

高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

土木工程测量

许国辉 郑志敏 编



中国建筑工业出版社

高等学校规划教材

土木工程测量

许国辉 郑志敏 编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量/许国辉等编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 2

(高等学校规划教材)

ISBN 978-7-112-13924-8

I. ①土… II. ①许… III. ①土木工程—工程测量—教材
IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 013760 号

本书是为土木工程类及相近专业学习测量学的基本知识而编写的教材, 较全面和系统地介绍了测量学的基本知识、常规及现代的测量仪器和测量方法。全书共分 12 章, 第 1 章阐述了我国测绘工程的发展状况、测量坐标系统和高程系统的建立方法以及我国关于测绘工作的有关规定; 第 2、3、4 章介绍了常用测量仪器的基本构造及三项基本测量工作的测量方法; 其他各章分别介绍了控制测量的基本方法、测量误差理论的基本知识、全球定位系统及其定位原理、地形图的测绘方法及其在工程中的应用、建筑工程、道路工程及桥梁工程的测设内容及方法; 最后一章介绍了大型建筑的变形测量。本书适合作为土木工程及相关专业的本科教材, 也可作为从事相关工作人员的参考用书。

* * *

责任编辑: 齐庆梅 张 健

责任设计: 董建平

责任校对: 党 蕾 赵 颖

高等学校规划教材
土木工程测量
许国辉 郑志敏 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13³/₄ 字数: 342千字

2012年3月第一版 2012年6月第二次印刷

定价: 28.00元

ISBN 978-7-112-13924-8

(22022) ·

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

近十几年来，随着我国科学技术水平的不断进步，特别是信息技术的快速发展，测绘工程领域发生了巨大的变化。2000 国家大地坐标系统的建立以及全站仪测量技术、GPS 定位技术的广泛运用，测绘工程技术正逐步实现从传统测绘技术体系向现代化测绘技术体系的转变。本书是根据土木工程类测量学教学大纲的要求，并鉴于当前测绘工程技术的发展状况，为土木工程类及相近各专业的学生学习测量学的基本知识而编写的专业基础课教材。

本教材适用于建筑工程、交通工程、给水排水工程、城市规划、建筑学、土地管理、房地产管理、水利工程等专业，也可供从事相关专业的技术人员参考。

本教材综合了目前多所院校编写的相关教材以及多部学术专著的精髓，同时也融入了编者多年的专业实践经验以及教学体会。在教材内容的取材方面，本教材尽量体现实用性和先进性，舍弃了一些教材中已经过时和落后的内容，增加了能反映当前测绘技术发展方向的新内容。例如，在第 1 章介绍了我国最新启用的 2000 国家大地坐标系统及我国对测绘工作的有关规定，在第 3 章介绍了电子经纬仪的测量原理，第 4 章介绍了全站仪及其应用，第 5 章介绍了 GPS 拟合高程，第 7 章对 GNSS 全球卫星定位系统及 CORS 系统进行了介绍，第 8 章介绍了数字测图技术。在教材内容的结构方面，本着科学、合理、便于教学的原则，先介绍测量的三项基本工作和常用的仪器设备，再介绍测量的各项工作内容。在教材内容的叙述方面，力求概念准确，表达简洁，深入浅出，便于自学。

广州大学金向农副教授、汪善根副教授对本教材进行了审阅并提出了许多宝贵意见，在此诚表谢意。

由于编者水平有限，本教材不完善之处，敬请读者及专家批评指正，编者在此先行表示感谢！

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测量学及其发展概述	1
1.2 测量工作的基准线与基准面	2
1.3 高程系统	3
1.4 平面坐标系统	4
1.5 地球曲率对测量工作的影响	8
1.6 测量工作的基本原则	10
1.7 我国关于测绘工作的有关规定	11
练习与思考题	12
第 2 章 水准测量	14
2.1 水准测量原理	14
2.2 水准测量的仪器和工具	15
2.3 水准仪的使用	17
2.4 水准外业测量	20
2.5 水准测量内业计算	26
2.6 水准仪的检验	28
2.7 精密水准仪和电子水准仪简介	30
2.8 水准测量的误差分析	33
练习与思考题	33
第 3 章 角度测量	37
3.1 水平角测量原理	37
3.2 经纬仪的构造及其测角原理	37
3.3 经纬仪的使用	40
3.4 水平角观测	43
3.5 竖直角观测	47
3.6 经纬仪的检验	50
3.7 水平角测量误差	52
练习与思考题	53
第 4 章 距离测量与直线定向	55
4.1 距离测量	55
4.2 直线定向	59
4.3 坐标方位角的推算	61
4.4 坐标正算与坐标反算	62
4.5 全站仪测量	63
练习与思考题	65

第 5 章	控制测量	67
5.1	控制测量概述	67
5.2	导线测量	69
5.3	交会测量	77
5.4	三角高程测量	79
5.5	GPS 拟合高程测量	82
	练习与思考题	83
第 6 章	测量误差基本知识	86
6.1	测量误差概述	86
6.2	衡量精度的指标	88
6.3	算术平均值及白塞尔公式	89
6.4	误差传播定律及应用	90
	练习与思考题	95
第 7 章	全球卫星定位系统简介	97
7.1	GNSS 概述	97
7.2	GPS 定位原理	99
7.3	CORS 系统	101
7.4	GPS 测量的设计与实施	103
	练习与思考题	108
第 8 章	大比例尺地形图的测绘与应用	109
8.1	地形图的基础知识	109
8.2	大比例尺地形图的测绘	117
8.3	地形图应用	124
	练习与思考题	130
第 9 章	建筑施工测量	133
9.1	建筑施工测量概述	133
9.2	施工测设的基本工作	133
9.3	测设点的平面位置	135
9.4	建筑场地施工控制测量	137
9.5	工业与民用建筑施工放样	141
9.6	高层建筑物施工测量	145
9.7	竣工总平面图的编绘	146
	练习与思考题	147
第 10 章	道路工程测量	149
10.1	道路工程的初测	149
10.2	中线测量	150
10.3	圆曲线测设	152
10.4	缓和曲线测设	156
10.5	逐桩测设方法	161
10.6	道路纵、横断面测量	163

10.7 道路施工测量	169
练习与思考题	170
第 11 章 桥梁工程测量	172
11.1 桥梁工程控制测量	172
11.2 桥址地形测量	175
11.3 桥梁墩台中心的定位	177
11.4 桥梁施工测量	179
练习与思考题	185
第 12 章 建筑物变形观测	186
12.1 建筑物变形观测概述	186
12.2 建筑场地及基坑的变形监测	188
12.3 建筑物沉降观测	189
12.4 建筑物倾斜观测和裂缝观测	192
12.5 建筑物的水平位移观测	194
12.6 桥梁工程的变形监测	195
练习与思考题	197
附录 测量实验与实习	198
第一部分 测量实验与实习须知	198
第二部分 测量实验	200
第三部分 测量实习	207
参考文献	213

第 1 章 绪 论

1.1 测量学及其发展概述

测量学是研究地球的形状与大小，确定地球表面各种物体的形状、大小和空间位置的科学。按照研究范围和对象的不同，测量学分为大地测量学、普通测量学、工程测量学、摄影测量学、海洋测量学以及制图学等多个学科。土木工程测量属于普通测量学的范畴，并包含部分工程测量学的内容，其研究内容主要包括测定和测设两个方面。测定是指运用现代测量技术将地面上的地貌和地物位置按比例尺缩小后绘制成地形图，供工程的规划和设计使用。测设是指运用现代测量技术将地形图上设计的建筑物或构筑物的位置在实地标定出来，为工程项目的施工提供依据。

在国民经济建设和社会发展的过程中，测绘信息是重要的基础信息之一。测量技术在工业、农业、国防、交通、科学研究等多个领域都有广泛的应用。在土木工程建设中，从项目的规划到勘测设计以及施工竣工的各个阶段，都需要进行大量的测绘工作。例如，城市规划、给水排水、燃气管道等市政工程的建设以及工业厂房和高层建筑的建造，在这些工程建设的规划设计阶段，需要测绘各种比例尺的地形图，供建（构）筑物的平面及竖向设计之用；在施工阶段，需要将设计的建（构）筑物按其平面位置和高程在实地标定出来，作为施工的依据；工程竣工后，需要测绘竣工图，供日后扩建、改建、维修和城市管理应用；对于某些重要的建筑物或构筑物，在建设过程中和建成以后还需要进行变形观测，以保证建（构）筑物的安全。又例如，在铁路、公路的规划设计中，为了确定一条最经济最合理的路线，需要测量规划区域的带状地形图，在地形图上进行线路设计，然后将设计的路线标定在实地，以便进行施工。当路线跨越河流时，需要在构筑桥梁之前，绘制河流两岸的地形图，测定河流的水位、流速、流量和河床地形图以及桥梁轴线长度等，为桥梁设计提供必要的资料，最后将桥梁的设计位置在实地进行标定。

我国的测绘事业在中华人民共和国成立以来有了很大的发展。在 20 世纪 50 年代和 80 年代，我国分别建立了 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系，建立了遍及全国的大地控制网、国家水准网、基本重力网和卫星多普勒网，完成了国家基本图的测绘工作，限于当时的技术条件，这些测量工作基本上是依赖于传统的技术手段实现的。20 世纪 90 年代以后，随着科学技术水平的不断进步，我国的测绘事业进入快速发展时期。全站仪测量技术、GPS 空间定位技术、数字测图技术得到了迅速发展和广泛应用，导致了测量技术和方法的重大变革。进入本世纪后，我国在全国范围内构建了高精度的 2000 国家 GPS 大地控制网，在完成北斗一号卫星定位系统的基础上，又开始建立北斗二号全球卫星定位系统，并计划于 2020 年左右完成全球的卫星覆盖。全国许多省、市建立了连续运行的 GNSS CORS 系统。2007 年，我国又启用了 2000 国家大地坐标系统，它是以全球参考基准框架为背景、原点位于地球质量中心的三维国家大地坐标系统。全站仪测量技术、GPS 定位技术的广泛应用以及 2000 国家大地坐标系统的建立，不仅大大提高了测量

的精度和工作效率,进一步拓宽了测量学的应用领域,为我国的航天、海洋、地震、气象、水利、城市规划与建设、交通运输、地质调查、国土资源管理、防灾减灾、公共应急与预警等多个领域的科学研究提供信息服务,也为创建“数字中国”、“数字地球”奠定了基础,同时标志着我国的测绘技术正在逐步实现从传统的低精度、二维、静态、模拟测量技术向现代化的高精度、三维、动态、数字测量技术的转变,也标志着我国测绘技术的发展水平已经达到或接近国际的先进水平。

1.2 测量工作的基准线与基准面

1.2.1 基准线

测量工作是在地球表面进行的,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,重力线的方向线称为铅垂线。铅垂线是测量的基准线,测量中通常是把地面上的点沿铅垂线投影到某个曲面或平面上,通过测量该点的投影距离以及该点在投影面上的坐标,从而确定地面点的空间位置。

1.2.2 大地水准面

假想将静止不动的水面延伸穿过陆地、岛屿,将形成一个包围整个地球的闭合曲面,这个曲面称为水准面,与水准面上某点相切的平面称为水平面。水准面是受地球重力影响形成的,是一个连续的、不规则的曲面,其表面处处与铅垂线都垂直。由于水面的高度可变,因此符合这个特点的曲面有无数个。

假设占地球表面71%的海洋能静止的话,静止的海洋面也是一个水准面,该水准面与地球表面71%的部分完全重合,较好地反映了地球的形状与大小,称该水准面为大地水准面,而其他的水准面则称为假定水准面。由于受潮汐、风浪等影响,海水面永远不可能静止。在实际工作中,一般是用平均海洋面代替静止的海洋面,平均海洋面可以通过设立验潮站对海洋面进行长期观测来求得。

测量中,通常将地面上的点沿铅垂线投影到大地水准面上,通过确定该点的投影距离(即高程)以及该点投影到大地水准面上之后的位置(即天文经度和天文纬度)从而求得地面点的坐标。因此大地水准面是测量工作中的一个基准面,有时也指定某个假定水准面作为基准面。

1.2.3 地球椭球

由于地球内部的质量分布不均匀,地球各处引力的大小不同,致使重力方向发生变化,所以大地水准面实际上是一个复杂的、不规则的曲面。将地面点投影到大地水准面上之后,在这个复杂而又不规则的曲面上直接对所测的角度和距离进行数据处理非常困难。为了解决这个问题,需选择一个与大地水准面非常接近,并能用数学方程表示的几何形体来代替大地水准面。这个几何形体是由一个与大地水准面高度吻合的椭圆绕其短轴NS旋转而成的旋转椭球体,该旋转椭球体称为地球椭球体,其表面称为旋转椭球面(图1-1)。

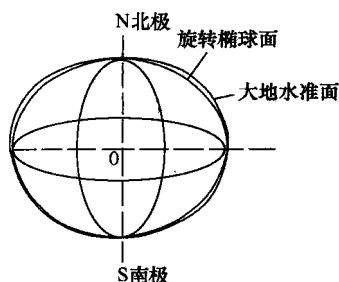


图 1-1 大地水准面与地球椭球体

由于地球椭球体可以用数学方程表示,在其表面上可

以对地面点投影后的距离和角度进行运算和处理，因此，地球椭球体也是测量的一个基准面。

1.3 高程系统

1.3.1 高程的概念

地面点沿铅垂线至高程基准面的距离称为该点的高程。要确定一个地面点的高程，首先应确定以某个水准面作为基准面，这个水准面可以是大地水准面，也可以是某个指定的假定水准面。当高程基准面为大地水准面时，该高程称为绝对高程或海拔，当高程基准面为某个假定水准面时，该高程称为假定高程或相对高程。高程通常用 H 加点名作下标表示，例如，地面点 A 的高程用 H_A 表示。

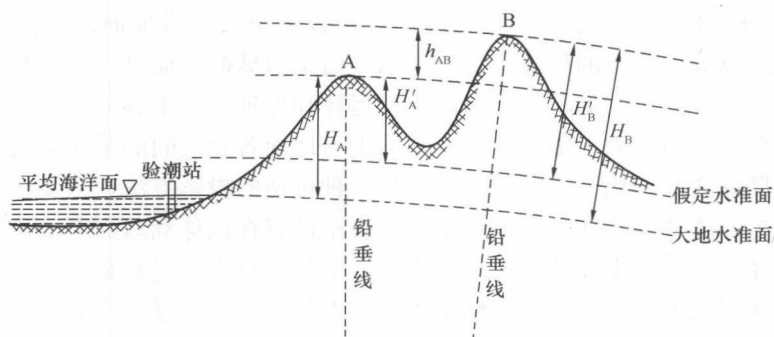


图 1-2 地面点的高程及高差

如图 1-2 所示，若以大地水准面为高程基准面，地面 A、B 两点的高程分别为 H_A 、 H_B ；若以某个指定的假定水准面为高程基准面，它们的高程分别为 H'_A 、 H'_B 。显然，当假定水准面与大地水准面不重合时， $H_A \neq H'_A$ ， $H_B \neq H'_B$ 。由此可见，相对于不同的高程基准面，地面上同一个点的高程不相同，或者说地面点的高程值与基准面的选择有关。

我国国家高程系统的基准面为大地水准面，其平均海洋面是以青岛验潮站历年观测的黄海海面的变化求得的。我国根据青岛验潮站 1956 年前的潮汐记录资料，用水准测量的方法将在验潮站确定的高程零点引测到水准原点（位于青岛市的观象山上），得到水准原点的高程为 72.289m，以这个大地水准面为高程基准建立的高程系称为“1956 年黄海高程系”，简称“56 黄海系”。

为了适应国家经济建设发展和考虑到国家水准网更新周期的需要，我国又采用青岛验潮站 1953 年至 1979 年的潮汐记录资料推算出水准原点的高程为 72.260m，此高程系称为“1985 国家高程基准”，简称“85 高程基准”。

由此可见，85 高程基准采用的大地水准面比 56 黄海系采用的大地水准面高出 0.029m。

1.3.2 高差的概念

地面 A、B 两点的高程之差称为该两点之间的高差，记为 h_{AB} 。其值为

$$h_{AB} = H_B - H_A \quad (1-1)$$

从式(1-1)容易推得 $h_{BA} = -h_{AB}$, 即高差具有方向性。从图 1-2 可以看出, 当水准面之间互为平行时, 地面两点的高差与高程基准面的选择无关。

地面两点的高低可以根据其高程来判断, 高程值越大, 该点越高; 高程值越小, 则该点越低。地面两点的高低也可以根据其高差来判断, 当 $h_{AB} > 0$ 时, $H_B > H_A$, 说明 B 点比 A 点高; 当 $h_{AB} < 0$ 时, $H_A > H_B$, 说明 A 点比 B 点高; 当 $h_{AB} = 0$ 时, $H_B = H_A$, 说明 AB 两点一样高。

需要注意的是, 只有当 A、B 两点的高程基准面相同时, 才能通过它们的高程或高差比较它们的高低。

1.4 平面坐标系

用地球椭球面代替大地水准面后, 地面各点投影至大地水准面上的位置, 可以用地面各点投影至地球椭球面上的相应位置来表示。由于地球椭球面是一个规则的曲面, 在椭球面上可以对地面各点之间的距离和角度进行运算和处理, 但不够方便, 需要通过某种投影方法将地球椭球面转换成平面, 然后在平面上对地面各点之间的距离和角度进行运算和处理。如果将椭球面转换成平面的投影方法是一种可逆的投影方法, 只要在平面上建立一个坐标系, 就可以用地面点在平面上的坐标来表示该点在地球椭球面上的位置。

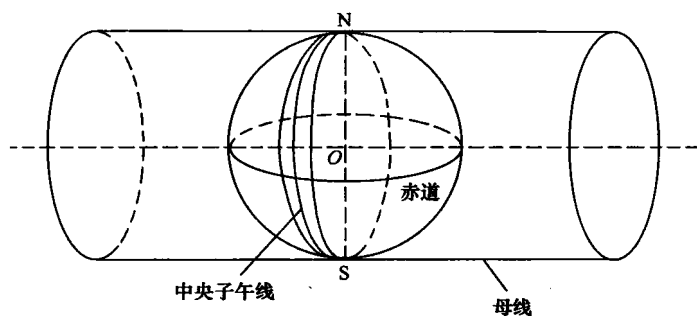
将地球椭球面转换成平面的投影方法很多。工程测量中, 通常是用高斯投影方法将地球椭球面转换成平面, 然后在平面上确定坐标原点的位置以及纵、横坐标轴的方向, 建立平面直角坐标系。

1.4.1 高斯平面直角坐标系

当测量区域较大时, 一般按高斯投影方法将地球椭球面转换成平面。如图 1-3 所示, 高斯投影是设想用一个空心椭圆柱横套在旋转椭球体外面, 若椭圆柱的长半轴和短半轴与椭球体的长半轴和短半轴相同, 这时椭圆柱必相切于椭球体上某一子午线。以该子午线为中心线, 向两侧各取一段经差(例如 3°)作为投影区域, 按保角投影的原理将该区域内的图形投影到椭圆柱的表面上。然后将椭圆柱沿着过南北极的母线切开, 展开成为平面, 并在该平面上定义平面直角坐标系。

与椭圆柱相切的子午线称为中央子午线, 中央子午线和赤道经投影后均变为直线。由于在旋转椭球体上, 中央子午线与赤道相互垂直, 所以经保角投影后的中央子午线与赤道也相互垂直。以投影后的中央子午线为坐标纵轴(x 轴), 北向为正; 赤道为坐标横轴(y 轴), 东向为正; 中央子午线与赤道的交点 O 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 1-4 所示。

为了将整个椭球面都投影成平面, 投影时将旋转椭球面按经线划分成若干个区域, 称为投影带, 每次投影一个投影带, 并将每个投影带进行编号。投影带的划分及其编号方法为: 从首子午线(过英国格林威治天文台的子午线)起每隔 6° 经差为一带, 将整个椭球面划分为 60 带。带号从首子午线开始, 自西向东依次编号, 用阿拉伯数字表示, 依次称为第 1 带, 第 2 带, ..., 第 60 带。位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线, 其经度为 $L_0 = 6N - 3$ (N 为该带的带号)。按这种分带方法投影得到的平面坐标系称为 6° 带高斯坐标系。



如图 1-3 高斯投影

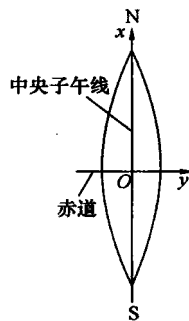


图 1-4 高斯平面直角坐标系

高斯投影方法是保角投影，即椭球面上任意两条弧线之间的夹角经投影后保持不变。如图 1-5a 所示，弧线 AB 与弧线 AC 在椭球面上的夹角为 β ，经高斯投影后，两弧线在平面上分别投影成曲线 ab 和曲线 ac （图 1-5b），两曲线的夹角仍然为 β 。但对于弧线 AB 的长度则不同，投影后，曲线 ab 的长度一般要大于椭球面上弧线 AB 的长度，这种现象称为投影变形。高斯投影变形的基本规律是：除中央子午线外，椭球面上任意一弧线的长度都会产生变形，弧线中点离中央子午线越近，变形越小；反之，变形越大。

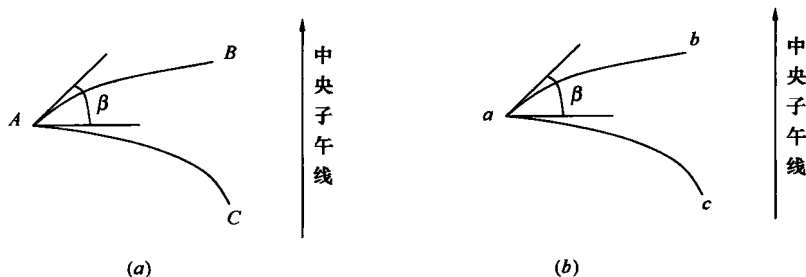


图 1-5 保角投影

为了减小高斯投影变形的影响，可每隔 3° 经差为一带进行投影，整个椭球面共投影 120 次，每次投影得到的平面坐标系称为 3° 带高斯坐标系。

3° 带的分带方法为：第 1 带的中央子午线与 6° 带第 1 带的中央子午线重合，以后每隔 3° 经差为一带，并自西向东依次编号，各带的中央子午线经度为 $L'_0 = 3n$ (n 为该带的带号)。 3° 带与 6° 带的关系如图 1-6 所示。

1.4.2 国家大地坐标系

(1) 椭球定位方式与坐标系

在地球椭球参数（如长半轴、扁率）确定以后，需要固定地球椭球与地球的关系，这项工作称为椭球定位。椭球定位有局部定位和地心定位两种方式。

局部定位要求在一定范围内椭球面与大地水准面的吻合为最佳，对椭球中心与地球质心的关系没有特殊要求。采用这种定位方法获得的坐标系，称为参心坐标系。

地心定位要求在全球范围内椭球面与大地水准面的吻合为最佳，并要求椭球中心与地球质心一致或最为接近。采用这种定位方法获得的坐标系，称为地心坐标系。

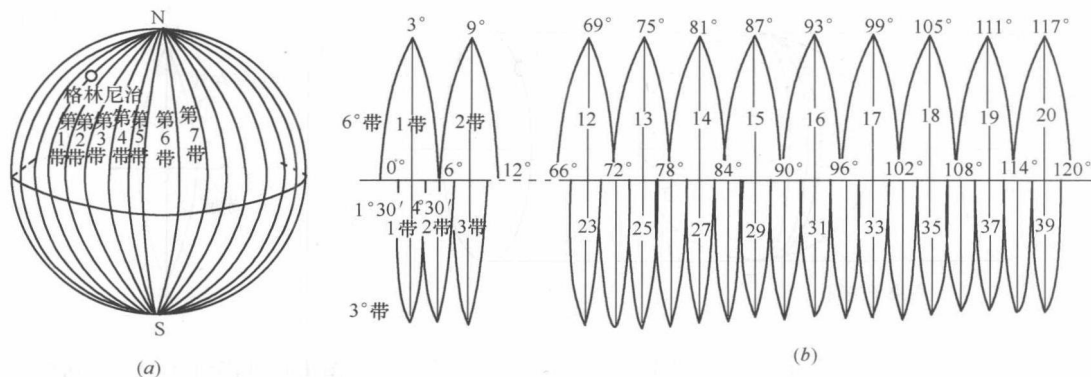


图 1-6 3°带与 6°带的关系

(2) 国家大地坐标系的种类

我国的国家大地坐标系有 1954 年北京坐标系、1980 年国家大地坐标系和 2000 年国家大地坐标系。

1) 1954 年北京坐标系

20 世纪 50 年代,在我国天文大地网建立初期,鉴于当时的历史条件,采用了克拉索夫斯基椭球元素 ($a=6378245\text{m}$, $\alpha=1/298.3$),并与前苏联 1942 年普尔科沃坐标系进行联测,通过计算建立了我国大地坐标系,定名为 1954 年北京坐标系。

1954 年北京坐标系属于参心坐标系,它的大地坐标原点在前苏联的普尔科沃。因此,对我国绝大多数地区而言,它不是最佳的参心坐标系。

2) 1980 年国家大地坐标系

1978 年我国利用观测得到的天文、地理、水文等资料,建立了 1980 年国家大地坐标系。该坐标系的椭球参数为:

长半轴 $a=6378140\text{m}$;

扁率 $\alpha=1/298.257$

1980 年国家大地坐标系是参心坐标系,大地原点设在我国中部——陕西省泾阳县永乐镇。椭球定位时,要求在我国范围内,椭球面与大地水准面之差的平方和为最小。

3) 2000 国家大地坐标系

随着科学技术的不断进步,特别是航天航空、卫星导航、电子信息等技术领域快速发展和普及应用,需要建立一个以全球参考基准框架为背景的坐标系统。为此,我国于 2008 年 7 月起,启用新的国家大地坐标系——2000 国家大地坐标系。

2000 国家大地坐标系属于地心坐标系,其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心。2000 国家大地坐标系的地球椭球参数为:

长半轴 $a=6378137\text{m}$

扁率 $\alpha=1/298.257222101$

(3) 我国平面坐标系的建立方法

全国统一的平面坐标系统是根据国际上通用的分带方法,按高斯投影方法建立的。我国领土所处的经度范围是东经 $73^{\circ}27'$ 至东经 $135^{\circ}09'$,按 6°带投影和 3°带投影的带号范围分别为 13~23, 25~45。由此可见,我国按高斯投影方法建立全国统一的平面坐标系统

时，需要明确各点的高斯坐标属于哪一个高斯投影带。

我国位于北半球，按高斯投影方法建立坐标系时，各带投影后，在我国领土范围内的任意一点，其 x 坐标值均为正， y 坐标值则有正有负，当点位于中央子午线以东时为正，以西时为负。例如图 1-7 中的 P 点位于中央子午线以西，其 y 坐标值为负值。对于 6° 带高斯坐标系，最大的 y 坐标负值约为 -334km 。为了避免 y 坐标出现负值，我国规定统一将每带的坐标原点向西平移 500km ，也就是给每点的 y 坐标值加上 500km ，使之均为正值，如图 1-7 所示。

为了明确某点的坐标经平移后位于哪一个投影带内，我国还规定在平移后的 y 坐标值前冠以带的编号。例如，图 1-7 中的 P 点位于 6° 带第 19 带内，投影后高斯平面直角坐标为 $x_P = 3754382\text{m}$ ， $y_P = -265214\text{m}$ ，经平移并冠以带号的坐标为 $X_P = 3754382\text{m}$ ， $Y_P = 19234786\text{m}$ 。

由于在我国领土范围内， 6° 带与 3° 带的投影带号不重复，因此可以根据测点的 Y 坐标值判断出该点的坐标是属于 6° 带坐标还是 3° 带坐标，并由此可推断出投影带的中央子午线经度。

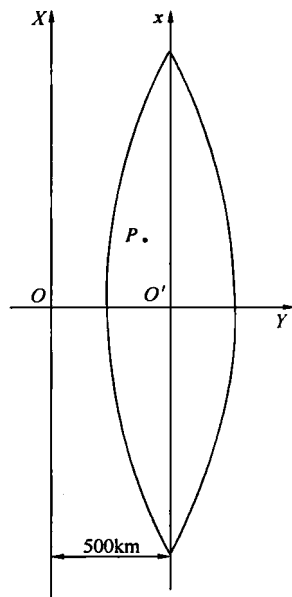


图 1-7 平移后的坐标系

1.4.3 独立坐标系

当测量区域比较小（测区半径小于 10km ）时，可将水准面近似地看成是一个水平面，这时可采用简易的方法建立独立的坐标系。建立的方法为：在测区以外西南角的某地选择一点作为坐标原点，以过该点的南北方向线为 x 轴，北向（即真北或磁北）为正；过该点的东西方向线为 y 轴，东向为正，如图 1-8 所示。或以测区内的主要建筑物的主轴方向为 x 轴，与其垂直的方向为 y 轴，在确定 x 轴的正方向后，顺时针确定 y 轴的正方向。

1.4.4 测量平面直角坐标系的特点

如图 1-9 所示，测量平面直角坐标系与数学中的笛卡儿坐标系主要有两点区别：

- (1) 纵、横轴的定义不同：在笛卡儿坐标系中，横轴定义为 x 轴，纵轴定义为 y 轴；而在测量平面直角坐标系中，横轴定义为 y 轴，纵轴定义为 x 轴；
- (2) 象限的规定不同：在笛卡儿坐标系中，四个象限的划分是按逆时针编号的；而在测量平面直角坐标系中，是按顺时针编号的。

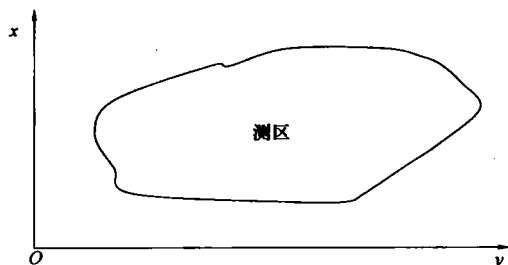


图 1-8 独立坐标系

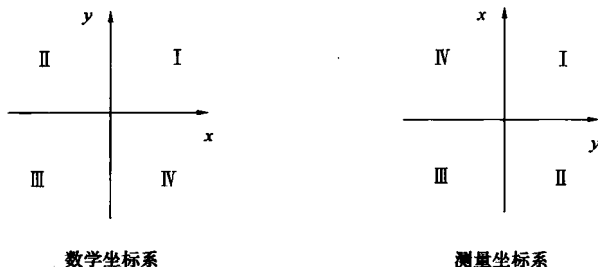


图 1-9 测量平面直角坐标系的特点

1.4.5 平面直角坐标系的坐标换算

在工程项目的建设过程中，一般要求采用国家统一的坐标系。但在实际工作中，由于有的工程项目规模较小，测量区域不大，或是由于工程项目的特殊性，采用国家统一的坐标系时，将导致投影变形太大，不能满足工程建设对测量的精度要求，这时往往采用独立坐标系。例如，在建筑物施工测量中，有时采用施工坐标系（亦称建筑坐标系），其坐标轴与建筑物主轴线一致或平行，便于用直角坐标法进行建筑物的放样。在道路施工、桥梁施工测量中也有同样的情况。

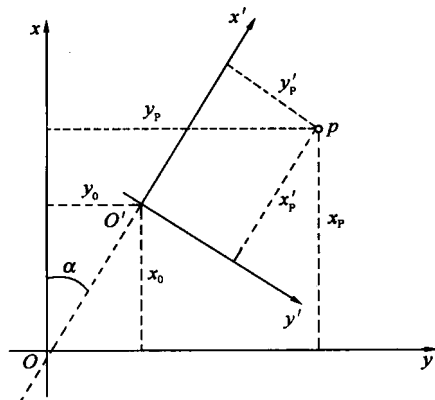


图 1-10 坐标系的坐标换算

当一个测区内有两个以上不同的坐标系统时，有时需要将一个点在某个坐标系下的坐标（称为旧坐标）换算为另一个坐标系下的坐标（称为新坐标）。如图 1-10 所示，已知旧坐标系的坐标原点 O' 在新坐标系下的坐标为 (x_0, y_0) ，旧坐标系的 x' 轴在新坐标系下的方位角为 α ，若 P 点在旧坐标系下的坐标为 (x'_p, y'_p) ，则 P 点在新坐标系下的坐标 (x_p, y_p) 可按下列式子进行换算：

$$\left. \begin{aligned} x_p &= x_0 + x'_p \cos \alpha - y'_p \sin \alpha \\ y_p &= y_0 + x'_p \sin \alpha + y'_p \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

同样，如果已知 P 点在新坐标系下的坐标为 (x_p, y_p) ，则 P 点在旧坐标系下的坐标为：

$$\left. \begin{aligned} x'_p &= (x_p - x_0) \cos \alpha + (y_p - y_0) \sin \alpha \\ y'_p &= -(x_p - x_0) \sin \alpha + (y_p - y_0) \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

1.5 地球曲率对测量工作的影响

当测区范围较小时，可将大地水准面近似地看成水平面，直接在水平面上进行测量工作的计算，本节将讨论用水平面代替大地水准面对距离、水平角及高程的影响。

1.5.1 对距离的影响

如图 1-11 所示，设地面 A 点为测区的地面中心点， B 点为测区内任一点，两点沿铅垂线投影到大地水准面上的点分别为 a 和 b 点， a 、 b 两点的弧长为 D 。过 a 点作大地水准面的切平面 H ， B 点在切平面上的投影为 b' 点， a 、 b' 两点的水平距离为 D' 。为了讨论方便，这里把大地水准面近似为半径为 R 的球形，这时有

$$D = R \cdot \theta \quad (1-4)$$

$$D' = R \cdot \tan \theta \quad (1-5)$$

式中， θ 为弧线 ab 所对应的圆心角。

用水平面代替大地水准面对距离的影响为

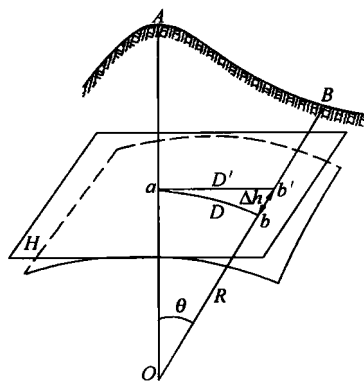


图 1-11 地球曲率的影响

$$\Delta D = D' - D = R(\tan\theta - \theta) \quad (1-6)$$

将 $\tan\theta$ 按级数展开, 略去高次项, 得

$$\tan\theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 \quad (1-7)$$

代入式 (1-6), 并注意到 $\theta = \frac{D}{R}$, 可推得

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-8)$$

等式两端同除以 D , 得相对误差

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-9)$$

取 $R=6371\text{km}$, $D=10\text{km}$, 由式 (1-9) 计算得相对误差为 $1/1200000$, 这样小的误差, 就是对精密测量来说也是允许的。因此, 在半径为 10km 的范围内, 用水平面代替大地水准面, 可以不考虑地球曲率对距离的影响。

1.5.2 对水平角的影响

根据球面三角形的理论, 球面三角形的三内角之和与 180° 之差大于零, 称为球面角超。球面角超的大小与球面三角形的面积有关, 表 1-1 列出了对应于不同面积的球面三角形, 球面角超的大小值。

球面三角形面积与球面角超的关系

表 1-1

球面三角形面积 (km^2)	10	50	100	500
球面角超 ($''$)	0.05	0.25	0.51	2.54

从表 1-1 可以看出, 当面积小于 100km^2 时, 对每个水平角的平均影响不超过 $0.51''/3 < 0.2''$ 。由此可见, 用水平面代替大地水准面, 对于一般工程而言, 可以不考虑地球曲率对水平角的影响。

1.5.3 对高程的影响

在图 1-11 中, 用水平面代替大地水准面对高程所产生的影响为 $\Delta h = \overline{bb'}$, 其值为

$$\Delta h = R\sec\theta - R = R(\sec\theta - 1) \quad (1-10)$$

将 $\sec\theta$ 按级数展开, 略去高次项后, 可推得

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R} \quad (1-11)$$

对应于不同的 D 值计算结果见表 1-2。

用水平面代替大地水准面对高程的影响

表 1-2

距离 D (m)	50	100	200	500	1000
Δh (mm)	0.2	0.8	3.1	19.6	78.5

从表 1-2 可以看出,用水平面代替大地水准面后,对高程的影响非常大。当 $D=200\text{m}$ 时, $\Delta h=3.1\text{mm}$,这对于一般工程建设来讲是不允许的。因此,测量的高程基准面不能采用水平面,而必须采用大地水准面或某个假定水准面。

1.6 测量工作的基本原则

前面已提到,在工程建设中,测量工作的主要内容是测定和测设。为了保证测量的精度满足工程建设的需要,提高工作效率,测量工作应按一定的原则有序开展。

图 1-12 是某工厂生活规划区的示意图,需要测量该区域的地形图作为生活区的设计提供依据。图中 A、B 两点的坐标和高程是已知的,称为已知点。测区内有山丘、房屋、河流、小桥、公路等,如果要求测绘出图中虚线范围附近的所有地物和地貌,仅用 A、B 两个已知点直接测量地形图是很困难的。利用 A、B 两个已知点,可以测绘出西面的河流、小桥,南面的山丘、房角。因为不通透,山北面的地物和地貌就无法直接测量。因此还需要在山北面布置一些点,如图中的 C、D、E、F 点,称为控制点。在测绘地形图之前,先要测出这些点的坐标和高程,这项工作称为控制测量。然后利用 A、B 两个已知点和这些控制点测绘出图中虚线范围附近的所有地物和地貌,这项工作称为碎部测量。

由于控制点的数量有限,可以用较精密的仪器和较精确的测量方法获得其坐标和高程。在获得控制点的坐标和高程后,可以利用这些控制点和已知点同时测量所有地物和地貌的碎部点。碎部点的数量很多,其测量的精度要求也相对较低,可以用一般的仪器和普通的测量方法获得其坐标和高程。采取这种测量方式,既可以控制测量误差的不断积累,又能提高测量的工作效率。

测设工作也是如此。设图 1-13 是图 1-12 所示地区的地形图,设计人员在地形图上已经设计出了 P、Q、R、S 多幢建筑物的位置。在开始施工前,需根据这些建筑物附近的控制点以及这些建筑物的房角设计坐标,将建筑物的设计位置按一定的测量方法在实地标定出来,作为以后施工的依据。如果在测区附近仅有 A、B 两个已知点,并用这两个已知点在实地标定所有建筑物的位置,显然是不方便的,其测设精度也难以得到保证。例如,

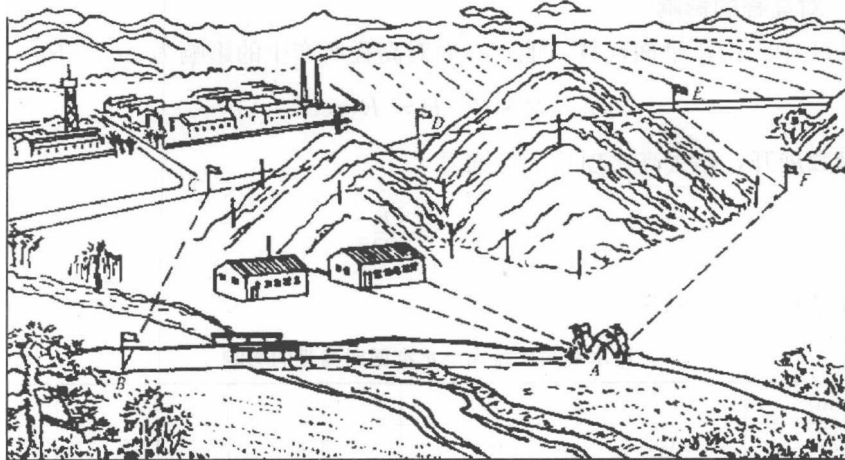


图 1-12 地形测量示意图