



# 土木工程

TUMU GONGCHENG  
CELIANG

# 测量

主编 杨小明



中国建材工业出版社

# 土木工程测量

主 编 杨小明  
副主编 颜树强

中国建材工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量/杨小明主编. —北京:中国建材工业出版社, 2006.9

ISBN 7-80227-072-3

I. 土… II. 杨… III. 土木工程—工程测量  
IV. TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 083420 号

## 内 容 提 要

本书以测量学的基本概念、原理、方法为主线,以土木工程测量教学大纲为框架,重点介绍了土木工程学科所要求的测量知识、技术、方法,同时对当代测量学科的高新技术和方法进行了详细地介绍,如电子水准仪、电子经纬仪、全站仪、全球定位系统(GPS)、数字化测图技术等。本书共分十二章,分别是绪论、水准测量、角度测量、距离测量与直线定向、误差的基本知识、小地区控制测量、地形图的基本知识测绘与应用、测设的基本知识、线性工程测量、大型建筑工程测量、GPS 技术与应用和测量实验及课堂作业。

全书章节紧凑,内容精炼,重点突出,适应于土木工程各专业的教学要求。既可作教材使用,也可作为土木工程技术人员参考用书。

## 土木工程测量

主编杨小明 副主编颜树强

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街6号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:17.75

字 数:438千字

版 次:2006年9月第1版

印 次:2006年9月第1次

定 价:29.00元

网上书店: [www.ecool100.com](http://www.ecool100.com)

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

已有  
架,

调方  
结合  
对有  
后的

和  
军  
全  
中,

敬

# 前 言

随着高等教育新专业目录的实行,全国各高校土木工程专业招生已有数年。编者根据这几年土木工程测量教学实践,以教学大纲为框架,编写本教材。

教材本着理论联系实际、与时俱进的思想,在讲述理论的同时,强调方法和应用。对一些内容进行了删减,使之更适用于现代教学环节。结合土木工程专业、交通工程专业、工程管理专业、建筑学等专业设置,对有关章节增加了相关专业对测量理论、方法的实际需要的内容,对以后的专业学习起到了基础和促进作用,更具有针对性。

本书由河北工业大学杨小明主编,颜树强为副主编。其中第一章和第十二章由王春明执笔,第二、四章由任海峰执笔,第三、九章由王德军执笔,第八、十、十一章由颜树强执笔,第五、六、七章由杨小明执笔。全书由杨小明、颜树强统稿,北京林业大学张远智主审。在编写的过程中,得到各兄弟院校同行的热情帮助,谨此表示感谢。

尽管我们倾注热情、才能,也力尽完美,但必会有不当和遗漏之处,敬请谅解。也希望同行、前辈批评指正。

编 者  
2006.6

## 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 测量学研究对象、任务和作用 .....	1
第二节 测量发展的历史和现状 .....	2
第三节 地球的形状和大小 .....	6
第四节 测量坐标系 .....	7
第五节 用水平面代替水准面的限度 .....	12
第六节 测量工作的程序和原则 .....	14
<b>第二章 水准测量</b> .....	17
第一节 高程测量概述 .....	17
第二节 水准测量原理 .....	17
第三节 水准测量的仪器和工具 .....	19
第四节 水准仪的操作使用 .....	23
第五节 水准测量的外业 .....	26
第六节 水准测量的内业 .....	30
第七节 微倾式水准仪的检验和校正 .....	32
第八节 现代水准测量仪器介绍和精密水准仪的使用 .....	35
第九节 水准测量误差及其注意事项 .....	41
<b>第三章 角度测量</b> .....	47
第一节 水平角测量原理 .....	47
第二节 经纬仪的构造及其使用 .....	47
第三节 水平角的观测 .....	55
第四节 竖直角观测 .....	58
第五节 经纬仪的检验和校正 .....	61
第六节 角度测量的误差及其注意事项 .....	67
第七节 电子经纬仪 .....	69
<b>第四章 距离测量与直线定向</b> .....	75
第一节 钢尺量距 .....	75
第二节 视距测量 .....	82
第三节 光电测距 .....	85

第四节	直线定向 .....	92
第五节	罗盘仪测定磁方位角 .....	96
第六节	用陀螺经纬仪测定真方位角 .....	98
<b>第五章</b>	<b>测量误差理论 .....</b>	<b>104</b>
第一节	测量误差概述 .....	104
第二节	偶然误差的统计特性 .....	105
第三节	评定精度的指标 .....	108
第四节	误差传播定律 .....	110
第五节	等精度直接观测值的最可靠值 .....	114
第六节	非等精度直接观测值精度评定 .....	117
<b>第六章</b>	<b>控制测量 .....</b>	<b>123</b>
第一节	概述 .....	123
第二节	导线测量 .....	127
第三节	导线测量内业 .....	129
第四节	交会定点 .....	138
第五节	高程控制测量 .....	142
第六节	全站仪 .....	146
<b>第七章</b>	<b>地形图的测绘与应用 .....</b>	<b>152</b>
第一节	地形图概述 .....	152
第二节	地形图基本知识 .....	153
第三节	地物符号 .....	158
第四节	地貌符号 .....	162
第五节	大比例尺地形图测绘 .....	166
第六节	数字化测图 .....	172
第七节	地形图的应用 .....	177
第八节	地形图在专业上的应用 .....	180
<b>第八章</b>	<b>测设的基本工作 .....</b>	<b>188</b>
第一节	测设已知水平距离 .....	188
第二节	测设已知水平角 .....	190
第三节	测设已知高程 .....	190
第四节	测设点的平面位置 .....	192
第五节	已知坡度线的测设 .....	194
<b>第九章</b>	<b>线性工程测量 .....</b>	<b>196</b>
第一节	线性工程测量概述 .....	196

第二节	曲线测设	198
第三节	纵横断面图绘制及土方量计算	206
第四节	铁路工程测量	209
第五节	公路工程测量	220
第六节	管线测量	222
<b>第十章</b>	<b>大型建筑施工测量</b>	<b>228</b>
第一节	施工测量概述	228
第二节	测量坐标的变换	229
第三节	工业厂房施工测量	231
第四节	高层建筑物施工测量	235
第五节	建筑物的变形观测	237
第六节	地下建筑施工测量	244
第七节	竣工图的测绘与编绘	247
<b>第十一章</b>	<b>全球定位系统(GPS)</b>	<b>250</b>
第一节	概 述	250
第二节	GPS 定位系统的组成	251
第三节	GPS 卫星定位的基本原理	254
第四节	GPS 测量的实施	258
<b>第十二章</b>	<b>测量实验</b>	<b>261</b>
第一节	测量实验须知	261
第二节	测量实验及课堂作业(一)	262
第三节	测量实验及课堂作业(二)	263
第四节	测量实验及课堂作业(三)	264
第五节	测量实验及课堂作业(四)	266
第六节	测量实验及课堂作业(五)	268
第七节	测量实验及课堂作业(六)	268
第八节	测量实验及课堂作业(七)	269
第九节	测量实验及课堂作业(八)	270
第十节	测量实验及课堂作业(九)	271
第十一节	测量实验及课堂作业(十)	273
第十二节	测量实验及课堂作业(十一)	274
<b>参考文献</b>		<b>276</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 测量学研究对象、任务和作用

### 一、测量学的研究对象、任务及分类

测量学是研究地球的形状和大小以及确定地面点位(这里所说的地面包括空中、陆地和地下)的科学。它的内容包括测定和测设两个部分。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、构筑物的平面位置在地面上标定出来,作为施工的依据。

测量学的主要任务有三个方面:一是研究确定地球的形状和大小,为地球科学提供必要的数据和资料;二是研究如何表达地球表面的空间信息;三是将图纸上的设计成果测设至现场。

测量学按照研究范围和对象的不同,产生了许多分支科学。

#### 1. 大地测量学

研究整个地球的形状和大小,解决大区域控制测量和地球重力场问题,属于大地测量学的范畴。其基本任务是建立国家大地控制网,测定地球的形状、大小和重力场,为地形测图和各种工程测量提供基础起算数据;为空间科学、军事科学及研究地壳变形、地震预报等提供重要资料。近年来,因人造地球卫星的发射和科学技术的发展,大地测量学又分为常规大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学等。

#### 2. 普通测量学

研究小范围地球表面形状时,不顾及地球曲率的影响,把地球局部表面当作平面看待所进行的测量工作,属于普通测量学的范畴。

#### 3. 摄影测量学

利用摄影像片来测定物体的形状、大小和空间位置的工作,属于摄影测量学的范畴。根据获得影像的方式及遥感距离的不同,摄影测量学又可分为地面摄影测量学、航空摄影测量学、水下摄影测量学和航天摄影测量学等。特别是由于遥感技术的发展,摄影方式和研究对象日趋多样,不仅是固体的、静态的对象可以进行摄影测量,就连液体、气体以及随时间而变化的动态对象,都可应用摄影测量方法进行研究。

#### 4. 海洋测量学

以海洋和陆地水域为对象所进行的测量和海图编制工作,属于海洋测量学的范畴。

#### 5. 工程测量学

研究工程建设和自然资源开发中各个阶段进行的控制和地形测绘、施工放样、变形监测的理论等等及各种与测量相关的工作,属于工程测量学的范畴。工程测量是测绘科学与技术



国民经济和国防建设中的直接应用。按工程建设的进行程序,工程测量可分为规划设计阶段的测量;施工兴建阶段的测量和竣工后的运营管理阶段的测量。按工程测量所服务的工程种类,也可分为建筑工程测量、线路测量、桥梁与隧道测量、矿山测量、城市测量和水利工程测量等。

## 6. 地图学

利用测量所得的成果资料,研究如何投影、编绘和制、印各种地图的工作,属于地图制图学的范畴。其基本任务是利用各种测量成果编制各类地图,其内容包括地图投影、地图编制、地图整饰和地图印制等。

本教材主要介绍普通测量学及部分工程测量学的内容。

## 二、测量学在国家经济建设和发展中的作用

在 21 世纪的信息社会中,测绘资料是重要的基础信息之一。测绘工作承担着重要的信息采集、整理、加工及信息建库的任务。在国民经济建设、国防建设和科学研究方面,测绘工作被称为国家建设的尖兵。测绘科学应用很广,在国民经济和社会发展各种规划及地籍管理中,首先要有地形图和地籍图;在各项工农业基本建设中,从勘测设计阶段到施工、竣工阶段,都需要进行大量的测绘工作;在国防建设中,军事测量和军用地图是现代大规模的诸兵种协同作战不可缺少的重要保障。至于远程导弹,空戒武器、人造卫星或航天器的发射,耀保证它精确入轨,随时校正轨道和命中目标,除了应测算出发射点和目标点的精确坐标、方位、距离外,还必须掌握地球形状、大小的精确数据和有关地域的重力场资料;在科学实验方面,诸如空间科学技术的研究、地壳的形变、地震预报以及地极周期性运动的研究等,都要应用测绘资料;即使在国家的各级行政管理工作中,测量和地图资料也是不可缺少的重要工具。

测绘科学在建筑类专业的工作中有着广泛的应用。例如:在勘测设计的各个阶段,要求有各种比例尺的地形图,供城镇规划、选择厂址、管道及交通线路选线以及总平面图设计和竖向设计之用;在施工阶段,要将设计好的建筑物、构筑物的平面位置和高程测设于实地,以便进行施工;施工结束后,还要进行竣工测量,绘制竣工图,供日后扩建和维修之用;即使竣工以后,对某些大型及重要的建筑物和构筑物还要进行变形观测,以保证建筑物的安全使用。

土木类专业的学生,学习完本课程后,要求达到掌握普通测量学的基本知识和基本理论;能正确使用工程水准仪、工程经纬仪等仪器和工具;了解大比例尺地形图的成图原理和方法;在工程设计和施工中,具有正确应用地形图、有关测量资料的能力和进行一般工程施工测设的能力,以便能灵活应用所学的测量知识为其专业服务。

## 第二节 测量发展的历史和现状

### 一、测绘学的发展简史

科学的产生和发展是由生产决定的。测绘科学也不例外,它是人类长期以来,在生活和生产方面与自然界斗争的结晶。

在测时方面,为了不误农时,人们远在颛顼高阳氏时就已开始观测日、月、五星,来确定一年的长短。春秋战国时编制了“四分历”,确定一年为 365.25 日,这与罗马人采用的“儒略历”相同,但比其早四五百年。南北朝时祖冲之所测的朔望月为 29.530 588 日,与现今采用的数值

只差 0.3 秒。宋代杨忠辅编制的《统天历》，一年为 365.242 5 日，与现代值相比，只有 26 秒误差。

在研究地球形状和大小方面，公元前就已有有人提出丈量子午线上的弧长，以推断地球的大小、形状。唐代在僧一行的主持下，实量了从河南白马，经过浚仪、扶沟到上蔡的距离和北极的高度，算得子午线上一度的弧长为 132.31km，为人类正确认识地球做出了贡献。17 世纪末，牛顿和惠更斯从力学的观点，提出地球是两极略扁的地扁说，从此与地圆说展开了一场大论战，直至 1739 年经过弧长测量才证实了地扁说的正确性，纠正了长期以来的地圆说，为正确地认识地球奠定了理论基础。1743 年，法国克莱洛论证了地球几何扁率与重力扁率之间的关系，为物理大地测量打下了基础。1849 年，斯托克斯提出利用重力观测资料确定地球形状的理论，之后又提出了用大地水准面代表地球形状，从此确认了大地水准面比椭球面更接近地球的真实形状的观念。

在地图测绘方面，目前见于记载最早的古地图是西周初年的洛邑城址附近的地形图。战国时管仲著有《管子》一书，书内第十卷（地图第二十七）专门论述了地图的内容和重要用途。可惜的是，秦代以前的古地图都已失传，现在能见到的最早的古地图是长沙马王堆三号墓出土的公元前 168 年陪葬的古长沙国地图和驻军图，图上有山脉、河流、居民地、道路和军事要素。西晋时裴秀编制了《禹贡地域图》和《方丈图》，并创立了地图编制理论——《制图六体》。此后历代都编制过多种地图，如明代郑和下西洋绘制的《郑和航海图》；清代康熙年间绘制的《皇舆全览图》；1934 年，上海申报馆出版的《中华民国新地图》等。我国历史上能绘制出如此水平的地图，是与测量技术的发展相关联的。我国古代测量长度的工具有丈杆、测绳、步车和记里鼓车，测量高程的仪器工具有矩和水平（相当于水准仪），测量方向的仪器有望筒和指南针。测量技术的发展与数理知识紧密关联。公元前问世的《周髀算经》和《九章算术》都有利用相似三角形进行测量的记载。三国时魏人刘徽所著的《海岛算经》，介绍利用丈杆进行两次、三次甚至四次测量（称重差术），求解山高、河宽的实例，大大促进了测量技术的发展。我国古代的测绘成就，除编制历法和测绘地图外，还有：北宋时沈括在《梦溪笔谈》中记载了磁偏角的发现。元代郭守敬在测绘黄河流域地形图时，“以海面较京师至汴梁地形高下之差”，是历史上最早提出“海拔”概念的人。17 世纪以来，在“资产阶级革命”的推动下，生产力有所发展。为了满足生产力发展的需要，科学技术发展迅速。望远镜的应用，为测绘科学的发展开拓了光明前景，使测量方法、测量仪器有了重大的改变，三角测量方法的创立，大地测量的广泛开展，对进一步研究地球的形状和大小以及测绘地形图都起了重要作用。

在测量理论方面也有不少创新，高斯的最小二乘法理论和横圆柱投影理论，就是其中的重要例证，一直使用至今。古希腊的托勒密在《地理学指南》一书中，首先提出了用数学的方法将地球表象描绘成平面图的问题，已经提出了原始的地图投影的问题。我国西晋时期的裴秀总结了前人的制图经验，拟定了小比例尺地图的编制法规，称《制图六体》，是世界上最早的制图规范之一。此后历代都编制过多种地图。但是，测绘工作仍是用手工生产方式。1903 年飞机的发明，使航空摄影测量成为可能，不但使成图工作提高了速度，减轻了劳动强度，而且改变了测绘地形图的工作现状，为由手工业生产方式向自动化方式转化开创了光明的前景。

忆往昔，测绘科学技术的发展也和其他科学技术的发展一样，由原始的、落后的方式，经漫长的人类社会发展的历程，一步步发展起来。生产力的发展促进了测绘科学的发展，同时测绘科学技术的发展又为生产力的发展创造了条件。

## 二、现代测绘学的发展现状

20世纪中叶,新的科学技术得到了快速发展,特别是电子学、信息学、计算机科学和空间科学等,在其自身发展的同时,给测绘科学的发展开拓了广阔的道路,创造了发展的条件,推动着测绘技术和仪器的变革和进步。测绘科学的发展很大部分是从测绘仪器发展开始的,然后再使测绘技术发生重大的变革。1947年,光波测距仪问世,20世纪60年代激光器作为光源用于电磁波测距,使长期以来艰苦的手工业生产方式的测距工作,发生了根本性的变革,彻底改变了大地测量工作中以测角换算距离的面貌,因此除用三角测量外,还可用导线测量和三边测量。随着光源和微处理机的问世和应用,使测距工作向着自动化方向发展。氦氖激光光源的应用使测程达到60km以上,精度达到 $\pm(5\text{mm} + 5 \times 10^{-6} \cdot D)$ 。固体激光器的应用使测程大大加大,因此测月、测卫工作得以实现。20世纪80年代开始,多波段(多色)载波测距的出现,抵偿、减弱了大气条件的影响,使测距精度大大提高。ME5 000测距仪达到了 $\pm(0.2\text{mm} + 0.1 \times 10^{-6} \cdot D)$ 的标称精度。与此同时,砷化钾发光管和激光光源的使用,使测距仪的体积大大减小,重量减轻,向着小型化大大迈进了一步。

除了光波测距以外,微波测距也有很大发展,20世纪80年代之后,全自动化的微波测距仪CA-100、WM-20等已用于军事等部门。

测角仪器的发展也十分迅速,它和其他仪器一样,随着科学技术的进步而发展,从金属度盘发展为光学度盘。近20年来,伴随着电子技术、微处理机技术的广泛应用,经纬仪已使用电子度盘和电子读数,且能自动显示、自动记录,完成了自动化测角的进程,自动测角的电子经纬仪问世,并得到应用。同时,电子经纬仪与测距仪结合,形成了电子速测仪(全站仪)。其体积小,重量轻,功能全,自动化程度高,为数字化测图开拓了广阔前景。现在又推出了智能经纬仪,连瞄准目标也可自动化。从此将结束测角、测距手工方式的漫长历史。

20世纪40年代,自动安平水准仪的问世,标志着水准测量自动化的开端。之后,又发展了激光水准仪、激光扫平仪,为提高水准测量的精度和开拓广泛的用途创造了条件。近年来,数字水准仪的诞生,也使水准测量中的自动记录、自动传输、存储和处理数据成为现实。它和经纬仪一样,也可自动选取目标进行观测。

由于以上这些先进测量仪器的生产和应用,使测量工作向着自动化、电子化方向发展,减轻了劳动强度,提高了工作效率,并且使野外工作量大大减少,因而改善了测绘工作艰苦的环境。

20世纪80年代,全球定位系统(GPS)问世,采用卫星直接进行空间点的三维定位,引起了测绘工作重大变革。由于卫星定位具有全球、全天候、快速、高精度和无须建立高标等优点,所以被广泛应用在大地测量、工程测量、地形测量及军事的导航、定位上。世界上很多国家为了使用全球定位系统的信号,迅速进行了接收机的研制。从20世纪70年代到现在,已有百余厂家研制了一二百种精度不同、类型不同的仪器。现已生产出第五代产品,它体积更小,功能更全,重量更轻。

除了美国研制(GPS)定位系统外,前苏联研制了(GLONASS)定位系统,还有欧洲空间局的全球卫星导航系统(NAVSAT)。

我国也在进行卫星导航定位系统的研究,所研制的北斗导航定位系统已有很大进展,现已开展应用;另外,全球定位系统GPS的应用研究,进展很快,做出了很好的成果。

20世纪70年代,除了用飞机进行航空摄影测量测绘地(形)图外,还通过人造地球卫星拍

摄地球照片,监测自然现象的变化,并且利用这些卫星照片测绘地图,其精度逐步提高。近年来,已改变了过去摄影测量的方式,用数字摄影测量技术进行测量工作,使摄影测量的成果稳定、可靠,并且自动化程度高,还可与计算机组成一个系统,易于完成地(形)图的生产、使用、更新和换代。

由于测绘仪器的飞速发展和计算机技术的广泛应用,地面的测图系统,也由过去的传统测绘方式发展为数字测图。所以,由数字表示的地形图用计算机进行绘制和管理既便捷,又迅速,精度还可靠。

### 三、我国测绘事业的发展

我国测绘科学自从中华人民共和国成立,便进入了一个崭新的发展阶段。中国共产党一向关怀测绘事业,即使在战争时期也注意测绘人才的培养,并于1956年成立了国家测绘总局(1982年改为国家测绘局),中国科学院也成立了测量及地球物理研究所,各相关部门也纷纷成立测绘机构,培养测绘人才的各级学校亦相继成立。

在测绘工作方面,建立和统一了全国坐标系统和高程系统,建立了全国的大地控制网、国家水准网、基本重力网,完成了大地网和水准网的整体平差;完成了国家基本图的测绘工作;进行了珠峰和南极长城站的地理位置和高程的测量,各种工程建设的测量工作也取得显著成绩,例如长江大桥、葛洲坝水电站、宝山钢铁厂、正负电子对撞机和同步辐射加速器、核电站等大型和特殊工程的测量工作。出版发行了地图1600多种,发行量超过11亿册。在测绘仪器制造方面从无到有,发展迅速,已生产了多种不同等级、不同型号的电磁波测距仪。我国全站仪已经批量生产,国产GPS接收机已广泛使用,传统的测量仪器产品已经配套生产。已完成全国GPS大地控制网。各部门对地理信息系统(GIS)的建立和应用都十分重视,已经着手建立各行业的GIS系统,测绘工作为建立这一系统提供了大量的基础数据。

综上所述,我国在测绘事业上已经做了大量的工作,为国民经济建设和国防建设做出了不可磨灭的贡献,但是与国际先进水平相比还有一定差距。只要我们发愤图强,励精图治,是能迅速赶上和超过国际测绘科技水平的。

### 四、地球空间信息学(Geomatics)与现代测绘学的任务

随着科学技术的发展,高新技术的不断涌现,如计算机科学、信息科学、空间技术、卫星技术、微电子技术、传感器技术等,在近代都得到了高速发展和应用;在此基础上,测绘学科也不例外,发展十分迅速。同时,测绘学的相邻学科如地球物理学、地球动力学、海洋学、地质学、天体力学的交叉发展,以及全球定位系统(GPS)、遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、专家系统(ES)、数字摄影测量系统(DPS)的出现,使传统的测绘学从地面到空间,从静态到动态,从宏观到微观,从手工业生产方式到自动化、信息化,有了一个根本性的变革。因此,测绘学的手段、方法、理论,甚至测量的观念和内涵都有了较大的改变,传统的“测”和“绘”的概念,已经不能概括现代测绘学的研究对象和任务,更不能覆盖高新技术对测绘科学的渗透和冲击而产生的新内容。因此如何界定测绘学含义,使形式和内容的统一,已引起了世界各国测绘工作者的关注。自从1975年,法国大地测量与摄影测量学者 Bernard Dubuisson 博士首先提出以 Geomatics 反映测绘学的学科实质之后,得到了各国测绘科学家的认可,并一致认为 Geomatics 能准确地反映现代测绘学的内容实质。

Geomatics 的含义是比“测绘”更广泛、更深远、更现代化的一个学科名词,如果说它与测绘紧密相联,只能说测绘是其内容的一个组成部分。国际标准组织对它的定义是:“Geomatics 是一个活动性的学科领域,它以系统的方法将所有用于空间数据的采集和管理的手段进行综合。这类空间数据是在空间信息产生和管理过程中所涉及的科学的、行政的、法律的以及技术的工作所需要的。上述活动包括地图学、控制测量、数字测图、大地测量、地理信息系统、水道测量、土地信息管理、土地测量、矿山测量、摄影测量和遥感等,但并不限于此。”

结合我国测绘科学的具体情况,我国的测绘专家们了解和分析了国外对 Geomatics 的含义之后,对 Geomatics 提出了如下定义:“对所研究的物体,包括地球的整体及其表面和外层空间的各种自然和人造实体,利用接触与非接触式测量仪器、传感器及其组合系统,对这些实体进行信息的采集、量测、存储、管理、更新、分析、显示、分发和利用的一门科学和技术”。

由上述可见,现代测绘学的任务是研究人类对赖以生存的地球环境信息的采集、量测、描述和利用的科学。其内容包括:空间定位、地球形状和重力场;获取地球及其外层空间宇宙星体的自然形态、人为设施以及与其属性有关的信息;制成各种地形图、专题图和建立地理信息系统,为研究地球上的自然和有关的社会现象,为社会可持续发展提供基础信息。

### 第三节 地球的形状和大小

测绘工作大多是在地球表面上进行的,测量基准的确定、测量成果的计算及处理都与地球的形状和大小有关。

地球的自然表面是很不规则的,其上有高山、深谷、丘陵、平原、江湖、海洋等,最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8 848.43m,最低的太平洋马里亚纳海沟低于海平面约 11 022m,其高差将近 20km,但是与地球的平均半径 6 371km 相比,是微不足道的,就整个地球表面而言,陆地面积仅占 29%,而海洋面积占了 71%。因此人们把海水包围的地球形体看作地球的形状。

由于地球的自转运动,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,重力的方向线称为铅垂线。铅垂线是测量工作的基准线。静止的水面称为水准面,水准面是受地球重力影响而形成的,是一个处处与重力方向垂直的连续曲面,并且是一个重力场的等位面。与水准面相切的平面称为水平面。水面可高可低,因此符合上述特点的水准面有无数多个,其中与平均海面吻合并向大陆、岛屿内延伸而形成的闭合曲面,称为大地水准面,如图 1-1 所示。大地水准面是测量工作的基准面。由大地水准面所包围的地球形体,称为大地体。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

用大地体表示地球形体是恰当的,但由于地球内部质量分布不均匀,引起铅垂线的方向产生不规则的变化,所以大地水准面是一个复杂的曲面(如图 1-1),无法用数学式表述,也就无法在这个曲面上进行测量数据的计算和处理。为了使用方便,人们通常用一个非常接近于大地水准面,并可用数学式表示的几何形体(即地球椭球)来代替地球的形状(图 1-2)作为测量计算工作的基准面。它是由椭圆绕其短轴旋转而成的。旋转椭球体的形状和大小由椭球基本元素确定,即

长半轴:  $a$

短半轴:  $b$

扁率:  $\alpha = \frac{a-b}{a}$

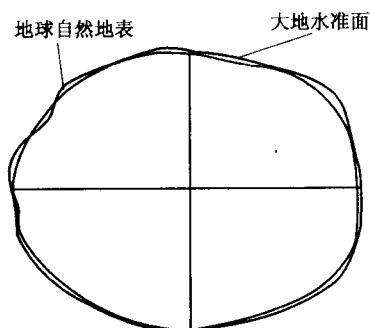


图 1-1 地球自然表面

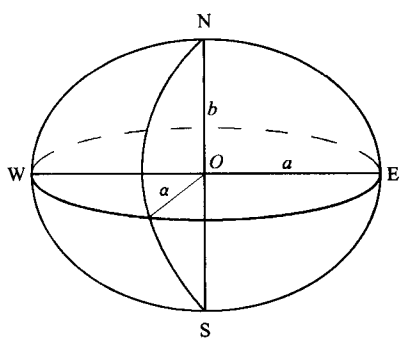


图 1-2 旋转椭球体

某一国家或地区为处理测量成果而采用与大地体的形状大小最接近,又适合本国或本地区要求的旋转椭球,这样的椭球体称为参考椭球体。确定参考椭球体与大地体之间的相对位置关系,称为椭球体定位。参考椭球体面只具有几何意义而无物理意义,它是严格意义上的测量计算基准面。

几个世纪以来,许多学者分别测算出了许多椭球体元素值,表 1-1 列出了几个著名的椭球体。我国的 1954 年北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球,1980 年国家大地坐标系采用的是 1975 国际椭球,而全球定位系统(GPS)采用的是 WGS-84 椭球。

表 1-1 几个著名的椭球体

椭球名称	长半轴 $a$ (m)	短半轴 $b$ (m)	扁率 $\alpha$	计算年代和国家	备 注
贝塞尔	6 377 397	6 356 079	1:299.152	1841 德国	
海福特	6 378 388	6 356 912	1:297.0	1910 美国	1942 年国际第一个推荐值
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1:298.3	1940 前苏联	中国 1954 年北京坐标系采用
1975 国际椭球	6 378 140	6 356 755	1:298.257	1975 国际第三个推荐值	中国 1980 年国家大地坐标系采用
WGS-84	6 378 137	6 356 752	1:298.257	1979 国际第四个推荐值	美国 GPS 采用

我国目前采用的元素值:  $a = 6\,378\,140\text{m}$

扁率:  $\alpha = 1:298.257$

并选择陕西省泾阳县永乐镇某点为大地原点,进行大地定位。由此而建立起来全国统一的坐标系,这就是现在使用的“1980 年国家大地坐标系”。

由于参考椭球的扁率很小,在小区域的普通测量中可将地(椭)球看作圆球,其半径  $R = (a + a + b)/3 = 6\,371\text{km}$ 。

#### 第四节 测量坐标系

测量中通常需要用三个量来确定地面点位。两个量是坐标,表示该点投影在基准面上的位置。第三个是高程,表示该点至基准面垂距,从而将点位有序地展示在投影面上。根据不同的需要可以采用不同的坐标系和高程系。

## 一、地理坐标

当研究和测定整个地球的形状或进行大区域的测绘工作时,可用地理坐标来确定地面点的位置。地理坐标是一种球面坐标,视依据球体的不同而分为天文坐标和大地坐标。

### 1. 天文坐标系

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。该坐标用天文经度和天文纬度表示。如图 1-3 所示,将大地体看作地球,NS 即为地球的自转轴,N 为北极,S 为南极, $O$  为地球体中心。包含地面点  $P$  的铅垂线且平行于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。而将通过英国格林尼治天文台埃里中星仪的子午面称为起始子午面,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二面角就称为  $P$  点的天文经度。用  $\lambda$  表示,其值为  $0^\circ \sim 180^\circ$ ,在本初子午线以东的叫东经,以西的叫西经。

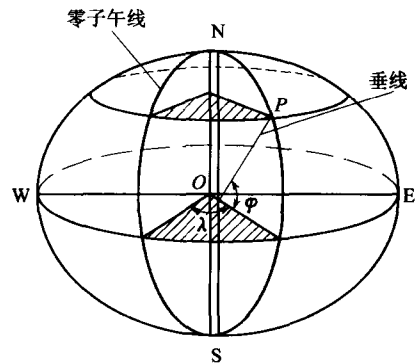


图 1-3 天文坐标

通过地球体中心  $O$  且垂直于地轴的平面称为赤道面。它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  $\varphi$  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( $\lambda, \varphi$ )是用天文测量的方法实测得到的。

### 2. 大地坐标系

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。该坐标用大地经度和大地纬度表示。过短轴  $NS$  的平面称为子午面,子午面与球面的交线称为子午线或经线。过英国格林尼治天文台的子午面称为首子午面。包含地面点  $P$  的法线且通过椭球旋转轴的平面称为  $P$  点的大地子午面,如图 1-4 所示。过  $P$  点的大地子午面与起始大地子午面所夹的二面角就称为  $P$  点的大地经度。用  $L$  表示,其值分为东经  $0^\circ \sim 180^\circ$  和西经  $0^\circ \sim 180^\circ$ 。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,其值分为北纬  $0^\circ \sim 90^\circ$  和南纬  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。我国 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系就是分别依据两个不同的椭球建立的大地坐标系。

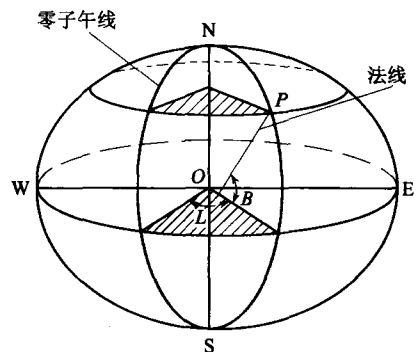


图 1-4 大地坐标

## 二、平面直角坐标系

在实际测量工作中,若用以角度为度量单位的球面坐标来表示地面点的位置是不方便的,通常是采用平面直角坐标来表示地面点的位置。测量工作中所用的平面直角坐标与数学上的

直角坐标基本相同,只是测量工作以  $x$  轴为纵轴,一般表示南北方向,以  $y$  轴为横轴,一般表示东西方向,象限为顺时针编号,直线的方向都是从纵轴北端按顺时针方向度量的,如图1-5所示。这样的规定,目的是为了数学中的三角公式在测量坐标系中完全适用。

1. 独立测区的平面直角坐标

当测区的范围较小,能够忽略该区地球曲率的影响而将其当作平面看待时,可在此平面上建立独立的直角坐标系,如图 1-6 所示。一般选定子午线方向为纵轴,即  $x$  轴,原点设在测区的西南角,以避免坐标出现负值。测区内任一地面点用坐标  $(x, y)$  来表示,它们与本地区统一坐标系没有必然的联系而为独立的平面直角坐标系。如有必要可通过与国家坐标系连测而纳入统一坐标系。经过估算,在面积为  $300\text{km}^2$  的多边形范围内,可以忽略地球曲率影响而建立独立的平面直角坐标系,当测量精度要求较低时,这个范围还可以扩大数倍。

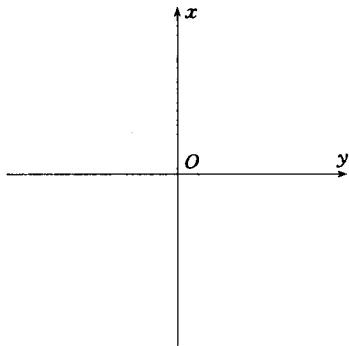


图 1-5 测量平面直角坐标系

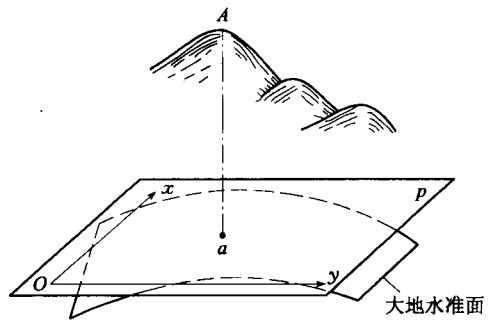


图 1-6 独立平面直角坐标系

2. 高斯平面直角坐标系

当测区范围较大时,要建立平面坐标系,就不能忽略地球曲率的影响,为了解决球面与平面这对矛盾,则必须采用地图投影的方法将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标。目前我国采用的是高斯投影,高斯投影是由德国数学家、测量学家高斯提出的一种横轴等角切椭圆柱投影,该投影解决了将球面转换为平面的问题。从几何意义上看,就是假设一个椭圆柱横套在地球椭球体外并与椭球面上的某一条子午线相切,这条相切的子午线称为中央子午线。假想在椭球体中心放置一个光源,通过光线将椭球面上一定范围内的物象映射到椭圆柱的内表面上,然后将椭圆柱面沿一条母线剪开并展成平面,即获得投影后的平面图形,如图 1-7 所示。

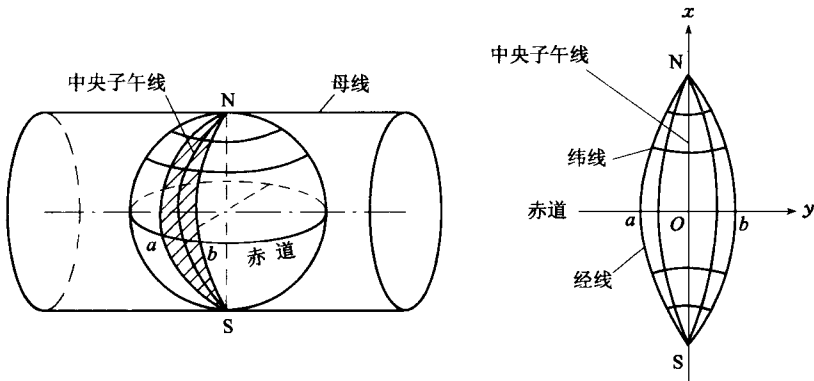


图 1-7 高斯平面直角坐标



该投影的经纬线图形有以下特点：

(1) 投影后的中央子午线为直线，无长度变化。其余的经线投影为凹向中央子午线的对称曲线，长度较球面上的相应经线略长。

(2) 赤道的投影也为一直线，并与中央子午线正交。其余的纬线投影为凸向赤道的对称曲线。

(3) 经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系，说明投影后的角度无变形。

高斯投影没有角度变形，但有长度变形和面积变形，离中央子午线越远，变形就越大，为了对变形加以控制，测量中采用限制投影区域的办法，即将投影区域限制在中央子午线两侧一定的范围，这就是所谓的分带投影，如图 1-8 所示。投影带一般分为 6°带和 3°带两种，如图 1-9 所示。

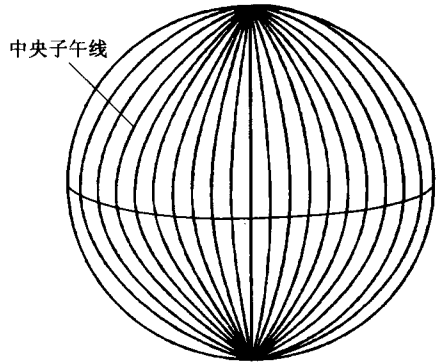


图 1-8 投影分带

6°带投影是从英国格林尼治起始子午线开始，自西向东，每隔经差 6°分为一带，将地球分成 60 个带，其编号分别为 1、2、…、60。每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_6 = (6n - 3)^\circ \quad (1-1)$$

式中  $n$  为 6°带的带号。6°带的最大变形在赤道与投影带最外一条经线的交点上，长度变形为 0.14%，面积变形为 0.27%。

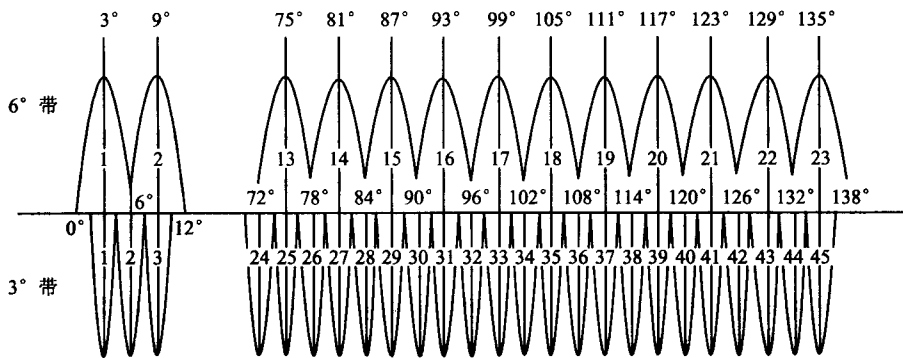


图 1-9 6°带和 3°带投影

3°投影带是在 6°带的基础上划分的。每 3°为一带，共 120 带，其编号分别为 1、2、…、120。其中中央子午线在奇数带时与 6°带中央子午线重合，每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_3 = 3n^\circ \quad (1-2)$$

式中  $n$  为 3°带的带号。3°带的边缘最大变形为长度 0.04%，面积 0.14%。

例如北京  $L = 116^\circ\text{E}$ ，如按 6°带计算，其  $n = 116/6 = 20$ （进位为整数），按公式 1-1 计算， $L_6 = 117^\circ$ ，故北京位于采用 6°带投影时 20 带内中央子午线的西侧（因为  $116^\circ < 117^\circ$ ）。

通过高斯投影，将中央子午线的投影作为纵坐标轴，用  $x$  表示，将赤道的投影作为横坐标轴，用  $y$  表示，两轴的交点作为坐标原点，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 1-10 所示。（该带的中央子午线为  $105^\circ$ ）对应于每一个投影带，就有一个独立的高斯