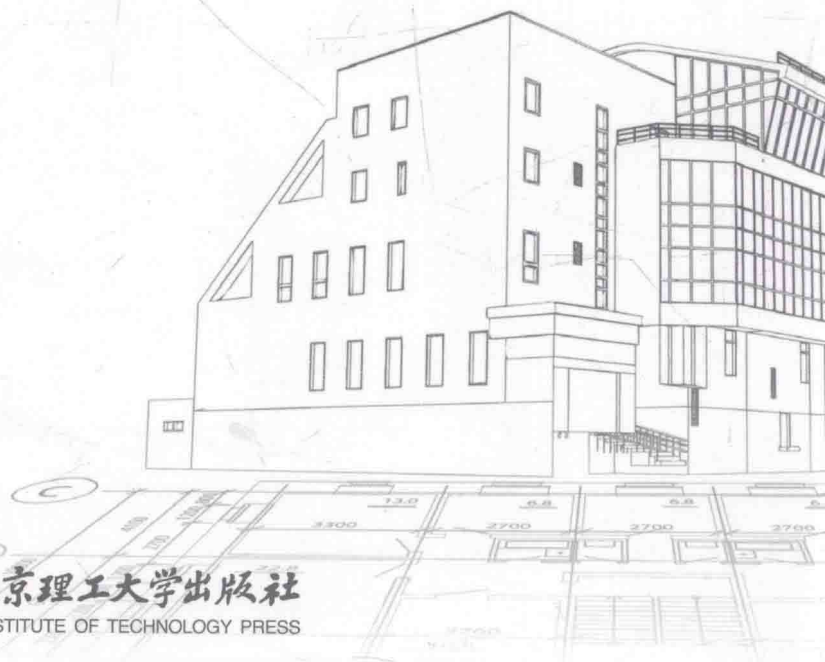


# 土木工程测量

主编 余代俊 崔立鲁

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



# 土木工程测量

|     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 余代俊 | 崔立鲁 |     |
| 副主编 | 刘福臻 | 李玉宝 | 许熙辉 |
| 参 编 | 陈 锐 | 廖 敏 | 鲁艺玲 |
|     | 周小莉 | 陈晓杰 | 罗秦岭 |
|     | 李开伟 | 韩 立 |     |
| 主 审 | 汪仁银 |     |     |



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本教材主要是应用于非测绘专业的工程测量课程使用, 针对土木、环境、造价、工管、水利、园林等工程专业进行基本的测量知识学习。本教材的主要内容有: 测量学的基本理论, 仪器操作, 基础数据处理方法、数字化地形测量、数字地形图绘制、线路工程测量、水利工程测量、桥梁工程测量等。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量 / 余代俊, 崔立鲁主编. —北京: 北京理工大学出版社,  
2016. 3

ISBN 978-7-5682-1818-4

I. ①土… II. ①余…②崔… III. ①土木工程-工程测量-高等学校-  
教材 IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 020109 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市天利华印刷装订有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16.5

字 数 / 412 千字

版 次 / 2016 年 3 月第 1 版 2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 49.00 元

责任编辑 / 陆世立

文案编辑 / 赵 轩

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

---

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

# 前 言

工程测量是土木工程、水利工程、工程管理与造价等工程类专业的基础课，同时也是一门对学生实际动手能力要求较高的课程。随着数字化设备全面进入工程测量领域，对于工程测量教学内容的变革需求也很高，目前高校所使用的相关教材的内容，主要还是停留在十几年前，已经不能满足工程测量生产的实际需要。

根据土木工程专业系列教材规划的要求，同时为了满足社会上对于应用型工程人才的需求，本教材的编写将主要针对工程测量学基本理论与概念、不同工程测量项目的内外业流程、测量仪器的基本操作步骤和针对不同行业的工程测量应用举例说明。其中，数字化地形图测量是工程项目设计、施工等的基础，因此本教材花费较多的篇章详细的阐述了数字化测图的基本理论、步骤等，同时介绍当前数字化地图绘制的基本理论方法。通过一系列编写方法，侧重培养应用型人才，加强工程测量实际应用方面的知识，增强学生的实际操作能力，确保并加强实际应用能力培养的环节。同时，引入当前测量技术发展的最新动态，帮助学生了解和熟悉新技术、新规范和新方法。

本教材由北京理工大学出版社组织编写，由余代俊编写第1章，刘福臻、周小莉编写第2、3章，廖敏编写第4章，李玉宝编写第5章，许熙辉、鲁艺玲编写第6、8章，余代俊、李开伟编写第7章，陈晓杰编写第9章，罗秦岭编写第10章，李开伟编写第11章，韩立、廖敏编写第12章，崔立鲁编写第13章，陈锐编写第14章。全书由余代俊老师负责审阅，崔立鲁老师负责统稿。汪仁银老师给本书也提出了大量的意见和建议。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第1章 绪论                  | 1  |
| 1.1 测量学与土木工程测量          | 1  |
| 1.2 地球的形状和大小            | 3  |
| 1.3 地面点位的确定及测量坐标系       | 4  |
| 1.3.1 地理坐标系             | 4  |
| 1.3.2 平面直角坐标系           | 5  |
| 1.3.3 地心坐标系             | 8  |
| 1.3.4 我国的大地坐标系统         | 9  |
| 1.3.5 高程系统              | 9  |
| 1.4 水平面代替水准面的限度         | 10 |
| 1.5 测量工作概述              | 12 |
| 思考题与练习题                 | 13 |
| 第2章 水准测量                | 14 |
| 2.1 水准测量原理              | 14 |
| 2.2 水准仪                 | 15 |
| 2.2.1 微倾式水准仪            | 16 |
| 2.2.2 自动安平水准仪           | 20 |
| 2.2.3 数字水准仪             | 21 |
| 2.3 普通水准测量              | 23 |
| 2.3.1 水准点               | 23 |
| 2.3.2 水准路线              | 23 |
| 2.3.3 普通水准测量外业工作        | 24 |
| 2.3.4 水准测量的内业计算         | 26 |
| 2.4 三、四等水准测量            | 29 |
| 2.4.1 一测站的观测程序和要求       | 29 |
| 2.4.2 三(四)等水准测量记录、计算与检核 | 30 |
| 2.4.3 成果计算与校核           | 32 |
| 2.5 水准测量误差分析            | 32 |
| 2.5.1 仪器误差              | 32 |
| 2.5.2 观测误差              | 32 |
| 2.5.3 外界条件的影响           | 33 |
| 2.6 水准仪的检验和校正           | 35 |
| 2.6.1 水准仪应满足的几何条件       | 35 |
| 2.6.2 水准仪的检验与校正         | 35 |

|                          |           |
|--------------------------|-----------|
| 思考题与练习题 .....            | 37        |
| <b>第3章 角度测量</b> .....    | <b>38</b> |
| 3.1 角度测量原理 .....         | 38        |
| 3.1.1 水平角及其测量原理 .....    | 38        |
| 3.1.2 竖直角及其测量原理 .....    | 38        |
| 3.1.3 天顶距及其与竖直角的关系 ..... | 39        |
| 3.2 经纬仪 .....            | 39        |
| 3.2.1 普通光学经纬仪 .....      | 39        |
| 3.3 水平角观测 .....          | 42        |
| 3.3.1 测回法 .....          | 42        |
| 3.3.2 方向观测法 .....        | 44        |
| 3.4 竖直角观测 .....          | 46        |
| 3.4.1 竖盘结构 .....         | 46        |
| 3.4.2 竖直角的计算公式 .....     | 47        |
| 3.4.3 竖直角观测与记录方法 .....   | 48        |
| 3.5 角度测量误差分析 .....       | 49        |
| 3.5.1 仪器误差 .....         | 49        |
| 3.5.2 观测误差 .....         | 50        |
| 3.5.3 外界条件的影响 .....      | 52        |
| 思考题与练习题 .....            | 52        |
| <b>第4章 距离测量</b> .....    | <b>54</b> |
| 4.1 钢尺量距 .....           | 54        |
| 4.1.1 丈量工具 .....         | 54        |
| 4.1.2 直线定线 .....         | 56        |
| 4.1.3 距离丈量 .....         | 56        |
| 4.1.4 精密钢尺量距 .....       | 57        |
| 4.2 视距测量 .....           | 58        |
| 4.3 光电测距 .....           | 60        |
| 4.3.1 基本原理 .....         | 60        |
| 4.3.2 光电测距仪 .....        | 63        |
| 4.3.3 光电测距长度改正 .....     | 64        |
| 4.3.4 光电测距误差分析 .....     | 65        |
| 思考题与练习题 .....            | 65        |
| <b>第5章 全站仪</b> .....     | <b>66</b> |
| 5.1 全站仪测量原理 .....        | 66        |
| 5.1.1 概述 .....           | 66        |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| 5.1.2 全站仪分类 .....         | 66        |
| 5.1.3 全站仪的基本组成 .....      | 67        |
| 5.1.4 全站仪测角基本原理 .....     | 68        |
| 5.1.5 全站仪测距基本原理 .....     | 69        |
| 5.2 全站仪的基本功能 .....        | 71        |
| 5.2.1 仪器主菜单 .....         | 71        |
| 5.2.2 全站仪基本程序 .....       | 72        |
| 5.3 全站仪测量误差分析 .....       | 75        |
| 5.3.1 加常数 .....           | 75        |
| 5.3.2 乘常数 .....           | 76        |
| 5.3.3 周期误差 .....          | 76        |
| 5.4 全站仪检验和校正 .....        | 77        |
| 5.4.1 全站仪的轴系关系 .....      | 77        |
| 5.4.2 全站仪的常规检验和校正 .....   | 78        |
| 5.5 测量机器人简介 .....         | 79        |
| 5.5.1 测量机器人的发展及研究现状 ..... | 79        |
| 5.5.2 测量机器人的主要功能 .....    | 79        |
| 5.5.3 测量机器人的基本原理 .....    | 80        |
| 5.5.4 经典的测量机器人 .....      | 81        |
| 思考题与练习题 .....             | 81        |
| <b>第6章 测量误差基本知识</b> ..... | <b>82</b> |
| 6.1 概述 .....              | 82        |
| 6.1.1 测量误差产生的原因 .....     | 82        |
| 6.1.2 测量误差的分类 .....       | 83        |
| 6.1.3 偶然误差的特性 .....       | 83        |
| 6.2 衡量精度的指标 .....         | 85        |
| 6.2.1 中误差 .....           | 86        |
| 6.2.2 相对误差 .....          | 86        |
| 6.2.3 极限误差 .....          | 87        |
| 6.3 误差传播定律 .....          | 87        |
| 6.4 等精度直接观测平差 .....       | 89        |
| 6.4.1 观测值的最或是值 .....      | 89        |
| 6.4.2 精度评定 .....          | 89        |
| 思考题与练习题 .....             | 90        |
| <b>第7章 控制测量</b> .....     | <b>92</b> |
| 7.1 控制测量概述 .....          | 92        |
| 7.1.1 控制测量的意义 .....       | 92        |

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| 7.1.2 平面控制测量          | 92         |
| 7.1.3 高程控制测量          | 94         |
| 7.2 导线测量              | 95         |
| 7.2.1 导线测量概述          | 95         |
| 7.2.2 导线测量的外业工作       | 96         |
| 7.2.3 导线测量的内业计算       | 96         |
| 7.3 高程控制测量            | 102        |
| 7.3.1 三角高程测量的原理       | 102        |
| 7.3.2 三角高程测量          | 104        |
| 思考题与练习题               | 104        |
| <b>第8章 GNSS 原理及应用</b> | <b>106</b> |
| 8.1 概述                | 106        |
| 8.2 GPS 系统的组成         | 108        |
| 8.2.1 空间部分            | 108        |
| 8.2.2 地面监控部分          | 109        |
| 8.2.3 用户设备部分          | 109        |
| 8.3 GPS 定位的基本原理       | 110        |
| 8.3.1 伪距法定位           | 110        |
| 8.3.2 载波相位测量定位        | 111        |
| 8.4 GPS 测量误差          | 112        |
| 8.4.1 与信号传播有关的误差      | 113        |
| 8.4.2 与卫星有关的误差        | 113        |
| 8.4.3 与接收机有关的误差       | 114        |
| 8.4.4 其他误差            | 114        |
| 8.5 GNSS 测量的施测        | 114        |
| 8.5.1 GNSS 测量的技术设计    | 114        |
| 8.5.2 GNSS 测量的作业模式    | 117        |
| 8.5.3 GNSS 测量的外业实施    | 119        |
| 思考题与练习题               | 120        |
| <b>第9章 数字化地形测量</b>    | <b>121</b> |
| 9.1 地形图基本知识           | 121        |
| 9.1.1 地形图比例尺          | 121        |
| 9.1.2 地形图图式           | 122        |
| 9.2 数字测图的基本原理         | 129        |
| 9.2.1 数字测图的基本思路       | 129        |
| 9.2.2 数字测图的基本原理       | 130        |
| 9.2.3 数字测图系统          | 130        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 9.2.4 数字测图系统的软件系统 .....      | 131 |
| 9.3 图根控制测量 .....             | 131 |
| 9.4 地形测量 .....               | 132 |
| 思考题与练习题 .....                | 133 |
| 第 10 章 数字地形图的绘制 .....        | 134 |
| 10.1 概述 .....                | 134 |
| 10.2 绘图软件介绍 .....            | 134 |
| 10.3 数据准备 .....              | 135 |
| 10.3.1 参数设置 .....            | 135 |
| 10.3.2 数据输入 .....            | 137 |
| 10.4 绘图步骤 .....              | 138 |
| 10.4.1 “草图法”工作模式 .....       | 138 |
| 10.4.2 “坐标定位法”工作模式 .....     | 142 |
| 10.4.3 “简码法”工作模式 .....       | 144 |
| 10.4.4 绘制等高线 .....           | 144 |
| 10.5 地图整饰 .....              | 151 |
| 10.5.1 图形分幅 .....            | 151 |
| 10.5.2 图幅整饰 .....            | 151 |
| 思考题与练习题 .....                | 153 |
| 第 11 章 地形图的应用 .....          | 154 |
| 11.1 地图的分幅和编号 .....          | 155 |
| 11.2 地形图的判读 .....            | 157 |
| 11.2.1 地形图的室内判读 .....        | 158 |
| 11.2.2 地形图的野外判读 .....        | 159 |
| 11.3 地形图的基本应用 .....          | 160 |
| 11.3.1 求点的坐标 .....           | 160 |
| 11.3.2 求两点间的距离 .....         | 161 |
| 11.3.3 求某直线的方位角 .....        | 161 |
| 11.3.4 求某点的高程 .....          | 161 |
| 11.3.5 求某直线的坡度 .....         | 161 |
| 11.3.6 面积量算 .....            | 162 |
| 11.3.7 绘制已知方向的纵断面图 .....     | 165 |
| 11.3.8 在地形图上按限坡选择最短路线 .....  | 165 |
| 11.3.9 确定汇水面积的边界线及水库库容 ..... | 166 |
| 11.3.10 利用地形图做场平计算 .....     | 168 |
| 思考题与练习题 .....                | 171 |
| 第 12 章 建筑工程测量 .....          | 172 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 12.1 概述 .....              | 172        |
| 12.2 施工放样的基本工作 .....       | 172        |
| 12.2.1 水平角测设 .....         | 172        |
| 12.2.2 水平距离测设 .....        | 173        |
| 12.2.3 平面点位测设 .....        | 174        |
| 12.2.4 点位高程测设 .....        | 176        |
| 12.2.5 坡度线测设 .....         | 178        |
| 12.3 建筑施工控制网 .....         | 180        |
| 12.3.1 施工平面控制网 .....       | 180        |
| 12.3.2 施工高程控制网 .....       | 183        |
| 12.4 场地平整测量 .....          | 183        |
| 12.5 建筑施工测量 .....          | 184        |
| 12.5.1 建筑物轴线测设 .....       | 184        |
| 12.5.2 高层建筑物施工测量 .....     | 187        |
| 12.5.3 建筑物的放线 .....        | 189        |
| 12.6 建筑物竣工测量 .....         | 194        |
| 思考题与练习题 .....              | 194        |
| <b>第 13 章 线路工程测量 .....</b> | <b>195</b> |
| 13.1 概述 .....              | 195        |
| 13.1.1 线路测量的任务和内容 .....    | 195        |
| 13.1.2 线路测量的基本特征 .....     | 196        |
| 13.2 线路工程初测 .....          | 196        |
| 13.2.1 平面控制测量 .....        | 196        |
| 13.2.2 高程控制测量 .....        | 197        |
| 13.2.3 带状地形图测绘 .....       | 197        |
| 13.3 线路工程定测 .....          | 198        |
| 13.3.1 中线测量 .....          | 198        |
| 13.3.2 曲线测设 .....          | 201        |
| 13.3.3 断面图测量与绘制 .....      | 210        |
| 13.4 隧道测量 .....            | 217        |
| 13.4.1 隧道洞外控制测量 .....      | 217        |
| 13.4.2 隧道联系测量 .....        | 218        |
| 13.4.3 隧道高程联系测量 .....      | 223        |
| 13.4.4 隧道施工测量 .....        | 225        |
| 13.4.5 隧道竣工测量 .....        | 225        |
| 13.4.6 隧道竣工测量 .....        | 226        |
| 13.5 桥梁测量 .....            | 227        |
| 13.5.1 桥梁控制测量 .....        | 227        |

13.5.2 桥梁墩、台的施工放样 ..... 229

13.5.3 桥梁竣工测量 ..... 232

思考题与练习题 ..... 232

第 14 章 水利工程测量 ..... 233

14.1 渠道测量 ..... 233

14.1.1 选线测量 ..... 233

14.1.2 中线测量 ..... 234

14.1.3 纵断面测绘 ..... 234

14.1.4 横断面测绘 ..... 236

14.1.5 土方计算 ..... 237

14.1.6 渠道施工测量 ..... 238

14.2 土坝施工测量 ..... 239

14.2.1 控制测量 ..... 239

14.2.2 清基开挖线的放样 ..... 241

14.2.3 坡脚线的放样 ..... 242

14.2.4 坝体边坡的放样 ..... 243

14.2.5 修坡桩的测设 ..... 243

14.2.6 护坡桩的标定 ..... 245

14.3 水下地形测量 ..... 245

14.3.1 测深线和测深点的布设 ..... 245

14.3.2 水下地形点平面位置的测定 ..... 246

14.3.3 水位观测 ..... 248

14.3.4 水深测量 ..... 248

14.3.5 水下地形图的绘制 ..... 250

思考题与练习题 ..... 251

参考文献 ..... 252

# 第1章 绪论

## 1.1 测量学与土木工程测量

测量学的经典定义是：测量学是研究地球的形状和大小，测定地面点的位置及高程，将地表形状及其他信息测绘成地形图的科学。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，建立统一的测绘基准；二是将地球表面的地物地貌测绘成图；三是将图纸上的设计成果测设至现场。根据测量及研究的对象、任务及采用技术手段的不同，传统上又将测量学分为以下几个分支学科。

**大地测量学**——研究和确定地球形状、大小和重力场，测定地面点的几何位置和地球整体与局部运动的理论和技术的学科。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。按照测量手段的不同，大地测量学又分为常规大地测量、卫星大地测量及物理大地测量等。

**普通测量学**——研究地球表面较小区域内测绘工作的基本理论、技术、方法及应用的学科。普通测量学是测量学的基础，主要内容包括建立图根控制网、测绘地形图、应用地形图、以及一般工程的施工测量。具体工作有角度测量、距离测量、高程测量、测量数据平差处理和绘图。在测绘地形图过程中无需考虑地球曲率的影响，用平面代替地球曲面。

**摄影测量学**——研究利用摄影或遥感技术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。其基本任务是通过摄影相片或遥感图像进行处理、量测、解译，以测定物体的形状、大小和空间位置，进而制作成图。摄影测量学包括航空摄影测量、航天摄影测量（遥感）、地面摄影测量和近景摄影测量等。

**地图制图学**——研究模拟地图和数字地图的基础理论、设计、编绘和复制的技术方法以及应用的学科。它的基本任务是利用各种测量成果编制各类地图，其内容主要包括地图投影、地图编制、地图整饰、地图制印和地图应用等。随着计算机技术的引入，出现了计算机地图制图技术，使地图产品由纸质模拟地图向数字地图转变，从二维静态向三维立体和四维动态转变。数字地图的发展及广阔的应用领域为地图学的发展展现出了光辉的前景，使数字地图成为 21 世纪社会生活中的主要测绘产品。

**工程测量学**——研究工程建设和自然资源开发中，在规划、勘察设计、施工和运营管理各个阶段进行的控制测量、地形测绘、施工放样、设备安装、变形监测及分析预报等的理论与技术的学科。工程测量学按其研究对象的不同，又可分为建筑工程测量、水利工程测量、矿山测量、铁路工程测量、公路工程测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、输电线路与输油管道测量、港口工程测量、军事工程测量、城市建设测量等。

**海洋测量学**——研究以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制理论与方法的学

科。主要包括海洋大地测量、海道测量、海底地形测量、海洋重力测量及各种海图的编制。

土木工程是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指所进行的勘测设计、施工、运营维护等技术活动,也指工程建设的对象,即建造在地上或地下、陆上或水中,直接或间接为人类生活、生产、军事、科研服务的各种工程设施,例如,房屋、道路、铁路、运输管道、隧道、桥梁、堤坝、港口、电站、机场、给排水等工程。为实施土木工程而进行的测量工作即为土木工程测量。因此,土木工程测量属于普通测量学和工程测量学的范畴。其基本内容包括测定和测设的理论与技术体系。

随着近代电子技术、空间技术、计算机技术以及通信技术的发展,测量工作的方法、工具、对象和成果有了较大的变化,现代的测量学又改称为测绘学。测绘学是研究对地球整体及其表面和外层空间中的各种自然和人造物体上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进行采集、处理、管理、更新和利用的科学和技术。测量学这一古老的学科在这些新技术的支撑和推动下,出现了以全球定位系统 GPS (Global Positioning System)、遥感 RS (Remote Sensing) 和地理信息系统 GIS (Geographic Information System) 即“3S”技术为代表的现代测绘科学技术,使测绘学科从理论到方法都发生了根本性的改变。GPS 主要用于实时、快速地提供目标的空间位置;RS 用于实时、快速地提供大面积地表物体及其环境的几何与物理信息,以及它们的各种变化;GIS 则是对多种来源的时空数据进行综合处理分析和应用的平台。“3S”技术的集成应用是测绘技术的发展方向,从测绘学的现代发展可以看出,现代测绘学是指对空间数据的测量、分析、管理、存储和显示的综合研究。这些空间数据来源于地球卫星、航空航天传感器以及地面的各种测量仪器,采用信息技术,利用计算机的硬件和软件对这些空间数据进行处理和使用。原来各测绘分支学科之间的界限因计算机技术和通信技术的发展而逐渐变得模糊,各测绘分支学科都因计算机和通信技术的发展而更加紧密地联系在一起,并结合地理学和管理学等学科知识,为现代社会对空间信息的各种需求提出全面的优化解决方案。这样,测绘学的现代概念就是研究地球和其他实体与地理空间分布有关的信息的采集、量测、分析、显示、管理和利用的科学和技术。由于将空间数据与其他专业数据进行综合处理、分析,致使测绘学科从单一学科走向多学科交叉,其应用已扩展到与空间信息分布有关的众多领域,显示出现代测绘学正向着——一门新兴学科——地球空间信息科学 (Geo-Spatial Information Science 简称 Geomatics) 跨越和融合。

在 21 世纪的信息社会中,测绘资料是重要的基础信息之一。测绘产品已由过去的单一硬拷贝纸质图逐步向软拷贝的“4D”数字产品,即数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model)、数字正射影像图 DOM (Digital Orthophoto Map)、数字线划图 DLG (Digital Line Graphic) 和数字栅格图 DRG (Digital Raster Graphic) 以及地理信息系统过渡。测绘工作承担着信息采集、加工、整理及信息建库的重要任务。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“建设的尖兵”。城乡规划与建设,国土整治,公路、铁路的修建,农林、水利建设,资源调查,矿产的勘探和开发,环境监测等都离不开测绘工作。在国防建设中,军事测量和军用地图是现代大规模诸兵种协同作战不可缺少的重要保障,而且对诸如远程导弹、空间武器、人造卫星和航天器的发射也起着重要的作用。测绘技术对于空间科学技术的研究、地壳形变、地震预报、地球动力学研究等领域是不可缺少的工具。由诸多测绘成果集成的地理信息系统现已成为现代行政管理和军事指挥的重要工具。

随着科学技术的日益发展,测绘学已全面进入数字化时代,正向着自动化、信息化和网

络化的方向迈进。测量对象已由地球表面扩展到空间星球，由静态发展到动态，“3S”技术已成为测绘工作的主要技术手段。测绘学的概念已被拓宽而注入了新的内容，成为一门名副其实的地球空间信息科学。本教材的主要内容包括地形图的测绘与应用以及一般工程建设的施工测量。

## 1.2 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 8 844.43 m，最深的太平洋马里亚纳海沟低于海平面 1 1034 m，二者相对高差近 20 km，与地球的平均半径 6 371 km 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，我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体，即设想将静止的海水面扩展延伸，使其穿过大陆和岛屿，形成一个封闭的曲面，如图 1-1 所示。静止的海水面称为水准面。由于海水受潮汐、风浪等影响而时高时低，故水准面有无穷多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称为大地水准面。由大地水准面所包围的形体称为大地体。人们常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

水准面的特性是处处与铅垂线相垂直。同一水准面上各点的重力位相等，故又将水准面称为重力等位面，此面既具有几何意义又具有物理意义。水准面和铅垂线就是实际测量工作所依据的面和线。

由于地球内部质量分布不均匀，致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化，所以，处处与铅垂线垂直的大地水准面是一个不规则的无法用数学式表述的曲面，在这样的面上是无法进行测量数据的计算和处理的。因此，人们进一步设想，用一个与大地体非常接近的又能用数学式表述的规则球体，即旋转椭球体来代表地球的形状，如图 1-2 所示，它是由椭圆 NESW 绕短轴 NS 旋转而成。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：

$$\alpha = \frac{a-b}{a}$$

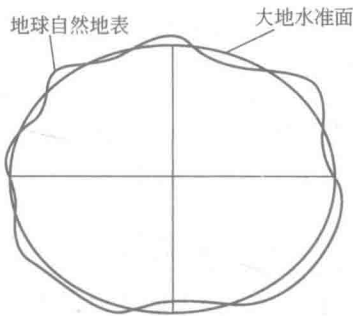


图 1-1 地球与大地体

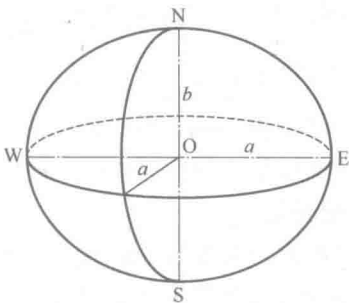


图 1-2 旋转椭球体

某一国家或地区为处理测量成果而采用的与本国或本地区的大地体面形状最密合的旋转椭球称为参考椭球体。而着眼于全世界的测量数据处理,选择在全球范围内与大地体的形状大小最密合的旋转椭球称为总椭球体。确定椭球体与大地体之间的相对位置关系,称为椭球体定位。参考椭球体的定位对椭球体的中心位置无特殊要求,而总椭球体的定位则要求椭球体中心与地球质心一致。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多组椭球体参数值,表 1-1 列出了几个著名的椭球体及几何参数。我国的 1954 年北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球,1980 西安坐标系采用的是 1975 国际椭球,它们属于参考椭球体定位的参心坐标系;全球定位系统(GPS)采用的是 WGS-84 椭球,我国的 2000 国家大地坐标系采用的椭球与 WGS-84 椭球近似,它们属于总椭球体定位的地心坐标系。

表 1-1 地球椭球几何参数

| 椭球名称      | 长半轴 $a/\text{m}$ | 扁 率 $\alpha$        | 计算年代和国家       | 备 注            |
|-----------|------------------|---------------------|---------------|----------------|
| 贝塞尔       | 6 377 397        | 1 : 299.152         | 1841 德国       |                |
| 海福特       | 6 378 388        | 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        | 1 : 298.3           | 1940 前苏联      | 1954 年北京坐标系采用  |
| 1975 国际椭球 | 6 378 140        | 1 : 298.257         | 1975 国际第三个推荐值 | 1980 西安坐标系采用   |
| WGS-84    | 6 378 137        | 1 : 298.257 223 563 | 1984 美国       | 美国 GPS 采用      |
| CGCS 2000 | 6 378 137        | 1 : 298.257 222 101 | 2000 中国       | 2000 国家大地坐标系采用 |

由于旋转椭球的扁率很小,在普通测量中可将地球当作圆球看待,其半径  $R = (a + a + b)/3 = 6\,371\text{km}$ 。

### 1.3 地面点位的确定及测量坐标系

测量工作的基本任务是确定地面点的三维空间位置,测量上通常将三维空间分解为确定点位置的二维坐标和一维高程。坐标表示地面点投影到基准面上的位置,高程表示地面点沿投影方向到基准面的距离。根据不同的需要可以采用不同的坐标系和高程系来表示地面点的位置。

#### 1.3.1 地理坐标系

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,宜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,视球体不同而分为天文坐标系和大地坐标系。

##### 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,该坐标系用天文经度和天文纬度表示。如图 1-3 所示,将大地体视作地球,NS 即为地球的自转轴,N 为北极,S 为南极。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。天文子午面与大地水准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，并作为经度计算的起点。过点 P 的天文子午面与起始子午面所夹的两面角就称为 P 点的天文经度，用  $\lambda$  表示，其值为  $0^\circ \sim 180^\circ$ ，在起始子午线以东的为东经，以西的为西经。

通过地球体中心且垂直于地轴的平面称为赤道面，它是纬度计算的起始面。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  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。在赤道以北的为北纬，以南的为南纬。

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，该坐标系用大地经度和大地纬度表示。如图 1-4 所示，包含地面点 P 的法线且通过椭球旋转轴的平面称为 P 的大地子午面。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的两面角就称为 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  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

大地坐标  $(L, B)$  因所依据的椭球体面不具有物理意义而不能直接测得，只可通过计算得到。它与天文坐标有如下关系式：

$$\begin{aligned} L &= \lambda - \frac{\eta}{\cos \varphi} \\ B &= \varphi - \xi \end{aligned} \tag{1-1}$$

式中， $\eta$  为过同一地面点的垂线与法线的夹角在东西方向上的垂线偏差分量， $\xi$  为在南北方向上的垂线偏差分量。

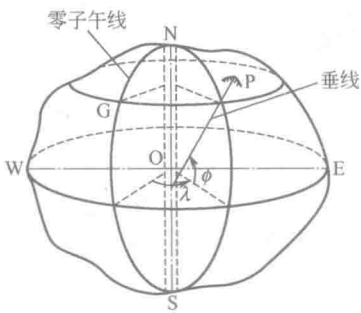


图 1-3 天文坐标系

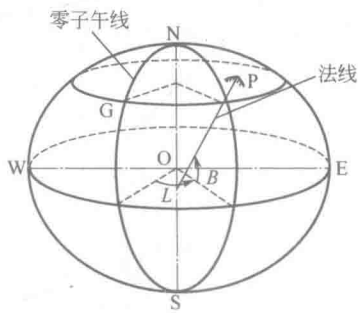


图 1-4 大地坐标系

### 1.3.2 平面直角坐标系

在实际测量工作中，若用以角度为计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。测量工作中所用的平面直角坐标系与数学上的笛卡尔直角坐标系实质相同而形式不同，测量上的平面直角坐标系以纵轴为  $x$  轴，一般表示南北方向，以横轴为  $y$  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，使数学中的三角公式在测量坐标系中完全适用。

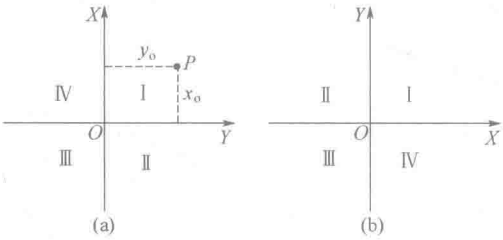


图 1-5 测量平面直角坐标系与数学笛卡尔直角坐标系

(a) 测量平面直角坐标系；(b) 笛卡尔直角坐标系

1. 独立测区的平面直角坐标系

当测区的范围较小，能够忽略地球曲率对该区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。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联测而纳入统一坐标系。

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。目前我国采用高斯-克吕格投影，建立了高斯-克吕格平面直角坐标系，简称高斯平面直角坐标系。

(1) 高斯投影

高斯投影是由德国数学家、测量学家高斯提出，后经德国大地测量学家克吕格改进的一种等角横切椭圆柱投影，全称高斯-克吕格投影。该投影解决了将椭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向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。将椭球面上一定范围内的物象映射到椭圆柱的表面，然后将椭圆柱面沿母线剪开并展成平面，即获得投影后的平面图形，如图 1-6 所示。

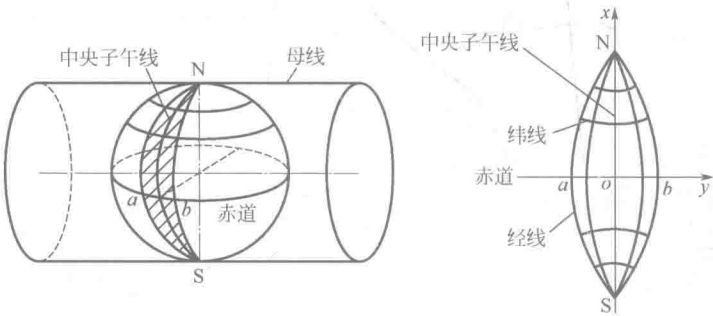


图 1-6 高斯投影

该投影的经纬线图形有以下特性：

- 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 赤道的投影为直线，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。