半径。在几何大地测量中,椭球的形状和大小通常用长半轴 a 、短半轴 b 和扁率 f 来表示: $f = \frac{a-b}{a}$ 。

地球椭球体的形状和大小取决于 a , b , f , 因此,称 a , b , f 为地球椭球体三要素,或称描述地球形状与大小的参数。国际上有多种参考椭球体的参数值,表 1.1 为几个有代表性的参数值。

表 1.1 地球椭球体的几何参数

椭球体名称	年份	长半轴 a/m	扁率 f	附注
德兰布尔	1800	6375653	1 : 334.0	法国
白塞尔	1841	6377397	1 : 299.152	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 系统	1984	6378137	1 : 298.257	美国国防部制图局(DMA)

注: IUGG——国际大地测量与地球物理联合会(International Union of Geodesy and Geophysics)。

由于参考椭球体的扁率很小,当测区面积不大时,在普通测量中可把地球近似地看做圆球体,其半径为

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) \approx 6371(\text{km})$$

1.2 测量常用坐标系和参考椭球定位

1.2.1 大地坐标系

1. 坐标系的建立

在大地测量中,通常所有的观测值在概算时均应尽量概化到参考椭球面上。地面上任意一点的空间位置可用大地坐标(B , L , H)表示。大地坐标系是以参考椭球面作为基准面,以其法线为基准线,以起始子午面和赤道面作为在椭球面上确定某一点投影位置的两个参考面。

2. 大地坐标的定义

图 1.2 中,过地面点 P 的子午面与起始子午面之间的夹角(L),称为该点的大地经度。规定:从起始子午面算起,向东称为东经;向西称为西经。

过地面点 P 的椭球面法线与赤道面的夹角 (B)，称为该点的大地纬度。规定：从赤道面算起，从赤道面向北称为北纬；从赤道面向南称为南纬。

P 点沿椭球面法线到椭球面的距离 (H)，称为大地高。从椭球面起算，向外为正，向内为负。

大地经纬度构成的大地坐标系，在大地测量计算中广泛应用。

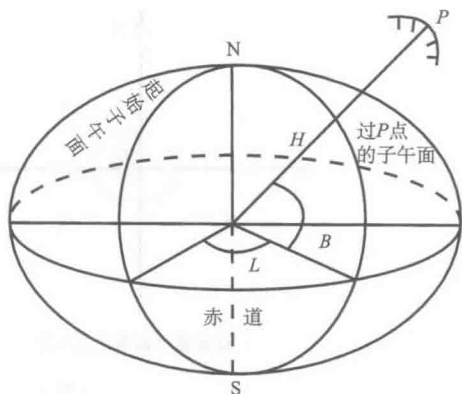


图 1.2 大地坐标系

1.2.2 地球坐标系与协议地球坐标系

1. 空间直角坐标系

以椭球体中心 O 为原点，起始子午面与赤道面交线为 X 轴，赤道面上与 X 轴正交的方向为 Y 轴，椭球体的旋转轴为 Z 轴，构成右手直角坐标系 $O-XYZ$ 。在该坐标系中， P 点的点位用 OP 在这三个坐标轴上的投影 x, y, z 表示，如图 1.3 所示。

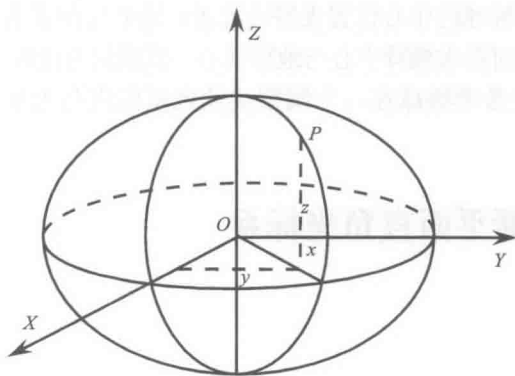


图 1.3 空间直角坐标系

2. WGS-84 坐标系

WGS-84 坐标系是全球定位系统 (GPS) 采用的坐标系，属于协议地心坐标系 (惯性系)。它是如下定义的：坐标系的 Z 轴指向 BIH 1984.0 定义的协议地球极 (CIP) 方向，原点为地球的质心； X 轴指向 BIH 1984.0 定义的零度子午面和 CIP 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。目前，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)。

协议坐标系之所以称为“协议”，是因为地球是不断变换的，地极的位置、地球的各个参数等都是不断变化的。因此，国际上“协议”取某个时刻的地极、零度子午面定义坐标系的轴。

3. 平面直角坐标系

在解析几何中，在同一个平面上互相垂直且有公共原点的两条数轴构成平面直角坐标系，简称为直角坐标系。通常，两条数轴分别置于水平位置与垂直位置，取向右与向上的方向分别为两条数轴的正方向。水平的数轴叫做 X 轴或横轴，竖直的数轴叫做 Y 轴或纵轴， X 轴或 Y 轴统称为坐标轴，它们的公共原点 O 称为直角坐标系的原点。

测绘工作中所用的平面直角坐标系与解析几何中的平面直角坐标系有所不同，测量平面直角坐标系以纵轴为 X 轴，表示南北方向，向北为正；横轴为 Y 轴，表示东西方向，向东为正；象限顺序依顺时针方向排列 (图 1.4)。这是因为测绘工作中以极坐标表示点位时其角度值是以北方向为准，按顺时针方向计算，而解析几何中则从横轴起按逆时针方向计算。当 X 轴与 Y 轴互换之后，全部平面三角公式均可用于测绘计算中。

一般情况下，应该采用高斯平面直角坐标系。将球面坐标和曲面图形转换成相应的平面

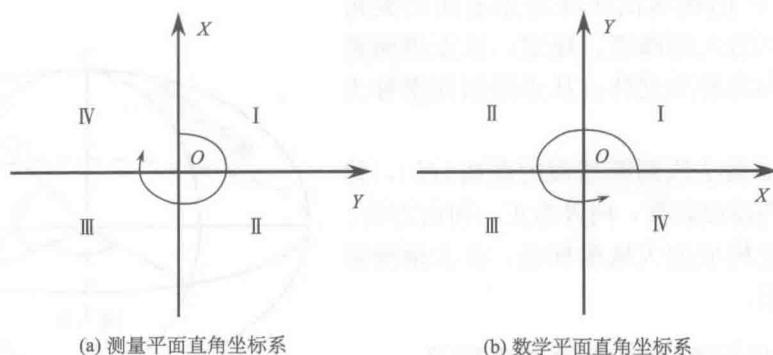


图 1.4 两种平面直角坐标系

坐标和图形必须采用适当的投影方法，具体内容将在第 1.3 节讲述。

1.2.3 参考椭球定位

椭球定位是指确定椭球中心的位置，可分为两类：局部定位和地心定位。局部定位要求在一定范围内椭球面与大地水准面有最佳的拟合，而对椭球的中心位置无特殊要求；地心定位要求在全球范围内椭球面与大地水准面有最佳的拟合，同时要求椭球中心与地球质心一致或最为接近。

确定参考椭球与大地水准面的相关位置，使参考椭球在一个国家或地区范围内与大地水准面最佳拟合，称为参考椭球定位。

1.3 地图投影和高斯平面直角坐标系

1.3.1 地图投影

1. 地图投影的意义

地球参考椭球面是不可展曲面，如果将它展成平面，必然会使曲面产生褶皱、拉伸或者断裂等形变。显然，在这种平面上，是无法绘制科学、准确的地图的，不便于地图的制作、使用和保管。历代地图学家和数学家经多年探索，创立了地图投影这种数学方法，实现了由地球椭球面向平面地图的科学转换，从而解决了上述一系列问题。

地图投影，简单来说就是讲椭球面上的各元素(坐标、长度和方向)按照一定的数学法则投影到平面上。这里所说的数学法则，可以用两个方程式来表示：

$$\begin{cases} x = F_1(L, B) \\ y = F_2(L, B) \end{cases} \quad (1.1)$$

式中， L 、 B 为椭球面上某点的大地坐标； x 、 y 为该点投影后的平面直角坐标，这里所说的平面通常也叫做投影面。

如果能够建立 x 、 y 与 L 、 B 之间的函数关系，那么只要知道地面点的大地坐标，便可以在投影平面上找到相对应的平面位置。由此可见，投影问题也就是建立椭球面元素与投影面相对应元素之间的解析关系式。

2. 地图投影变形

地图投影，必然会产生形变。椭球面上的一段距离、一个角度、一个图形投影到平面

上,就会和原来的距离、角度、图形呈现差异,这一差异称为投影变形。

投影变形一般分为角度变形、长度变形和面积变形三种。

其实,投影只不过是根据具体的用图目的、表现区域和内容特点等,在长度、角度、面积几种变形中,选择一种,并令其不变形,或者虽有几种变形,但变形值相对不至于过大而已。因此,在地图投影中产生了许多种类的投影法。

3. 地图投影分类

地图投影种类繁多,通常采用以下几种分类方法:按投影面类型分类、按地图投影的变形性质分类和按投影面与参考椭球的位置关系分类。地图投影分类见图 1.5~图 1.7。

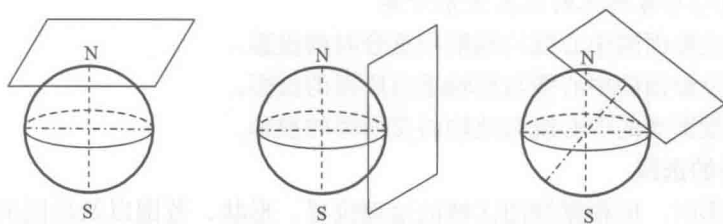


图 1.5 正、横、斜轴方位投影

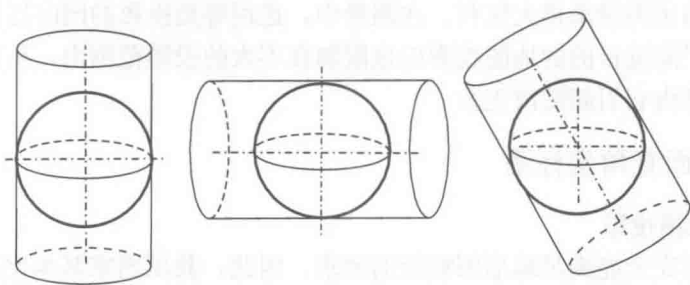


图 1.6 正、横、斜轴圆柱投影

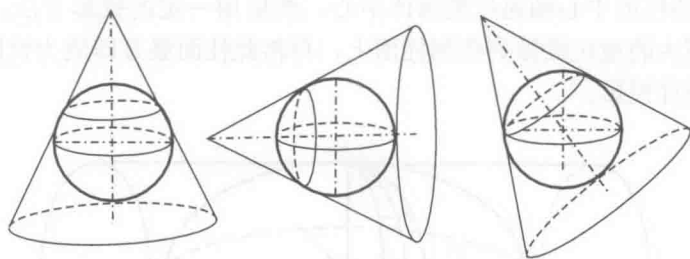


图 1.7 正、横、斜轴圆锥投影

1) 按投影面类型分类

方位投影 以平面作为辅助投影面,使球体与平面相切或相割,将球体表面上的经纬网投影到平面上构成的一种投影。

圆柱投影 以圆柱表面作为辅助投影面,使球体与圆柱表面相切或相割,将球体表面上的经纬网投影到圆柱表面上,然后再将圆柱表面展成平面而构成的一种投影。

圆锥投影 以圆锥表面作为辅助投影面,使球体与圆锥表面相切或相割,将球体表面上

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

的经纬网投影到圆锥表面上,然后再将圆锥表面展成平面而构成的一种投影。

2) 按地图投影的变形性质分类

等角投影 投影面上两条方向线所夹角度与球面上对应的两条方向线所夹角度相等。换句话说,球面上小范围内的地物轮廓经投影之后,仍保持形状不变。

等积投影 地球椭球面上的面状地物轮廓经投影之后,仍保持面积不变。

任意投影 既不等角也不等积,长度、角度、面积三种变形同时存在的投影,统称为任意投影。在任意投影中,有一种比较常见的投影,即等距投影,它使沿某一特定方向的距离投影前后保持不变。

3) 按投影面与参考椭球的位置关系分类

正轴投影 投影面的中心线与地轴相重合时的投影。

横轴投影 投影面的中心线与地轴垂直所得的投影。

斜轴投影 投影面的中心线与地轴斜交所得的投影。

4. 地图投影的选择

选择地图投影时,应根据制图区域的地理位置、形状、范围以及地图的用途来进行。

测制地图的主要目的是为国防和经济建设服务。采用等角投影可以保证在有限的范围内使得地图上的图形同椭球上的原形保持相似。等角投影后角度大小不变,投影前后长度比为一常数,这给识图用图带来很大便利。在测量中,选用等角投影的同时还要求长度和面积变形不大,因此为了测量目的的地图投影应该限制在不大的投影范围内,从而控制变形,并能以简单的公式计算由它引起的改正数。

1.3.2 高斯平面直角坐标系

1. 高斯-克吕格投影

由于高斯投影完全能满足地形图测绘的要求,因此,我国国家基本比例尺地形图中的大中比例尺图均采用高斯-克吕格投影。

如图 1.8 所示,一个椭圆柱面横套在地球椭球体外面,使它与椭球上某一子午线(中央子午线)相切,椭圆柱的中心轴通过椭球体中心,然后用一定的投影方法,将中央子午线两侧各一定经差范围内的地区投影到椭圆柱面上,再将此柱面展开即成为投影面。所以高斯投影又称为横轴椭圆柱投影。

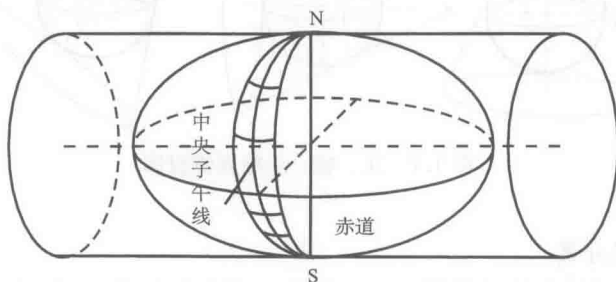


图 1.8 高斯投影

2. 高斯投影的特点

高斯投影是等角投影中的一种,投影前后的角度相等。除此之外,高斯投影还具有以下

特点:

(1) 中央子午线投影后为直线, 且长度不变。距中央子午线越远的子午线, 投影后弯曲程度越大, 长度变形也越大。

(2) 椭球面上除中央子午线外, 其他子午线投影后均向中央子午线弯曲, 并向两级收敛, 对称于中央子午线和赤道。

(3) 在椭球面上对称于赤道的纬圈, 投影后仍成为对称的曲线, 并与子午线的投影曲线互相垂直且凹向两极。

3. 高斯平面直角坐标系

在高斯投影面上，中央子午线和赤道的投影都是直线。以中央子午线的投影为纵坐标轴 X ，向北为正，以赤道的投影为横坐标轴 Y ，向东为正，以中央子午线和赤道的交点 O 作为坐标原点，这样便形成了高斯平面直角坐标系(图 1.9)。

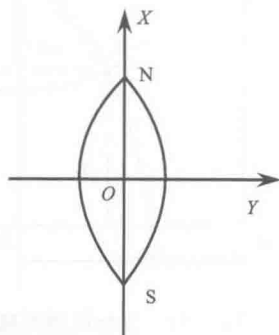
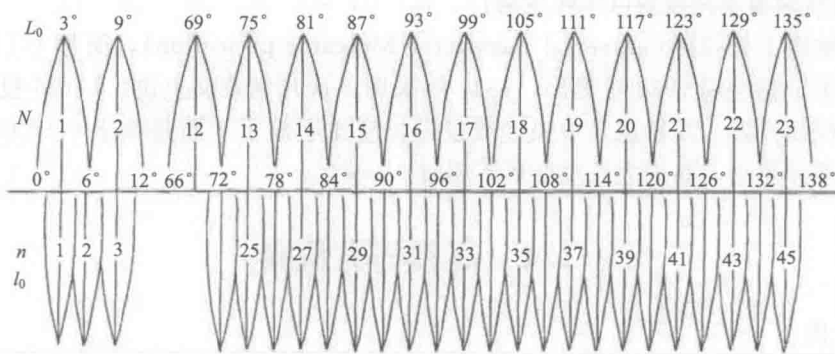


图 1.9 高斯平面直角坐标系

4. 投影带

按一定经差将地球椭球面划分成若干投影带，这是高斯投影中限制长度变形的最有效的方法。分带时既要控制长度变形使其不大于测图误差，又要使带数不致过多以减少换带计算工作，据此原则将地球椭球面沿子午线划分成经差相等的瓜瓣形地带，以便分带投影。通常，带宽一般分为经差 6° 和 3° ，分别称为 6° 带和 3° 带(图 1.10)。

图 1.10 6° 带与 3° 带

6°带：从0°子午线起，每隔经差6°自西向东分带，依次编号1, 2, 3, …, 60，每带中间的子午线称为轴子午线或中央子午线，各带相邻子午线叫做分界子午线。我国领土跨11个6°投影带，即第13~23带。带号 N 与相应的中央子午线经度 L_0 的关系是

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1.2)$$

3°带：以6°带的中央子午线和分界子午线为其中央子午线。即自东经1.5°子午线起，每隔经差3°自西向东分带，依次编号1, 2, 3, ..., 120。我国领土跨22个3°投影带，即第24~45带。带号 n 与相应的中央子午线经度 l_0 的关系是

$$l_0 = 3n \quad (1.3)$$

我国国家基本比例尺地形图中的大中比例尺图，一律采用高斯-克吕格投影。其中比例尺为 1:5000 和 1:10000 的地形图采用经差 3°分带，1:50 万~1:2.5 万比例尺地形图采用经差 6°分带。

5. 国家统一坐标

由于我国疆域均在北半球， X 坐标均为正值，而 Y 坐标值有正有负。为避免 Y 坐标出现负值，规定将 X 坐标轴向西平移 500km，即所有点的 Y 坐标值均加上 500km，在整个投影带内 Y 值就不会出现负值了(图 1.11)。

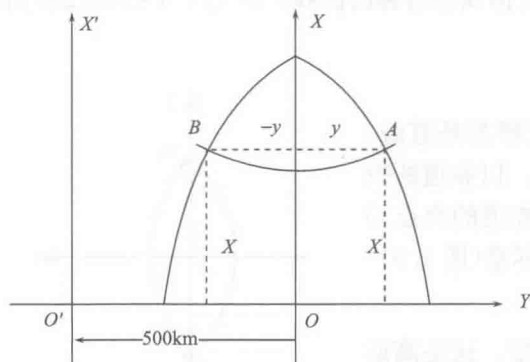


图 1.11 坐标纵轴西移 500km 示意图

例如：在某投影带内有 A、B 两点，A 点位于中央经线东侧， $y_A = 245863.7\text{m}$ ，B 点位于中央经线西侧， $y_B = -245863.7\text{m}$ ，当坐标轴西移 500km 后，则 $y_A = 745863.7\text{m}$ ， $y_B = 254136.3\text{m}$ 。

此外，为方便区别某一点位于哪一个投影带内，还应在横坐标值前加上投影带带号。这种坐标称为国家统一坐标。假设 A、

B 两点同位于 20 带内，则其国家统一坐标表示为

$$y_A = 20745863.7\text{m}$$

$$y_B = 20254136.3\text{m}$$

6. 通用横轴墨卡托投影(UTM 投影)

通用横轴墨卡托投影(universal transverse Mercator projection)，简称 UTM 投影。该投影由美国军事测绘局 1938 年提出，1945 年采用。从几何意义上讲，UTM 投影属于横轴等角割圆柱面投影。其特点是中央经线投影长度比不等于 1 而是等于 0.9996。因而使投影带内变形差异更小，其最大长度变形不超过 0.04%。

1.4 高程与方位角

1.4.1 高程

地面点到高度起算面的垂直距离称为高程。高度起算面又称高程基准面。选择不同的高程基准面，可得到不同的高程系统。通常，测量是以大地水准面作为高程基准面的。地面点沿铅垂线方向到大地水准面的距离，称为该点的绝对高程或海拔，简称高程，用 H 表示。

我国高程起算面是由青岛验潮站验潮结果推算的黄海平均海面。我国曾采用青岛验潮站 1950~1956 年期间的验潮结果推算了黄海平均海面，称为“1956 年黄海平均高程面”，以此建立了“1956 年黄海高程系”，此高程系的青岛水准原点高程为 72.289m。我国自 1959 年开始，全国统一采用 1956 年黄海高程系。后来又利用该站 1952~1979 年期间的验潮结果计算确定了新的黄海平均海面，称为“1985 国家高程基准”，此高程基准的青岛水准原点高程为 72.260m。我国自 1988 年 1 月 1 日起开始采用 1985 国家高程基准作为高程起算的统一基准。

在局部地区, 引用绝对高程有困难时, 可采用相对高程。即假定一个水准面作为高程基准面, 地面点至假定水准面的铅垂距离, 称为相对高程。

两点高程之差称为高差。图 1.12 中, H_A 、 H_B 为 A、B 点的绝对高程, H'_A 、 H'_B 为相对高程, H_{AB} 为 A、B 两点间的高差, 即

$$H_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1.4)$$

所以, 两点之间的高差与高程起算面无关。

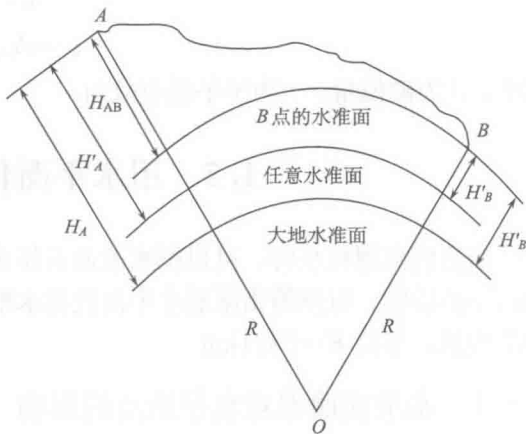


图 1.12 高程

1.4.2 方位角

在高斯平面内, 由基准方向(北方向)顺时针量至某直线的夹角, 称为该直线的方位角。依据基准方向的不同选择, 方位角有真方位角、坐标方位角和磁方位角三种。

(1) 真方位角。由子午线北方向起算的方位角称为真方位角, 用 A 表示。它是通过天文观测、陀螺经纬仪测定和计算求得。同一直线上各点的真方位角不同。

(2) 坐标方位角。由坐标纵轴正方向起算的方位角称为坐标方位角, 用 α 表示。它是通过坐标反算或角度传递得到。在同一直线上, 各点的坐标方位角相等。正反方位角相差 180° 。坐标方位角可以用于控制网起算数据和坐标的推算。

(3) 磁方位角。由磁子午线北方向(磁针自由静止时其指北端所指的方向)起算的方位角称为磁方位角, 用 A_m 表示。它是通过带磁针装置的经纬仪测定的。在同一直线上, 各点的磁方位角不相等。磁方位角容易受到磁性物质的干扰, 其精确度不高, 只用来概略地指示方位。

由于三个指北的标准方向并不重合, 所以, 一条直线的三种方位角并不相等, 它们之间存在着一定的换算关系。在介绍换算关系之前, 先解释几个概念。

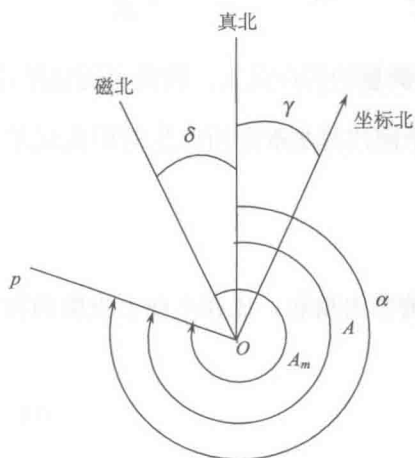


图 1.13 三种方位角的关系

(1) 子午线收敛角。过一点的子午线北方向与坐标纵轴正方向之间的夹角称为子午线收敛角, 用 γ 表示。 γ 的符号规定: 若坐标纵轴正方向在子午线北方向东侧时, γ 为正; 若坐标纵轴正方向在子午线北方向西侧时, γ 为负。

(2) 磁偏角。地面上一点的磁子午线北方向与子午线北方向之间的夹角称为磁偏角, 用 δ 表示。 δ 的符号规定为: 磁子午线北方向在子午线北方向东侧时, δ 为正; 磁子午线北方向在子午线北方向西侧时, δ 为负。

如图 1.13 所示, 一条直线的真方位角 A 、磁方位角 A_m 、坐标方位角 α 之间有如下关系式:

$$A = A_m + \delta \quad (1.5)$$

$$A = \alpha + \gamma \quad (1.6)$$

$$\alpha = A_m + \delta - \gamma \quad (1.7)$$

式中, δ 为磁偏角; γ 为子午线收敛角。

1.5 用水平面代替水准面的限度

当测区范围较小时, 可以把水准面看作水平面。探讨用水平面代替水准面对距离、角度和高差的影响, 以便给出限制水平面代替水准面的限度。在分析过程中, 将大地水准面近似看成圆球, 半径 $R = 6371\text{km}$ 。

1.5.1 水准面曲率对水平距离的影响

在图 1.14 中, $\widehat{AB}$ 为水平面上的一段圆弧, 长度为 S , 所对圆心角为 θ , 地球半径为 R 。AC 为圆弧 AB 的切线, 长度为 t 。以线段 AC 代替圆弧 $\widehat{AB}$, 则在距离上将产生误差 ΔS :

$$\Delta S = AC - \widehat{AB} = t - S$$

其中:

$$AC = t = R \tan \theta$$

$$\widehat{AB} = S = R \cdot \theta$$

则

$$\Delta S = R \left(\frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots \right)$$

因 θ 角值一般很小, 故略去五次方以上的各项, 并

以 $\theta = \frac{S}{R}$ 代入, 则得

$$\Delta S = \frac{1}{3} \frac{S^3}{R^2} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{3} \frac{S^2}{R^2} \quad (1.8)$$

图 1.14 用水平面代替水准面

当 $S = 10\text{km}$ 时, $\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{1217700}$, 小于目前精度距离测量的容许误差。因此可得出结论:

在半径为 10km 的范围内进行距离的测量工作时, 用水平面代替水准面所产生的距离误差可以忽略不计。

1.5.2 水准面曲率对水平角的影响

从球面三角学可知, 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 。

$$\epsilon = \rho \frac{P}{R^2} \quad (1.9)$$

式中, P 为球面多边形面积; R 为地球半径; ρ 为 1 弧度所对应的秒角值, $\rho = 206265''$ 。

以不同的面积 P 代入式(1.9), 可求出球面角超值, 如表 1.2 所示。

表 1.2 水平面代替水准面的水平角误差

球面多边形面积 P/km^2	球面角超值 $\epsilon/(\prime)$
10	0.05
50	0.25
100	0.51
300	1.52

可以得出结论：对于面积在 100km^2 内的多边形，地球曲率对水平角的影响只有在最精密的测量中才考虑，一般测量工作是不必考虑的。

1.5.3 水准面曲率对高差的影响

图 1.14 中， BC 为水平面代替水准面产生的高差误差。令 $BC = \Delta h$ ，则

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

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

上式中可用 S 代替 t ， Δh 与 $2R$ 相比可略去不计，故上式可写成：

$$\Delta h = \frac{S^2}{2R} \quad (1.10)$$

此式表明， Δh 的大小与距离的平方成正比。当 $S = 1\text{km}$ 时， $\Delta h = 8\text{cm}$ 。因此，地球曲率对高差的影响，即使在很短的距离内也必须加以考虑。

综上所述，在面积为 100km^2 的范围内，不论是进行水平距离或水平角测量，都可以不考虑地球曲率的影响，在精读要求较低的情况下，这个范围还可以相应扩大。但地球曲率对高差的影响是不能忽略的。

思 考 题

1. 如何表示地球的形状和大小？
2. 高斯平面直角坐标系是怎样建立的？
3. 为什么要进行分带投影？
4. 测量学中的平面直角坐标系和数学中的平面直角坐标系有什么不同？为什么要这样规定？
5. 我国高程起算面是如何确定的？
6. 用水平面代替水准面对水平距离、水平角、高差有什么影响？