

普通高等教育“十二五”规划教材

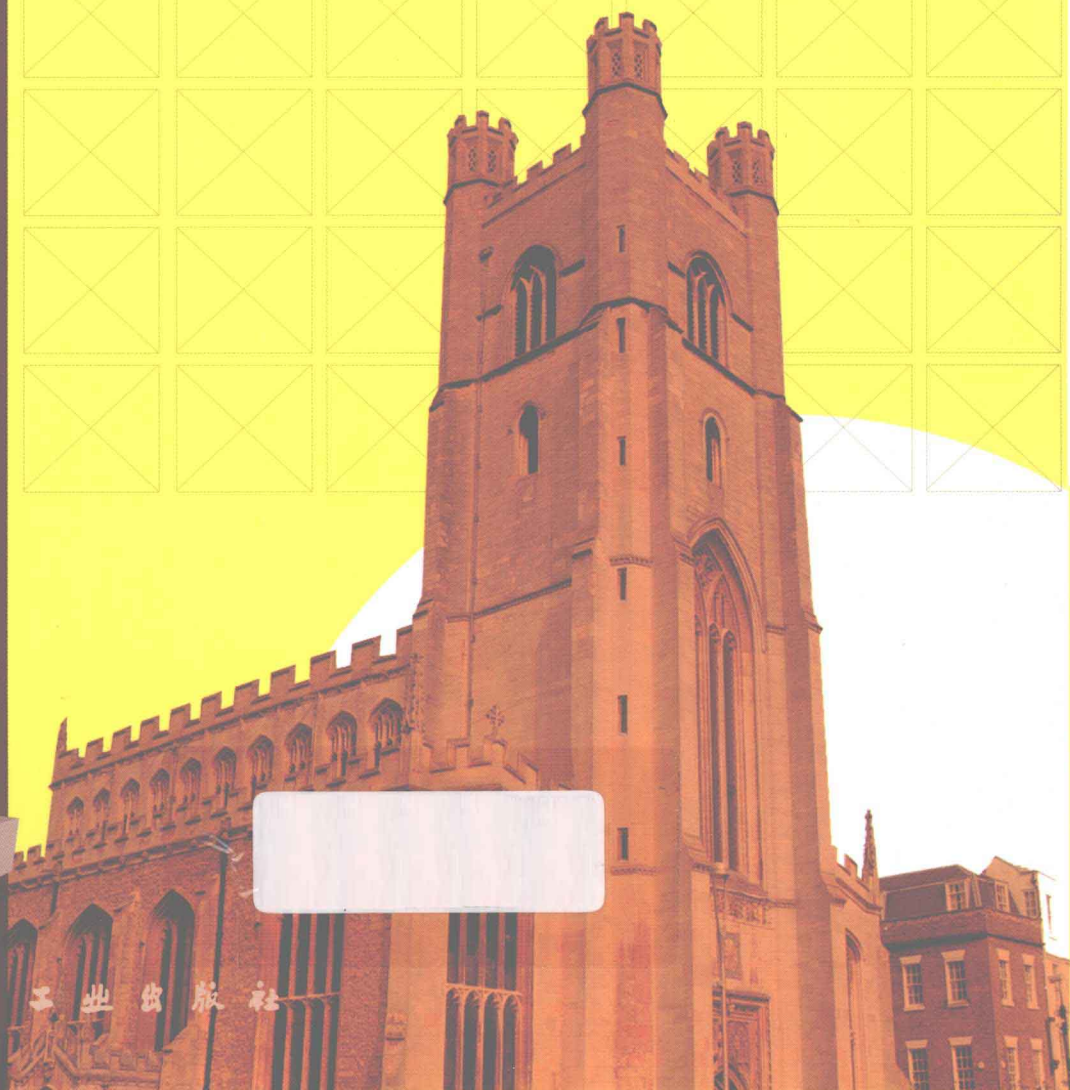
# 测量学

万玉山 封金财 主编

CELIANGXUE



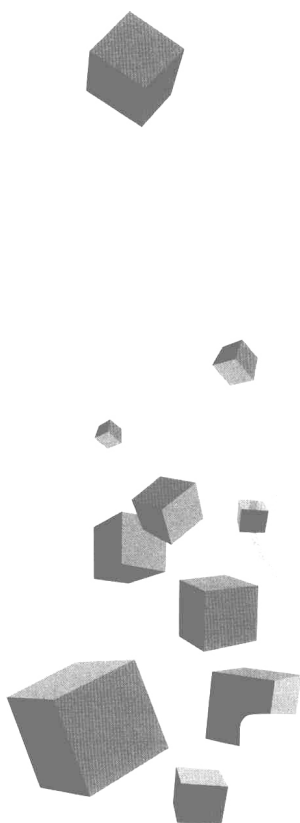
化学工业出版社



普通高等教育“十二五”规划教材

# 测量学

万玉山 封金财 主 编  
陈春红 杨 兆 周志富 杨 莉 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

全书共分为十四章,第一章介绍了坐标系、测量工作的程序与内容;第二章介绍了水准测量;第三章介绍了角度测量;第四章介绍了距离测量;第五章介绍了测量误差;第六章介绍了控制测量;第七章说明了地形测量;第八章介绍了地形图应用的相关知识;第九章介绍了建筑工程施工测量;第十章介绍了道路工程测量;第十一章介绍了桥梁工程测量;第十二章介绍了地下建筑工程测量的基本内容;第十三章介绍了电子全站仪测量;第十四章介绍了全球定位系统的基本内容。

本书强调逻辑的完整性、章节的独立性以及内容的实用性,各章均配有习题。本书适用的专业主要包括测绘工程、建筑工程、给排水工程、环境工程、水利工程、安全工程、农业工程等本科相关专业,也可供有关专业工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

测量学/万玉山,封金财主编. —北京:化学工业出版社,2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-14431-7

I. 测… II. ①万…②封… III. 测量学-高等学校-教材 IV. P2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第112913号

---

责任编辑:满悦芝

文字编辑:颜克俭

责任校对:王素芹

装帧设计:尹琳琳

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张15½ 字数384千字 2012年9月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:36.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

测绘科学是各类工程活动的“眼睛”，为人类活动提供各种地球信息。它为交通工具的自动导航，大型精密工程的规划和建设，海洋资源的开发，防灾减灾和救援活动以及为地震的预测提供监测信息；监测预报滑坡和泥石流，并在环境监测和保护等领域中发挥着重要作用。它还可以监测极地冰盖和海平面的变化，给出森林面积缩小、草原蜕化、沙漠扩大、耕地面积减小等环境破坏的分布评估。应用测绘技术可以探索地球物理现象的力学机制，获取表征地球运动和形变的参数，如板块运动的速率、地壳形变的速度和加速度等。它还为空间技术和国防现代化建设提供重要保障，如地球重力场模型和精密地心参考框架等。因此，测绘科学是各种工程建设不可或缺的重要技术保障。

近年来，随着国民经济和现代科学技术的飞速发展，特别是电子学、信息与通信、电子计算机科学和空间科学等为测量科学的发展拓宽了道路，推动着测量技术和测绘仪器的变革和进步。顺应时代潮流，反映测量科学的深刻变革，总结教学、科研和实践成果，为 21 世纪培养高素质测绘人才，是测绘教育工作者的职责和义务。

本书是多位编者从事教学、科研和社会实践工作中的经验积累与心得体会的总结。书中内容的编写以理论与实践相结合，对传统的测量理论、技术和方法进行了深入的总结与思考，吸纳了当今最新的科技成就和技术以及他人的宝贵经验。

本书是在常州大学教改基金的资助下，在化学工业出版社的支持下编写完成的。由常州大学封金财编写第一、九、十章，常州大学陈春红编写第二、三、四章，常州大学万玉山编写第五、十一、十二章，常州大学杨兆编写第六、十三、十四章，大同大学周志富编写第七章，大同大学杨莉编写第八章，常州大学万玉山负责统稿。大同大学郭玉社及常州大学董亮亮、张平、李娜等也参与了编写工作。在编写过程中，编者参考了很多国内外文献资料，在此向文献的作者表示诚挚的谢意。

由于编者学识有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者  
2012 年 7 月

# 目 录

|                         |    |                                    |    |
|-------------------------|----|------------------------------------|----|
| 第一章 概述 .....            | 1  | 三、外界条件的影响 .....                    | 29 |
| 第一节 测量学 .....           | 1  | 四、水准测量的注意事项 .....                  | 30 |
| 第二节 坐标系 .....           | 2  | 习题 .....                           | 30 |
| 一、确定点的球面位置的坐标系 .....    | 2  | 第三章 角度测量 .....                     | 32 |
| 二、确定点的高程系 .....         | 6  | 第一节 角度测量原理 .....                   | 32 |
| 三、WGS-84 坐标系 .....      | 7  | 一、水平角测量原理 .....                    | 32 |
| 第三节 测量工作的程序与基本内容 .....  | 8  | 二、竖直角测量原理 .....                    | 32 |
| 一、测量的主要任务是测定和测设 .....   | 8  | 第二节 光学经纬仪的构造及度盘读数 .....            | 33 |
| 二、测量工作的基本要求 .....       | 9  | 一、DJ <sub>6</sub> 光学经纬仪的基本构造 ..... | 33 |
| 第四节 水准面的曲率对观测量的影响 ..... | 10 | 二、光学经纬仪的读数系统及读数方法 .....            | 34 |
| 习题 .....                | 11 | 三、DJ <sub>2</sub> 光学经纬仪的读数系统 ..... | 35 |
| 第二章 水准测量 .....          | 12 | 四、经纬仪的使用 .....                     | 36 |
| 第一节 概述 .....            | 12 | 第三节 水平角测量 .....                    | 38 |
| 第二节 水准测量原理 .....        | 12 | 一、测回法 .....                        | 38 |
| 第三节 水准测量的仪器和工具 .....    | 13 | 二、方向观测法 .....                      | 39 |
| 一、微倾式水准仪 .....          | 13 | 第四节 竖直角测量 .....                    | 40 |
| 二、水准尺和尺垫 .....          | 15 | 一、竖直度盘的构造 .....                    | 40 |
| 三、水准仪的使用 .....          | 16 | 二、竖直角计算 .....                      | 41 |
| 第四节 水准测量的方法及成果整理 .....  | 17 | 三、竖盘指标差 .....                      | 42 |
| 一、水准点 .....             | 17 | 四、竖盘角观测 .....                      | 43 |
| 二、水准路线 .....            | 18 | 第五节 经纬仪的检验与校正 .....                | 43 |
| 三、水准测量的实施 .....         | 19 | 一、经纬仪轴线应满足的几何条件 .....              | 44 |
| 四、水准测量的成果整理 .....       | 21 | 二、经纬仪的检验与校正 .....                  | 44 |
| 第五节 自动安平水准仪 .....       | 23 | 第六节 角度测量误差及注意事项 .....              | 47 |
| 一、自动安平原理 .....          | 23 | 一、水平角测量误差 .....                    | 47 |
| 二、自动安平补偿器 .....         | 23 | 二、竖直角测量误差 .....                    | 49 |
| 三、自动安平水准仪的使用 .....      | 24 | 三、角度测量的注意事项 .....                  | 49 |
| 第六节 精密水准仪和水准尺 .....     | 24 | 第七节 电子经纬仪 .....                    | 49 |
| 一、精密水准仪的构造 .....        | 24 | 一、编码测角系统 .....                     | 49 |
| 二、精密水准尺 .....           | 25 | 二、光栅测角系统 .....                     | 50 |
| 三、精密水准仪的使用 .....        | 25 | 三、动态测角原理 .....                     | 50 |
| 第七节 水准仪的检验和校正 .....     | 26 | 习题 .....                           | 51 |
| 一、水准仪的轴线及其应满足的条件 .....  | 26 | 第四章 距离测量 .....                     | 53 |
| 二、水准仪的检验与校正 .....       | 26 | 第一节 卷尺量距 .....                     | 53 |
| 第八节 水准测量的误差分析 .....     | 28 | 一、量距工具 .....                       | 53 |
| 一、仪器误差 .....            | 28 | 二、直线定线 .....                       | 54 |
| 二、观测误差 .....            | 28 | 三、钢尺量距的一般方法 .....                  | 54 |

|                         |    |                         |     |
|-------------------------|----|-------------------------|-----|
| 四、钢尺的检定 .....           | 56 | 三、导线测量内业计算 .....        | 85  |
| 五、钢尺量距的精密方法 .....       | 56 | 四、导线测量中错误的查找 .....      | 89  |
| 六、钢尺量距的误差分析及注意事项 .....  | 58 | 第四节 交会定点的计算 .....       | 90  |
| 第二节 视距测量 .....          | 59 | 一、测角交会 .....            | 90  |
| 一、视距测量的基本原理 .....       | 59 | 二、测边交会 .....            | 91  |
| 二、视距测量的观测和计算 .....      | 61 | 三、边角交会 .....            | 93  |
| 第三节 电磁波测距 .....         | 62 | 第五节 三、四等水准测量及高程测量 ..... | 93  |
| 一、电磁波测距原理 .....         | 62 | 一、三、四等水准测量的技术要求 .....   | 93  |
| 二、测距仪的使用 .....          | 64 | 二、三、四等水准测量的方法 .....     | 94  |
| 三、测距成果整理 .....          | 64 | 三、水准网高程的平差计算 .....      | 95  |
| 第四节 三角高程测量 .....        | 65 | 四、三角高程测量 .....          | 98  |
| 一、三角高程测量原理 .....        | 65 | 五、GPS 高程测量 .....        | 98  |
| 二、地球曲率和大气折射对高差的影响 ..... | 66 | 习题 .....                | 99  |
| 三、三角高程测量的观测和计算 .....    | 67 | 第七章 地形测量 .....          | 100 |
| 习题 .....                | 67 | 第一节 地形图基本知识 .....       | 100 |
| 第五章 测量误差 .....          | 69 | 一、地形图的概念 .....          | 100 |
| 第一节 测量误差概述 .....        | 69 | 二、地形图的比例尺 .....         | 100 |
| 一、概念 .....              | 69 | 三、地形图符号 .....           | 101 |
| 二、测量误差的来源 .....         | 69 | 四、地貌的表示方法 .....         | 104 |
| 三、观测误差的分类及其处理方法 .....   | 70 | 五、地形图的图幅与编号 .....       | 108 |
| 四、偶然误差的特性 .....         | 71 | 第二节 测图前的准备工作 .....      | 110 |
| 第二节 精度及衡量精度的指标 .....    | 72 | 一、图纸准备 .....            | 110 |
| 一、精度 .....              | 72 | 二、测图的器材 .....           | 111 |
| 二、中误差 .....             | 72 | 三、测图的资料 .....           | 111 |
| 三、极限误差 .....            | 73 | 第三节 地物平面图测绘 .....       | 112 |
| 四、相对误差 .....            | 73 | 一、平板仪图解法测图 .....        | 112 |
| 第三节 误差传播定律 .....        | 74 | 二、经纬仪测记法测图 .....        | 112 |
| 第四节 等精度直接观测平差 .....     | 75 | 三、地物测绘的一般原则 .....       | 113 |
| 一、最或是值 .....            | 75 | 四、图的注记 .....            | 115 |
| 二、观测值改正值 .....          | 76 | 第四节 等高线地形图测绘 .....      | 116 |
| 三、等精度直接观测的精度评定 .....    | 76 | 一、地形点的选择 .....          | 116 |
| 第五节 不等精度直接观测平差 .....    | 76 | 二、地形点三维坐标的测定 .....      | 117 |
| 一、权 .....               | 76 | 三、等高线绘制 .....           | 117 |
| 二、权与中误差 .....           | 77 | 第五节 数字测图概述 .....        | 118 |
| 三、不等精度直接观测的精度评定 .....   | 77 | 一、概述 .....              | 118 |
| 习题 .....                | 77 | 二、数字化测图的工作过程与作业模式 ..... | 118 |
| 第六章 控制测量 .....          | 78 | 三、数字测图的方法 .....         | 119 |
| 第一节 概述 .....            | 78 | 四、全站仪数字测图的实施 .....      | 120 |
| 第二节 平面控制网的定位与定向 .....   | 81 | 五、RTK 数字测图的实施 .....     | 122 |
| 一、方位角和坐标方位角 .....       | 81 | 第六节 航空摄影测量成图 .....      | 123 |
| 二、两点间边长的方位角和坐标增量 .....  | 82 | 习题 .....                | 124 |
| 第三节 导线测量和导线计算 .....     | 83 | 第八章 地形图的应用 .....        | 126 |
| 一、导线网的布设 .....          | 83 | 第一节 地形图应用概述 .....       | 126 |
| 二、导线测量的外业工作 .....       | 84 |                         |     |

|                        |     |                  |     |
|------------------------|-----|------------------|-----|
| 一、地形图的主要用途             | 126 | 第四节 建筑施工测量       | 145 |
| 二、地形图的识读               | 126 | 一、轴线的测设          | 146 |
| 三、地形图的精度               | 127 | 二、施工控制桩和龙门板的测设   | 147 |
| 第二节 地形图应用的基本内容         | 127 | 三、基础施工测量         | 149 |
| 一、在地形图上量取点的坐标和确定点的高程   | 127 | 四、工业厂房构件安装测量     | 150 |
| 二、求图上直线的长度、坡度和坐标方位角    | 128 | 五、高层建筑的轴线投测和高程传递 | 153 |
| 三、按设计坡度在地形图上选定最短路线     | 129 | 第五节 管道工程测量       | 157 |
| 四、图形面积的量算              | 129 | 一、管道中线测量         | 157 |
| 五、在地形图上确定通视情况          | 130 | 二、管线纵、横断面测量      | 158 |
| 六、根据等高线计算体积            | 131 | 三、管道施工测量         | 159 |
| 第三节 工程建设中的地形图应用        | 132 | 四、顶管施工测量         | 160 |
| 一、根据地形图作剖面图            | 132 | 五、管道竣工测量         | 160 |
| 二、确定汇水面积               | 132 | 第六节 建筑竣工总平面图绘制   | 161 |
| 三、根据地形图计算平整场地的土方量      | 133 | 一、竣工测量           | 161 |
| 第四节 建筑和给排水设计中的地形图应用    | 135 | 二、竣工总平面图的编绘      | 162 |
| 一、建筑设计中的地形图应用          | 135 | 第七节 建筑变形测量       | 162 |
| 二、给排水设计中的地形图应用         | 135 | 一、建筑变形测量的一般规定    | 162 |
| 第五节 城市规划和道路勘测设计中的地形图应用 | 136 | 二、沉降观测           | 164 |
| 一、城市规划用地分析的地形图应用       | 136 | 三、位移观测           | 168 |
| 二、道路勘测设计中的地形图应用        | 136 | 习题               | 173 |
| 习题                     | 137 | 第十章 道路工程测量       | 174 |
| 第九章 建筑工程施工测量           | 138 | 第一节 概述           | 174 |
| 第一节 概述                 | 138 | 第二节 道路中线测量       | 174 |
| 一、施工测量的内容              | 138 | 一、中线交点和转点的测设     | 175 |
| 二、施工测量精度的基本要求          | 138 | 二、转角测定           | 177 |
| 三、施工测量的原则              | 138 | 三、里程桩测设          | 177 |
| 四、准备工作                 | 138 | 第三节 道路圆曲线测设      | 178 |
| 第二节 施工测量的基本工作          | 139 | 一、圆曲线及其测设        | 178 |
| 一、水平角的测设方法             | 139 | 二、复曲线及其测设        | 182 |
| 二、水平距离的测设方法            | 139 | 三、缓和曲线及其测设       | 183 |
| 三、高程的测设方法              | 141 | 第四节 线路纵、横断面测量    | 185 |
| 四、坡度的测设方法              | 142 | 一、基平测量           | 185 |
| 第三节 建筑施工控制测量           | 142 | 二、中平测量           | 186 |
| 一、建筑基线                 | 142 | 三、纵断面图的绘制        | 187 |
| 二、建筑方格网                | 143 | 四、线路横断面测量        | 189 |
| 三、施工坐标系与测量坐标系的相互变换     | 145 | 五、横断面图的绘制        | 191 |
| 四、施工高程控制网              | 145 | 第五节 线路工程施工测量     | 192 |
|                        |     | 一、施工控制桩的测设       | 192 |
|                        |     | 二、边桩测设           | 193 |
|                        |     | 习题               | 194 |
|                        |     | 第十一章 桥梁工程测量      | 195 |
|                        |     | 第一节 概述           | 195 |
|                        |     | 第二节 桥梁控制测量       | 195 |
|                        |     | 一、平面控制测量         | 195 |

|                            |     |                             |     |
|----------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| 二、高程控制测量·····              | 196 | <b>第十三章 电子全站仪测量</b> ·····   | 220 |
| 第三节 桥梁施工测量·····            | 197 | 第一节 概述·····                 | 220 |
| 一、中小型桥梁施工测量·····           | 197 | 第二节 全站仪的特殊部件及其功能·····       | 221 |
| 二、大型桥梁施工测量·····            | 198 | 一、全站仪的基本构造·····             | 221 |
| 三、大型斜拉桥施工测量·····           | 200 | 二、全站仪的特殊构造·····             | 221 |
| 第四节 桥梁竣工及变形测量·····         | 204 | 三、全站仪的工作原理·····             | 222 |
| 一、桥梁竣工测量·····              | 204 | 四、全站仪的精度及等级·····            | 224 |
| 二、桥梁变形测量·····              | 205 | 五、测量机器人·····                | 225 |
| 习题·····                    | 206 | 第三节 全站仪的使用·····             | 225 |
| <b>第十二章 地下建筑工程测量</b> ····· | 207 | 一、全站仪的基本功能·····             | 225 |
| 第一节 概述·····                | 207 | 二、全站仪的主要操作步骤·····           | 227 |
| 第二节 地下工程的地面控制测量·····       | 208 | 三、全站仪实例·····                | 227 |
| 一、平面控制测量·····              | 208 | 习题·····                     | 230 |
| 二、高程控制测量·····              | 209 | <b>第十四章 全球定位系统</b> ·····    | 231 |
| 第三节 隧道联系测量·····            | 209 | 第一节 概述·····                 | 231 |
| 一、掘进方向测设数据计算·····          | 210 | 第二节 全球定位系统的组成及信号<br>结构····· | 232 |
| 二、洞口掘进方向标定·····            | 210 | 第三节 全球定位系统测定点位的原理·····      | 234 |
| 三、洞口内侧施工点位高程测设·····        | 210 | 一、单点定位·····                 | 234 |
| 第四节 竖井联系测量·····            | 211 | 二、相对定位·····                 | 235 |
| 一、竖井联系测量概述·····            | 211 | 三、差分 GPS·····               | 235 |
| 二、一井定向·····                | 211 | 第四节 GPS 控制测量·····           | 236 |
| 三、两井定向·····                | 213 | 一、概述·····                   | 236 |
| 四、陀螺经纬仪测定方位角·····          | 213 | 二、GPS 控制网建立过程·····          | 236 |
| 五、竖井高程传递·····              | 215 | 三、GPS 外业观测过程·····           | 237 |
| 第五节 隧道(巷道)施工测量·····        | 216 | 四、GPS 数据处理·····             | 238 |
| 一、洞内中线和腰线的测设·····          | 216 | 习题·····                     | 239 |
| 二、洞内施工导线测量和水准测量·····       | 217 | <b>参考文献</b> ·····           | 240 |
| 三、盾构施工测量·····              | 218 |                             |     |
| 第六节 地下建筑竣工测量·····          | 218 |                             |     |
| 习题·····                    | 219 |                             |     |

# 第一章 概 述

## 第一节 测 量 学

人类生活的地球表面极不规则，有高山、丘陵、平原、盆地、湖泊、河流和海洋等自然形成的物体，还有房屋建筑、工厂、公路、铁路、桥梁等人工建造的建筑物和构筑物。测量学将地表物体分为地物和地貌。

① 地物 地面上天然或人工形成的物体，它包括平原、湖泊、河流、海洋房屋、道路、桥梁等。

② 地貌 地表高低起伏的形态，它包括山地、丘陵和平原等。

地物和地貌总称为地形。测量学是研究地球的形状和大小，确定地球表面各种物体的形状、大小和空间位置的科学。其主要任务是测定和测设。

③ 测定 使用测量仪器和工具，通过测量和计算将地物和地貌的位置按一定比例尺、规定的符号缩小绘制成地形图，供科学研究和工程建设规划设计使用。

④ 测设 将在地形图设计出的建筑物和构筑物的位置在实地标定出来，作为施工的依据。

测量学是一门历史悠久的学科，早在几千年前，由于当时社会生产发展的需要，中国、埃及、希腊等古代国家的人民就开始创造与运用测量工具进行测量。在远古时代，中国就发明了指南针，以后又发明创造了浑天仪等测量仪器，并绘制了相当精确的全国地图。指南针于中世纪由阿拉伯人传到欧洲，以后在全世界得到更广泛的应用，直到今天，它仍然是利用地磁测定方位的简便测量工具。

20 世纪 60 年代开始，随着社会经济的发展，世界科技进入高速发展时期，同时也促进了测绘科学技术的发展。光电技术和微型电子计算机引入测绘仪器制造领域后，产生了将电磁波测距与电子测角融为一体的全站仪，它具有自动计算测点三维坐标、自动保存观测数据和将观测数据传输到计算机实现自动绘制地形图的功能，可以实现数字化测绘地形图的功能。随着航天遥感技术的不断完善，利用航天遥感相片及扫描信息测绘地形图，不仅覆盖面积大，而且不受地理及气候条件的限制，能全天候作业，极大地提高了测绘工作效率。1993 年后迅速发展和普及的利用卫星测定地面控制点坐标的新技术——全球定位系统彻底改变了传统的通过测角量边计算地面点位坐标的方法，测量人员只需将 GPS 接收机安置在测点上。通过接收卫星信号，使用专门的数据处理软件，就可以快速计算出测点的三维坐标。1962 年开始研究的地理信息系统是一定格式的数字地图与地面有关资源信息的集成并实现有关空间数据管理、空间信息分析及其传播的计算机系统，是传统学科（测量学、地理学和地图学等）与现代科学技术（遥感技术、计算机科学等）相结合的产物，经过四十多年的发展历程，已经取得了巨大的成就，被广泛应用于土地利用、资源管理、环境监测、交通运输、城市规划、经济建设以及政府各职能部门。

在国民经济建设中,测量技术的应用非常广泛。但在不同的领域中,测量工作中的内容和步骤也是不同的,例如在城市规划、给水排水、煤气管道、工业厂房和高层建筑建设中的测量工作是:在施工阶段,要将设计结构物的平面位置和高程在实地标定出来,作为施工的依据;工程完工后,要测绘竣工图,供日后扩建、改建、维修和城市管理应用,对某些重要的建筑物或构筑物,在建设中和建成以后都需要进行变形观测,以保证建筑物的安全。

在铁路、公路建设中的测量工作是:为了确定一条最经济合理的路线,必须预先测绘路线附近的地形图,在地形图上进行路线设计,然后将设计路线的位置标定在地面上以指导施工;当路线跨越河流时,必须建造桥梁,在建桥之前,要测绘河流两岸的地形图,测定河流的水位、流速、流量和河床地形图以及桥梁轴线长度等,为桥梁设计提供必要的资料,最后将设计桥台、桥墩的位置用测量的方法在实地标定;当路线穿过山岭需要开挖隧道时,开挖之前,必须在地形图上确定隧道的位置,根据测量数据计算隧道的长度和方向;隧道施工通常是从隧道两端相向开挖,这就需要根据测量成果指示开挖方向,保证其正确贯通。

对于土木工程专业的学生,通过本课程的学习,要掌握下列有关测定和测设的基本内容。

① 地形图测绘 运用各种测量仪器和工具,通过实地测量和计算,把小范围内地面上的地物、地貌按一定的比例尺测绘成图。

② 地形图应用 在工程设计中,在地形图上获取设计所需要的资料,例如点的坐标和高程、两点间的水平距离、地块的面积、地面的坡度、地形的断面和进行地形分析等。

③ 施工放样 把图上设计好的建筑物或构筑物的位置标定在实地上,作为施工的依据。

④ 变形观测 监测建筑物或构筑物的水平位移和垂直沉降,以便采取措施,保证建筑物的安全。

⑤ 竣工测量 对生活在科学技术尤其是新技术飞速发展年代的大学生,既要熟练掌握传统的测绘理论与方法,也要努力学习和掌握成熟的测绘新技术,例如,数字测图、全站仪和GPS测量及计算机数据处理等,并能将它们应用到土木工程建设的生产实践中,只有这样,才能使自己在激烈的市场竞争中立于不败之地。

## 第二节 坐 标 系

测量学的主要任务是测定和测设,无论是测定还是测设,都需要通过确定地面点的空间位置来实现。空间是三维的,所以表示地面点在某个空间坐标系中的位置需要三个参数,确定地面点位的实质就是确定其在某个空间坐标系中的三维坐标。测量中,将空间坐标系分为参心坐标系和地心坐标系。“参心”意指参考椭球的中心,由于参考椭球的中心一般不与地球质心重合,所以它属于非地心坐标系;“地心”意指地球的质心。工程测量通常使用参心坐标系。

### 一、确定点的球面位置的坐标系

由于地表高低起伏不平,所以一般是用地面某点投影到参考曲面上的位置和该点到大地水准面间的铅垂距离(简称高程)来表示该点在地球上的位置,为此,测量上将空间坐标系分解成确定点的球面位置的坐标系(二维)和高程系(一维)。确定点的球面位置的坐标系有地理坐标系和平面直角坐标系两类。

#### 1. 地理坐标系

按坐标所依据的基本线和本面的不同以及求坐标方法的不同,地理坐标系又可分为天文地理坐标系和大地地理坐标系两种。

(1) 天文地理坐标系 天文地理坐标又称天文坐标,表示地面点在大地水准面上的位置,它的基准是铅垂线和大地水准面,它用天文经度 $\lambda$ 和天文纬度 $\psi$ 两个参数来表示地面点在球面上的位置。

如图 1-1 所示,过地面上任一点  $P$  的铅垂线与地球旋转轴  $NS$  所组成的平面称为该点的天文子午面,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。设  $G$  点为英国格林尼治天文台的位置,称过  $G$  点的天文子午面为首子午面。 $P$  点天文经度 $\lambda$ 的定义是:过  $P$  点的天文子午面  $NPKS$  与首子午面  $NGMS$  的两面角,从首子午面向东或向西计算,取值范围  $0^\circ \sim 180^\circ$ ,在首子午线以东为东经、以西为西经。同一子午线上各点的经度相同。过  $P$  点垂直于地球旋转轴的平面与地球表面的交线称为  $P$  点的纬线,过球心  $O$  的纬线称为赤道。 $P$  点天文纬度 $\psi$ 的定义是: $P$  的铅垂线与赤道平面的夹角,自赤道起向南或向北计算,取值范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ ,在赤道以北为北纬、以南为南纬。

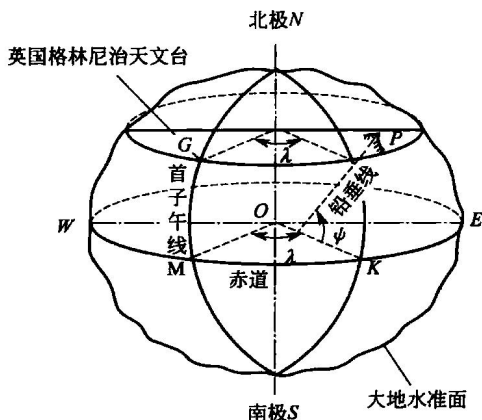


图 1-1 天文地理坐标系

可以应用天文测量方法测定地面点的天文经度 $\lambda$ 和天文纬度 $\psi$ 。例如广州地区的概略天文地理坐标为东经  $113^\circ 18'$ , 北纬  $23^\circ 07'$ 。

(2) 大地地理坐标系 大地地理坐标又称大地坐标,是表示地面点在参考椭球面上的位置,它的基准点是法线和参考椭球面,它用大地经度  $L$  和大地纬度  $B$  表示。 $P$  点的大地经度  $L$  是过  $P$  点的大地子午面和首子午面所夹的两面角; $P$  点的大地纬度  $B$  是过  $P$  点的法线与赤道面的夹角。大地经度、纬度是根据起始点大地点(又称大地原点,该点的大地经纬度与天文经纬度一致)的大地坐标,按大地测量所得的数据推算而得的。我国以陕西省泾阳县永乐镇大地原点为起算点,由此建立的大地坐标系,称为“1980 西安坐标系”,简称 80 系或西安系;通过与苏联 1942 年普尔科沃坐标系联测,经我国东北传算过来的坐标系称“1954 北京坐标系”,其大地原点位于前苏联列宁格勒天文台中央。

## 2. 平面直角坐标系

(1) 高斯平面坐标系 地理坐标对局部测量工作来说是非常不方便的。例如,在赤道上,  $1''$  的经度差或纬度差对应的地面距离约为 30km。测量计算最好在平面上进行,但地球是一个不可展的曲面,必须通过投影的方法将地球表面上的点位化算到平面。地图投影有多种方法,我国采用的高斯-克吕格正形投影,简称高斯投影。

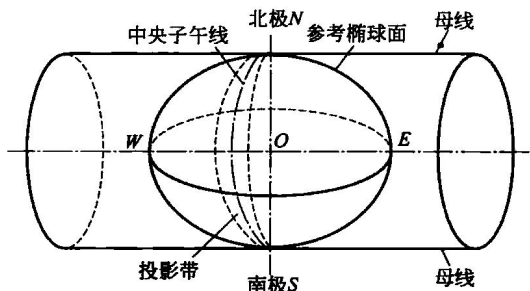


图 1-2 高斯平面坐标系的投影图

高斯投影是高斯在 1820~1830 年间为解决德国汉诺威地区大地测量投影问题而提出的一种投影方法。1912 年起,德国学者克吕格将高斯投影公式加以整理和扩充并推导出了实用计算公式。

高斯投影是将地球按经线划分成带,称为投影带,投影带是从首子午线,每隔经度  $6^\circ$  划分为一代(称为统一  $6^\circ$  带),如图 1-2 所示,自西向东将整个地球划分为 60 个带。带

号从首子午线开始,用阿拉伯数字表示,位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线。第一个6°带中央子午线的经度为3°。任意带的中央子午线经度 $L_0$ 与投影带号 $N$ 的关系为:

$$L_0 = 6N - 3 \quad (1-1)$$

反之,已知地面任一点的经度 $L$ ,要求计算该点所在的统一6°带编号的公式为:

$$N = \text{Int}\left(\frac{L+3}{6} + 0.5\right) \quad (1-2)$$

式中,Int为取整函数。投影时是设想用一个空心椭圆柱横套在参考椭球外面,使椭球柱与某一中央子午线相切,将椭球面上的图形按保角投影的原理投影到圆柱体面上,然后将圆柱体沿着过南北极的母线切开,展开成为平面,并在该平面上定义平面直角坐标系,如图1-3(a)。

投影后的中央子午线和赤道均为直线。由于在参考椭球面上,中央子午线与赤道相互垂直,所以经保角投影后的中央子午线与赤道也相互垂直。以中央子午线为坐标纵轴( $x$ 轴),向北为正;赤道为坐标横轴( $y$ 轴),向东为正,中央子午线与赤道的交点为坐标原点 $O$ ,组成的平面直角坐标系称为高斯平面坐标系。

与数学上的笛卡尔坐标系比较,在高斯平面坐标系中,为了定向的方便,定义纵轴为 $x$ 轴、横轴为 $y$ 轴, $x$ 轴与 $y$ 轴互换了位置,象限则按顺时针方向编号[图1-3(a)],这样就可以将数学上定义的各类三角函数在高斯平面坐标系中直接应用,不需做任何变更。

我国位于北半球, $x$ 坐标值恒为正, $y$ 坐标值则有正有负,当测点位于中央子午线以东时为正、以西时为负。例如图1-3(a)的 $P$ 点位于中央子午线以西,其 $y$ 坐标值为负值。对于6°带高斯平面坐标系,最大的 $y$ 坐标负值约为-365km。为了避免 $y$ 坐标出现负值,我国统一规定将每带的坐标原点向西移500km,也就是给每个点的 $y$ 坐标值加上500km,使之恒为正值,如图1-3(b)。

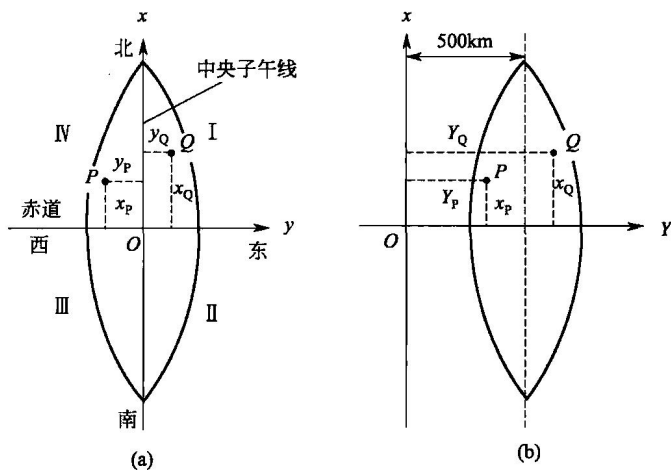


图 1-3 高斯平面坐标系

为了根据横坐标值能够确定某点位于哪一个投影带内,还要 $y$ 坐标值前冠以带号。将经过加500km和冠以带号处理后的横坐标用 $Y$ 表示。例如,图1-3(b)中的 $P$ 点位于第19带内,其横坐标为 $y_P = -265214\text{m}$ ,则有 $Y_P = 19234786\text{m}$ 。

高斯投影属于保角投影,它保证了球面图形的角度与投影后的平面图形的角度不变,但球面上任意两点间的距离经投影后会产生变形,其规律是:除了中央子午线和赤道没有距离变形以外,其他位置的直线均存在距离变形。

地面某直线的水平距离  $D$  投影到高斯平面上需要经过两次投影。第一次投影是从地面投影到参考椭球面上, 第二次投影是从参考椭球面上投影到高斯平面上。设投影到参考椭球面上的长度为  $S'_0$ , 则计算公式为:

$$S'_0 = D - \left[ \frac{H_m + h_g}{R_n} - \frac{(H_m - h_g)^2}{R_n^2} \right] D \quad (1-3)$$

式中,  $H_m$  为边长  $D$  的高程;  $h_g$  为边长所在地区大地水准面对于参考椭球面的高度;  $R_n$  为边长方向参考椭球面法截弧的曲率半径。由于  $H_m + h_g$  远小于  $R_n$ , 所以  $-\left[ \frac{H_m + h_g}{R_n} - \frac{(H_m - h_g)^2}{R_n^2} \right] D < 0$ , 故有  $S'_0 < D$ , 也即地面水平距离投影到参考椭球面上后, 距离变短了。

设将参考椭球面上的长度  $S'_0$ ,  $S'_0$  投影到高斯平面上的长度为  $S_0$ , 则计算公式为:

$$S_0 = S'_0 + \left( \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right) S'_0 \quad (1-4)$$

式中,  $y_m$  为直线两端点近似  $y$  坐标的平均值,  $\Delta y$  为直线两端点近似  $y$  坐标的增量,  $R_m$  为参考椭球在直线中点的平均曲率半径。显然  $\left( \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right) S'_0 > 0$ , 所以,  $S_0 > S'_0$ , 也即高斯平面上的距离大于其参考椭球面上的距离, 且离开中央子午线愈远 ( $y_m$  大), 变形愈大, 投影带边缘部分的距离变形量最大。

距离变形过大, 对于测绘大比例尺地形图和施工测量师极不方便的。减小投影带边缘位置距离变形的其中之一就是缩小投影带的带宽, 例如, 可以选择统一  $3^\circ$  带或以城市中心某点的子午线为中央子午线 (任意带) 进行投影, 其中统一  $3^\circ$  带中央子午线经度  $L'_0$  与投影带号  $n$  的关系为:

$$L'_0 = 3n \quad (1-5)$$

反之, 已知地面任一点的经度  $L$ , 要求计算该点所在的统一  $3^\circ$  带编号的公式为:

$$n = \text{Int} \left( \frac{L}{3} + 0.5 \right) \quad (1-6)$$

统一  $6^\circ$  带投影与统一  $3^\circ$  带投影的关系如图 1-4 所示。我国领土所处的概略经度范围是东经  $73^\circ 27'$  至东经  $135^\circ 09'$ , 根据式 (1-2) 和式 (1-6) 求得的统一  $6^\circ$  带投影与统一  $3^\circ$  带投影的带号范围分别为 13~23, 25~45。可见, 在我国领土范围内, 统一  $6^\circ$  带与统一  $3^\circ$  带的投影带号不重复。

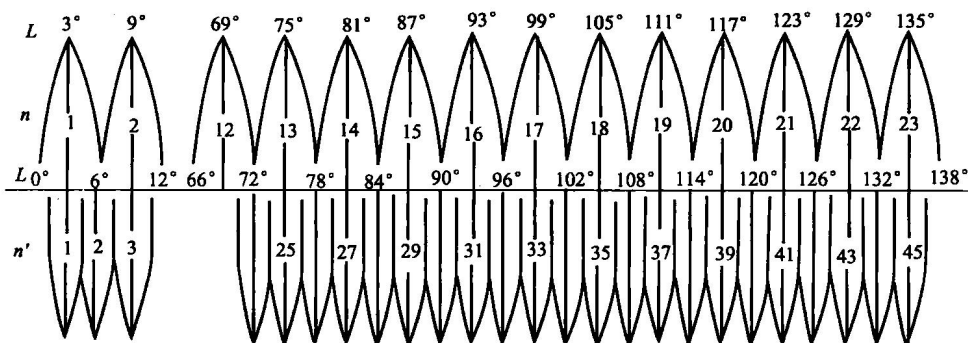


图 1-4 高斯平面坐标系统一  $6^\circ$  带投影与统一  $3^\circ$  带投影的关系

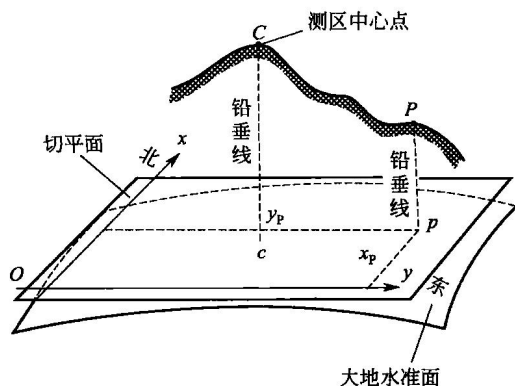


图 1-5 假定平面直角坐标系原理图

测量, 计算出的  $P$  点坐标  $x_P, y_P$  就是  $P$  点在假定平面直角坐标系中的坐标。

(3) 城市平面坐标系的选择 一个城市只应建立一个与国家坐标系相联系的、相对独立和统一的城市平面坐标系。城市平面坐标系的选择应以投影长度变形值不大于  $2.5\text{cm/km}$  为原则, 并根据城市地理位置和平均高程而定。由式(1-6)和式(1-7)可以求得地面水平距离  $D$  投影到高斯平面上的距离  $S_0$  的长度相对变形为:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{S_0 - D}{D} \\
 &= \frac{D \left[ 1 - \frac{H_m + h_g}{R_n} + \frac{(H_m + h_g)^2}{R_n^2} \right] \left[ 1 + \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right] - D}{D} \\
 &= \left[ 1 - \frac{H_m + h_g}{R_n} + \frac{(H_m + h_g)^2}{R_n^2} \right] \left[ 1 + \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right] - 1 \\
 &= \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} - \frac{H_m + h_g}{R_n} + \frac{(H_m + h_g)^2}{R_n^2} + \left[ -\frac{H_m + h_g}{R_n} + \frac{(H_m + h_g)^2}{R_n^2} \right] \left[ \frac{y_m^2}{2R_m^2} + \frac{\Delta y^2}{24R_m^2} \right] \quad (1-7)
 \end{aligned}$$

《城市测量规范》规定, 当长度变形值  $K$  不大于  $2.5\text{cm/km}$  时, 应采用高斯投影统一  $3^\circ$  带的平面直角坐标系。当长度变形值  $K$  大于  $2.5\text{cm/km}$  时, 可依次采用: 投影于抵偿高程面上的高斯投影统一  $3^\circ$  带的平面直角坐标; 高斯投影任意带的平面坐标系, 投影面可用黄海平均海水面或城市平均高程面; 假定平面直角坐标系。

所谓抵偿高程面, 就是当城市所处的统一  $3^\circ$  带的平面坐标系的高斯投影距离变形值于  $2.5\text{cm/km}$  时, 通过适当选择距离投影的高程面  $H_m$ , 使由式(1-7) 计算出的  $K$  值任意能满足小于  $2.5\text{cm/km}$  的要求。高层为  $H_m$  的高程面称为抵偿高程面。

## 二、确定点的高程系

地面点沿铅垂线到大地水准面的距离称为该点的绝对高程或海拔, 简称高程, 通常用  $H$  加点名作下标表示。图 1-6 中  $A, B$  两点的高程表示为  $H_A, H_B$ 。

高程系是一维坐标系, 它的基准是大地水准面。由于海水面受潮汐、风浪等影响, 它的高低时刻在变化。通常是在海边设立验潮站, 进行长期观测, 求得海水面的平均高度作为高程零点, 以通过该点的大地水准面为高程基准面, 也即大地水准面上的高程恒为零。

(1) 国家高程系统 我国境内所测定的高程点是一青岛验潮站历年观测的黄海平均海水面为基准面, 并于 1954 年在青岛市观象山建立了水准原点, 通过水准测量的方法将验潮站

(2) 假定平面直角坐标系 《城市测量规范》(CJJ 8—99) 规定, 面积小于  $25\text{km}^2$  的城镇, 可不经投影, 采用假定平面直角坐标系在平面上直接进行计算。如图 1-5 所示, 将测区中心点  $C$  沿铅垂线投影到大地水准面上得  $c$  点, 用过  $c$  点的切平面来代替大地水准面, 在切平面上建立的测区平面直角坐标系  $xOy$  称为“假定平面直角坐标系”。坐标系的原点选在测区西南角以使测区内点  $x, y$  的坐标均为正值, 以过测区中心的子午线为  $x$  轴方向。将测区内任一点  $P$  沿铅垂线投影到切平面上得  $p$  点, 通过

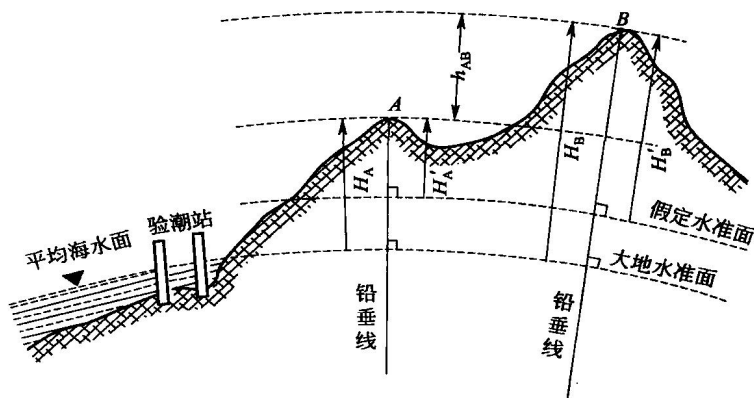


图 1-6 高程与高差的定义及其相互关系

确定的高程零点引测到水准原点，也即求出水准原点的高程。

新中国成立后，1956 年我国采用青岛验潮站 1950~1956 年共 7 年的潮汐记录资料推算出的大地水准面为基准引测出水准原点的高程为 72.289m，以这个大地水准面为高程基准建立的高程系称为“1956 年黄海高程系”，简称“56 黄海系”。

20 世纪 80 年代，我国又采用青岛验潮站 1953~1977 年共 25 年的潮汐记录资料推算出的大地水准面为基准引测出水准原点的高程为 79.260m，以这个大地水准面为高程基准建立的高程系称为“1985 年国家高程基准”，简称“85 高程基准”。

由上可知，在水准原点，“85 高程基准”使用的大地水准面比“56 黄海系”使用的大地水准面高出 0.029m。

在局部地区，当无法知道绝对高程时，也可以假定一个水准面作为高程起算面，地面点到假定水准面的垂直距离，称为假定高程或相对高程，通常用  $H'$  加点名作下标表示。图 1-6 中 A、B 两点的相对高程表示为  $H'_A$ 、 $H'_B$ 。

地面两点间的绝对高程或相对高程之差称为高差，用  $h$  加两点点名作下标表示。如 A、B 两点高差为：

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (1-8)$$

(2) 城市高程系统的选择 《城市测量规范》规定，一个城市只应采用一个统一的高程系统。城市高程系统应采用“1985 年国家高程基准”或沿用“1956 年黄海高程系统”，在在远离国家水准点的新设城市或在改造旧有水准网因高程变动而影响使用时，经上级行政主管部门批准后，可暂时建立或用地方高程系统，但应争取条件归算到“1985 年国家高程基准”上来。

### 三、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  $x$ 、 $y$ 、 $z$  符合右手规则确定，如图 1-7 所示。

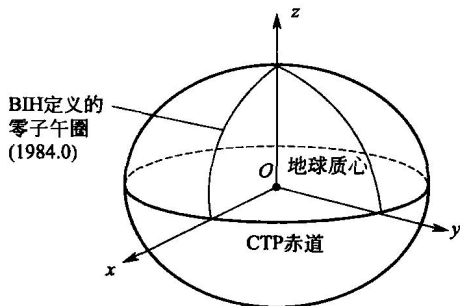


图 1-7 WGS-84 世界大地坐标系

WGS-84 地心坐标系可以与 1954 北京坐标系或 1980 西安坐标系等参心坐标系相互转换，其方法之一是：在测区内，利用至少 3 个以上公共点的两套坐标列出坐标转换方程，采用最小二乘原理解算出 7 个转换参数就可以得到转换方程。其中，7 个转换参数是指 3 个平移参数、3 个旋转参数和 1 个尺度参数。

### 第三节 测量工作的程序与基本内容

#### 一、测量的主要任务是测定和测设

##### 1. 测定

测定是将地物和地貌按一定的比例尺缩小绘制成地形图。如图 1-8，测区内有山丘、房屋、河流、小桥、公路等。测绘地形图的过程是先测量出这些地物、地貌特征点的坐标，然后按一定的比例尺、规定的符号缩小展绘在图纸上。例如，要在图纸上绘出一幢房屋，就需要在这幢房屋附近、与房屋通视且坐标已知的点（如图中的 A 点）上安置测量仪器，选择另一个坐标已知的点（如图中的 F 点或 B 点）作为定向方向（也称后视方向），才能测量出这幢房屋角点的坐标。坐标、地貌的特征点又称碎部点，测量碎部点坐标的方法与过程称为碎部测量。

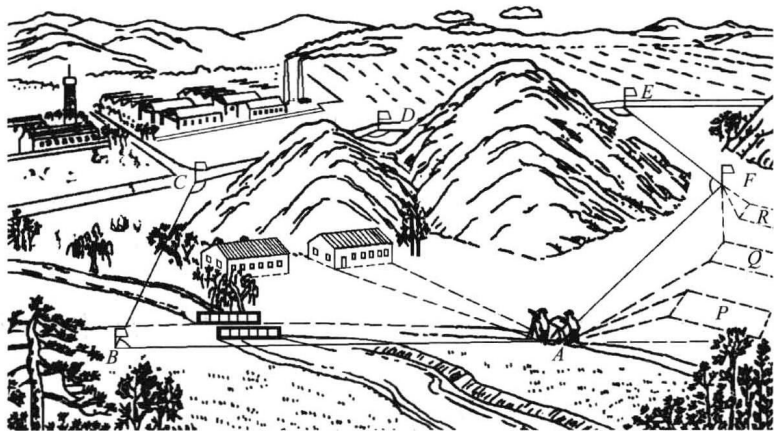


图 1-8 某测区地物、地貌透视图

由图 1-8 可知，在 A 点安置测量仪器还可以测绘西面的河流、小桥，北面的山丘，但在北面的工厂区就看不见了。因此还需要在山北面布置一些点，如图中的 C, D, E 点，这些点的坐标应已知。由此可知，要测绘地形图，首先要在测区内均匀布置一些点，并测量计算出它们的  $x$ ,  $y$ ,  $H$  三维坐标。测量上将这些点称为控制点，测量与计算控制点坐标的方法与过程称为控制测量。

##### 2. 测设

测设是将图纸上设计好的建筑物和构筑物的位置在实地标定出来，设图 1-9 是图 1-8 已经测绘出来的地形图。根据需要，设计人员已经在图纸上设计出了 P, Q, R 三幢建筑物，用极坐标法将它们的位置标定到实地的方法是：在控制点 A 上安置仪器，F 点（或 B 点）定向，由 A, F 点（或 B 点）及 P, Q, R 三幢建筑物轴线点的设计坐标计算出水平夹角  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ……和水平距离  $S_1$ ,  $S_2$ ……，然后用仪器分别定出水平夹角  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ……所指的方

