

应用测量学

张凤兰 王登杰 党星海 主编



山东省地图出版社

应 用 测 量 学

张凤兰 王登杰 党星海 主编

山东省地图出版社

内容提要

本书根据高等学校土木建筑类专业《测量学》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。内容包括:高程测量、角度测量、距离测量和直线定向、测量误差的基本理论、平面控制测量、GPS 全球定位系统、地形测绘及应用、曲线测设、工业与民用建筑中的施工测量、水利工程测量、线路工程测量、桥梁工程施工测量、工程建筑物的变形观测和工程施工监理中的测量工作等。内容丰富,具有一定的深度和广度。

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

应用测量学/张凤兰,王登杰,党星海主编.

—济南:山东省地图出版社,2002.10

ISBN 7-80532-588-X

I. 应… II. ①张…②王③党… III. 测量学 IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 076192 号

山东省地图出版社出版/发行

(济南市二环东路 6090 号)

(邮编:250014)

山东山大科苑印刷厂印刷

787×1092 毫米 1/16 开本 印张:20.25 467 千字

2002 年九月第 1 版 2002 年九月第一次印刷

印数:0001—2000 定价:22.0 元

前 言

本书是按照高等学校土木工程和水利工程类“测量学”课程教学大纲的要求，总结编者多年教学实践经验的基础上编写的。本书适用于土木工程、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，也可作为其他相关专业教学用书，以及工程技术人员用作参考书。

在编写工程中，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，对教材体系作了一些变动。主要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；第二篇控制测量只介绍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，主要有电子水准仪、全站仪的使用，GPS 定位系统，数字地形图的成图方法和使用等。另外，工程监理在工程中的作用日益加强，本书编写了有关测量监理的内容，这也是本书的特色之一。

本书由张凤兰、王登杰、党星海主编，陈继光主审。第一篇第一、二章、第三篇和第四篇各二章、第五篇第一章由山东大学张凤兰编写；第五篇第二、四、五、六章及本书中关于全站仪及其应用的所有章节由山东大学王登杰编写；第一篇第三、四章、第二篇两章由甘肃工业大学党星海编写；第一篇第五章、第五篇第三章由房栓社编写。全书由张凤兰修改定稿。本书附有习题集，由张凤兰编写；另附有实验报告及实习任务书，由王登杰和张凤兰编写。

在编写过程中，参考和引用了许多专家、学者的一些书籍和文献资料，在此表示由衷的感谢。

由于编者水平所限，书中可能存在不少缺点和错误，谨请广大读者批评指正。

编者
2002 年 9 月

目 录

第一篇 测量基础知识

第一章 绪论	1
1-1 测量学的任务及其在工程建设中的作用	1
1-2 地面点位的确定	2
1-3 用水平面代替水准面的限度	8
1-4 测量工作概述	11
第二章 高程测量	13
2-1 水准测量原理	13
2-2 DS3 型水准仪和水准尺	13
2-3 精密水准仪和水准尺	18
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	30
2-7 微倾式水准仪的检验与校正	30
2-8 水准测量误差及削减方法	32
2-9 电磁波测距三角高程测量	34
第三章 角度测量	40
3-1 角度测量原理	40
3-2 光学经纬仪类仪器设备	41
3-3 水平角观测	47
3-4 竖直角观测	49
3-5 光学经纬仪的检验与校正	51
3-6 角度测量误差分析及注意事项	55
第四章 距离测量与直线定向	58
4-1 钢尺量距方法	58
4-2 钢尺量距的误差分析	62
4-3 视距测量	63
4-4 电磁波测距	66
4-5 全站仪及其应用	73
4-6 直线定向	81
第五章 测量误差的基本理论	84
5-1 测量误差概述	84

5-2	评定精度的标准	87
5-3	观测值与算术平均值的中误差	89
5-4	观测值函数的中误差	92
5-5	不等精度观测的加权平均值及其中误差	98
5-6	测量精度分析实例	103

第二篇 平面控制测量

第一章	常规平面控制测量的方法	107
1-1	国家控制网及图根控制网的概念	107
1-2	导线测量	109
1-3	小三角测量	115
1-4	加密控制点方法	120
第二章	全球定位系统	124
2-1	概述	124
2-2	GPS 定位系统的组成	125
2-3	GPS 卫星定位基本原理	128
2-4	GPS 接收机及其工作原理	134
2-5	GPS 测量实施	138

第三篇 地形图测绘及其应用

第一章	地形测量	143
1-1	地形图的比例尺	143
1-2	地形图的分幅与编号	144
1-3	地形图图外注记	149
1-4	地形图图示	151
1-5	地籍图基本知识	157
1-6	地形图测绘方法	163
1-7	数字地形图成图方法	170
1-8	地籍图测绘方法	171
第二章	地形图的应用	173
2-1	地形图识读	173
2-2	地形图应用的基本内容	174
2-3	图形面积的量算	175
2-4	地形图在工程规划和设计中的应用	178
2-5	数字地形图应用方法	182

第四篇 测设基础知识

第一章	测设的基本工作	185
1-1	水平角、水平距离和高程的测设	185

1-2	点的平面位置的测设	187
1-3	已知坡度直线的测设	189
第二章	曲线放样	191
2-1	圆曲线放样	191
2-2	测设圆曲线遇障碍时的处理方法	194
2-3	复合曲线测设	197
2-4	竖曲线测设	202
2-5	全站仪在测设中的应用	203

第五篇 工程测量方法

第一章	工业与民用建筑中的施工测量	207
1-1	施工测量概述	207
1-2	建筑施工控制测量	209
1-3	民用建筑施工放样	212
1-4	工业建筑施工测量	217
1-5	竣工总平面图的编绘	221
1-6	激光技术在施工测量中的应用	222
第二章	线路工程测量	224
2-1	线路工程测量概述	224
2-2	公路中线测量	227
2-3	路线纵、横断面测量	233
2-4	路基边坡与边桩的放样	240
2-5	管道中线测量	242
2-6	管道纵横断面图测绘	243
2-7	管道施工测量	244
第三章	水利工程测量	247
3-1	水利工程测量概述	247
3-2	施工控制网的布设	248
3-3	混凝土重力坝的放样	250
3-4	渠道的选线及中线测量	253
3-5	渠道横断面测量	255
3-6	渠道纵横断面图的绘制	255
3-7	渠道施工断面放样	257
3-8	河道测量	258
第四章	桥梁工程施工测量	262
4-1	桥梁施工控制网的布设	262
4-2	桥墩基础施工测量	269
4-3	墩(塔)台施工测量	271
4-4	主梁施工测量	276

4-5	斜拉桥索道管精密定位测量	279
4-6	斜拉桥静、动载实验中的测量工作	281
第五章	工程建筑物的变形观测	283
5-1	概述	283
5-2	变形观测的精度及周期	284
5-3	垂直位移观测	286
5-4	水平位移观测	289
5-5	倾斜观测	292
5-6	建筑物裂缝与挠度观测	294
5-7	高塔柱的摆动观测	296
5-8	变形观测的成果整理与分析	297
第六章	工程施工监理中的测量工作	299
6-1	测量监理工作的任务及内容	299
6-2	桥梁工程施工测量监理	302
6-3	公路工程施工测量监理	306
6-4	工业建筑施工测量监理	310
6-5	民用建筑物施工测量监理	313

第一篇 测量基础知识

第一章 绪 论

1-1 测量学的任务及其在工程建设中的作用

测绘学是研究地球的形状和大小以及确定地面（包含空中、地表、地下和海洋）物体的空间位置，以及对于这些空间位置信息进行处理、储存、管理的科学。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。

测绘学按照研究对象和范围及采用技术的不同，又分为多个分支学科，如：

大地测量学——研究整个地球的形状和大小，解决大范围地区的控制测量和地球重力场问题。近年来随着空间技术的发展，大地测量正在向空间大地测量和卫星大地测量方向发展。

普通测量学——测量小范围地球表面形状时，不考虑地球曲率的影响，把地球局部表面当作平面看待所进行的测量工作。

工程测量学——研究各种工程在规划设计、施工放样、竣工验收和使用中测量的理论和方法。

摄影测量学——研究利用摄影或遥感技术获取被测物体的信息，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。特别是随着遥感技术的发展，摄影方式和研究对象日趋多样，不仅是固体的、静态的对象，即使是液体、气体以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——研究各种地图的制作理论、原理、工艺技术和应用的一门学科。研究内容主要包括地图编制、地图投影学、地图整饰、印刷等。现代地图制图学向着制图自动化、电子地图制作及地理信息系统方向发展。

在当前信息社会中，测绘资料是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。数字地球的数据就包括全球性的中、小比例尺的空间数据；包括局部范围的大比例尺的空间数据以及元数据；不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、人文和军事等等不同类别的数据。测绘技术及成果的应用面很广，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,而且对于现代化的武器装备,如远程导弹、空间武器及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研究、地壳变形、地震预报、地球动力学研究等科学研究也是不可缺少的工具。

应用测量学属于工程测量学范畴,主要面向土木建筑、环境、道路、桥梁、水利等学科。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。土木工程测量是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。应用测量学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。

(2) 研究在地形图上进行规划、设计的基本原理和方法

重点讲述在地形图上进行土地平整、土方计算、道路选线、房屋设计和区域规划的基本原理和方法。

(3) 研究建(构)筑物施工放样、建筑质量检验的技术和方法

施工放样测量是工程施工的依据。应用测量学研究是将规划设计在图纸上的建筑物、构筑物准确地标定和放样在地面上的技术和方法。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,为确保工程和使用的安全,应对建(构)筑物进行位移和变形监测。

总之,测量工作将贯穿于工程建设的整个过程。从事土木工程的技术人员必需掌握工程测量的基本知识和技能。应用测量学是工程建设技术人员的一门必修的技术基础课。

1-2 地面点位的确定

测量上确定地面点的空间位置,是采用在基准面上建立坐标系,通过对距离、角度、高差三个基本量的测量来实现的。测量的工作对象是地球,它选择的基准面,直接与地球的形状有关。

一、地球的形状和大小

地球自然表面是很不规则的曲面,有高山、丘陵、平原和海洋、江河、湖泊。其中最高的珠穆朗玛峰高于海平面 8848.49m,最低的位于太平洋西部的马里亚纳海沟低于海平面 11022m。但是这样的高低起伏,相对于地球半径 6371km 来说还是很小的,所以仍可将地球作为球体。地球自然表面的海洋面积约占 71%,陆地只占 29%。因此,地球总的形体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(重力等位

面), 水准面处处与铅垂线(重力作用的方向线)正交。与水准面相切的平面称为水平面。水准面有无限多个, 其中通过平均海水面的那个水准面称为大地水准面。大地水准面是测量工作的基准面。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。它也是高程基准面, 即地面某点的海拔高度是由大地水准面起算的。

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面又不易用数学式表达的曲面(图 1-1-1a)。为了便于正确地计算测量成果, 准确表示地面点的位置, 测量上选用一个大小和形状接近大地

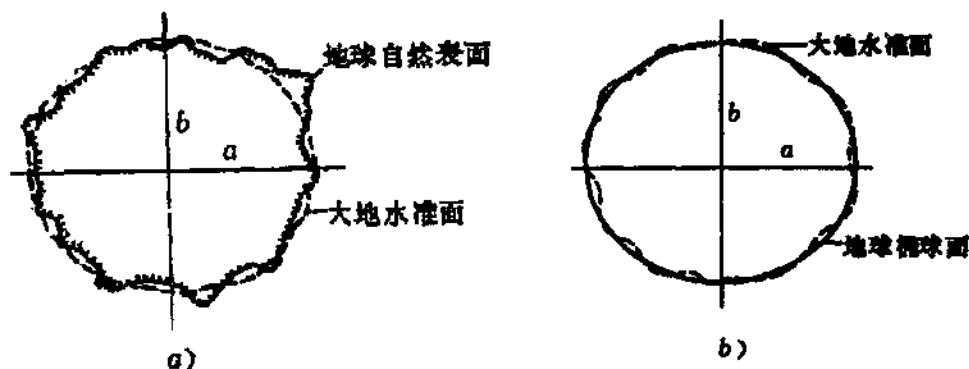


图 1-1-1 大地水准面与地球旋转椭球体面示意图

体的旋转椭球体作为地球的参考形状和大小(图 1-1-1b)。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:

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

式中 a 、 b 为参考椭球体几何参数。 a 为长半径, b 为短半径。参考椭球体扁率 α 应满足下式:

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

我国采用的参考椭球体几何参数有:

(1) 1954 年北京坐标系, 采用前苏联克拉索夫斯基参考椭球体参数:

$$a=6378245\text{m} \quad \alpha=1:298.3$$

(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在 1975 年推荐的 IUGG—75 地球椭球。其参数:

$$a=6378140\text{m} \quad \alpha=1:298.257$$

并于 1989 年在陕西泾阳县永乐镇某处建立了大地坐标原点, 进行了大地定位。

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。

二、测量坐标系

地面点的空间位置都与一定的坐标系统相对应。在测量上常用的坐标系有空间直角坐标

系、大地坐标系、高斯投影平面直角坐标系、平面独立直角坐标系等。地面点位常用三个量表示。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，两个量为坐标，它表示地面点沿着基准线投影到基准面上，在基准面上的位置。基准线可以是铅垂线，也可以是法线。基准面是大地水准面、平面或者是椭球体面。第三个量是高程，表示地面点沿着基准线到基准面的距离。

1、大地坐标系

是以参考椭球体面为基准面。地面点在大地水准面的投影位置，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 1-1-2 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 并与短轴垂直的平面与椭球相交的面为赤道面。 P 为地面点。含有短轴的平面为子午面。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。过格林威治天文台子午线的为本初子午线。经 $NP'S$ 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 。

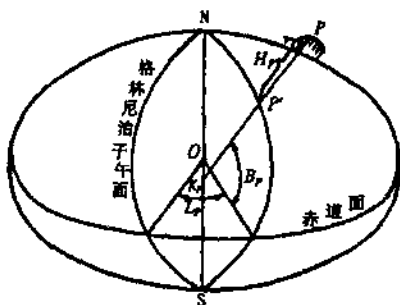


图 1-1-2 大地坐标系

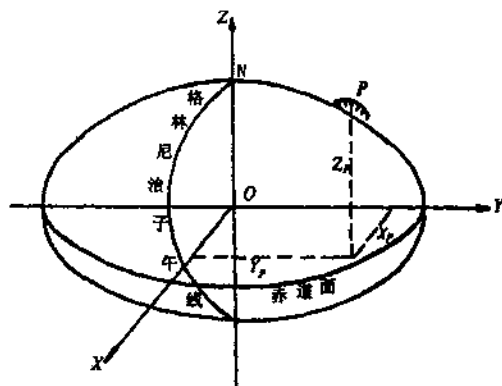


图 1-1-3 空间直角坐标系

国际规定，过格林威治天文台的子午面为零子午面。向东经度为正，向西为负，其值域为 $0^\circ \sim \pm 180^\circ$ 。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，见图 1-1-3。以球心 O 为坐标原点， ON 为 Z 轴方向，格林威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（参见《大地测量学》）。

2、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（图 1-1-4），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如图 1-1-5 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。

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。所以要将球面上的大地坐标按一定数学法则归算到平面上，即采用地图投影的理论绘制地形图，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。地图投影有等角投影、等面积投影和任意投影三种。

等角投影又称为正形投影，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。

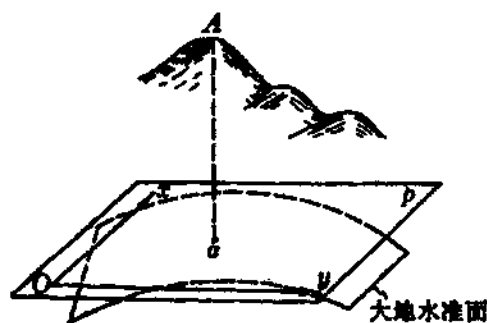


图 1-1-4 用水平面代替大地水准面

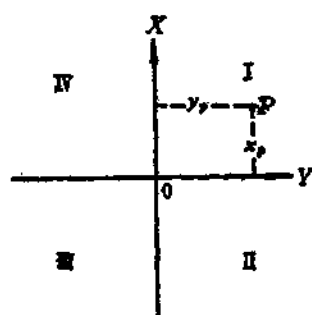


图 1-1-5 测量平面直角坐标系

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 ：

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

式中： ds ——投影后的长度； dS ——球面上的长度。

(1) 高斯投影的概念

如图 1-1-7，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它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，成为其它经纬线投影后的对称轴。

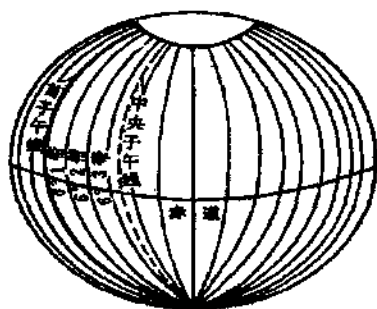


图 1-1-6 分带方法

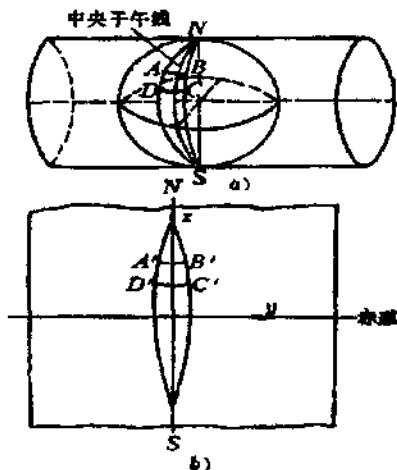


图 1-1-7 高斯投影方法

(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，见图 1-1-6 和 1-1-8。各带中央子午线经度可用下式计算：

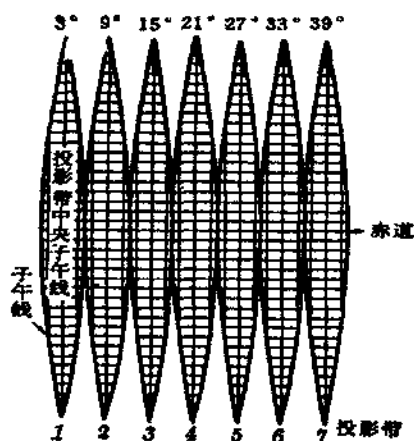


图 1-1-8 6° 带投影

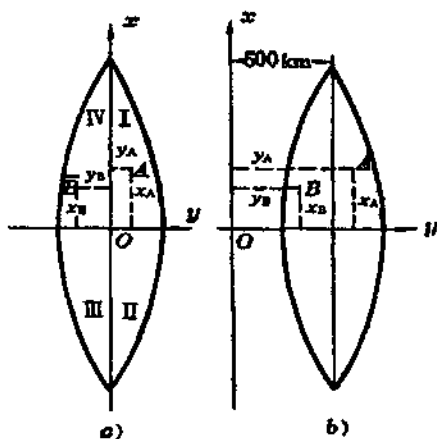


图 1-1-9 高斯平面直角坐标系

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

已知某点大地经度 L ，可按下式计算该点所属的带号：

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

3° 带是从东经 1°30' 起，每隔经差 3° 划分一带，共分为 120 带（图 1-1-10），各带中央子

午线经度为：

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

已知某点大地经度 L ，可按下式计算该点所属 3° 带的带号：

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

我国幅员辽阔，含有 11 个 6° 带，即从 13~23 带（中央子午线经度从 $75^\circ \sim 135^\circ$ ），21 个 3° 带，从 25~45 带。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，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 1-1-9 中，设 $y_A = +137680m$ ， $y_B = -274240m$ 。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， $y_A = 500000 + 137680 = 637680m$ ； $y_B = 500000 - 274240 = 225760m$ 。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。

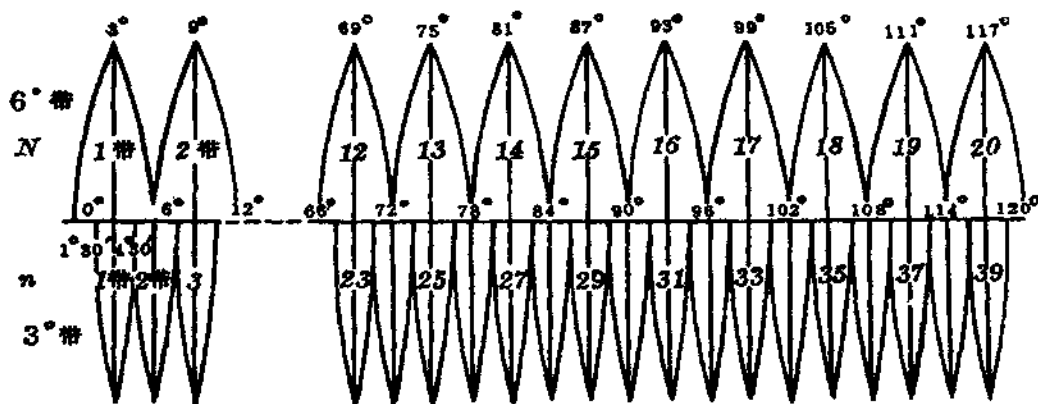


图 1-1-10 3° 带和 6° 带投影

4、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。由于高程基准面选择的不同，有不同的高程系统。测量上常用的高程基准面有参考椭球体面和大地水准面。其相应的高程为大地高和海拔高。

大地高：是以参考椭球体面为高程基准面。地面上某点沿法线到椭球体面的距离，用 H^* 表示，见图 1-1-11。

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。建国后，我国采用青岛验潮站长期观测资料求得黄海平均海水面作为我国高程基准面，称为“1956 年黄海高程系”。在青岛市观象山建立水准原点，其高程为 72.289m。后又将 1953 年到 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 年国家高程基准”。1987 年开始启用这个基准。

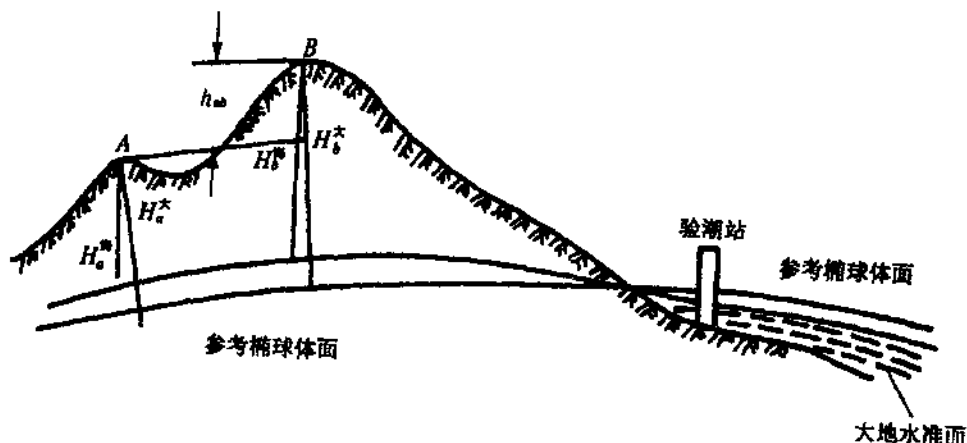


图 1-1-11 海拔高和大地高

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，见图 1-1-11。A、B 两点高差为：

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

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要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。

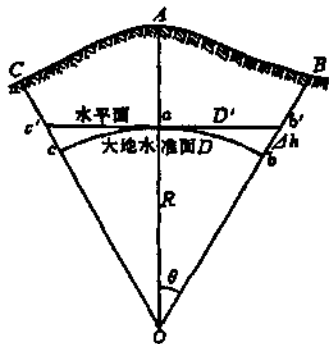


图 1-1-12 水平面代替水准面

一、对距离的影响

如图 1-1-12，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

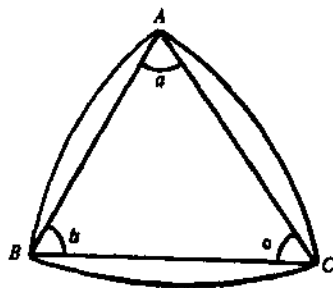


图 1-1-13 球面三角形和平面三角形角度差

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' , 现分析由此而产生的影响。设 A 、 B 两点在大地水准面上的距离为 D , 在水平面上的距离为 D' , 两者之差 ΔD , 即是用水平面代替水准面所引起的距离差异。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

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

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

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

$$\text{用 } \theta = D/R \text{ 代入上式, 则 } \Delta D = \frac{1}{3} \cdot \frac{D^3}{R^2}, \quad \frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{3} \cdot \frac{D^2}{R^2} \quad (1-1-10)$$

取地球平均半径 $R = 6371 \text{ km}$, D 用不同距离代入, 计算结果如下:

表 1-1-1

$D(\text{km})$	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

计算表明当两点相距 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。

二、对水平角测量的影响

从球面三角测量中可知 (图 1-1-13), 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 ε 。其值可用多边形面积求得:

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

式中: P ——球面多边形面积; R ——地球半径; ρ ——一弧度相应的秒值, $\rho = 206265''$ 。以不同面积代入, 可求出球面角超如下:

表 1-1-2

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

当测区面积为 100 km^2 时, 用水平面代替大地水准面, 对角度最大影响仅为 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。

三、对高差测量的影响

如图 1-1-12 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 Δh , 即为对高程的影响, 由图得

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

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

$\theta = D/R$, 故得