



# 现代路线工程测量

*Xiandai Luxian Gongcheng Celiang*

主 编 杨鹏源 牛全福

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

# 现代路线工程测量

主 编 杨鹏源 牛全福

中国矿业大学出版社

## 内 容 简 介

本书共分十四章,内容包括:绪论、高程控制测量、角度测量、直线定向与距离测量、平面控制测量、GPS技术在路线测量中的应用、大比例尺数字化地形图测绘、路线工程施工放样基本方法、路线中线测量、路线断面测量、道路施工测量、桥涵施工测量、管线工程测量、输电线路测量。

全书既立足于测量学基础知识、基本原理、基本技术与基本方法,以理论为基础,以路线工程从勘测设计到施工验收为主线,又增加了现代测绘技术,如GPS技术和数字化测绘技术以及全站仪测量技术在路线工程测量中的应用。

本书可作为高等学校土木工程、道路桥梁与渡河工程、给水排水科学与工程、工程管理、建筑学、城市规划等专业的教材,也可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

现代路线工程测量 / 杨鹏源,牛全福主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3073 - 7

I. ①现… II. ①杨…②牛… III. ①线形设计—工程测量  
IV. ①U412.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第080029号

书 名 现代路线工程测量

主 编 杨鹏源 牛全福

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 16 字数 420 千字

版次印次 2016年10月第1版 2016年10月第1次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

# 前 言

本书按照高等学校交通类各专业测量学课程教学基本要求而编写。

随着我国以公路、铁路为代表的路线工程建设的迅猛发展,路线工程测量技术在其中起着非常重要的作用,测量技术也朝着智能化、自动化方向发展。笔者在总结多年实践教学经验的基础上,结合当今测绘技术的进展,增加了全站仪、电子水准仪、GPS技术和数字化测绘技术等路线工程建设中的应用内容而编写了本教材。全书既立足于测量学基础知识、基本原理、基本技术与基本方法,以理论为基础,以路线工程从勘测设计到施工验收为主线,又增加了现代测绘技术的应用。

参加本教材编写的人员及分工如下:

杨鹏源(兰州理工大学),第1、2、3、4、5、7、9章

牛全福(兰州理工大学),第13、14章

杨育丽(兰州理工大学),第8、10章

张秀霞(兰州理工大学),第11、12章

孔令杰(兰州理工大学),第6章

全书由杨鹏源和牛全福担任主编,最后由杨鹏源统稿和定稿;党星海教授主审,在此致以诚挚的谢意!

本书在编写过程中汲取了有关教材、专著和期刊论文的成果,谨向有关作者表示诚挚的敬意和真诚的感谢!

由于编者水平所限,书中可能存在谬误之处,敬请读者批评指正,并将意见和建议发至 yangpy@lut.cn,以便笔者修订完善。

作 者

2016年1月

## 目 录

|                   |    |
|-------------------|----|
| 第一章 绪论            | 1  |
| 第一节 测绘学概述         | 1  |
| 第二节 地面上点位的确定      | 6  |
| 第三节 测绘工作的基本原则     | 12 |
| 第四节 用水平面代替水准面的限度  | 13 |
| 第五节 路线测量概述        | 15 |
| 思考题与习题            | 18 |
| 第二章 高程控制测量        | 19 |
| 第一节 水准测量原理        | 19 |
| 第二节 水准测量仪器及使用     | 21 |
| 第三节 水准测量的施测方法及计算  | 28 |
| 第四节 三、四等水准测量      | 38 |
| 第五节 自动安平水准仪与精密水准仪 | 39 |
| 第六节 数字水准仪及使用      | 44 |
| 第七节 三角高程测量        | 45 |
| 思考题与习题            | 48 |
| 第三章 角度测量          | 50 |
| 第一节 角度测量原理        | 50 |
| 第二节 光学经纬仪         | 51 |
| 第三节 水平角测量         | 57 |
| 第四节 竖直角测量         | 61 |
| 第五节 经纬仪的检验与校正     | 64 |
| 第六节 角度测量误差分析      | 67 |
| 第七节 激光经纬仪与电子经纬仪   | 69 |
| 思考题与习题            | 72 |
| 第四章 直线定向及距离测量     | 74 |
| 第一节 直线定向          | 74 |
| 第二节 钢尺量距          | 81 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 第三节 视距测量 .....                   | 88         |
| 第四节 光电测距仪原理及使用 .....             | 92         |
| 第五节 全站仪概述 .....                  | 99         |
| 思考题与习题 .....                     | 104        |
| <b>第五章 平面控制测量</b> .....          | <b>105</b> |
| 第一节 控制测量概述 .....                 | 105        |
| 第二节 导线测量 .....                   | 112        |
| 第三节 控制点加密 .....                  | 115        |
| 第四节 全站仪三维坐标导线测量 .....            | 117        |
| 思考题与习题 .....                     | 119        |
| <b>第六章 GPS 技术在路线测量中的应用</b> ..... | <b>121</b> |
| 第一节 全球定位系统(GPS)简介 .....          | 121        |
| 第二节 GPS 定位原理 .....               | 123        |
| 第三节 GPS 静态测量与数据处理 .....          | 128        |
| 第四节 GPS-RTK 定位技术原理 .....         | 132        |
| 第五节 GPS-RTK 技术在路线工程中的应用 .....    | 134        |
| 思考题与习题 .....                     | 142        |
| <b>第七章 大比例尺数字化地形图测绘</b> .....    | <b>143</b> |
| 第一节 地形图的基本知识 .....               | 143        |
| 第二节 大比例尺地形图解析测绘方法 .....          | 153        |
| 第三节 大比例尺数字化测图 .....              | 167        |
| 思考题与习题 .....                     | 170        |
| <b>第八章 路线工程施工放样基本方法</b> .....    | <b>171</b> |
| 第一节 施工放样测量概述 .....               | 171        |
| 第二节 施工放样测量的基本工作 .....            | 172        |
| 第三节 点的平面位置的放样 .....              | 176        |
| 思考题与习题 .....                     | 179        |
| <b>第九章 路线中线测量</b> .....          | <b>180</b> |
| 第一节 路线中线的直线测量 .....              | 180        |
| 第二节 圆曲线及其测设 .....                | 185        |
| 第三节 缓和曲线及其测设 .....               | 189        |
| 第四节 复曲线的测设 .....                 | 196        |
| 思考题与习题 .....                     | 197        |

|                |     |
|----------------|-----|
| 第十章 路线断面测量     | 198 |
| 第一节 路线断面测量概述   | 198 |
| 第二节 路线纵断面测量    | 198 |
| 第三节 路线横断面测量    | 202 |
| 思考题与习题         | 204 |
| 第十一章 道路施工测量    | 206 |
| 第一节 施工控制桩的测设   | 206 |
| 第二节 路基的测设      | 206 |
| 第三节 竖曲线的测设     | 208 |
| 第四节 路线竣工测量     | 210 |
| 思考题与习题         | 211 |
| 第十二章 桥涵施工测量    | 212 |
| 第一节 桥涵施工测量概述   | 212 |
| 第二节 桥梁控制网布设    | 212 |
| 第三节 桥梁施工测量     | 214 |
| 第四节 涵洞施工测量     | 217 |
| 思考题与习题         | 218 |
| 第十三章 管线工程测量    | 219 |
| 第一节 管线中线测量     | 219 |
| 第二节 管线施工测量     | 222 |
| 思考题与习题         | 226 |
| 第十四章 输电线路测量    | 227 |
| 第一节 输电线路施工设计测量 | 227 |
| 第二节 输电线路施工测量   | 239 |
| 思考题与习题         | 246 |
| 参考文献           | 247 |

## 第一章 绪 论

**【本章要点】:**本章主要介绍测绘学的基本概念、发展简史及有关学科分类;路线工程测量的概念、基本技术内容,路线测量的基本过程以及路线测量的基本特点。

### 第一节 测绘学概述

测绘学是研究地球的形状和大小、地球重力场以及确定地球表面(包括空中、地表、地下和海洋)物体的空间位置,并对于这些空间位置信息进行处理、储存和管理的科学。它包括测量和制图两项主要内容。

测绘学的应用范围很广。在城乡建设规划、国土资源的合理利用、农林牧渔业的发展、环境保护以及地籍管理等工作中,必须进行土地测量和测绘各种类型、各种比例尺的地图,以供规划和管理部门使用。在地质勘探、矿产开发、水利、交通等国民经济建设中,则必须进行控制测量、矿山测量和路线测量,并测绘大比例尺地图,以供地质普查和各种建筑物设计施工使用。在国防建设中,除了为军事行动提供军用地图外,还要为保证火炮射击的迅速定位和导弹等武器发射的准确性,提供精确的地心坐标和精确的地球重力场数据。在研究地球运动状态方面,测绘学提供大地构造运动和地球动力学的几何信息,结合地球物理的研究成果,解决地球内部运动机制问题。

测绘学的主要研究对象是地球及其表面的各种形态。为此,首先要研究和测定地球的形状、大小及其重力场,并在此基础上建立一个统一的坐标系,用以表示地表任一点在地球上的准确几何位置。

#### 一、学科分类

测绘学按照研究对象及采用技术的不同,又可分为下列学科。

##### (1) 大地测量学

大地测量学是研究和测定地球形状、大小和地球重力场,以及测定地面点几何位置的学科。大地测量学中测定地球的大小,是指测定地球椭球的大小;研究地球的形状,是指研究大地水准面的形状;测定地面点的几何位置,是指测定以地球椭球面为参考的地面点的位置。将地面点沿法线方向投影于地球椭球面上,用投影点在椭球面上的大地纬度和大地经度表示该点的位置,用地面点至投影点的法线距离表示该点的大地高程。点的几何位置也可以用—个以地球质心为原点的空间直角坐标系中的三维坐标来表示。大地测量工作作为大规模测制地形图提供地面的水平位置控制网和高程控制网,为用重力勘探地下矿藏提供重力控制点,同时也为发射人造地球卫星、导弹和各种航天器提供地面站的精确坐标和地球重力场资料。

##### (2) 摄影测量与遥感学

摄影测量与遥感学是研究利用摄影或遥感的手段获取被测物体的信息(影像的或数字式的),进行分析和处理,以确定被测物体的形状、大小和位置,并判断其性质的一门学科。摄影测量学包括航空摄影测量、地面立体摄影测量等。航空摄影测量是摄影测量学的主要内容。摄影测量的特点是通过图像对被摄目标进行间接量测,无需接触被摄物体本身。摄影测量主要用于测制地形图,但它的原理和基本技术也适用于非地形测量。自从出现了影像的数字化技术以后,被测对象可以是固体、液体,也可以是气体;可以是微小的也可以是巨大的;可以是瞬时的也可以是变化缓慢的。这些特性使摄影测量方法得到广泛的应用。

摄影测量与遥感学作为基于影像的空间信息科学,是地球空间信息学(Geomatics)的核心。地球空间信息学是空间数据采集、量测、分析、存储、管理、显示和应用的集成科学与技术,属于现代空间信息科学技术的范畴。2004年美国劳工部把地球空间信息技术与纳米和生物技术一起列为当今最具发展潜力的三大技术。

### (3) 工程测量学

工程测量学是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、变形监测的理论和技术的学科。它是测绘学在国民经济和国防建设中的直接应用。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。工程测量学所研究的内容,按工程测量所服务的工程种类,分为建筑工程测量、路线测量(如铁路测量、公路测量、输电线路测量和输油管道测量等)、桥梁测量、隧道测量、矿山测量、城市测量、水利工程测量、海洋工程测量、3维工业测量等。按工程建设进行的程序,又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,每个阶段测量工作的重点和要求各不相同。

### (4) 海洋测量学

海洋测量学以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制工作,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的编制。海洋测绘是海洋事业的一项基础性工作,其成果广泛应用于经济建设、国防建设和科学研究的各个领域。例如,海上交通、海洋地质勘探、海洋资源开发、海洋工程建设、海底电缆和管道的敷设、海洋疆界的勘定、海洋环境保护和地壳变迁、板块构造等理论的研究,都离不开海洋测绘。海洋测量的基本理论、技术方法和测量仪器设备等,同陆地测量相比,有它自己的许多特点,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、气象等影响起伏不定;大多为动态作业,精确测量难度较大。

### (5) 地图制图学与地理信息工程

地图制图学与地理信息工程是研究地球空间信息存储、处理、分析、管理、分发及应用的科学与技术,它能够提供一种科学的手段来提高工作效率与工程质量,以完善、丰富、强大的数据信息为科技人员和各级管理人员提供良好的决策基础和决策环境,为社会广大民众提供各种咨询和信息服务,促进社会经济与城市建设的迅猛发展。地图制图学同许多学科都有联系,尤其同测量学、地理学和数学的联系更为密切。

## 二、测绘学发展简史与我国测绘事业的发展

测绘学有着悠久的历史,古代的测绘技术起源于水利和农业。古埃及尼罗河每年洪水泛滥,淹没了土地界线,水退以后需要重新划界,从而开始了测量工作。公元前2世纪,我国

史学家司马迁在《史记·夏本纪》中叙述了禹受命治理洪水的情况：“左准绳，右规矩，载四时，以开九州、通九道、陂九泽、度九山”。说明在公元前很久，中国人为了治水，已经会使用简单的测量工具了。

人类对地球形状的科学认识，是从公元前 6 世纪古希腊的数学家毕达哥拉斯(Pythagoras)最早提出地球是球形的概念开始的。两个世纪后，亚里士多德(Aristotle)作了进一步论证，支持这一学说，称为地圆说。又过了一个世纪，埃拉托色尼(Eratosthenēs)采用在两地观测日影的办法，首次推算出地球子午圈的周长，以此证实了地圆说。世界上有记载的实测弧度测量，最早是中国唐代开元十二年(724)南宫说在张遂(一行)的指导下在今河南省境内进行的，根据测量结果推算出了纬度  $1^\circ$  的子午弧长。17 世纪末，英国牛顿(I. Newton)和荷兰的惠更斯(C. Huygens)首次从力学的观点探讨地球形状，提出地球是两极略扁的椭球体，称为地扁说。1743 年法国 A. C. 克莱洛证明了地球椭球的几何扁率同重力扁率之间存在着简单的关系。19 世纪初，随着测量精度的提高，通过对各处弧度测量结果的研究，发现测量所依据的垂线方向同地球椭球面的法线方向之间的差异不能忽略。1849 年 Sir G. G. 斯托克斯提出利用地面重力观测资料确定地球形状的理论。1873 年，利斯廷(J. B. Listing)创用“大地水准面”一词，以该面代表地球形状。自那时起，弧度测量的任务，不仅是确定地球椭球的大小，而且还包括求出各处垂线方向相对于地球椭球面法线的偏差，用以研究大地水准面的形状。

地图的出现可追溯到上古时代，那时由于人类从事生产和军事等活动，就产生了对地图的需要。据文字记载，中国春秋战国时期地图已用于地政、军事和墓葬等方面。公元前 3 世纪，埃拉托色尼最先在地图上绘制经纬线。1973 年，在中国湖南省长沙市马王堆汉墓中发现的绘制在帛上的地图，是公元前 168 年之前制作的。公元 2 世纪，古希腊的 C. 托勒密所著《地理学指南》一书，提出了地图投影问题。100 多年后，中国西晋的裴秀总结出“制图六体”的制图原则，从此地图制图有了标准，提高了地图的可靠程度。16 世纪，地图制图进入了一个新的发展时期。中国明代的罗洪先和德国的墨卡托都以编制地图集的形式，分别总结了 16 世纪之前中国和西方在地图制图方面的成就。从 16 世纪起，随着测量技术的发展，尤其是三角测量方法的创立，西方一些国家纷纷进行大地测量工作，并根据实地测量结果绘制国家规模的地形图，这样测绘的地形图，不仅有准确的方位和比例尺，具有较高的精度，而且能在地图上描绘出地表形态的细节，还可按不同的用途，将实测地形图缩制编绘成各种比例尺的地图。现代地图制图的方法有了巨大的变革，地图制图的理论也不断得到丰富，特别是 20 世纪 60 年代以来，又朝着计算机辅助地图制图的方向发展，使成图的精度和速度都有很大的提高。17 世纪之前，人们使用简单的工具进行测量。这些测量工具都是机械式的，而且以用于量测距离为主。17 世纪初发明了望远镜。1617 年，荷兰的斯涅耳(W. Snell)为了进行弧度测量而首创三角测量法，以代替在地面上直接测量弧长，从此测绘工作不仅量测距离，而且开始了角度测量。约于 1640 年，英国的加斯科因(W. Gascoigne)在两片透镜之间设置十字丝，使望远镜能用于精确瞄准，用以改进测量仪器，这可算光学测绘仪器的开端。约于 1730 年，英国的西森(Sisson)制成测角用的第一架经纬仪，大大促进了三角测量的发展，使它成为建立各种等级测量控制网的主要方法。

19 世纪初，随着测量方法和仪器的不断改进，测量数据的精度也不断提高，精确的测量计算就成为研究的中心问题。1806 年和 1809 年法国的勒让德(A. M. Legendre)和德国的

高斯(C. F. Gauss)分别发表了最小二乘准则,这为测量平差计算奠定了科学基础。19 世纪 50 年代初,法国的洛斯塔(A. Laussedat)首创摄影测量方法。随后,相继出现立体坐标量测仪、地面立体测图仪等。到 20 世纪初,形成了比较完备的地面立体摄影测量法。可以说,从 17 世纪末到 20 世纪中叶,测绘仪器主要在光学领域内发展,测绘学的传统理论和方法也已发展成熟。

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、电子计算机科学和空间科学等在自身发展的同时,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与进步。测绘科学的发展很大部分是从测绘仪器发展开始的,然后使测绘技术发生重大的变革。如 1947 年,光波测距仪的问世;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,氦氖激光光源的应用使测程达到 60 km 以上,精度达到 $\pm(5\text{ mm}+5\text{ ppm}\times D)$ 。固体激光器的应用使测程更加增大,使测月、测卫工作得以实现;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,ME5000 测距仪达到 $\pm(0.2+0.1\text{ ppm}\times D)$ 的标称精度。除了光波测距以外,微波测距也有很大发展,80 年代之后,全自动化的微波测距仪 CA-100、WM-20 等已用于军事部门。随着光源和微处理机的问世和应用,测距工作向着自动化方向发展。与此同时,砷化镓发光管和激光光源的使用使测距仪的体积大大减小,质量减轻,向着小型化迈出了一步,同时也使大地测量工作中以测角为主的面貌得到了彻底改变,除用三角测量外,还可用导线测量和三边测量,这些均在工程中得到广泛应用。

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,生产出电子经纬仪,并得到广泛应用。电子经纬仪能自动显示读数、自动记录。同时,电子经纬仪与测距仪结合,构成了电子速测仪(全站仪),其体积小,质量轻,功能全,自动化程度高,为在一个测站上直接测得三维坐标和为数字测图开拓了广阔前景。近年来,厂家又推出了智能全站仪,连瞄准目标、测量也可自动化,这将结束测角、测距手工业生产方式的漫长历史,实现使用测量机器人的梦想。

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始。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,也可选取目标后自动进行观测,实现了水准测量的全自动化。

20 世纪 80 年代,全球定位系统(Global Positioning System,简称 GPS)问世,并用于测量工作,对此广大测绘工作者给予了很大关注。GPS 在短时间内可以进行空间点的三维定位,况且不受局部气象条件的影响,无需通视,使测绘工作发生了极大变革。GPS 原是美国为军事服务的导航系统,以后被用于民用。从 70 年代开始,世界上很多国家为了使用 GPS 信号,迅速进行了接收机的研制,其体积小,功能全,质量轻,使用方便。

除了美国研制 GPS 外,前苏联研制了 GLONASS 定位系统,于 1995 年投入运营。目前欧盟委员会正在加紧建设伽利略(Galileo)全球卫星导航系统。我国除了进行 GPS 定位理论及应用研究外,于 2003 年利用自主研发的地球同步卫星,建立了第一代北斗卫星导航定位系统。该系统具有导航定位、精密授时、短报文通信等功能,可用于我国领土和相邻周边

地区导航定位、授时、数据传输、通信和移动目标监控等方面。2012 年年初,已发射 11 颗卫星的北斗卫星导航系统建成了基本系统,开始正式提供试运行服务,范围覆盖我国及周边地区。2016 年 6 月 12 日,第 23 颗北斗导航卫星升空,计划在 2020 年前发射 35 颗卫星,形成全球性的定位导航系统。

20 世纪 70 年代,除了用飞机进行航空摄影测量外,还可通过人造地球卫星使用遥感(Remote Sensing,简称 RS)技术拍摄地球照片,监测自然现象的变化,并且利用这些卫星照片进行地图的测绘,其精度逐步提高。近年来,伴随着数字摄影技术的发展,改变了过去模拟摄影测量的方式,用数字摄影技术进行测量工作,其成果稳定、可靠,并且自动化程度高,还可与计算机组成一个系统,使地图的生产、使用、修改、更新易于完成。

地面的测图系统,也由于测绘仪器的飞速发展和技术的广泛应用,由过去的传统测图方式发展为数字测图,所得地形图是由数字表示的,用计算机进行绘制和管理,既便捷,又迅速,精度可靠。

为了满足国民经济飞速发展的需要,在计算机科学、信息学和测绘学的支持下,地理信息系统(Geographic Information System,简称 GIS)应运而生,它能为地球科学、环境科学和工程设计,以及对政府行政职能和企业经营管理提供必需而重要的信息,因而发展很快,并与 GPS、RS 集成为“3S”技术。在“3S”技术的促进和支持下,测绘工作和测绘技术正向着自动化、数字化、网络化、可视化和信息化的方向发展,使测绘学科进入了一个信息化测绘学全新的发展阶段。

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,并且使野外工作大大减少,向着内外业一体化的方向发展,同时大大改善了测绘工作艰苦的情况。

自 1950 年起,中国的测绘事业有了很大的发展。1956 年成立了国家测绘总局(现为国家测绘地理信息局);建立了测绘研究机构,组建了专门培养测绘人才的院校,目前测绘专业硕士、博士的培养学校也有几十所;各业务部门也纷纷成立测绘机构和科研机构,党和国家对测绘工作给予很大的关怀和重视。主要成就有:在全国范围内建立了国家大地网、国家水准网、国家基本重力网和卫星多普勒网,并对国家大地网进行了整体平差;全国 GPS 大地控制网业已完成,完成了国家基本图的测绘工作;进行了两次(1975 年和 2005 年)珠峰测量、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,如长江大桥、葛洲坝水电站、宝山钢铁厂、三峡水利枢纽、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。近年来,又完成了大型工程和特殊工程建设的测量工作,诸如 30 多千米的杭州湾大桥,山西 42.6 km 的引黄工程隧洞,大伙房水库 85.5 km 工程隧洞,以及上海磁悬浮铁路、北京中国大剧院、奥运体育场馆等特殊工程的施工测量;还建立了中国内地地壳水平、垂直运动速度场,出版发行了地图 1 600 多种。为了发展卫星大地测量技术,相继研制了卫星摄影仪、卫星激光测距仪和卫星定位接收机,并已投入实际应用。在摄影测量技术上已普遍应用电子计算机进行解析空中三角测量,并研制解析测图仪、正射投影仪,研究自动测图系统和航天遥感资料在测绘上的应用。在海洋测绘方面,采用了新的海洋定位系统。这些新技术和新仪器的使用,进一步推动了中国测绘事业的发展。

### 三、路线工程测量学的任务

路线工程测量学属于工程测量学的范畴,它主要是面向土木建筑、环境、道路、桥梁、水

利等学科,其主要任务如下。

#### (1) 研究测绘地形图的理论和方法

地形图是路线工程勘察、规划、设计的依据。测量学是研究确定地球表面局部区域建筑物、构筑物和地貌、地面高低起伏形态的空间三维坐标的原理和方法,研究局部地区地图投影理论,以及将测量资料按比例绘制成地形图或电子地图的原理和方法。

#### (2) 研究在地形图上规划、设计的基本原理和方法

地形图的应用十分广泛,在路线工程建设过程中,常常遇到区域规划、道路选线、场地平整等问题,本课程将对其中的主要问题进行研究讨论。

#### (3) 研究路线工程施工放样、质量检验的技术和方法

施工放样是路线工程施工测量的主要工作,它的主要任务是将设计好的建筑物、构筑物位置在实地上标定出来。另外,在施工过程中,为保证工程的施工质量,必须对施工结果分阶段进行检查验收。

#### (4) 研究变形监测的基本理论和方法

在路线工程施工过程中或竣工后,为确保工程的安全,应进行工程的变形监测。

## 第二节 地面上点位的确定

### 一、地球的形状和大小

测量工作是在地球表面进行的,要确定地面点之间的相互关系,将地球表面测绘成地形图,需了解地球的形状和大小。对地球形状的研究是大地测量学和地球物理学的一个共同课题,其目的是运用几何方法、重力方法和空间技术,确定地球的形状、大小、地面点的位置和重力场的精细结构。

地球的自然表面高低起伏,是一个复杂的不规则曲面。海洋面积约占地球表面积的71%,而陆地约占29%。世界上最高的珠穆朗玛峰高出海平面8 844.43 m,最低的马里亚纳海沟低于海平面11 022 m,由于地球的半径约为6 371 km,因此地表起伏相对于庞大的地球来说是微不足道的。由于地球表面大部分是海洋,所以海水所包围的形体基本表示了地球的形状。假想有一个静止的海水面,向陆地延伸形成一个封闭的曲面,这个曲面称为水准面。水准面上每一个点的铅垂线均与该点的重力方向重合。由于海水面受潮汐的影响而不断变化,所以水准面有无数个,为此,人们在海滨设立验潮站,通过长期观测,求出平均高度的海水面,称为大地水准面。大地水准面所包围的形体称为大地体,它代表地球的一般形状。

由于地球表面起伏不平 and 地球内部质量分布不均匀,地面上各点的铅垂线方向产生不规则的变化,大地水准面仍然是一个复杂的不规则曲面,不是一个简单的数学曲面,不能用一个数学模型表达,因此也就无法在这样的面上直接进行测量和数据处理。于是,人们进一步设想用一个合适的旋转椭球面来逼近大地水准面,旋转椭球面所包含的形体称为旋转椭球体,同大地水准面最为接近的椭球面称为平均地球椭球面。旋转椭球体是由椭球面绕其短轴NS旋转而成的形体(图1-1),其形状和大小取决于长半轴 $a$ 、短半轴 $b$ 和扁率 $\alpha=(a-b)/a$ 。

为了将观测成果准确地化算到椭球面,各国都根据本国的实际情况,采用与大地体非常接近自己国家的椭球体,并选择地面上一点或多点使椭球定位。如图1-1所示,地面上选一

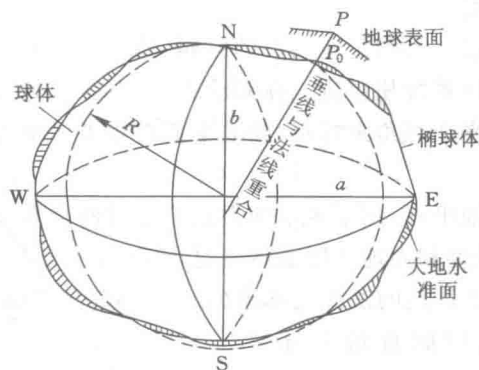


图 1-1 大地水准面和参考椭球面

点  $P$ , 令  $P$  点的铅垂线和椭球面上相应点  $P_0$  的法线重合, 并使  $P_0$  点的椭球面与大地水准面相切。这里的  $P$  点称为大地原点, 旋转后的椭球面称为参考椭球面, 其包围的形体称为参考椭球体。

大地水准面和铅垂线是测量外业所依据的基准面和基准线, 参考椭球面及其法线是测量计算所依据的基准面和基准线。

人类对地球形状的认识经历了很长的时间。初期认为天圆地方, 以后逐渐认识到地球是个圆球。17 世纪法国人发现地球不是正圆而是扁的, 牛顿等根据力学原理提出地球是扁球的理论, 这一理论直到 1739 年才为南美和北欧的弧度测量所证实。其实, 在此之前中国为编绘《皇舆全图》, 就曾进行了大规模的弧度测量, 并发现纬度愈高, 经线的弧长愈长的事实。这同地球两极略扁, 赤道隆起的理论相符。1849 年英国的 Sir G. G. 斯托克斯提出利用地面重力观测确定地球形状的理论。经过 100 多年的努力, 特别是人造卫星等先进技术的应用, 使地球形状的测定越来越精确。

利用地面观测来研究地球形状的经典方法是弧度测量, 即根据地面上丈量的子午线弧长, 推算出地球椭球的扁率。以后, 人们广泛地用建立天文大地网的方法确定同局部大地水准面最相吻合的参考椭球。但是这些纯几何测量的方法都由于不能遍及整个地球而有很大的局限性。近代空间技术的发展为研究地球形状提供了新手段, 如干涉测量、激光测距和多普勒测量等。

表 1-1 给出了有代表性的几个参考椭球元素。

| 地球椭球参数  |           |             |                     |                      |
|---------|-----------|-------------|---------------------|----------------------|
| 椭球名称    | 长半轴 $a/m$ | 短半轴 $b/m$   | 扁率 $\alpha$         | 推算年代和国家              |
| 白塞尔     | 6 377 397 | 6 356 564   | 1 : 299.2           | 1841 年德国             |
| 克拉克     | 6 378 249 | 6 356 515   | 1 : 293.5           | 1880 年英国             |
| 德福特     | 6 378 388 | 6 356 912   | 1 : 297.0           | 1909 年美国             |
| 克拉索夫斯基  | 6 378 245 | 6 356 863   | 1 : 298.3           | 1940 年苏联             |
| IUGG-75 | 6 378 140 | 6 356 755.3 | 1 : 298.257         | 1979 年国际大地测量与地球物理联合会 |
| WGS-84  | 6 378 137 | 6 356 752   | 1 : 298.257 223 563 | 1984 年美国             |

## 二、地面点位置的确定

测绘工作的主要任务之一是确定地面点的空间位置,其表示方法为坐标和高程,而地面点的空间位置与一定的坐标系相对应。在测绘工作中,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、独立平面直角坐标系等。

### 1. 大地坐标系

大地地理坐标又称大地坐标,用于表示地面点在参考椭球面上的位置,它的基准是参考椭球面及其法线,用大地经度和大地纬度表示。过  $P$  点的大地子午面和首子午面所夹的两面角称  $P$  点的大地经度;过  $P$  点的法线与赤道面的夹角称  $P$  点的大地纬度。

如图 1-2 所示,地心空间直角坐标系  $(X, Y, Z)$  的  $Z$  轴与地球平均自转轴重合,与  $Z$  轴垂直的平赤道面构成  $XY$  平面; $XZ$  平面是包含平均自转轴和格林尼治平均天文台的平面; $Y$  轴的指向使该坐标系成为右手坐标系。椭球的短轴与地心空间直角坐标系的  $Z$  轴重合,起始子午面和赤道面分别与该坐标系的  $XZ$  平面和  $XY$  平面重合。 $P$  点沿椭球面法线到椭球面上的投影是  $Q$ ,  $PQ = H$ ,称为  $P$  点的大地高程, $L$  和  $B$  是  $P$  点的大地经度和大地纬度。 $P$  点的大地坐标  $(L, B, H)$  和地心空间直角坐标  $(X, Y, Z)$  之间存在着严密的数字关系,可以互相换算。

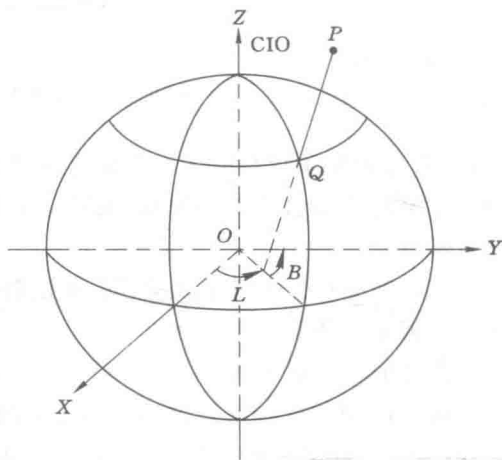


图 1-2 大地坐标系

20 世纪 50 年代之前,一个国家或一个地区都是在使所选择的参考椭球与其所在地区的大地水准面最佳拟合的条件下,按弧度测量方法来建立各自的局部大地坐标系的。由于当时除海洋上只有稀疏的重力测量外,大地测量工作只能在各个大陆上进行,而各大陆的局部大地坐标系间几乎没有联系。不过在当时的科学发展水平上,局部大地坐标系已基本满足各国大地测量和制图工作的要求。

目前,我国常用的大地坐标系有以下几种。

#### (1) 1954 年北京坐标系

我国建国初期采用克拉索夫斯基椭球建立的坐标系。由于该坐标系的大地原点在前苏联,便利用我国东北边境的三个大地点与前苏联大地网联测后的坐标作为我国天文大地网的起算数据,通过天文大地网坐标计算,推算出北京一点的坐标,故命名为 1954 年北京坐标系。该坐标系在我国的经济建设和国防建设中发挥了重要作用,但也存在点位精度不高等许多问题。

#### (2) 1980 年国家大地坐标系

为了克服 1954 年北京坐标系存在的问题,我国于 20 世纪 70 年代末对原大地网重新进行了平差。该坐标系采用 IUGG-75 地球椭球,大地原点选在陕西省永乐镇,椭球面与我国境内的大地水准面密合最佳,平差后的精度明显提高。

#### (3) 2000 国家大地坐标系

我国当前最新的国家大地坐标系,英文名称为 China Geodetic Coordinate System

2000,英文缩写为 CGCS 2000。国家大地坐标系的定义包括坐标系的原点、三个坐标轴的指向、尺度以及地球椭球的 4 个基本参数的定义。2000 国家大地坐标系的原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心; $Z$ 轴由原点指向历元 2000.0 的地球参考极的方向, $X$ 轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球赤道面(历元 2000.0)的交点, $Y$ 轴与 $Z$ 轴、 $X$ 轴构成右手正交坐标系。采用广义相对论意义下的尺度。

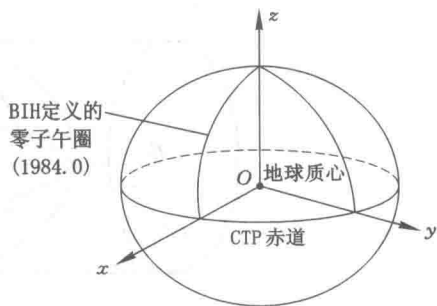


图 1-3 WGS-84 坐标系

#### (4) WGS-84 坐标系

WGS 英文意义是“World Geodetic System”(世界大地坐标系),它是美国国防局为进行 GPS 导航定位于 1984 年建立的地心坐标系,1985 年投入使用。WGS-84 坐标系的几何意义是:坐标系的原点位于地球质心, $Z$ 轴指向 BIH1984.0 定义的协议地球极(CTP)方向, $X$ 轴指向 BIH1984.0 的零度子午面和 CTP 赤道的交点, $Y$ 轴通过右手规则确定(图 1-3)。

#### 2. 高斯平面直角坐标系

由于用大地经度和纬度表示的大地坐标是一种椭球面上的坐标,不能直接应用于测图。因此,需要将它们按一定的数学规律转换为平面直角坐标。

根据高斯—克吕格投影所建立的平面坐标系称高斯平面直角坐标系。它是大地测量、城市测量、普通测量、各种工程测量和地图制图中广泛采用的一种平面坐标系。

高斯—克吕格投影理论是德国的 C. F. 高斯于 1822 年提出的,后经德国的克吕格于 1912 年加以扩充而完善。

高斯—克吕格投影的投影函数是根据以下两个条件确定的:第一,投影是正形的,即椭球面上无穷小的图形和它在平面上的表象相似,故又称保角投影或保形投影;投影面上任一点的长度比(该点在椭球面上的微分距离与其在平面上相应的微分距离之比)同方位无关。第二,椭球面上某一子午线在投影平面上的表象是一直线,而且长度保持不变,即长度比等于 1。该子午线称为中央子午线或称轴子午线。这两个条件体现了高斯—克吕格投影的特性。

高斯—克吕格投影属于横轴切圆柱正形投影。可以设想将截面为椭圆的一个圆柱体面套在地球椭球的外面(图 1-4),圆柱的中心轴  $EE_1$  在赤道面内,圆柱面同椭球面相切在中央子午线上。按正形条件将中央子午线东、西各一定经度范围内的地区投影到圆柱面上,然后将该圆柱面展开成一平面,就得出中央子午线两侧的一部分地区在平面上的投影(图 1-5)。地球椭球赤道的投影也是直线,且与中央子午线正交,以前者为横轴,即  $y$  轴,东向为正;后者为纵轴,即  $x$  轴,北向为正;两者的交点  $O$  为原点,这就形成了高斯平面直角坐标系。

高斯—克吕格投影是将一个不可平展的地球椭球面变换成平面。这种变换不可避免地会产生投影变形,其中长度变形随着离中央子午线的距离增大而增大。投影变形过大,对应用和计算都会带来许多不便。为了限制这种投影变形,克吕格提出将地球椭球面按子午线划分成适当个数的投影带,带宽一般分为  $6^\circ$ 、 $3^\circ$  和  $1.5^\circ$  等 3 种。每一投影带采用各自独立的高斯平面坐标系(图 1-6),并规定  $y$  坐标加上 500 km,以避免出现负值。为了表示任一点所

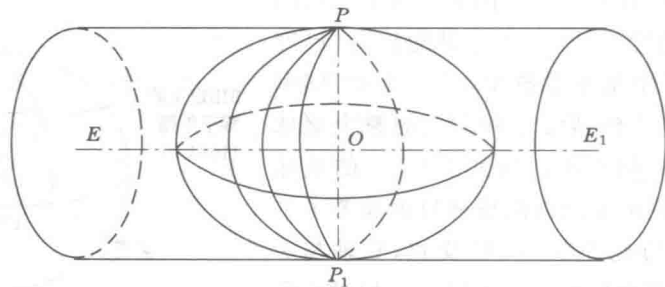


图 1-4 高斯—克吕格投影

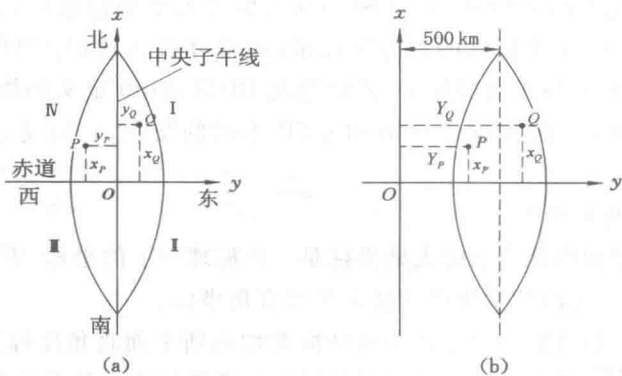


图 1-5 高斯—克吕格投影展开

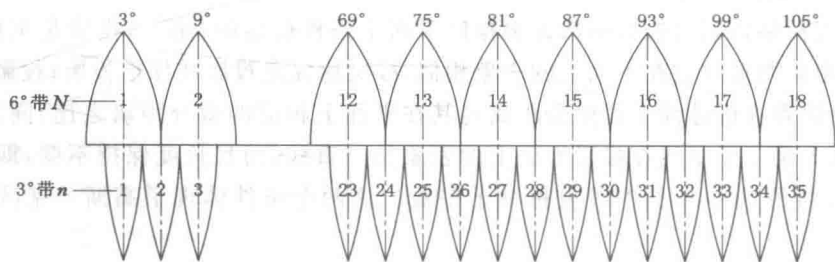


图 1-6 高斯—克吕格投影分带

在的投影带,又规定  $y$  坐标值前加上二位数,以表示投影带号。 $x$  坐标值无论在任一投影带内都是由赤道起算的实际值。

对中央子午线位置的选取办法是:对于 6°带,取经度 3°为第一带的中央子午线,以下各带便可类推;3°带亦取经度 3°为第一带的中央子午线,这样第二带的中央子午线便是经度 6°,以下各带可依此类推。这种规定可使整个地球 3°带的中央子午线有一半与 6°带的中央子午线重合,其优点是对两种分带间进行点的坐标相互换算较为方便,即全球内有一半区域的点的坐标不需要进行换算。

地球表面上一点所在分带的中央子午线的经度值可用下式计算: