

职业教育“十三五”规划教材·无人机应用技术

# 无人机遥感测绘技术及应用

官建军 李建明 苟胜国 刘东庆◎编著



西北工业大学出版社

职业教育“十三五”规划教材·无人机应用技术

# 无人机遥感测绘技术及应用

官建军 李建明 苟胜国 刘东庆 编著

西北工业大学出版社  
西安

**【内容简介】** 本书在系统归纳无人机测绘的基础理论和遥感的基本知识与方法的基础上,重点讲述了无人机遥感任务设备、无人机摄影测量制图技术和倾斜摄影测量技术,梳理了当前和未来无人机遥感的主要应用领域以及管理规范与技术标准等内容。本书内容深入浅出,层次清楚,体系完整,是一本理论与实践应用结合紧密的专业课教材。

本书可作为高等院校无人机应用技术、摄影测量与遥感、信息工程等专业的教材,也可作为测绘、遥感、地理信息系统、环境、电力、城市规划管理和军事等相关领域的教师、科研人员和工程技术人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

无人机遥感测绘技术及应用 / 官建军等编著. —西安:  
西北工业大学出版社, 2018. 8  
职业教育“十三五”规划教材·无人机应用技术  
ISBN 978-7-5612-6115-6

I. ①无… II. ①官… III. ①无人驾驶飞机—测绘—  
遥感技术—职业教育—教材 IV. ①P237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 185402 号

WURENJI YAOGAN CEHUI JISHU JI YINGYONG  
无人机遥感测绘技术及应用

策划编辑: 杨 军  
责任编辑: 李阿盟 朱辰浩

---

出版发行: 西北工业大学出版社  
通信地址: 西安市友谊西路 127 号 邮编: 710072  
电 话: (029)88493844 88491757  
网 址: www.nwpup.com  
印 刷 者: 陕西金德佳印务有限公司  
开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张: 15.5  
字 数: 378 千字  
版 次: 2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷  
定 价: 49.00 元

# 前 言

无人机遥感(Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing),是以航空遥感为基础,利用先进的无人驾驶飞行器技术、遥感传感器技术、遥测遥控技术、通信技术、GPS 差分定位技术和遥感应用技术,实现自动化、智能化、专用化在灾害应急处理、基础测绘、土地利用调查、矿山开发监测和智慧城市建设和应用,具有使用范围广、作业成本低、续航时间长、影像实时传输、高危地区探测、图像精细、机动灵活等优点,是卫星遥感与有人机航空遥感的有力补充,已经成为世界各国争相研究和发展的方向。

无人机遥感是我国目前获取厘米级超高分辨率、小时级即时响应遥感地球数据及环境信息的主要技术手段,是人工智能时代新的空间信息产业革命的关键技术。无人机遥感由于其快速反应、及时以及全方位覆盖的能力,正在被越来越多的行业或领域广泛应用。

当前和未来,在移动互联网、物联网背景下,面向超高分辨率地理空间数据和重点热点地区环境数据获取的国家重大需求条件下,无人机应用将渗透至国民经济建设各领域。汇同云计算与大数据技术,低空无人机将得到更为有限的管控,同时将给传统测绘技术带来新的创新和挑战。

本书共计 8 章,在系统归纳了无人机测绘、遥感的基础知识和方法的基础上,重点对无人机遥感任务设备、无人机摄影测量制图技术、倾斜摄影测量技术、无人机遥感影像处理软件、无人机遥感应用等相关技术和应用进行了深入探讨,比较全面地整理了国家现有的涉及无人机应用的管理规范与技术标准。第 1 章重点介绍测绘的基础知识和基本理论;第 2 章重点介绍遥感的基本理论和方法;第 3 章重点介绍遥感任务设备,归纳总结任务设备的发展方向;第 4 章研究基于航空摄影作业流程的无人机摄影测量制图技术和成果整理的理论和方法;第 5 章研究倾斜摄影技术以及基于无人机影像的地面模型三维重建技术,系统研究了三维模型的生产和加工技术;第 6 章系统介绍国内外常用的无人机遥感主流软件,着重介绍 Pix4Dmapper, ContextCapture 两款应用软件;第 7 章研究无人机在重大突发事件和自然灾害应急响应、国土、城市、海洋、农林、环保、科教文化、矿业、能源和交通等领域的应用以及在公共安全、互联网、移动通信和娱乐领域的应用,展望未来更多的其他新兴行业应用;第 8 章整理涉及无人机航空摄影以及测绘遥感方面的国家规范和技术标准。

本书是由西北工业大学出版社联合全国无人机教育联盟开发的无人机应用技术专业系列教材之一,为任课教师配有相应的教学课件。

本书由官建军负责设计全书结构、内容和统稿。刘东庆负责第1,8章的编写,苟胜国负责第2,4,6章的编写,李建明负责第3,7章的编写,官建军负责第5章的编写,PIX4D中国王德峰、陈傲博士也给予了大力支持,洪正、蔡亚波在资料收集方面做了大量工作,同时,本书在编写过程中参阅了相关文献资料,在此一并感谢。

由于水平有限,加之无人机发展日新月异,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者  
2018年5月

# 目 录

第 1 章 测绘基础 .....	1
1.1 测绘基础知识 .....	1
1.2 测绘基准、测绘系统和测量标志 .....	22
1.3 测量误差基础 .....	41
思考与练习 .....	51
第 2 章 遥感基础 .....	52
2.1 遥感概述 .....	52
2.2 遥感数字图像处理基础知识 .....	55
2.3 遥感数字图像几何处理 .....	60
2.4 遥感数字图像辐射处理 .....	66
2.5 遥感数字图像判读 .....	81
思考与练习 .....	86
第 3 章 无人机遥感任务设备 .....	87
3.1 无人机遥感任务设备类型 .....	87
3.2 航空定位定向系统(POS) .....	87
3.3 可见光相机系统 .....	89
3.4 倾斜摄影相机系统 .....	98
3.5 红外相机系统 .....	103
3.6 多光谱成像仪 .....	106
3.7 机载激光雷达系统 .....	109
3.8 合成孔径雷达系统 .....	114
思考与练习 .....	120
第 4 章 无人机摄影测量制图技术 .....	121
4.1 摄影测量基础 .....	121
4.2 无人机航空摄影 .....	137
4.3 无人机摄影测量数据处理 .....	140

思考与练习 .....	148
<b>第 5 章 倾斜摄影测量技术</b> .....	149
5.1 倾斜摄影测量概述 .....	149
5.2 倾斜摄影基本原理 .....	153
5.3 倾斜摄影测量作业流程 .....	154
5.4 倾斜摄影模型应用 .....	158
思考与练习 .....	162
<b>第 6 章 无人机遥感影像处理软件</b> .....	163
6.1 常用遥感影像处理软件介绍 .....	163
6.2 摄影测量软件 Pix4Dmapper .....	165
6.3 倾斜摄影建模软件 ContextCapture .....	196
思考与练习 .....	214
<b>第 7 章 无人机遥感应用</b> .....	215
7.1 重大突发事件和自然灾害应急响应 .....	215
7.2 国土、城市、海洋等领域应用 .....	216
7.3 农林、环保、科教文化等领域应用 .....	219
7.4 矿业、能源、交通等领域应用 .....	221
7.5 公共安全领域应用 .....	225
7.6 互联网、移动通信和娱乐应用 .....	225
7.7 测绘行业应用 .....	227
7.8 其他新兴应用 .....	231
思考与练习 .....	232
<b>第 8 章 管理规范与技术标准</b> .....	233
8.1 相关标准综述 .....	233
8.2 无人机遥感管理及应用 .....	236
8.3 遥感作业的标准与规程 .....	238
8.4 遥感信息处理的标准与规范 .....	240
<b>参考文献</b> .....	242

# 第1章 测绘基础

## 1.1 测绘基础知识

### 1.1.1 测绘学概念、研究内容和作用

#### 一、测绘学的基本概念

测绘学是以地球为研究对象,对其进行测定和描绘的科学。我们可以将测绘理解为利用测量仪器测定地球表面自然形态的地理要素和地表人工设施的形状、大小、空间位置及其属性等,然后根据观测到的这些数据通过地图制图的方法将地面的自然形态和人工设施等绘制成地图,通过图的形式建立并反映地球表面实地和地形图的相互对应关系这一系列的工作,如图1-1所示。在测绘范围较小区域,可不考虑地球曲率的影响而将地面当成平面;当测量范围是大区域,如一个地区、一个国家,甚至全球,由于地球表面不是平面,测绘工作和测绘学所要研究的问题就不像上面那样简单,而是变得复杂得多。此时,测绘学不仅研究地球表面的自然形态和人工设施的几何信息的获取和表述问题,而且还要把地球作为一个整体,研究获取和表述其几何信息之外的物理信息,如地球重力场的信息以及这些信息随着时间的变化。随着科学技术的发展和社会

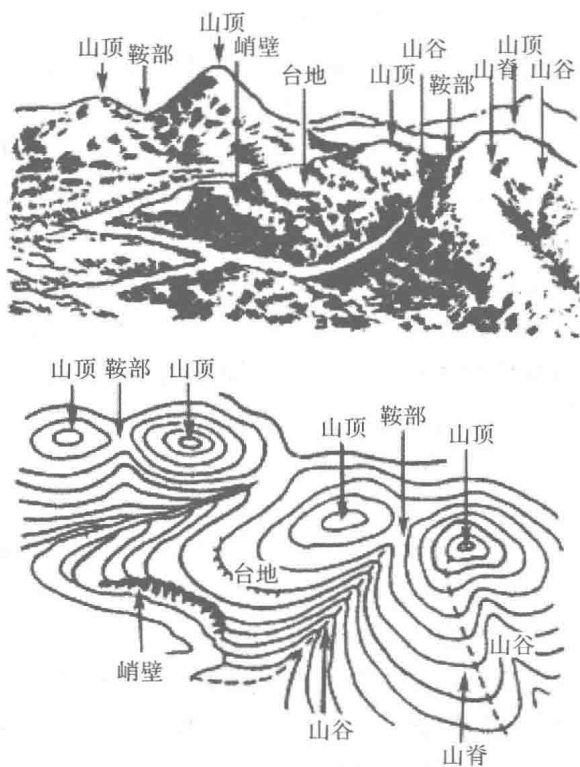


图1-1 实地和地形图的对应关系

的进步,测绘学的研究对象不仅是地球,还需要将其研究范围扩大到地球外层空间的各种自然和人造实体。因此,测绘学完整的基本概念是研究对实体(包括地球整体、表面以及外层空间各种自然和人造的物体)中与地理空间分布有关的各种几何、物理、人文及其随时间变化的信息的采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。就地球而言,测绘学就是研究测定和推算地面及其外层空间点的几何位置,确定地球形状和地球重力场,获取地球表面自然形态和人工设



施的几何分布以及与其属性有关的信息,编制全球或局部地区的各种比例尺的普通地图和专题地图,建立各种地理信息系统,为国民经济发展和国防建设以及地学研究服务。因此,测绘学主要研究地球多种时空关系的地理空间信息,与地球科学研究关系密切,可以说测绘学是地球科学的一个分支学科。

## 二、测绘学的研究内容

测绘学的研究内容很多,涉及许多方面。现仅就测绘地球来阐述其主要内容。

(1)根据研究和测定地球形状、大小及其重力场成果建立一个统一的地球坐标系统,用以表示地球表面及其外部空间任一点在这个地球坐标系中准确的几何位置。由于地球的外形接近一个椭球(称为地球椭球),地面上的任一点可用该点在地球椭球面上的经纬度和高程表示其几何位置。

(2)根据已知大量的地面点的坐标和高程,进行地表形态的测绘工作,包括地表的各种自然形态,如水系、地貌、土壤和植被的分布,也包括人类社会活动所产生的各种人工形态,如居民地、交通线和各种建筑物等。

(3)采用各种测量仪器和测量方法所获得的自然界和人类社会现象的空间分布、相互联系及其动态变化信息,并按照地图制图的方法和技术进行反映和展示出来的数据集即为地图测绘。对于小面积的地表形态测绘,可以利用普通测量仪器,通过平面测量和高程测量的方法直接测绘各种地图;对于大面积地表形态的测绘工作,先用传感器获取区域地表形态和人工设施空间分布的影像信息,再根据摄影测量理论和方法间接测绘各种地图。

(4)各种工程建设和国防建设的规划、设计、施工和建筑物建成后的运营管理中,都需要进行相应的测绘工作,并利用测绘资料引导工程建设的实施,监视建筑物的形变。这些测绘工程往往要根据具体工程的要求,采取专门的测量方法。对于一些特殊的工程,还需要特定的高精度测量或使用特种测量仪器去完成相应的测量任务。

(5)在海洋环境(包括江河湖泊)中进行测绘工作,同陆地测量有很大的区别。主要是测量内容综合性强,需多种仪器配合施测,同时完成多种观测项目,测区条件比较复杂,海面受潮汐、气象因素等影响起伏不定,大多数为动态作业,观测者不能用肉眼透视水域底部,精确测量难度较大,因此要研究海洋水域的特殊测量方法和仪器设备,如无线电导航系统、电磁波测距仪器、水声定位系统、卫星组合导航系统、惯性组合导航系统以及天文方法等。

(6)由于测量仪器构造上有不可避免的缺陷、观测者的技术水平和感觉器官的局限性以及自然环境的各种因素,如气温、气压、风力、透明度和大气折光等变化,对测量工作都会产生影响,给观测结果带来误差。虽然随着测绘科技的发展,测量仪器可以制造得越来越精密,甚至可以实现自动化或智能化;观测者的技术水平可以不断提高,能够非常熟练地进行观测,但也只能减小观测误差,将误差控制在一定范围内,而不能完全消除它们。因此,在测量工作中必须研究和处理这些带有误差的观测值,设法消除或削弱其误差,以便提高被观测量的质量,这就是测绘学中的测量数据处理和平差问题。它是依据一定的数学准则,如最小二乘准则,由一系列带有观测误差的测量数据,求定未知量的最佳估值及其精度的理论和方法。

(7)将承载各种信息的地图图形进行地图投影、综合、编制、整饰和制印,或者增加某些专门要素,形成各种比例尺的普通地图和专题地图。因此,传统地图学就是要研究地图制作的理论、技术和工艺。

(8)测绘学的研究工作成果最终要服务于经济建设、国防建设以及科学研究,因此

要研究测绘学在社会经济发展的各个相关领域中的应用。

### 三、测绘学的作用

(1) 测绘学在科学研究中的作用。地球是人类和社会赖以生存和发展的唯一星球。经过古往今来人类的活动和自然变迁,如今的地球正变得越来越骚动不安,人类正面临一系列全球性或区域性的重大难题和挑战,测绘学在探索地球的奥秘和规律、深入认识和研究地球的各种问题中发挥着重要作用。由于现代测量技术已经或将要实现无人工干预自动连续观测和数据处理,可以提供几乎任意时域分辨率的观测系列,具有检测瞬时地学事件(如地壳运动、重力场的时空变化、地球的潮汐和自转变化等)的能力,这些观测成果可以用于地球内部物质结构和演化的研究,尤其是像大地测量观测结果在解决地球物理问题中可以起着某种佐证作用。

(2) 测绘学在国民经济建设中的作用。测绘学在国民经济建设中具有广泛作用。在经济发展规划、土地资源调查和利用、海洋开发、农林牧渔业的发展、生态环境保护以及各种工程、矿山和城市建设等各个方面都必须进行相应的测量工作,编制各种地图和建立相应的地理信息系统,以供规划、设计、施工、管理和决策使用。如在城市化进程中,城市规划、乡镇建设和交通管理等都需要城市测绘数据、高分辨率卫星影像、三维景观模型、智能交通系统和城市地理信息系统等测绘高新技术的支持。在水利、交通、能源和通信设施的大规模、高难度工程建设中,不但需要精确勘测和大量现势性强的测绘资料,而且需要在工程全过程采用地理信息数据进行辅助决策。丰富的地理信息是国民经济和社会信息化的重要基础,对传统产业的改造、优化、升级与企业生产经营,发展精细农业,构建“数字中国”和“数字城市”,发展现代物流配送系统和电子商务,实现金融、财税和贸易信息化等,都需要以测绘数据为基础的地理空间信息平台。

(3) 测绘学在国防建设中的作用。在现代化战争中,武器的定位、发射和精确制导需要高精度的定位数据、高分辨率的地球重力场参数、数字地面模型和数字正射影像。以地理空间信息为基础的战场指挥系统,可持续、实时地提供虚拟数字化战场环境信息,为作战方案的优化、战场指挥和战场态势评估实现自动化、系统化和信息化提供测绘数据和基础地理信息保障。这里,测绘信息可以提高战场上的精确打击力,夺得战争胜利或主动。公安部门合理部署警力,有效预防和打击犯罪也需要电子地图、全球定位系统和地理信息系统的技术支持。为建立国家边界及国内行政界线,测绘空间数据库和多媒体地理信息系统不仅在实际疆界划定工作中起着基础信息的作用,而且对于边界谈判、缉私禁毒、边防建设与界线管理等均有重要的作用。尤其是测绘信息中的许多内容涉及国家主权和利益,决不可失其严肃性和严密性。

(4) 测绘学在国民经济建设和社会发展中的作用。国民经济建设和社会发展的绝大多数活动是在广袤的地域空间进行的。政府部门或职能机构既要及时了解自然和社会经济要素的分布特征与资源环境条件,也要进行空间规划布局,还要掌握空间发展状态和政策的空间效应。但由于现代经济和社会的快速发展与自然关系的复杂性,使人们解决现代经济和社会问题的难度增加,因此,为实现政府管理和决策的科学化、民主化,要求提供广泛通用的地理空间信息平台,测绘数据是其基础。在此基础上,将大量经济和社会信息加载到这个平台上,形成符合真实世界的空间分布形式,建立空间决策系统,进行空间分析和管理决策,以及实施电子政务。当今人类正面临环境日趋恶化、自然灾害频繁、不可再生能源和矿产资源匮乏及人口膨胀等社会问题。社会、经济迅速发展和自然环境之间产生了巨大矛盾。要解决这些矛盾,维持社会的可持续发展,则必须了解地球的各种现象及其变化和相互关系,采取必要措施来约束和规范人

类自身的活动,减少或防范全球变化向不利于人类社会的方面演变,指导人类合理利用和开发资源,有效地保护和改善环境,积极防治和抵御各种自然灾害,不断改善人类生存和生活环境质量。而在防灾减灾、资源开发和利用、生态建设与环境保护等影响社会可持续发展的种种因素方面,各种测绘和地理信息可用于规划、方案的制订,灾害、环境监测系统的建立,风险分析,资源、环境调查与评估、可视化的显示以及决策指挥等。

### 1.1.2 测绘学的学科分类

随着测绘科学技术的发展和时间的推移,测绘学的学科分类有着多种不相同的分类方法,按传统方法可将测绘学分为下面几种学科。

#### 一、大地测量学

大地测量学是一门量测和描绘地球表面的科学,是测绘学的一个分支。该学科主要是研究和测定地球形状、大小、地球重力场、整体与局部运动和地表面点的几何位置以及它们变化的理论和技术。在大地测量学中,测定地球的大小是指测定地球椭球的大小;研究地球形状是指研究大地水准面的形状(或地球椭球的扁率);测定地面点的几何位置是指测定以地球椭球面为参考面的地面点位置。将地面点沿椭球法线方向投影到地球椭球面上,用投影点在椭球面上的大地经纬度表示该点的水平位置,用地面至地球椭球面上投影点的法线距离表示该点的大地高程。在一般应用领域,例如水利工程,还需要以平均海面(即大地水准面)为起算面的高度,即通常所称的海拔高。

大地测量学的基本内容包括①根据地球表面和外部空间的观测数据,确定地球形状和重力场,建立统一的大地测量坐标系;②测定并描述地壳运动、地极移动和潮汐变化等地球动力学现象;③建立国家大地水平控制网、精密水准网和海洋大地控制网,满足国家经济、国防建设的需要;④研究大规模、高精度和多类别的地面网、空间网和联合网的观测技术和数据处理理论与方法;⑤研究解决地球表面的投影变形及其他相应大地测量中的计算问题。

大地测量系统规定了大地测量的起算基准、尺度标准及其实现方式。由固定在地面上的点所构成的大地网或其他实体,按相应于大地测量系统的规定模式构建大地测量参考框架,大地测量参考框架是大地测量系统的具体应用形式。大地测量系统包括坐标系统、高程系统/深度基准和重力参考系统。

#### 二、摄影测量学

摄影测量学是研究利用摄影或遥感的手段获取目标物的影像数据,从中提取几何的或物理的信息,并用图形、图像和数字形式表达测绘成果的学科。它的主要研究内容有获取目标物的影像,并对影像进行量测和处理,将所测得的成果用图形、图像或数字表示。摄影测量学包括航空摄影、航天摄影、航空航天摄影测量和地面摄影测量等。航空摄影是在飞机或其他航空飞行器上利用航摄机摄取地面景物影像的技术(见图1-2)。航天摄影是在航天飞行器(卫星、航天飞机、宇宙飞船)中利用摄影机或其他遥感探测器(传感器)获取地球的图像资料和相关数据的技术,它是航空摄影的扩充和发展(见图1-3)。航空航天摄影测量是根据在航空或航天飞行器上对地摄取的影像获取地面信息,测绘地形图。地面摄影测量是利用安置在地面上基线两端点处的专用摄影机拍摄的立体像对,对所摄目标物进行测绘的技术,又称为近景摄影测量。



图 1-2 航空摄影



图 1-3 航天摄影

### 三、地图制图学(地图学)

地图制图学是研究地图(包括模拟地图和数字地图)及其编制和应用的学科。主要研究内容包括地图设计,即通过研究、实验,制订新编地图内容、表现形式及其生产工艺程序的工作;地图投影,它是研究依据一定的数学原理将地球椭球面的经纬线网描绘在地图平面上相应的经纬线网的理论和方法,也就是研究把不可展曲面上的经纬线网描绘成平面上的图形所产生各种变形的特性和大小以及地图投影的方法等(见图 1-4);地图编制,它是研究制作地图的理论和技术的,主要包括制图资料的分析

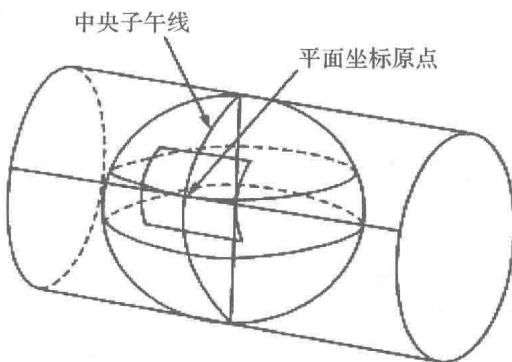


图 1-4 地图投影

分析和处理,地图原图的编绘以及图例、表示方法、色彩、图形和制印方案等编图过程的设计;地图制印,它是研究复制和印刷地图过程中各种工艺的理论和技术的;地图应用,它是研究地图分析、地图评价、地图阅读、地图量算和图上作业等。

随着计算机技术的引入,出现了计算机地图制图技术。它是根据地图制图原理和地图编辑过程的要求,利用计算机输入、输出等设备,通过数据库技术和图形数字处理方法,实现地图数据的获取、处理、显示、存储和输出。此时地图是以数字形式存储在计算机中,称之为数字地图。有了数字地图就能生成在屏幕上显示的电子地图。计算机地图制图的实现,改变了地图的传统生产方式,节约了人力,缩短了成图周期,提高了生产效率和地图制作质量,使得地图手工生产方式逐渐被数字化地图生产所取代。

### 四、工程测量学

工程测量学主要是研究在工程建设和自然资源开发各个阶段进行测量工作的理论和技术,包括地形图测绘及工程有关的信息的采集和处理、施工放样及设备安装、变形监测分析和预报等,以及研究对与测量和工程有关的信息进行管理和使用。它是测绘学在国民经济建设和国防建设中的直接应用,包括规划设计阶段的测量、施工建设阶段的测量和运行管理阶段的测量。每个阶段测量工作的内容、重点和要求各不相同。

工程测量学的研究应用领域既有相对的稳定性,又是不断变化的。总的来说,它主要包括以工程建筑为对象的工程测量和以机器、设备为对象的工业测量两大部分。在技术方法上可划分为普通工程测量和精密工程测量。工程测量学的主要任务是为各种工程建设提供测绘保障,满足工程所提出的各种要求。精密工程测量代表着工程测量学的发展方向。

现代工程测量已经远远突破了为工程建设服务的狭窄概念,而向所谓的“广义工程测量学”发展,认为一切不属于地球测量、不属于国家地图集范畴的地形测量和不属于官方的测量,都属于工程测量。

### 五、海洋测绘学

海洋测绘学是研究以海洋及其邻近陆地和江河湖泊为对象所进行的测量和海图编制理论和方法的学科,主要包括海道测量、海洋大地测量、海底地形测量、海洋专题测量以及航海图、海底地形图、各种海洋专题图和海洋图集等图的编制。海道测量,是以保证航行安全为目的,对地球表面水域及毗邻陆地所进行的水深和岸线测量以及底质、障碍物的探测等工作。海洋大地测量是为测定海面地形、海底地形以及海洋重力及其变化所进行的大地测量工作。海底地形测量是测定海底起伏、沉积物结构和地物的测量工作。海洋专题测量是以海洋区域的地理专题要素为对象的测量工作。海图制图是设计、编绘、整饰和印刷海图的工作,同陆地地图编制基本一致。

#### 1.1.3 测量的基准线和基准面

##### 一、大地水准面

地球表面被陆地和海洋所覆盖,其中海洋面积约占 71%,陆地面积约占 29%,人们常把地球形状看作是被海水包围的球体。静止不流动水面称为水准面。水准面是物理面,水准面上的每一个分子各自均受到相等的重力作用,处处与重力方向(铅垂线)正交,同一水准面上的重力位相等,故此水准面也称重力等位面,水准面上任意一点的垂线方向均与水准面正交。地球表面十分复杂,难以用公式表达,设想海洋处于静止不动状态,以平均海水面代替海水静止时的水面,并向全球大陆内部延伸,使它形成连续不断的、封闭的曲面,这个特定的重力位水准面被称之为大地水准面。由大地水准面所包围的地球形体被称之为大地体,在测量学中用大地体表示地球形体。

地球空间的任意一质点,都受到地球引力和地球自转产生的离心力的作用,因此质点实际上所受到的力为地球引力和离心力的合力,即大家所熟知的重力(见图 1-5)。

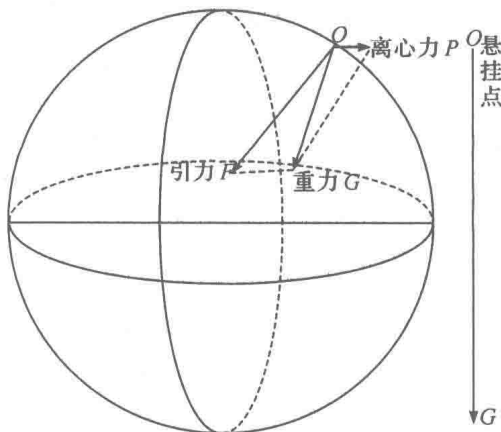


图 1-5 铅垂线方向

野外测量工作是以地球自然表面为依托面,通过测量仪器的水准器置平便可得到水准面;以细线悬挂垂球便可获知悬挂点 O 的重力方向,通常称为垂线或铅垂线;因而水准面和铅垂

线便成为实际测绘工作的基准面与基准线,如图 1-6 所示。

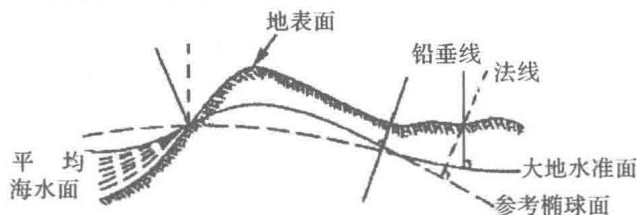


图 1-6 大地水准面

## 二、参考椭球面

大地测量学的基本任务之一就是建立统一的大地测量坐标系,精确测定地面点的位置。但是测量野外只能获得角度、长度和高差等观测元素,并不能直接得到点的坐标,为求解点的坐标成果,必须引入一个规则的数学曲面作为计算基准面,并通过该基准面建立起各观测元素之间以及观测元素与点的位置之间的数学关系。

地球自然表面十分复杂,不能作为计算基准面;大地水准面虽然比地球自然表面平滑许多,但由于地球引力大小与地球内部质量有关,而地球内部质量分布又不均匀,引起地面上各点垂线方向产生不规则变化,大地水准面实际上是一个有着微小起伏的不规则曲面,形状不规则,无法用数学公式精确表达为数学曲面,也不能作为计算基准面。

经过长期研究表明,地球形状极近似于一个两极稍扁的旋转椭球,即一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体(见图 1-7)。而其旋转椭球面可以用较简单的数学公式准确地表达出来,所以测绘工作便取大小与大地体很接近的旋转椭球作为地球的参考形状和大小,一般称其外表面为参考椭球面(见图 1-8)。若对参考椭球面的数学式加入地球重力异常变化参数改正,便可得到与大地水准面较为接近的数学式,因此在测量工作中是用参考椭球面这样一个规则的曲面代替大地水准面作为测量计算的基准面的。

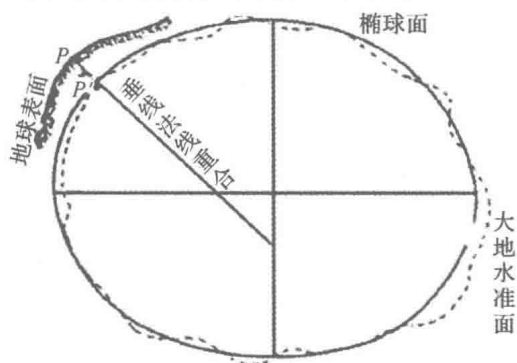


图 1-7 旋转椭球

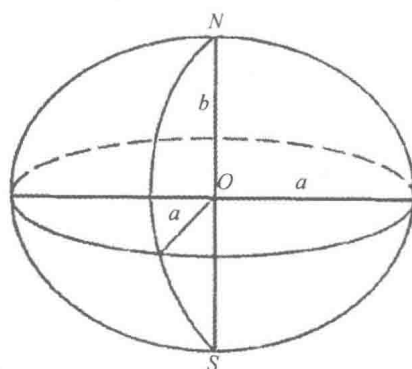


图 1-8 参考椭球

世界各国通常均采用旋转椭球代表地球的形状,并称其为“地球椭球”。测量中把与大地体最接近的地球椭球称为总地球椭球;把与某个区域如一个国家大地水准面最为密合的椭球称为参考椭球,其椭球面称为参考椭球面。由此可见,参考椭球有许多个,而总地球椭球只有一个。

椭球的形状和大小是由其基本元素决定的。椭球体的基本元素是长半轴  $a$ 、短半轴  $b$ 、扁率  $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。

我国 1980 西安坐标系(1980 年国家大地坐标系)采用了 1975 年国际椭球,该椭球的基本

元素为  $a=6\ 378\ 140\ \text{m}$ ,  $b=6\ 356\ 755.3\ \text{m}$ ,  $\alpha=1/298.257$ 。

根据一定的条件,确定参考椭球面与大地水准面的相对位置,所做的测量工作,称为参考椭球体的定位。在一个国家或一个区域中适当位置选择一个点  $P$  作为大地原点,假设大地水准面与参考椭球面相切,切点  $P'$  位于  $P$  点的铅垂线方向上,参考椭球面  $P'$  点的法线与该点对大地水准面的铅垂线重合,并使椭球的短轴与地球的自转轴平行,而且椭球面与这个国家范围内的大地水准面差距尽量地小,从而确定参考椭球面与大地水准面的相对位置关系,这就是椭球的定位工作。

我国“1980 年国家大地坐标系”大地原点位于陕西省泾阳县永乐镇,在大地原点上进行了精密天文测量和精密水准测量,获得了大地原点的平面起算数据。

由于参考椭球体的扁率很小,在普通测量中可把地球看作圆球体,其平均半径为

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) = 6\ 371\ \text{km}$$

参考椭球面在测绘工作中具有以下重要作用:

- (1)它是一个代表地球的数学曲面;
- (2)它是一个大地测量计算的基准面;
- (3)它是研究大地水准面形状的参考面。我们知道,参考椭球面是规则的,大地水准面是不规则的,两者进行比较,即可将大地水准面的不规则部分(差距和垂线偏差)显示出来。将地球形状分离为规则和不规则两部分,分别进行研究,这是几何大地测量学的基本思想;
- (4)在地图投影中,讨论两个数学曲面的对应关系时,也是用参考椭球面来代替地球表面。因此,参考椭球面是地图投影的参考面。

将地球表面、水准面、大地水准面和参考椭球面进行比较不难看出以下几点:

- (1)地球表面是测量的依托面。它的形状复杂,不是数学表面,也不是等位面。
- (2)水准面是液体的静止表面。它是重力等位面,不是数学表面,形状不规则。通过任一点都有一个水准面,因此水准面有无数个。水准面是野外测量的基准面。
- (3)大地水准面是平均海面及其在大陆的延伸。它具有一般水准面的特性。全球只有一个大地水准面。它是客观存在的,具有长期的稳定性,在整体上接近地球。大地水准面可以代表地球,并可作为高程的起算面。
- (4)参考椭球面是具有一定参数、定位和定向的地球椭球面。它是数学曲面,没有物理意义。它的建立有一定的随意性。它可以在一定范围内与地球相当接近。参考椭球面是代表地球的数学曲面,是测量计算的基准面,同时又是研究地球形状和地图投影的参考面。

地球表面(地面)、水准面、大地水准面和参考椭球面的关系示意,如图 1-9 所示。

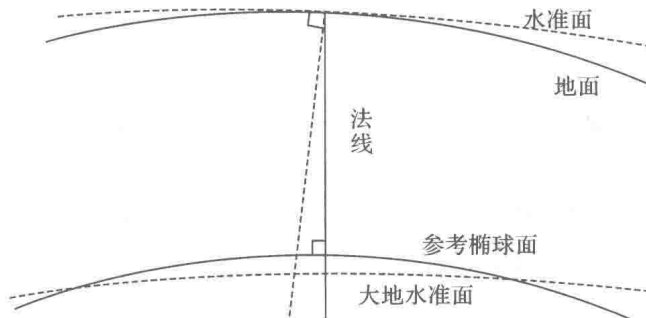


图 1-9 地面、水准面、大地水准面和参考椭球面关系

### 1.1.4 测量坐标系统和高程系统

坐标系是定义坐标如何实现的一套理论方法,包括定义原点、基本平面和坐标轴的指向等。

#### 一、数学坐标系

常用的数学坐标系包括平面直角坐标系(二维)和空间直角坐标系(三维)。

(1)平面直角坐标系。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,简称直角坐标系(Rectangular Coordinates),如图1-10所示。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。水平的数轴叫作 $X$ 轴( $x$ -axis)或横轴,垂直的数轴叫作 $Y$ 轴( $y$ -axis)或纵轴, $X$ 轴 $Y$ 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(origin),以点 $O$ 为原点的平面直角坐标系记作平面直角坐标系 $XOY$ 。

(2)空间直角坐标系。空间任意选定一点 $O$ ,过点 $O$ 作三条互相垂直的数轴 $OX, OY, OZ$ ,它们都以 $O$ 为原点且具有相同的长度单位。这三条轴分别称作 $X$ 轴(横轴)、 $Y$ 轴(纵轴)、 $Z$ 轴(竖轴),统称为坐标轴。它们的正方向符合右手规则,即以右手握住 $Z$ 轴,当右手的四个手指从 $X$ 轴的正向以 $90^\circ$ 角度转向 $Y$ 轴正向时,大拇指的指向就是 $Z$ 轴的正向。这样就构成了一个空间直角坐标系,称为空间直角坐标系 $OXYZ$ ,如图1-11所示。定点 $O$ 称为该坐标系的原点,与之相对应的是左手空间直角坐标系。一般在数学中更常用右手空间直角坐标系,在其他学科方面因应用方便而异。

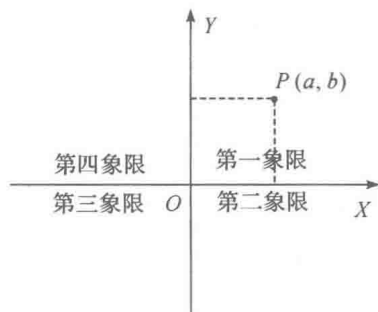


图1-10 平面直角坐标系(二维)

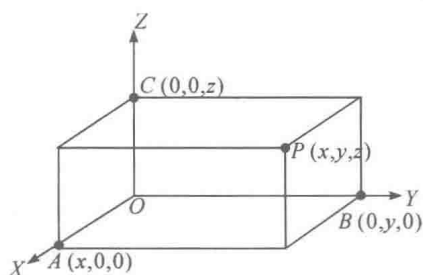


图1-11 空间直角坐标系(三维)

任意两条坐标轴确定一个平面,这样可确定三个互相垂直的平面,统称为坐标面。其中 $X$ 轴与 $Y$ 轴所确定的坐标面称为 $XOY$ 面,类似地有 $YOZ$ 面和 $ZOX$ 面。三个坐标面把空间分成八个部分,每一部分称为一个卦限。如图1-11所示,八个卦限分别用字母 $I, II, \dots, VIII$ 表示,其中含 $X$ 轴、 $Y$ 轴和 $Z$ 轴正半轴的是第 $I$ 卦限,在 $XOY$ 面上的其他三个卦限按逆时针方向排定,依次为第 $II, III, IV$ 卦限;在 $XOY$ 面下方与第 $I$ 卦限相邻的为第 $V$ 卦限,然后也按逆时针方向排定依次为第 $VI, VII, VIII$ 卦限。

#### 二、测量坐标系

测量坐标系是供各种测绘地理信息工作使用的一类坐标系,与数学坐标系统的最大区别在于 $X$ 轴、 $Y$ 轴的指向互换,在使用时应引起重视。

本书描述的测量坐标系均为地固坐标系。地固坐标系指坐标系与地球固联在一起,与地球同步运动的坐标系。与地固坐标系对应的是与地球自转无关的天球坐标系或惯性坐标系。原点在地心的地固坐标系称为地心地固坐标系。地固坐标系的分类方式有多种,



常用分类方法如下。

(1)根据坐标原点位置的不同分为参心坐标系、地心坐标系、站心(测站中心)坐标系等。

参心坐标系是各个国家为了研究地球表面的形状,在使地面测量数据归算至椭球的各项改正数最小的原则下,选择和局部地区的大地水准面最为密合的椭球作为参考椭球建立的坐标系。“参心”指参考椭球的中心。由于参考椭球中心与地球质心不一致,参心坐标系又称为非地心坐标系、局部坐标系或相对坐标系。参心坐标系通常包括两种表现形式:参心空间直角坐标系(以  $X, Y, Z$  为坐标元素)和参心大地坐标系(以  $B, L, H$  为坐标元素)。

地心坐标系是以地球质量中心为原点的坐标系,其椭球中心与地球质心重合,且椭球定位与全球大地水准面最为密合。地心坐标系通常包括两种表现形式:地心空间直角坐标系和地心大地坐标系。

(2)根据坐标维数的不同分为二维坐标系、三维坐标系、多维坐标系等。

(3)按坐标表现形式的不同分为空间直角坐标系、空间大地坐标系、站心直角坐标系、极坐标系和曲线坐标系等。

为表达地球表面地面点相对地球椭球的空间位置,大地坐标系除采用地理坐标(大地经度  $B$  和纬度  $L$ )外,还要使用大地高  $H$ 。地面点超出平均海水面的高程称为绝对高程或海拔高程,随起算面和计算方法的不同,还存在其他各种高程系统,例如以参考椭球面为高程起算面沿球面法线方向计算的大地高系统,以及以似大地水准面为高程起算面沿铅垂线方向计算的正常高系统等。

常见的高程系统有正高系统、正常高系统、力高系统以及大地高系统等。

对测量上确定地面点平面位置和高程常用的大地坐标、高斯直角坐标及平面直角坐标和正高系统、正常高系统等简要介绍如下。

### (一)大地坐标系

地面上一点的平面位置在椭球面上通常用经度和纬度来表示,称为地理坐标。如图 1-12 所示。 $O$  为地心,  $PP'$  为旋转椭球体的旋转轴,又称地轴,它的两端点为北南两极。过地轴的平面称为子午面。子午面与旋转椭球体面的交线称为子午线或经线。过地轴中心且垂直于地轴的平面称为赤道面。赤道面与旋转椭球面的交线称为赤道。

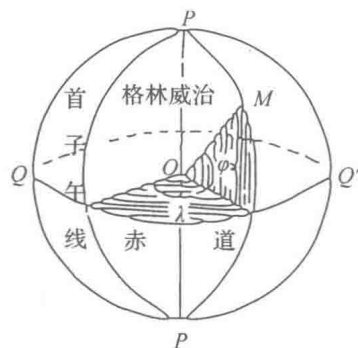


图 1-12 大地坐标

世界各国统一将通过英国格林尼治天文台的子午面作为经度起算面,称为首子午面。首子午面与旋转椭球面的交线,称为首子午线。地面上某一点  $M$  的经度,就是过该点的子午面与首子午面的夹角,以  $\lambda$  表示。经度从首子午线起向东  $180^\circ$  称东经;向西  $180^\circ$  称西经。 $M$  点的纬度,就是该点的法线与赤道平面的交角,以  $\varphi$  表示。纬度从赤道起,向北由  $0^\circ \sim 90^\circ$  称北纬;向南由  $0^\circ \sim 90^\circ$  称南纬。例如,北京的地理坐标,经度是东经  $116^\circ 28'$ ,纬度是北纬  $39^\circ 54'$ 。

### (二)高斯平面直角坐标系

地理坐标只能用来确定地面点在旋转椭球面上的位置,但测量上的计算和绘图,要求最好在平面上进行。大家知道,旋转椭球面是个闭合曲面,如何建立一个平面直角坐标系呢? 主要应用各种投影方法。我国采用横切圆柱投影——高斯-克吕格投影的方法来建立平面直角