



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工程测量学

李永树 主编



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

GONGCHENG CELIANGXUE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 工程测量学

李永树 主编

张正禄 主审

中国铁道出版社

2011年·北京

## 内 容 简 介

本教材包括了测量学的基本知识及有关工程领域涉及的工程测量内容。为了增强本教材的实用性、广泛性及具有较高的参考价值,本书尽量采用步骤化的具体方法描述测绘工作,并增加了测绘相关新技术及典型行业工程测量方法。本教材内容较为完整、丰富,能够满足多至96学时的教学需要,也可适当取舍讲授内容,以便满足不同专业的学时要求。

本教材主要用于土木、建筑、交通运输、地质、油气田、环境、矿业与安全、房地产、水利及国土资源管理等专业的工程测量课程教学用书,也可供从事测绘、工程建设、防灾减灾等领域的科研和专业技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程测量学 / 李永树主编. —北京: 中国铁道出版社,  
2011.3

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-113-12460-1

I. ①工… II. ①李… III. ①工程测量—高等学校—  
教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 008651 号

书 名: 工程测量学

作 者: 李永树 主编

---

责任编辑: 李丽娟

电话: (010) 51873135

电子邮箱: LLJ704@163.com

封面设计: 薛小卉

责任校对: 孙 玫

责任印制: 陆 宁

---

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街8号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 三河兴达印务有限公司

版 次: 2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 19.25 字数: 477千

书 号: ISBN 978-7-113-12460-1

定 价: 36.00元

---

### 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话: 市电 (010) 51873170, 路电 (021) 73170 (发行部)

打击盗版举报电话: 市电 (010) 63549504, 路电 (021) 73187

# 前言

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。为了满足当今时代人才培养、科技发展、工程规划与建设的需求,教材建设与教学内容必须紧跟时代前进的步伐,不断地用测绘新理论、新方法、新技术、新仪器及新标准更新教材内容。本教材在编写时,充分参考了现有“工程测量学”课程教学大纲,以及大量国内外相关教材,并顾及了测绘技术的实际应用情况。为了增强本教材的实用性、广泛性并使其具有较高的参考价值,本书尽量采用步骤化的具体方法描述测绘工作。本教材内容较为完整、丰富,能够满足多至 96 学时的教学需要,也可适当取舍讲授内容,以便满足不同专业的学时要求。

本教材着重突出了实用性及测绘新技术的应用,主要体现在全站仪、全球定位系统、数字化测图、典型行业工程测量方法等内容上,同时介绍了测绘有关新技术,如网络 RTK、无人机测图、DPS、RS、三维激光扫描系统、GIS 及工业测量系统等内容。

本教材基于李永树主持的西南交通大学教材建设研究重点项目“工程测量学”,由西南交通大学李永树主编,武汉大学张正禄主审。参加编写的人员有:西南交通大学李永树(第 1 章)、高山(第 4 章)、龚涛(第 6 章)、熊永良(第 7 章)、范东明(第 8 章)、徐京华(第 10 章)、张献州(第 13 章部分)、刘成龙(第 15 章)、黄丁发(第 17 章),西南科技大学张文君(第 2 章)、王卫红(第 3 章),昆明理工大学方源敏(第 5 章),西南石油大学王泽根(第 9 章),重庆大学刘星(第 11、12 章),重庆交通大学冯晓(第 13 及 14 章部分)、刘国栋(第 14 章部分),成都理工大学余代俊(第 16 章)。最后,由李永树对全书进行了统稿、补充与修改。

在本教材的编写中,作者参阅和引用了大量书籍、文章及网上相关资料,在此向有关作者表示衷心感谢!虽然作者多次修改书稿,力图完善,但在教材中难免存在疏漏和错误,敬请读者提出宝贵的修改意见。

编者  
2010 年 10 月

# 目 录

<b>1 测绘基础知识</b> .....	1
1.1 测绘学概述 .....	1
1.2 地球的形状与大小 .....	4
1.3 测绘工作中的常用坐标系统 .....	5
1.4 测量的基本工作和原则 .....	9
1.5 用水平面代替球面的影响 .....	10
思考题与习题 .....	11
<b>2 高程测量</b> .....	13
2.1 水准测量原理 .....	13
2.2 地球曲率对水准测量的影响 .....	14
2.3 水准测量的仪器和工具 .....	15
2.4 水准测量的实施 .....	22
2.5 水准测量误差分析 .....	27
2.6 水准仪的检验和校正 .....	30
2.7 三角高程测量 .....	33
2.8 GPS 水准测量 .....	34
思考题与习题 .....	34
<b>3 角度测量</b> .....	36
3.1 角度测量原理 .....	36
3.2 测角仪器 .....	37
3.3 测角仪器的使用方法 .....	43
3.4 角度测量方法 .....	45
3.5 测角仪器的检校 .....	49
3.6 角度测量误差分析 .....	52
思考题与习题 .....	53
<b>4 距离测量</b> .....	54
4.1 钢尺量距 .....	54
4.2 视距测量 .....	58
4.3 光电测距 .....	60

思考题与习题 .....	65
<b>5 方向测量</b> .....	67
5.1 三北方向 .....	67
5.2 直线方向的表示方法 .....	68
5.3 磁方位角测量 .....	70
5.4 真方位角测量 .....	71
5.5 坐标方位角的计算 .....	72
思考题与习题 .....	74
<b>6 测量误差理论</b> .....	75
6.1 观测误差 .....	75
6.2 偶然误差的特性 .....	76
6.3 评定精度的标准 .....	78
6.4 误差传播定律 .....	79
6.5 算术平均值及其中误差 .....	82
6.6 加权平均值及其中误差 .....	84
思考题与习题 .....	87
<b>7 全球卫星导航系统</b> .....	89
7.1 概    述 .....	89
7.2 GPS 定位系统的组成 .....	89
7.3 GPS 卫星定位的基本原理 .....	92
7.4 GPS 测量的实施 .....	96
7.5 实时动态定位技术 .....	99
思考题与习题 .....	101
<b>8 控制测量</b> .....	103
8.1 概    述 .....	103
8.2 导线测量 .....	105
8.3 交会法定点 .....	110
8.4 三、四等水准测量 .....	112
8.5 精密三角高程测量 .....	114
思考题与习题 .....	116
<b>9 地形图及其测绘</b> .....	118
9.1 地形图的基本知识 .....	118
9.2 模拟测图法 .....	129
9.3 数字测图法 .....	134
9.4 航测成图概述 .....	138

思考题与习题·····	140
<b>10 地形图的应用·····</b>	<b>142</b>
10.1 地形图识读方法·····	142
10.2 地形图的基本用途·····	143
10.3 地形图的工程应用·····	145
10.4 电子地形图及其应用·····	150
思考题与习题·····	153
<b>11 测设的基本方法·····</b>	<b>155</b>
11.1 概    述·····	155
11.2 测设的基本工作·····	155
11.3 平面点位的测设方法·····	158
11.4 坡度线的测设·····	161
11.5 延长线及中间点的测设·····	162
思考题与习题·····	163
<b>12 建筑施工测量·····</b>	<b>164</b>
12.1 施工控制测量·····	164
12.2 民用建筑施工测量·····	167
12.3 高层建筑施工测量·····	173
12.4 工业建筑施工测量·····	175
12.5 管道工程测量·····	182
12.6 编绘竣工总平面图·····	186
思考题与习题·····	187
<b>13 线路工程测量·····</b>	<b>189</b>
13.1 概    述·····	189
13.2 线路新线初测·····	190
13.3 线路新线定测·····	193
13.4 线路曲线测设·····	201
13.5 新线施工测量·····	209
13.6 既有线改造测量·····	215
思考题与习题·····	217
<b>14 桥隧工程测量·····</b>	<b>219</b>
14.1 桥梁控制测量·····	219
14.2 桥梁施工放样·····	222
14.3 隧道控制测量·····	227
14.4 隧道施工测量·····	231

14.5 隧道贯通误差预计简介·····	233
思考题与习题·····	234
<b>15 建筑工程变形监测·····</b>	<b>236</b>
15.1 概    述·····	236
15.2 沉降监测·····	238
15.3 水平位移监测·····	243
15.4 倾斜监测·····	248
15.5 挠度监测·····	249
思考题与习题·····	250
<b>16 典型行业工程测量·····</b>	<b>251</b>
16.1 地质工程勘探测量·····	251
16.2 矿山测量·····	253
16.3 油气田工程测量·····	257
16.4 水利工程测量·····	262
16.5 地籍测量·····	267
16.6 房产测量·····	272
思考题与习题·····	275
<b>17 测绘新技术简介·····</b>	<b>276</b>
17.1 卫星导航定位新技术·····	276
17.2 数字摄影测量新技术·····	279
17.3 遥感新技术·····	281
17.4 无人机低空遥感技术·····	285
17.5 地理信息系统·····	287
17.6 三维激光扫描系统·····	290
17.7 工业测量系统·····	293
思考题与习题·····	295
<b>参考文献·····</b>	<b>296</b>



## 1.1 测绘学概述

### 1.1.1 测绘学的定义和任务

测绘学(又称地球空间信息学或测量学)是研究地球形体、地表、地下和外层空间中的各种自然和人造物体的形状,以及对与地理空间分布有关的信息进行采集、处理、表达和应用的一门科学。简而言之,测绘学主要是研究确定空间点位的科学。测绘学的主要任务有以下三个方面:

(1)研究、确定地球的形状、大小和重力场及其变化;

(2)测定(或称测量)地表、地下及外层空间的形态,确定各种自然及人造物体的空间坐标,并绘制各种地图和专题图;

(3)将设计坐标或图纸上的点位测设(或称放样、标定)到实地。

测绘学的服务领域已扩大到国民生活、经济和国防建设及社会发展的各个方面,能够提供自然物体、人工设施的空间分布特征及其属性特征,为信息化社会提供重要的基础地理信息(主要形式为4D产品,即DEM——Digital Elevation Model,数字高程模型;DLG——Digital Line Graphic,数字线划图;DRG——Digital Raster Graphic,数字栅格图;DOM——Digital Orthophoto Map,数字正射影像图),为各项工程的规划、设计、建设及质量评估等提供技术支持和数据保障,并为分析自然规律和社会现象,解决经济建设和社会发展过程中的问题提供科学决策依据。测绘学的核心技术是以“3S”为代表的现代技术(即:GPS——Global Positioning System,全球定位系统;RS——Remote Sensing,遥感;GIS——Geographic Information System,地理信息系统),以及数字摄影测量和三维激光扫描系统等。

### 1.1.2 测绘学的分类

测绘学可分为以下几个主要分支学科:

(1)大地测量学。研究和确定地球形状、大小和重力场及其变化。基本任务是建立全球和国家大地控制网,测定地球的形状、大小和重力场,为地形测图及各项工程测量提供起算数据,并为空间科学、军事科学、重要工程及地震预报等研究提供基础资料。

(2)地形测量学。研究和测绘地表物体和高低起伏形态的成图理论、方法和技术的学科。基本任务是快速、准确地采集地理空间信息,根据地形图图式规定的符号,将地球表面的自然和人工物体及地表起伏形态按一定的比例尺测绘在图纸上,或存储于计算机中。

(3)摄影测量与遥感。研究利用航空航天传感器获取目标物体的影像和光谱数据,并用图形、图像和数字形式表达地表和物体的形状、大小及空间位置的学科。基本任务是通过摄影像片或遥感图像进行处理、量测、解译,以便确定地理空间位置及其相关属性。

(4)工程测量学。研究在工程的规划设计、施工建设、质量评估及运营管理各个阶段进行测量工作的理论、方法和技术的学科,即测绘学在工程建设领域的直接应用。基本任务是在工程规划设计阶段提供地形资料,在施工建设阶段按照工程设计要求在实地标定工程位置,在质量评估阶段进行竣工测量、变形观测及工程验收等工作,在运营管理阶段进行维护、改扩建及安全性监测等工作。

(5)地图制图学。研究各类地图的制图理论,以及设计、编绘、印刷和出版的技术、方法及其应用的学科。基本任务是采用地图投影、地图编绘、地图整饰和地图印制等技术,利用测量成果编辑和绘制各类地图及专题图件。

(6)海洋测绘学。研究海洋空间地理信息的获取、处理和应用的学科。基本任务是获取海底和水下地形、海洋重力场及磁力场信息,设计、编绘海图,进行海洋工程建设、航海安全保障及海洋生态环境保护等测绘工作。

(7)地理信息工程。研究地理空间信息的获取、存储、处理、建模、分析、可视化及应用,以及研发地理信息系统理论与技术的学科。基本任务是地理信息采集和处理、输入与输出,开发基础软件平台及空间数据库管理系统,建立各种地理信息系统。

(8)地籍和土地管理学。研究地籍的勘定、地籍图的编绘、土地信息的分类和管理,以及不动产(房地产)的测绘、登记和管理的学科。基本任务是地籍测量与地籍调查,土地信息的分类、编码及处理,建立地籍、土地利用与规划等地理信息系统,以及土地的定级、估价及潜力分析等。

### 1.1.3 测绘学在国家经济建设和社会发展中的作用

测绘工作在人们生产与生活中发挥着眼睛和先锋的作用,测绘学在国家经济建设的各个领域、社会发展的各个阶段及国防建设中都发挥着越来越重要的不可替代的作用。例如:在城乡建设、资源勘察与开发、国防工程及土地利用等领域都需要地图等地理信息,以便进行规划和设计;对于交通、水利、建筑及农业等各种工程的施工建设,都需要确定工程的形状及其相互空间位置关系,以便满足设计要求,并进行工程质量评估;在大型桥隧、摩天大楼及电视塔等重要工程的施工和使用过程中,需要进行变形监测和安全性预测,以便保证建筑设施的正常使用和人民生命财产的安全。同时,在进行科学研究、太空开发、海洋利用、防灾减灾、科学决策及交通旅游等方面,都需要测绘提供基础地理信息和数据保障。可见,在人们的生活和生产活动中都离不开测绘。

由于测绘学大量的引进和应用现代高新技术,使得测绘理论和方法产生了深刻的根本性变革,向着数字化、信息化、网络化和自动化方向迅速发展,服务领域扩大到了国民经济、国防建设及社会发展的各个方面。当今世界正步入信息时代,信息化已经成为经济发展和社会进步新的驱动力,以测绘为基础和主干的地球空间信息产业已经成为现代社会产业结构中不可缺少的重要组成部分,为人们的工作和生活提供了多方面的自然和社会信息。

### 1.1.4 测绘学的发展概况

大约在公元前 2600 年建设的埃及大金字塔,就已经开始利用工具进行测量工作,以便精确地进行位置与形状的标定工作。早在公元前 1000 多年,我国就有地图出现。建于公元前 256 年的都江堰水利枢纽工程,为防洪和灌溉目的开始了水利工程测量工作。我国的地籍管理和土地测量最早出现在殷周时期,隋唐建立了户籍册,宋朝出现地块图,到了明朝洪武四年,

编制了世界最早的地籍图册。

综观测绘学的发展历程,可以认为是人类对地球认识的三大阶段:

(1)18世纪以前,人们用了数千年时间对地球各大洲的轮廓与分布情况进行了探索和分析,并给各个大洲命名。同时,人们利用准绳(可定平和丈量距离)和规矩(可测高度、深度和画矩形)等简单测量工具,进行房屋建筑和农田水利等方面的测量工作。

(2)18世纪至20世纪中期,世界各国掀起了测量地形及地界的高潮,纷纷建立了专门的测绘机构和专业测量队伍,形成了测绘科学体系,测绘的各种地图受到了普遍重视和广泛应用,政府对测绘业务与产品进行专门化管理。

(3)20世纪中期至今,人们开始利用卫星、航天飞机等空间技术观察和认识地球,使用电子仪器进行角度、距离和方向测量,利用计算机和网络技术处理、分发、管理、分析、表述及使用测绘数据,并且,测绘工作正在向数字化、信息化、网络化、自动化及可视化方向快速发展。

### 1.1.5 工程测量学的任务、作用及发展趋势

工程测量学按其研究对象与内容主要可分为:建筑工程测量、交通(线路)工程测量、矿山工程测量、水利工程测量、地质工程测量、军事工程测量、石油工程测量、精密工程测量、工程摄影测量及变形监测等。工程测量学的研究对象涉及的地理空间包括地面、地下、水下、空中,研究目标是解决工程中的测绘问题,主要有以下三方面任务:

(1)测定——测量点位或测绘地形图,即确定工程的形状、大小及其相互位置关系,测量地面高低起伏的形态,以便进行工程规划和设计;

(2)测设——将规划或设计的点位标定到实地,在施工和大型构件安装过程中进行位置的标定工作,以便指导施工,保证施工质量和安全;

(3)监测——在高耸或大型工程的施工、竣工及使用过程中,进行变形监测及预计,以便保障工程质量及使用安全。

在各项工程的规划、勘察、设计、施工建设、质量评估、运营管理等过程中,都需要进行测绘工作,以便指导工程顺利实施。例如铁道工程,在规划阶段需要在测绘图纸上进行线路规划和工程量统计,以便确定最优线路方案;在勘察阶段,需要在测绘图纸上和在地确定线路的勘探线及勘探点位置;在设计阶段,需要在测绘图纸上进行线路工程设计并确定最优施工方案;在施工建设阶段,需要将测绘图纸上设计的线路工程位置测设到实地,以便进行施工建设;在质量评估阶段,需要对已完成的线路工程进行竣工测量,并与线路设计值进行检查和工程验收;在运营阶段,需要对线路工程进行监测、维护和安全性评估。

此外,在高能加速器设备部件的安装中,在大型发射和接收天线的制造或安装工作中,在卫星和导弹发射轨道及精密传送带的铺设等精密工程测量工作中,测量角度(或方向)的精度已达到 $0.1''$ ,测量距离的精度已达到 $0.01\text{ mm}$ ,并已实现自动观测、自动记录、自动计算及自动绘图等自动化过程。

工程测量学的发展趋势可概括如下:

- (1)内外业工作一体化,内业、外业测量工作无明确界线;
- (2)数据获取及处理自动化,利用现代测绘技术自动采集、存储、分析和处理数据;
- (3)测量过程智能化,通过软件系统实现对观测仪器的智能控制,获取高精度测量成果;
- (4)成果数字化及可视化,测绘成果为图表、图像、声音及三维景观等数字化形式;
- (5)数据传输网络化,测绘信息在网上便捷、安全传播和流通,有关信息实现共享。

工程测量学的发展特点可概括为:精确、智能、快速、简便、连续、动态、遥测、实时和多维。“3S”技术、数字摄影测量、三维激光扫描系统、测量机器人等新技术将得到进一步发展,应用范围将扩大,智能化水平将增强,并显著地提高测量成果的可靠性及实时性;测量成果将从一维、二维到三维及多维,从点信息到面信息,从静态到动态,从后处理到实时处理,从手动观测到自动观测,从地面到高空、地下及水下观测,从人工量测到无接触遥测,从周期间断性观测到连续观测,从毫米级精度到微米级乃至纳米级精度。

随着人类文明进展,现代科技新成就将为工程测量不断地提供新的方法和手段,从而使测绘成果的应用领域不断扩大,工程测量学的发展不断深入,而工程测量学的发展又将直接对改善人们的生活环境,提高人们的生活质量起到极大地推动作用。

## 1.2 地球的形状与大小

测绘工作大多是在地球表面进行,测绘成果的处理、地图绘制及测绘基准面的确定等都会涉及地球的形体问题,因此,必须要顾及和研究地球的形状与大小。

中国古人观察到“天似穹隆”,提出了“天圆地方”的说法。西方的古人按照自己所居住的陆地为大海所包围,则认为“地如盘状,浮于无垠海洋之上”。公元前6世纪后半叶,毕达哥拉斯提出地球为圆球的说法。公元前3世纪,亚历山大学者最早证实了“地圆说”。之后,我国东汉时期的天文学家张衡也较完整地阐述了大地是一个球体。1522年,航海家麦哲伦率领船队从西班牙出发,一直向西航行,经过大西洋、太平洋和印度洋,最后又回到了西班牙,以实践证明了地球是一个球体。

近代科学家牛顿仔细研究了地球的自转,提出地球是赤道凸起,两极扁平的椭球体,形状像个橘子。到20世纪50年代末期,人造地球卫星发射成功,通过卫星观测地球,发现南北两个半球不对称,南极离地心的距离比北极略短。因此,有人把地球描绘成梨形。现代科学家们认为,最好把地球看作是一个“不规则的球体”。

地球的表面有高山、深谷、丘陵、平原、江湖和海洋等,最高的山峰珠穆朗玛峰高出海平面8 844.43 m,最深的太平洋马里亚纳海沟低于海平面11 034 m,两者相对高差接近20 km,但与地球的平均半径6 371 km相比还是很小的。地球表面的陆地面积仅占29%,海洋面积为71%。因此,可以近似地认为地球的形体就是被海水面所包围的球体,可设想将一静止的海水面扩展延伸,穿过大陆和岛屿后形成一个封闭的曲面,这个静止的封闭海水面称作水准面。由于海水面受潮汐、风浪等影响,时高时低,故水准面有无数个,其平均位置的水准面称为大地水准面,如图1-1所示。由大地水准面所包围的形体称大地体,通常用大地体来代表地球的形状和大小。

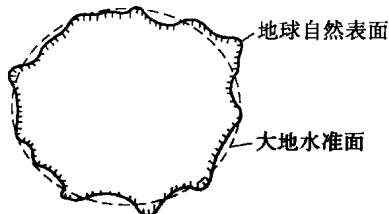


图 1-1 地球自然表面示意图

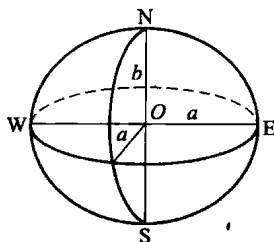


图 1-2 旋转椭球体

水准面的特性是面上处处与铅垂线相垂直,水准面和铅垂线被测绘学定义为基准面和基准线。由于地球内部质量分布不均匀,致使水准面上各点的铅垂线方向发生不规则变化,所以,与铅垂线方向垂直的大地水准面是一个无法用数学式表述的不规则曲面,在这样的面上难以进行测绘数据处理和制图。因此,通常选用一个既与大地水准面非常接近又能用数学式表述的规则球体来代表地球的形体,如图 1-2 所示,它就是长半轴为  $a$ ,短半轴为  $b$  的旋转椭球体(也称地球椭球体或参考椭球体)。旋转椭球体的形状和大小由  $a$ 、 $b$  及扁率  $\alpha$  等椭球元素确定,其中:

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

目前,我国采用的参考椭球元素为: $a=6\,378\,140\text{ m}$ , $\alpha=1/298.257$ 。由于参考椭球的扁率较小,在小范围进行测绘工作时可以近似地将旋转椭球体当作圆球来处理,其半径通常取  $6\,371\text{ km}$ ,这样既能满足要求,又能大大地简化测绘工作。

### 1.3 测绘工作中的常用坐标系

坐标系是测绘学中的重要概念。测绘的基本工作是确定点的空间位置,而点位则与一定的坐标系相对应,例如,直角坐标系中用  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个分量表示。下面介绍常用的几种坐标系。

#### 1.3.1 地理坐标系

当研究或测量的地域较广时,通常采用地理坐标来确定空间点位。地理坐标系是一种用经度和纬度来表示点位的球面坐标系,根据基准面的不同可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,铅垂线为基准线,空间点  $P$  沿铅垂线方向投影到大地水准面上的位置  $P'$ ,称为  $P$  点的天文坐标,如图 1-3 所示。NS 轴为地球自转轴,N 为北极,S 为南极, $O$  为地球中心。包含  $P$  点的铅垂线和地球自转轴 NS 的平面称为  $P$  点的天文子午面。天文子午面与大地水准面的交线称为天文子午线(也称经线)。将通过英国格林尼治天文台的子午面称为起始子午面,相应的子午线称为起始子午线(也称首子午线,零子午线,本初子午线)。过点  $P$  的天文子午面与起始子午面所夹的两面角  $\lambda$  称为  $P$  点的天文经度,其值为  $0^\circ\sim 180^\circ$ ,在起始子午线以东称东经,以西则称西经。

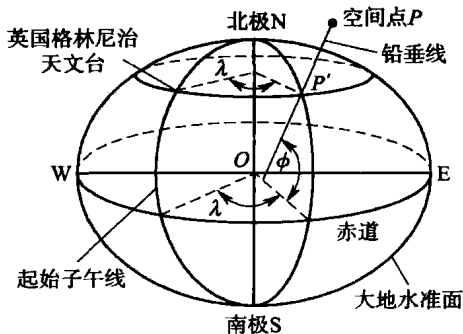


图 1-3 天文坐标系

通过地球中心  $O$  且垂直于地球自转轴的平面称为赤道面,它与地球表面的交线称为赤道,其他垂直于地球自转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  $\phi$  称为  $P$  点的天文纬度,其值为  $0^\circ\sim 90^\circ$ ,在赤道以北称北纬,以南则称南纬。天文坐标  $(\lambda, \phi)$  可用天文测量的方法得到。例如,北京某地的天文坐标为东经  $116^\circ 29'$ ,北纬  $39^\circ 55'$ 。

##### (2) 大地坐标系

以参考椭球面为基准面,其法线为基准线,空间点  $P$  沿法线方向投影到参考椭球面上的位置  $P'$ ,称为  $P$  点的大地坐标,如图 1-4 所示。包含空间任意点  $P$  的法线且通过椭球旋转轴

NS的平面称为 $P$ 的大地子午面。过 $P$ 点的大地子午面与起始子午面所夹的两面角 $L$ 称为 $P$ 点的大地经度,其值同样分为东经 $0^\circ\sim 180^\circ$ 和西经 $0^\circ\sim 180^\circ$ 。过点 $P$ 点的法线与椭球赤道面所夹的线面角 $B$ 称为 $P$ 点的大地纬度,其值同样分为北纬 $0^\circ\sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。

尽管天文坐标与大地坐标所依据的基准面和基准线不同,但差异较小,因此,在一般的测量工作中可以忽略其差异。

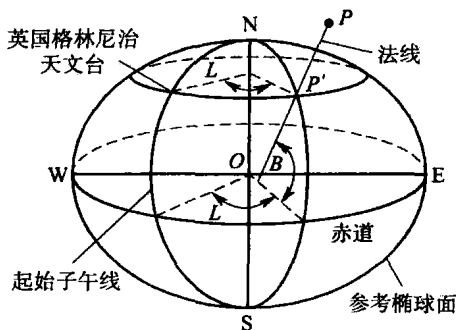


图 1-4 大地坐标系

### 1.3.2 平面直角坐标系

在测量工作中,若用球面坐标来表示地面点的位置,在计算和制图时都很不方便。因此,通常用平面直角坐标系来表示点位。测量工作中所用的平面直角坐标系与数学上的直角坐标系不同之处在于:测量坐标系以 $x$ 轴为纵轴表示南北方向,以 $y$ 轴为横轴表示东西方向;象限按顺时针方向编号,如图 1-5 所示,这样规定可使数学中的三角公式直接用于测量计算。

#### (1) 独立平面直角坐标系

当测区范围较小,能够忽略地球曲率的影响而将球面当作平面看待时,可建立独立平面直角坐标系(也称假定平面直角坐标系,或任意平面直角坐标系),如图 1-5 所示。该坐标系通常选取建筑物的轴线方向(如厂房、桥梁或隧道的轴线)为纵轴 $x$ 方向,与其垂直的方向作为横轴(即 $y$ 轴),原点设在测区的西南角,以免坐标出现负值。

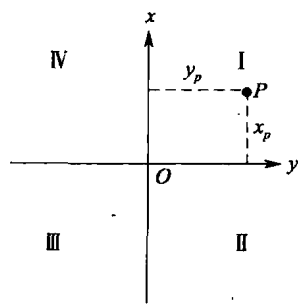


图 1-5 独立平面直角坐标系

#### (2) 高斯平面直角坐标系

当测区范围较大时,必须顾及地球曲率的影响。为了将球面转换为平面,我国采用高斯投影的方法。高斯投影就是假设一个圆柱套在地球椭球体外,并与某条子午线相切,这条相切的子午线称为中央子午线,如图 1-6(a)所示。然后,采用等角投影的方法,将中央子午线两侧椭球面投影到圆柱面上,再将圆柱面沿母线裁开并展成平面,则得到投影平面,如图 1-6(b)所示。高斯投影具有以下特点:

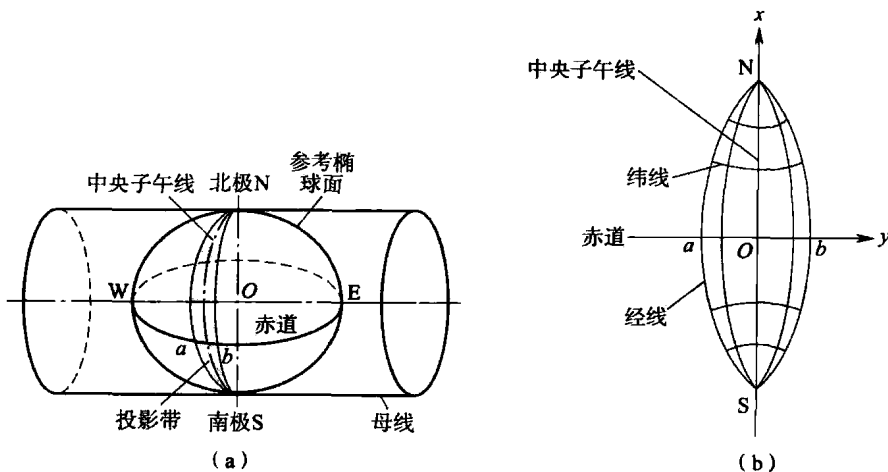


图 1-6 高斯投影概念

1) 投影后的中央子午线为直线, 无长度变化; 其余经线投影为凹向中央子午线的对称曲线, 长度有变化。

2) 赤道的投影也为一直线, 长度有变化; 其余纬线投影为凸向赤道的对称曲线, 长度有变化。

3) 经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系, 即投影后的图形角度无变形。

高斯投影没有角度变形, 但长度、面积有变形, 离中央子午线越远则变形越大。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范围内, 这就是所谓的分带投影法, 如图 1-7 所示。投影带一般分为 6°带和 3°带两种, 如图 1-8 所示。

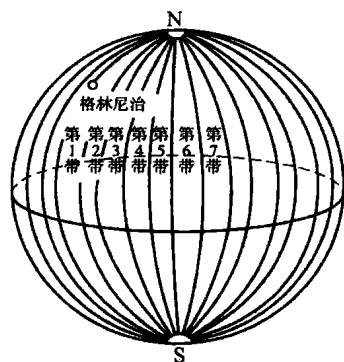


图 1-7 投影分带

6°带投影是从起始子午线开始, 自西向东, 每隔经差 6°分为 1 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:

$$L_6 = (6n - 3)^\circ \quad (1-2)$$

式中  $n$  为 6°带的带号。

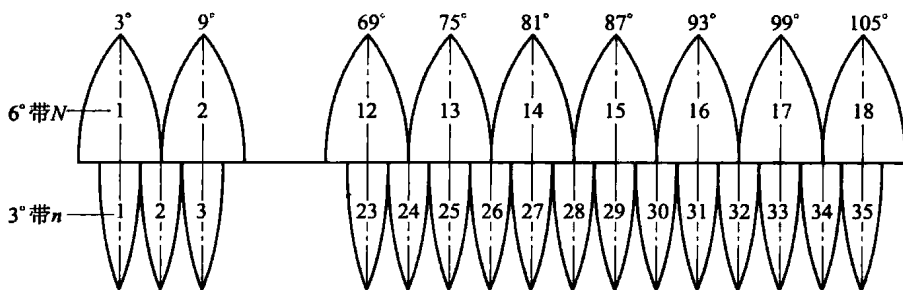


图 1-8 6°带和 3°带投影

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:

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

式中  $n'$  为 3°带的带号。

我国位于东经 72°~136°之间, 包括 11 个 6°投影带, 即 13~23 带; 22 个 3°投影带, 即 24~45 带。

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, 向北为正; 将赤道的投影作为横坐标轴, 用  $Y$  表示, 向东为正; 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 1-9 所示。对应于每一个投影带, 就有一个独立的高斯平面直角坐标系。

我国位于北半球, 在每个投影带的坐标系中,  $X$  坐标值总为正 (表示距赤道的距离); 而  $Y$  坐标值则有正有负, 这对于计算和使用均不方便。为了使  $Y$  坐标都为正值, 则将纵坐标轴向西平移 500 km (6°投影带的半个投影

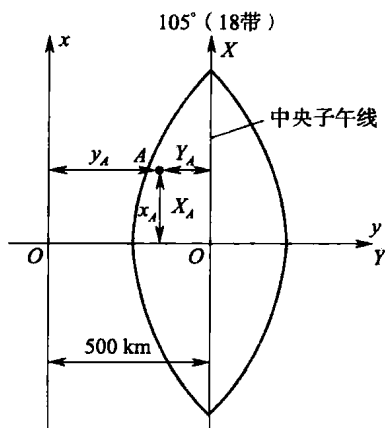


图 1-9 高斯平面直角坐标

带的最大宽度约为334 km);同时,为了区别不同的投影带坐标系,则在其Y坐标前再加上投影带的带号。这样,每个空间点的坐标则唯一了。如图1-9中的A点位于18投影带,其自然坐标为: $X_A=3\ 300\text{ km}$ , $Y_A=-280\text{ km}$ ;而A点的通用坐标(或称国家统一坐标)则为: $x_A=3\ 300\text{ km}$ , $y_A=-280+500+\text{带号}=18\ 220\text{ km}$ 。

### 1.3.3 地心坐标系

卫星测量是利用空中卫星的位置来确定地面点的位置。由于卫星围绕地球质心运动,所以卫星测量中需采用地心坐标系,该坐标系一般有两种表达形式,如图1-10所示。

#### (1)地心空间直角坐标系

坐标系原点O与地球质心重合,Z轴指向地球北极,X轴指向格林尼治起始子午面与地球赤道的交点,Y轴垂直于XOZ平面构成右手坐标系。

#### (2)地心大地坐标系

椭球体中心与地球质心重合,椭球短轴与地球自转轴重合,大地经度L为过地面点的椭球子午面与起始子午面的夹角,大地纬度B为过地面点的法线与赤道面的夹角,大地高H为地面点沿法线至椭球面的距离。

因此,任意空间点P在地心坐标系中的坐标,可以表示为X,Y,Z或L,B,H。二者之间有一定的换算关系。美国的全球定位系统(即GPS)采用的WGS-84坐标系就属于地心坐标系。

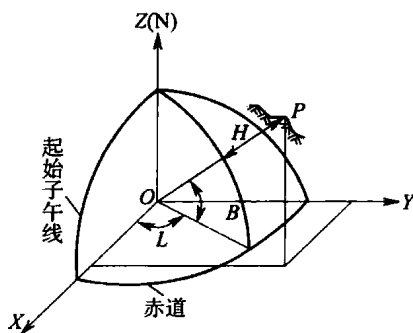


图 1-10 空间直角坐标系

### 1.3.4 高程坐标系

在一般的测量工作中,都是以大地水准面作为高程起算面(称高程基准面)。任意空间点A沿铅垂线方向到大地水准面的距离称为A点的高程(也称绝对高程,或海拔,或标高),通常用 $H_A$ 表示,如图1-11所示。我国规定,以青岛验潮站长期观测得到的黄海平均海面为大地水准面,并由此建立起全国的高程系,以前称“1956 黄海高程系”,目前称“85 国家高程基准”。

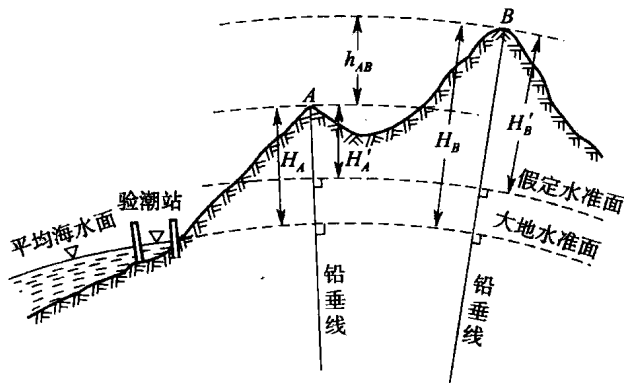


图 1-11 地面点的高程

当待测地区没有国家高程点时,也可以假定一个水准面作为该地区的高程起算面。地面点沿铅垂线至假定水准面的距离,称为该点的相对高程(或称假定高程),如图1-11中的 $H'_A$ 、 $H'_B$ 分别为地面A、B两点的假定高程。

空间两点的高程之差称为高差,通常用 $h$ 表示,例如,A点至B点的高差可表示为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知,高差有正、有负,分别表示实际地形的上坡或下坡方向,并用下标注明其方向。



## 1.4 测量的基本工作和原则

### 1.4.1 测量的基本工作

如图 1-12 所示,  $A、B、C、D、E$  为地面上高低不同的一系列点位, 构成空间多边形  $ABCDE$ , 图下方为其在水平面的投影多边形  $abcde$ 。水平面上的角就是空间两斜边的两面角在水平面上的投影。工程中常用的地形图, 就是将空间点、线、面垂直投影到水平面并按一定的比例缩绘在图纸上。因此, 地形图上各点之间的相对位置可以由距离、角度和高差确定, 若已知一点的坐标  $(x, y, H)$  和一条直线的方向, 则可根据测量的距离、角度及高差计算其他点的坐标和高程。

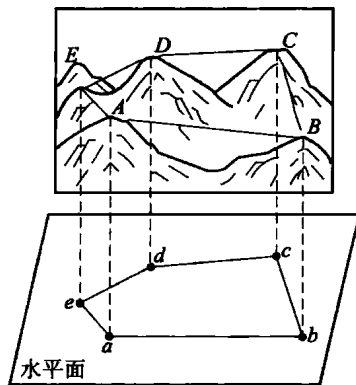


图 1-12 测量的基本工作

由此可知, 测量的基本工作是:

- (1) 测量高程(详见本书第 2 章);
- (2) 测量角度(详见本书第 3 章);
- (3) 测量距离(详见本书第 4 章);
- (4) 测量方向(详见本书第 5 章)。

### 1.4.2 测量工作的原则

测量工作的原则以下面地形测量为例来说明。地面上的地物(如房屋、道路、湖泊等)千差万别, 地貌(如山峰、盆地、悬崖等)高低起伏且形态各异。地物和地貌统称为地形。测定地形的工作称为地形测量, 其主要工作是测量一些有特征意义的地形点(如房角点、道路拐弯点及山头顶点等), 然后按比例缩小绘制在图纸上用线条连接起来表示地形, 如图 1-13 所示。地面房屋、道路及田地等地物通常用几何图形来表示, 而山丘、平原及盆地等地貌通常用等高线表示, 这样, 便把客观现实在图纸上表示出来了。

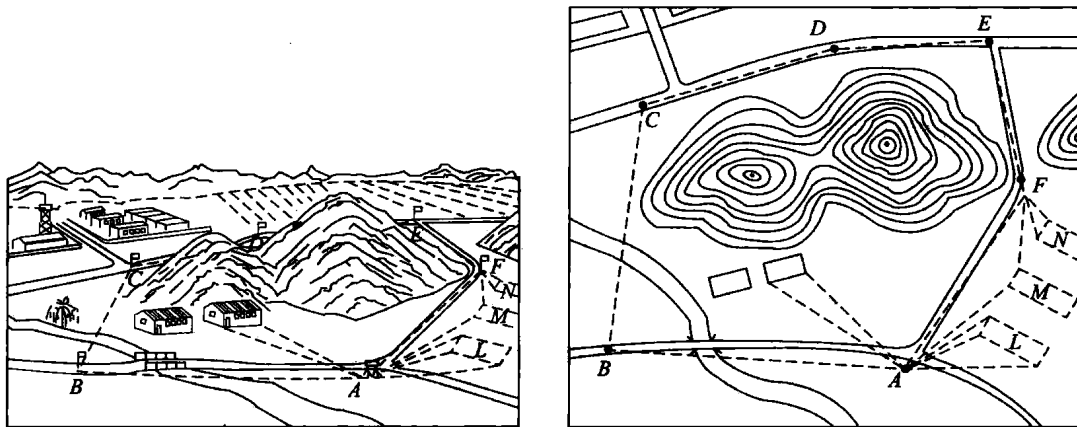


图 1-13 控制测量与碎部测量

为了保证测区内所有地形点的精度基本一致, 应先在测区内统一选择一些起控制作用的点(例如, 视线开阔的  $A、B$  等点, 称为控制点), 构成一定的几何图形(例如, 多边形  $ABCDEF$ ,