



# 工程测量

GONGCHENG  
CELIANG

李刚 主编

刘福臻 杜子涛 副主编

杨志强 主审



化学工业出版社



# 工程测量

GONGCHENG CELIANG

ISBN 978-7-122-10165-5



9 787122 101655 >



[www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)  
读科技图书 上化工社网



销售分类建议: 土木工程

定价: 35.00元



# 工程测量

GONGCHENG  
CELIANG

李刚 主编

刘福臻 杜子涛 副主编

杨志强 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

工程测量是测绘学中最活跃的一个分支学科,是高校土建类本科专业学生必须掌握的一门专业基础课,而且还是从事规划设计、施工以及工程管理等工作的工程技术人员必备的专业知识。本书在编写中充分考虑了工程测量的学科特性,以测绘技术与应用为中心,力求理论与实践相结合,由浅入深,循序渐进;既立足于土木工程建设实际的需要,又体现本学科体系的完整性和现代测绘科技的发展状况。本书既可以作为高校土建类本科专业的通用教材,又可以作为工程技术人员继续教育用书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

工程测量/李刚主编. —北京:化学工业出版社,  
2011.1

ISBN 978-7-122-10165-5

I. 工… II. 李… III. 工程测量 IV. TB22

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第249698号

---

责任编辑:董琳

文字编辑:刘砚哲

责任校对:吴静

装帧设计:韩飞

---

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)

印刷:北京白帆印务有限公司

装订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张18 字数491千字 2011年3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: 35.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

工程测量是测绘学中最活跃的一个分支学科,直接服务于国民经济建设和国防建设,是一门密切联系生产实际的应用学科。它不仅作为高校土建类本科专业学生必须掌握的一门专业基础课,而且还是从事规划设计、施工以及工程管理等工作的工程技术人员必备的专业知识。本书在编写中充分考虑了工程测量的学科特性,既可以作为高校土建类本科专业的通用教材,又可以作为工程技术人员继续教育用书。

本书在编写过程中,以测绘技术与应用为中心,力求理论与实践相结合,由浅入深,循序渐进;既立足于土木工程建设实际的需要,又体现本学科体系的完整性和现代测绘科技的发展状况。全书共分13章。第1~4章介绍了测量学的基本知识、基本理论以及常规测量仪器的构造、使用 and 检校方法,并介绍了光电仪器如电子水准仪、电子经纬仪、全站仪的测量原理及使用方法;第5章详细地介绍了误差的基本理论及精度的评定方法,以及间接平差方法,并且详细地介绍了Excel在数据处理中的应用;第6章讲述了控制测量的基本方法,以及GPS测量原理和应用,并且介绍了条件平差在导线测量中的应用;第7章讲述了地形图的基本应用以及数字地形图的一些应用;第8章不仅讲述了地形图的传统测绘方法,也介绍了地面数字化测图、地形图数字化和摄影测量与遥感成图方法,而且介绍了常用的成图软件CASS的使用方法;第9、10章为测设的基本工作以及建筑工程施工测量;第11、12章讲述了线路工程测量以及桥梁隧道工程测量的内容,并且介绍了GAT磁悬浮陀螺全站仪的基本原理;第13章讲述了工程建筑变形测量的基本内容以及变形测量新技术的应用。

本书由天津城市建设学院李刚主编,西南石油大学刘福臻,河北工业大学杜子涛担任副主编,长安大学杨建华、姜刚,新疆大学何浩,天津城市建设学院王雪松、田金苓、国巧真、窦理波,福建信息职业技术学院刘梅姜等教师参加了教材编写工作。具体分工为:第1、5、9章由李刚编写;第2、3章由王雪松编写;第4章由田金苓编写;第6章由李刚、杨建华编写;第7章由杜子涛、刘梅姜编写;第8章由刘福臻、杜子涛、国巧真编写;第10章由何浩编写;第11章由窦理波编写;第12、13章由姜刚编写。最后全书由李刚、刘福臻进行统稿和校对。另外中铁二十局徐喜平高级工程师提供了部分资料并参加了部分章节的校对工作,南方测绘公司提供了部分资料,在此一并表示感谢。

长安大学博士生导师杨志强教授、天津农学院张培冀教授、甘肃一建集团胡继河总经理、中铁二十局徐喜平高级工程师、中国冶金地质总局保定物勘院王乾高级工程师等专家对书稿进行了细致、认真的审阅,并提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。

在编写过程中,参阅了有关文献及近年新出版的书刊等,在此向文献的作者表示感谢。限于编者水平,书中难免存在缺漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2010年11月

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....          | 1   |
| 1.1 测绘学科与工程测量的任务 .....         | 1   |
| 1.2 坐标系统与高程系统 .....            | 4   |
| 1.3 用水平面代替大地水准面的限度 .....       | 11  |
| 1.4 测量的基本工作与原则 .....           | 13  |
| <b>第 2 章 角度测量</b> .....        | 17  |
| 2.1 角度测量的概念 .....              | 17  |
| 2.2 光学经纬仪 .....                | 18  |
| 2.3 光学经纬仪的基本操作 .....           | 24  |
| 2.4 水平角测量方法 .....              | 26  |
| 2.5 竖直角测量的方法 .....             | 28  |
| 2.6 经纬仪的检验与校正 .....            | 32  |
| 2.7 角度测量的误差分析 .....            | 34  |
| 2.8 电子经纬仪 .....                | 36  |
| <b>第 3 章 距离测量与全站仪</b> .....    | 40  |
| 3.1 钢尺量距 .....                 | 40  |
| 3.2 视距测量 .....                 | 44  |
| 3.3 电磁波测距 .....                | 46  |
| 3.4 全站仪 .....                  | 51  |
| <b>第 4 章 水准测量</b> .....        | 60  |
| 4.1 水准测量原理 .....               | 60  |
| 4.2 水准仪及其使用 .....              | 61  |
| 4.3 水准测量外业 .....               | 65  |
| 4.4 水准测量的校核方法和成果整理 .....       | 68  |
| 4.5 微倾式水准仪的检验与校正 .....         | 70  |
| 4.6 水准测量的误差分析 .....            | 73  |
| 4.7 精密水准仪和电子水准仪 .....          | 76  |
| <b>第 5 章 误差理论与测量数据处理</b> ..... | 79  |
| 5.1 测量误差 .....                 | 79  |
| 5.2 衡量精度的指标 .....              | 83  |
| 5.3 误差传播定律及其应用 .....           | 86  |
| 5.4 直接平差及精度评定 .....            | 90  |
| 5.5 测量数据处理 .....               | 97  |
| <b>第 6 章 控制测量</b> .....        | 103 |
| 6.1 控制测量概述 .....               | 103 |

|               |                           |            |
|---------------|---------------------------|------------|
| 6.2           | 导线测量 .....                | 107        |
| 6.3           | 交会定点测量 .....              | 122        |
| 6.4           | 高程控制测量 .....              | 126        |
| 6.5           | GPS 控制测量 .....            | 131        |
| <b>第 7 章</b>  | <b>地形图的基本知识及其应用 .....</b> | <b>140</b> |
| 7.1           | 地形图的基本概念 .....            | 140        |
| 7.2           | 地形图的分幅与编号 .....           | 142        |
| 7.3           | 地物与地貌的表示方法 .....          | 147        |
| 7.4           | 地形图的判读 .....              | 153        |
| 7.5           | 地形图的应用 .....              | 156        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>地形图的测绘 .....</b>       | <b>163</b> |
| 8.1           | 概述 .....                  | 163        |
| 8.2           | 大比例尺地形图测绘的传统方法 .....      | 164        |
| 8.3           | 地面数字测图 .....              | 173        |
| 8.4           | 地形图的数字化 .....             | 180        |
| 8.5           | 摄影测量与遥感制图方法介绍 .....       | 183        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>测设的基本工作 .....</b>      | <b>190</b> |
| 9.1           | 水平距离、水平角和高程的测设 .....      | 190        |
| 9.2           | 点的平面位置的测设方法 .....         | 194        |
| 9.3           | 设计坡度线的测设方法 .....          | 198        |
| <b>第 10 章</b> | <b>建筑工程施工测量 .....</b>     | <b>200</b> |
| 10.1          | 施工测量概述 .....              | 200        |
| 10.2          | 施工控制测量 .....              | 201        |
| 10.3          | 民用建筑施工测量 .....            | 204        |
| 10.4          | 工业建筑施工测量 .....            | 211        |
| 10.5          | 高层建筑施工测量 .....            | 218        |
| 10.6          | 竣工总平面图的编绘 .....           | 221        |
| <b>第 11 章</b> | <b>线路工程测量 .....</b>       | <b>223</b> |
| 11.1          | 线路工程测量概述 .....            | 223        |
| 11.2          | 线路中线测量 .....              | 225        |
| 11.3          | 曲线的测设 .....               | 229        |
| 11.4          | 线路纵横断面测量 .....            | 238        |
| 11.5          | 线路工程施工测量 .....            | 244        |
| <b>第 12 章</b> | <b>桥隧施工测量 .....</b>       | <b>252</b> |
| 12.1          | 桥隧施工测量概述 .....            | 252        |
| 12.2          | 桥梁施工控制测量 .....            | 254        |
| 12.3          | 桥墩、台的施工放样测量 .....         | 256        |
| 12.4          | 隧道施工控制测量 .....            | 258        |

|               |                   |            |
|---------------|-------------------|------------|
| 12.5          | 竖井联系测量.....       | 261        |
| 12.6          | 陀螺定向测量.....       | 263        |
| 12.7          | 隧道施工与竣工测量.....    | 265        |
| <b>第 13 章</b> | <b>变形测量</b> ..... | <b>267</b> |
| 13.1          | 变形测量概述.....       | 267        |
| 13.2          | 建筑物沉降观测.....      | 269        |
| 13.3          | 建筑物的位移观测.....     | 272        |
| 13.4          | 建筑物的裂缝与挠度观测.....  | 274        |
| 13.5          | 变形测量的新技术.....     | 276        |
| <b>参考文献</b>   | .....             | <b>279</b> |

## 1.1 测绘学科与工程测量的任务

### 1.1.1 测绘学科

测绘学, 又称测量学, 是地球科学的一个分支, 是研究地球的形状、大小以及其表面(包括地下及地上空间)的各种自然地理要素或者人工设施的形状、大小、空间位置及其属性等, 并对这些地理空间信息进行采集、处理、分析和应用的一门科学。

测绘学科的研究内容和基本任务包括以下几个方面: 第一, 要研究和确定地球的形状、大小以及地球重力场, 并以此为基础建立全国统一的、协调一致的、三维、高精度、动态和实用的大地测量参考框架, 用以表示地表任一点在地球坐标系统中的位置; 第二, 使用各种测量仪器和工具, 通过测量和计算确定地表各种自然形态以及人类活动所产生的各种人工形态的位置, 然后按照一定的比例、规定的符号缩小绘制成各种全国性的和区域性的地形图(包括纸质地形图、数字地形图和建立“数字地球”所需的各种基础地理信息); 第三, 为各种经济建设和国防建设的规划、设计、施工以及建成后的运营管理提供测绘服务。

测绘学是研究与地球有关的基础空间信息, 并对其进行采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。测绘学下分大地测量学、摄影测量与遥感学、地图制图与地理信息工程学、工程测量学和海洋测绘学等五个主要分支学科。

(1) 大地测量学 作为基础性学科, 它主要研究地球表面及其外层空间点位的精密测定、地球的形状和大小、地球重力场及其随时间变化的理论和方法。现代大地测量学与地球科学和空间科学的多学科交叉, 已成为推动地球科学、空间科学和军事科学发展的前沿学科之一, 其研究范围已从地球本体扩展到整个地球外空间。

(2) 摄影测量与遥感学 它由摄影测量、遥感和空间信息系统以及计算机视觉等交叉组成。主要研究利用各种不同类型的非接触传感器, 获取模拟的或数字的影像, 然后通过解析和数字化方式提取所需要的信息, 在空间信息系统中数字化地加以存储、管理、分析和表达, 再通过可视化和符号化技术形成所需要的产品供地学和非地学领域应用。

(3) 地图制图与地理信息工程学 地图制图学与地理信息工程是研究利用地图图形, 科学地、抽象概括地反映自然界和人类社会各种现象的空间分布、相互关系及其动态变化, 并对空间信息进行获取、智能抽象、存储、管理、分析、处理、可视化及其应用的科学。当今, 随着计算机地图制图和地图数据库技术的快速发展, 作为人们认知地理环境和利用地理条件的工具, 地图制图学已经进入数字(电子)制图和动态制图的阶段, 并且成为地理信息系统的支撑技术。地图制图学已发展成为研究空间地理环境信息和建立相应的空间信息系统的科学。

(4) 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在进行控制测量、地形测绘、施工放样和变形监测的理论和技术的科学。它是测绘学在国民经济和国防建设中的直接应用。按工程建设的对象分为建筑工程测量、水利工程测量、铁路工程测量、公路工程测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、矿山测量、城市市政工程测量、工厂建设测量以及军事工程测量、海洋工程测量等等。工程测量按其工作顺序和性质分为: 勘测设计阶段

的工程控制测量和地形测量；施工阶段的施工测量和设备安装测量；竣工和管理阶段的竣工测量、变形观测及维修养护测量等。根据工程性质的不同，各阶段的工程测量重点和要求有所不同。

(5) 海洋测绘学 海洋测绘是对整个海洋空间，包括海面水体和海底进行全方位、多要素的综合测量，以获取包括大气和水文以及海底地貌、地质、重力、磁力、海底扩张等各种信息和数据，并绘制成各种用途的专题图件。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。

### 1.1.2 测绘发展简史

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后，需要重新划定土地界线，开始有测量工作。公元前 21 世纪，中国夏禹治水就使用简单测量工具测量距离和高低。公元前 3 世纪，古希腊学者埃拉托斯特尼（Eratosthenes）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，也是测量地球大小的弧度测量方法的初始形式。公元前 168 年，西汉绘制在帛上的地图（1973 年湖南省长沙马王堆汉墓出土），已注意到比例尺和方位。公元 117 年，东汉张衡造了一件成就空前的铜铸浑天仪。150 年古希腊的 C. 托勒密（Claudius Ptolemy）所著《地理学指南》一书，论述了地球的形状、大小、经纬度的测定以及地图的投影方法，他制造了供测量经纬度用的类似中国浑天仪的仪器和角距仪。265 年，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，奠定了中国古代制图的理论基础。724 年中国唐代的南宫说等人在张遂（一行）的指导下，在今河南滑县至上蔡实测了约 300km 的子午弧长，并在滑县、开封、扶沟、上蔡测量同一时刻的日影长度，推算纬度  $1^\circ$  的子午弧长，这是世界上第一次子午线弧长实测。1617 年荷兰的科学家 W. 斯涅耳（Willebrord Snellius）首创三角测量法进行弧度测量，克服了在地面上直接量测弧长的困难。1687 年英国 I. 牛顿（Isaac Newton）根据力学理论，提出地球是两极略扁的椭球体。1690 年荷兰 C. 惠更斯（Christiaan Huygens）也提出地球是两极略扁的扁球体。后为法国在南美洲和北欧进行的弧度测量所证明，结束了历时半个世纪的有关地球形状的争论。1743 年法国 A. C. 克莱罗（Alexis Claude Clairaut）发表《地球形状理论》，奠定了用物理方法研究地球形状的理论基础。1849 年英国的 G. G. 斯托克斯（George Gabriel Stokes）提出利用地面重力的测量结果研究大地水准面形状的理论。1945 年前苏联 M. S. 莫洛金斯基（Mikhail Sergeevich Molodensky）创立了研究地球自然表面形状的理论，并提出“似大地水准面”的概念。中国清康熙四十七年至五十七年（1708～1718）完成的《皇舆全图》，是中国历史上首次以实地测量结果绘制的地形图。

测绘学是技术性学科，它的形成和发展不仅依赖测量理论的发展，还在很大程度上依赖测绘仪器的创造和改革。测绘仪器的发展，推动着测绘事业的前进，同时，测量理论的发展，又给测绘仪器指明了前行的道路。17 世纪以前，人们使用简单的工具，如绳尺、木杆尺等进行测量，以量测距离为主。17 世纪初发明了望远镜。1617 年创立的三角测量法，开始了角度测量。1730 年英国的机械师 J. 西森（Jonathon Sisson）制成第一架经纬仪，促进了三角测量的发展。1794 年德国科学家 C. F. 高斯（Carl Friedrich Gauss）发明了“最小二乘法”，为测量的数据处理奠定了理论基础。1806 年法国的 A. M. 勒让德（Adrien-Marie Legendre）也提出了同样的观测数据处理方法。1859 年法国的 A. 洛斯塔（Aime Laussedat）首创摄影测量方法编制地形图。20 世纪初，由于航空技术发展，出现了自动连续航空摄影机，可以将航摄像片在立体测图仪上加工成地形图，促进了航空摄影测量技术的发展。

20 世纪 40 年代起，测绘技术朝着电子化和自动化发展。世界上第一台测距仪于 1947

年由瑞典 AGA 公司制成, 电磁波测距仪的出现, 是测距方法的革命, 从而开创了距离测量的新纪元。测距仪的不断改进创新使导线测量得到重视和应用。电子计算机的发明与不断发展, 推进了测量仪器的发展, 加快了测量计算的速度。最早电子速测仪(习惯称“全站仪”)是 1970 年 Zeiss 的 Reg Elta 14, 它配备了一个电子读数器, 不仅可以读取距离而且可以读取竖直和水平度盘; 1971 年 AGA (后为 Trimble 收购) 推出 Geodimeter 700 全站仪。全站型电子速测仪是一种集测角、测距、坐标测量、计算记录于一体的新型测量仪器。此后各种性能的全站仪层出不穷。1997 年, 推出了 Tpocon AP-L1 自动跟踪全站仪; 2000 年 Leica 推出了 TCRA “自动目标瞄准”全站仪等。

1950 年世界第一台自动安平水准仪, 标志着水准测量自动化的开端。1990 年, 瑞士的 Wild 生产了数字水准测量仪器, 1992 年, 推出了最早的精密数字水准仪 (Wild NA3000), 1994 年, Topcon 和 Zeiss 公司推出自己的数字水准仪, 1998 年 Sokkia 公司也推出了数字水准仪。数字水准仪通过电子数据记录的方式而不需要通过望远镜读取水准尺, 实现了水准标尺的精密照准, 标尺分划读数和视距的读取、数据储存和处理等数据采集的自动化, 从而减轻了水准测量的劳动强度, 提高了测量成果质量。

在光电测量仪器蓬勃发展的今天, 除了大量出现的种类繁多的测距仪、全站仪等以外, 还出现了诸如激光经纬仪、激光准直仪、激光水准仪等光电测量仪器。

1957 年第一颗人造地球卫星发射成功后, 给测量学的发展和测绘仪器的发展带来了意义深远的大变革。在测绘学中开辟了卫星大地测量和航天摄影测量等新领域, 随后发展起来的甚长干涉测量技术、惯性测量技术, 使测绘学增添了新的测量手段。随着电子计算机、微电子技术、激光技术、空间技术等新技术的发展与应用, 特别是 GPS (Global Positioning System)、RS (Remote Sensing)、GIS (Geographical Information System) 为代表的测绘科学与技术的不断发展完善, 使测绘学科从理论到手段发生了根本性的变化, 并正步入信息采集、数据处理和成果应用的自动化、实时化、智能化、网络化、社会化、多样化和可视化的新阶段。

### 1.1.3 工程测量的任务

当今世界, 以信息技术为主要标志的科技进步日新月异, 世界各国都在争先抢占科技、产业和经济的制高点。测绘资料与成果作为重要的基础信息, 在国民经济建设、国防建设和科学研究发挥着重要作用。国民经济建设的发展总体规划, 城市建设与改造, 工矿企业建设, 公路、铁路修建, 各种水利工程和输电线路的兴建, 农业规划和管理, 森林资源的保护和利用, 自然资源的勘察和开采等都离不开测量工作; 在国防建设中, 测绘技术不但对国防工程建设、作战战役部署和现代化诸兵种协同作战起着重要的保证作用, 而且对于现代化的武器装备, 如远程导弹、空间武器及人造卫星和航天器的发射也起着重要作用; 测绘技术对于空间技术研究、地壳形变、地震预报、地球动力学研究等科学研究方面也是不可缺少的工具。

工程测量作为测绘学科的一个分支, 历来是测绘学科中最活跃和最有活力的, 直接为国民经济建设、国防建设和科学研究提供测绘保障与服务, 其广泛应用于城市规划、土地规划与管理、工业与民用建筑工程、城市建设工程、公路铁路工程、桥梁工程、隧道与地下工程、水利水电工程、管线工程、矿山建设等工程建设。

在工程建设过程中, 工程项目一般分为规划与勘测设计、施工建设、营运管理三个阶段, 测量工作贯穿于工程项目建设的全过程, 是工程规划建设的重要依据; 是工程勘察设计现代化的重要技术; 是工程顺利施工的重要保证; 是房地产管理、工程综合质量检验、重要工程设施安全监测的重要手段。根据不同的施测对象和阶段, 工程测量学具有以下任务。

(1) 地形图的测绘 地形图的测绘也称作测定, 是指应用各种测量仪器和工具, 通过测

量和计算确定地球表面局部区域各种自然形态以及人类活动所产生的各种人工形态的位置, 然后按照一定的比例、规定的符号缩小绘制成区域性的地形图(包括纸质地形图、数字地形图和建立“数字地球”所需的各种基 地理信息)。

既能表示地物(如房屋、道路、桥梁、河流、湖泊)平面位置, 又能表现地貌(如平原、洼地、丘陵、山地)变化的图称为地形图; 仅能表示地物平面位置的图称为地物图。为了满足与工程建设有关的土地规划与管理、用地界定等的需要, 需要测绘各种平面图(如地籍图、宗地图); 对于建筑工程, 需测绘各种比例尺的现状地形图, 供建(构)筑物平面及竖向设计使用; 对于道路、管线和特殊建(构)筑物的设计, 还需测绘带状地形图和沿某方向表示地面起伏变化的断面图; 工程竣工后, 为了便于工程验收和运营管理、维修, 还需测绘竣工图等等。

(2) 地形图的应用 地形图的应用就是利用成图的基本原理, 如构图方法、坐标系统、表达方式等, 在图上进行量测, 以获得所需要的资料(如地面点的三维坐标、两点间的距离、地块面积、地面坡度、断面形状), 或将图上量测的数据反算成实地相应的测量数据, 以解决设计和施工中的实际问题。例如, 充分利用地形选择建筑物的布局、形式、位置和尺寸; 在地形图上进行方案比较、土方量估算、施工场地布置与平整等。

(3) 施工放样 施工放样也称测设, 是根据设计图提供的数据, 按照设计精度要求, 通过测量手段将建(构)筑物的特征点、线、面等标定到实地工作面上, 为施工提供正确位置, 用以指导施工。施工放样贯穿于施工阶段的全过程。同时, 在施工过程中, 还需利用测量的手段监测建(构)筑物的三维坐标、构件与设备的安装定位等, 以保证工程施工质量与安全。

(4) 变形测量 在大型建筑物的施工过程中和竣工之后, 为了确保建筑物在各种荷载或外力作用下, 施工和运营的安全性和稳定性, 或验证其设计理论和检查施工质量, 需要对其进行位移和变形监测, 这种监测称为变形测量。它是在建筑物上设置若干观测点, 按测量观测程序和相应周期, 测定观测点在荷载或外力作用下, 随时间延续三维坐标的变化值, 以分析判断建筑物的安全性和稳定性。变形观测包括位移观测、倾斜观测、裂缝观测等。

综上所述, 测量工作贯穿于工程建设的全过程。参与工程建设的技术人员必须具备工程测量的基本技能。因此, 工程测量学是工程建设技术人员的一门必修技术基础课。土建类专业的学生, 通过学习本课程, 掌握工程测量学的基本知识和基本理论; 能正确使用工程常用的水准仪、经纬仪等仪器和工具; 了解大比例尺地形图的成图原理和方法; 在工程设计和施工中, 具有正确应用地形图和有关测量资料的能力和进行一般工程施工测设的能力。

## 1.2 坐标系统与高程系统

### 1.2.1 地球的形状和大小

(1) 地球自然表面 测量工作是在地球表面进行的, 而地球是一个两极稍扁、赤道略鼓的不规则球体, 并且地球自然表面是一个起伏不平、十分不规则的表面, 有高山、丘陵、盆地和平原, 又有江河湖海等各种形态。其中陆地上最高点珠穆朗玛峰高达 8844.43m, 与海洋中最深处马里亚纳海沟(11022m)相差近 20km。但是这样的高低起伏, 相对于地球庞大的体积来说还是很小的。就整个地球表面而言, 海洋的面积约占 71%, 陆地面积约占 29%, 因此, 人们把地球总的形状看作是海水所包围的球体。

(2) 大地水准面 当液体处于静止状态时, 其表面必处处与重力方向(铅垂线方向)正交, 否则液体就要流动。液体静止时的表面称为水准面。与水准面相切的平面称为水平面。

水准面是物理表面,因为同一水准面上的重力位相等,水准面上任一点的铅垂线都与这个面正交,因此水准面也是重力等位面。由于地球空间处处都有重力存在,所以通过不同高度的点就有不同的水准面。在无穷多个水准面中,与平均海面重合并伸展到大陆内部形成的闭合的曲面称为大地水准面,如图 1-2-1(a) 所示。大地水准面所包围的形体叫做大地体。大地水准面很接近于地球自然表面,同时又具有长期稳定性,因此,在实际测量中,通常采用大地体来代表地球,大地水准面作为基准面,即作为研究地球自然表面形状的参考面。并以处处与大地水准面正交的铅垂线作为测量工作的基准线,如图 1-2-2 所示。

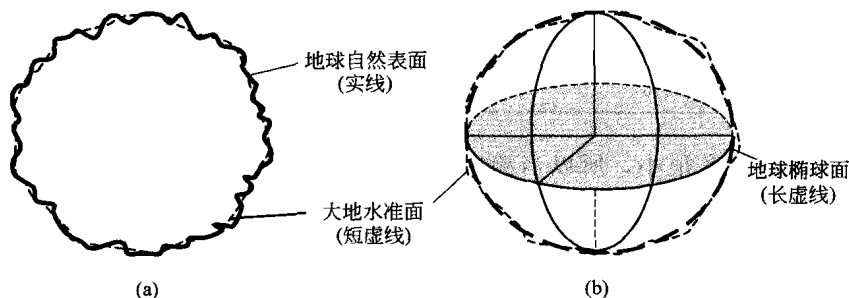


图 1-2-1 地球表面、大地水准面与地球椭球体

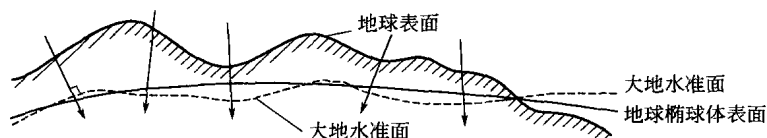


图 1-2-2 地球表面、大地水准面和地球椭球体之间的关系

大地水准面也是一个不规则的曲面。是因为地球体内部质量分布的不均匀,使得地面各点所受的吸引力大小和方向各不相同,从而引起地面各点铅垂线方向发生不规则变化。于是,处处与铅垂线正交的大地水准面,也就随之成为略有起伏的不规则曲面,如图 1-2-1、1-2-2 所示。所以,大地水准面是个物理曲面而不是数学曲面。

(3) 参考椭球面 大地水准面不是数学曲面,不能用数学公式表达。这样的曲面难以在上面进行测量数据的处理。大地水准面形状虽然十分复杂,但从整体来看,起伏是微小的。它非常接近绕短轴旋转的椭球面,如图 1-2-1(b)。因此,在测量计算和制图中,通常采用一个与大地水准面非常接近的、能够用数学方程表示的椭球面作为基准面,并用这个椭球代替大地体。这个椭球是由长半轴为  $a$ 、短半轴为  $b$  的椭圆绕其短轴旋转而成的旋转椭球,称为地球椭球,也称参考椭球。由地表任一点向参考椭球面所作的垂线称为法线,作为测量计算和制图的基准线。

地球椭球表面,如图 1-2-1(b),是一个规则的数学表面。其数学方程为

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \quad (1-2-1)$$

式中  $a$  为地球椭球体的长半轴,  $b$  为短半轴。

根据  $a$  和  $b$  定义的地球椭球体的扁率  $\alpha$ , 表示椭球的扁平程度。扁率的计算公式为:

$$\alpha = (a - b) / a \quad (1-2-2)$$

地球椭球体的参数值(表 1-2-1)有很多种,主要是由于推求它的年代、使用的方法以及测定的地区不同,导致其结果不一致。中国在 1952 年以前采用海福特(Hayford)椭球,从 1953~1980 年采用克拉索夫斯基(Krasovsky)椭球。1980~2008 年采用 GRS(1975)地球椭球。自 2008 年 7 月 1 日开始采用 CGCS2000 椭球[GRS(1980)地球椭球]。

表 1-2-1 地球椭球体参数

| 椭球体名称     | 长半轴/m       | 短半轴/m        | 扁率(1:x)       | 年份和国家     |
|-----------|-------------|--------------|---------------|-----------|
| Bessel    | 6377397.155 | 6356078.9628 | 299.15281     | 1841,德国   |
| Clarke    | 6378249.145 | 6356514.8696 | 293.465       | 1880,英国   |
| Hayford   | 6378388     | 6356911.9461 | 297           | 1909,美国   |
| Krasovsky | 6378245     | 6356863.019  | 298.3         | 1940,前苏联  |
| GRS(75)   | 6378140     | 6356755.288  | 298.257       | 1975,IUGG |
| GRS(80)   | 6378137     | 6356752.3141 | 298.257222101 | 1980,IUGG |
| WGS84     | 6378137     | 6356752.3142 | 298.257223563 | 1984,美国   |

由于地球椭球的扁率很小,所以当测区范围不大时,可以近似地把地球当作圆球体看待,这个球体的半径为

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) \approx 6371 \text{ km}$$

### 1.2.2 确定地面点位的坐标系

地球表面高低起伏,并分布着许多物体,将地球表面高低起伏的形态称为地貌,将地球表面上人工建造或自然形成的固定物体称为地物。它们的外形和轮廓是由一系列连续的点所组成。确定点的位置实质就是确定其在某个空间坐标系中的三维坐标。测量中,将空间坐标系分为地心坐标系(如 WGS84 和 CGCS2000)和参心坐标系(如 1954 北京坐标系,1980 西安坐标系)。地心是指地球的质心,参心是指参考椭球的中心,由于参考椭球的中心与地球的质心一般不重合,所以它属于非地心坐标。工程测量上通常使用参心坐标。

为了确定和表示这些点的位置,需要设定一个基准面作为点位的投影面。投影的基准线可以是铅垂线,或是法线。基准面是大地水准面、水平面或地球椭球面。地面点沿基准线投影到基准面之后,其位置用球面或平面坐标(二维)和高程(一维)表示。它们分别属于大地坐标系、平面直角坐标系和高程系统;在卫星定位测量中,还要用到空间直角坐标系。

(1) 大地坐标系 大地坐标系是地理坐标系的一种,是以法线为投影基准线,以地球椭球面为基准面建立的球面坐标。常用大地经度  $L$ 、大地纬度  $B$ 、大地高  $H$  表示地面点的空间位置。

如图 1-2-3 所示地球椭球,  $N$ 、 $S$  分别为地球的南极和北极,  $NS$  为短轴。通过地球旋转轴  $NS$  的平面均称为子午面。各子午面与地球表面的交线叫做经线或子午线。过球心且与地球旋转轴正交的平面即为赤道面,此平面与地球表面的交线即为赤道,赤道面作为纬度的起算面。

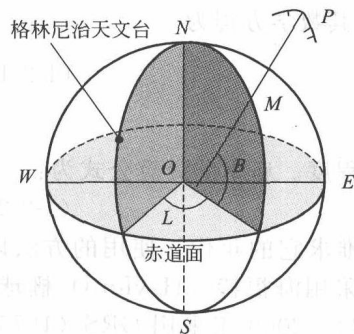


图 1-2-3 大地坐标系

如图 1-2-3 中,  $P$  点的经度,是指过  $P$  点的子午面与首子午面(也称起始子午面,是指通过英国 Greenwich 天文台的子午面)所夹的二面角的平面角的大小,以  $L$  表示。自首子午线向东  $0^\circ \sim 180^\circ$  为东经,向西  $0^\circ \sim 180^\circ$  为西经。 $P$  点的纬度,是指该点的法线与赤道面之间的夹角,以  $B$  表示。自赤道向北  $0^\circ \sim 90^\circ$  为北纬。向南  $0^\circ \sim 90^\circ$  为南纬。大地经纬度是地面点在地球椭球面上的二维坐标,另外用“大地高  $H$ ”表示第三维。大地高是沿地面点的椭球面法线量至椭球面的距离。从椭球面起算,向外为正,向内为负。

地面点的经纬度如果用天文测量的方法得到,分别称为“天文经度( $\lambda$ )”和天文纬度( $\varphi$ )。这种地理坐标是以铅垂线为投影基准线,以大地水准面为基准面建立的球面坐标。而过某点的铅垂线与法线并不是总是重合的,它们之间存在垂线偏差,因此某点的大地经纬度与天文经纬度不是相等的。

(2) 空间直角坐标系 空间直角坐标系也称作空间大地直角坐标系,它与大地坐标系相对应。这种坐标系的原点设在地球椭球的中心(可以是参考椭球的中心,亦可是地球的质心),用相互垂直的 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个轴来表示,如图 1-2-4, $X$ 轴与首子午面与赤道面的交线重合,向东为正。 $Z$ 轴与地球旋转轴重合,向北为正。 $Y$ 轴与 $XZ$ 平面垂直构成右手系。地面上 $M$ 点的空间直角坐标表示为 $(X_M, Y_M, Z_M)$ 。它可与大地坐标系相互转换。

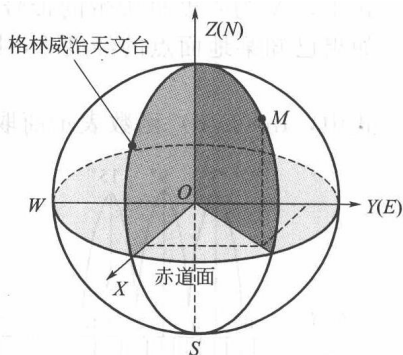


图 1-2-4 空间直角坐标系

(3) 高斯平面直角坐标系 大地坐标系或空间直角坐标系对于地形测图和工程测量中确定地面点位来说,是不直观和不方便的。这就需要采用地图投影的方法,将空间坐标转换为球面坐标,或将球面坐标变换为平面坐标,或直接在平面坐标系中进行测量。地图投影的方法很多,测量工作中通常采用高斯-克吕格投影,所建立的平面直角坐标系称作高斯平面直角坐标系。

① 高斯-克吕格投影 高斯-克吕格投影简称高斯投影,是一种等角横轴切椭圆柱投影。设想有一个椭圆柱面横套在地球椭球外面,并与某一条子午线(此子午线称为中央子午线或轴子午线)相切,椭圆柱的中心轴通过椭球体中心并与 $NS$ 轴垂直,在椭球面图形与柱面图形保持等角的条件下(称为“正形投影”),将中央子午线两侧各一定经差(通常为 $6^\circ$ 或 $3^\circ$ )范围内的地区投影到椭圆柱面上,再将此柱面沿着通过南、北极点的母线分别切开展平成

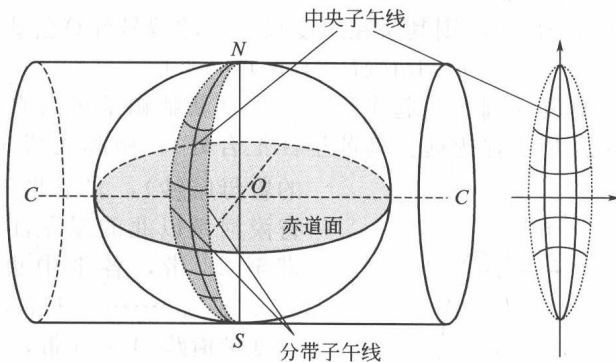


图 1-2-5 高斯投影

经过高斯投影后,中央子午线的投影是一条直线,其长度无变形,其他子午线的投影为凹向中央子午线的曲线;赤道的投影为一条与中央子午线垂直的直线,其他纬线的投影为凸向赤道的曲线;除中央子午线外,其他线段的投影均有变形,且离中央子午线愈远,长度变形愈大;投影前后图形的角度保持不变。

为了有效地限制长度变形,高斯投影不是将整个地球一次投影,而是按一定经差将地球椭球面划分成若干投影带,采用分带投影的方法。分带时既要控制长度变形使其不大于测图误差,又要使带数不致过多以减少换带计算工作,据此原则将地球椭球面沿子午线划分成经

差相等的瓜瓣形地带，以便分带投影。通常按经差 6 度或 3 度分为六度带投影或三度带投影（如图 1-2-6）。六度带可用于中小比例尺（如 1:250000）测图。六度带自首子午线起每隔经差 6 度自西向东分带，带号依次编为第 1、2、…、60 带。第一个六度带的中央子午线的经度为 3°，任意带的中央子午线经度  $L_0^6$ ，可按下式计算

$$L_0^6 = 6N - 3 \quad (1-2-3)$$

式中， $N$  为六度投影带的带号。

如果已知某地面点的经度  $L$ ，则其所在六度投影带编号的计算公式为

$$N = \text{Int}(L/6) + 1 \quad (1-2-4)$$

式中， $\text{Int}(L/6)$  函数表示商取整。

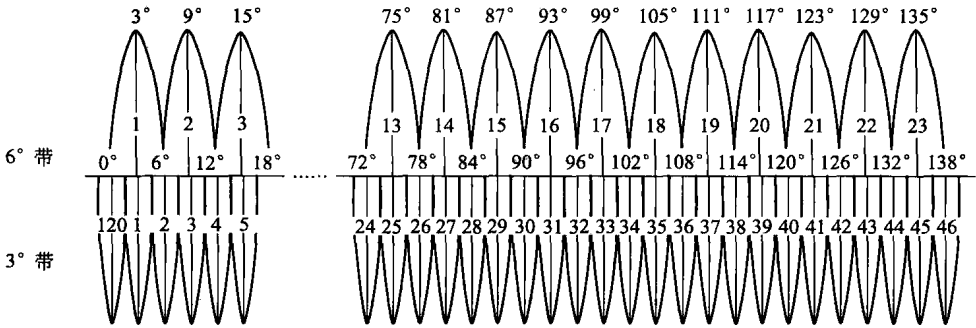


图 1-2-6 六度带和三度带投影

三度带是在六度带的基础上分成的，它的中央子午线与六度带的中央子午线和分带子午线重合，即自 1.5 度子午线起每隔经差 3 度自西向东分带，带号依次编为三度带第 1，2，…，120 带。第一个三度带的中央子午线的经度为 1.5°，任意带的中央子午线经度  $L_0^3$ ，可按式计算

$$L_0^3 = 3n \quad (1-2-5)$$

式中， $n$  为三度投影带的带号。

如果已知某地面点的经度  $L$ ，则其所在三度投影带的编号计算公式为

$$n = \text{Int}[(L - 1.5^\circ)/3] + 1 \quad (1-2-6)$$

我国位于北半球，幅员辽阔，西起东经 73°40′（新疆帕米尔高原乌孜别里山口附近），东至东经 135°02′30″（黑龙江省抚远县乌苏里江汇合处）；南起北纬 3°52′（南海南沙群岛

的曾母暗沙），北至北纬 53°31′10″（黑龙江省漠河镇以北的黑龙江江心）。六度带从 13 带至 23 带，各带中央子午线依次为 75°、81°、87°、……、117°、123°、129°、135°；三度带横跨 24~45 带，各带中央子午线依次为 72°、75°、78°、……、129°、132°、135°。

② 高斯平面直角坐标系 地球椭球分带投影后，在投影面上每条中央子午线和赤道都投影成为相互垂直相交的直线。如图 1-2-7 (a) 所示，以中央子午线的投影为纵轴（ $x$  轴）；赤道的投影为横轴（ $y$  轴）；并按照顺时针方向划分 I、II、III、IV 象限；中央子午线和赤道的交点  $O$  作为坐标原点，如此建立高斯平面直角坐标系。并规定  $x$  轴以北为

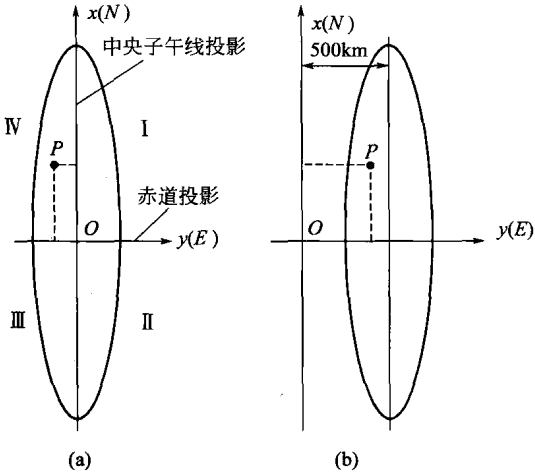


图 1-2-7 高斯平面直角坐标系

正向,  $y$  轴以东为正向。

高斯平面直角坐标系与数学上的笛卡尔坐标系是不同的, 主要是由于测量工作中直线方向是以北方向为基准顺时针定义的, 高斯平面直角坐标系的定义, 可以使数学上定义的各类三角函数在高斯平面上不做任何改变, 直接使用。

根据我国北半球的地理位置, 分带投影后, 高斯坐标的  $x$  值均为正值, 而  $y$  值则有正有负, 即位于中央子午线以东时  $y$  坐标为正值, 以西时为负。如图 1-2-7(a) 所示,  $P$  点位于中央子午线以西, 其  $y$  坐标值为负。对于六度带高斯平面直角坐标系,  $y$  坐标的最小值约为一 334km。为了避免横坐标 ( $y$  坐标) 出现负值, 我国规定将每一带的横坐标加上 500km, 即纵坐标轴向西平移 500km。此外, 为了能够区分某点位于哪个六度带内, 还应在横坐标前面冠以带号 (即  $y$  坐标加上  $N \times 10^6 \text{m}$ ) 以示区别。例如,  $P$  点位于 19 带内, 原坐标的自然值为  $y = -143\,543.211 \text{m}$ , 按照上述规定, 则它的通用值为  $Y_P = 19356456.789 \text{m}$ 。

(4) 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计算。因此, 在局部范围内进行测绘工作时, 以铅垂线作为投影基线, 采用测区中心点的切平面代替大地水准面。将点位投影到水平面上建立假定平面直角坐标系 (也称作独立平面直角坐标系)。并规定南北方向为纵轴, 东西方向为横轴, 如图 1-2-8 所示。如果可能, 尽量使假定坐标系与国家坐标系进行联测, 以便能够进行坐标换算。

为了使用方便, 测量上使用的平面直角坐标的原点有时是假设的。假设的原点一般选在测区的西南角的位置, 应使测区内的各点坐标均为正值。

在工程建设中, 为了便于计算和施工放样, 所采用的平面直角坐标系的坐标轴与建 (构) 筑物主轴线重合、平行或垂直, 称为建筑坐标系或施工坐标系。施工坐标系与测量坐标系往往不一致, 在计算时坐标时需要坐标换算。如图 1-2-9 所示, 设  $xOy$  为测量坐标系,  $x'O'y'$  为施工坐标系, 已知  $P$  点的施工坐标, 则可按下式将其换算为测量坐标

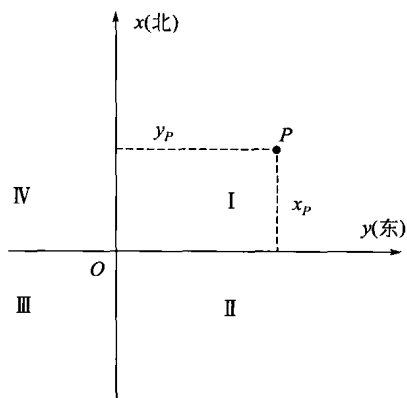


图 1-2-8 平面直角坐标系

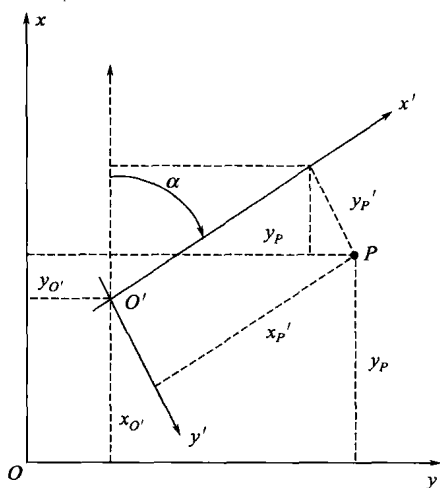


图 1-2-9 施工坐标系与测量坐标系的换算

$$\begin{cases} x_P = x_{O'} + x'_P \cos \alpha - y'_P \sin \alpha \\ y_P = y_{O'} + x'_P \sin \alpha + y'_P \cos \alpha \end{cases} \quad (1-2-7)$$

同样, 若已知  $P$  的测量坐标, 则可按下式将其换算为施工坐标

$$\begin{cases} x'_P = (x_P - x_{O'}) \cos \alpha + (y_P - y_{O'}) \sin \alpha \\ y'_P = -(x_P - x_{O'}) \sin \alpha + (y_P - y_{O'}) \cos \alpha \end{cases} \quad (1-2-8)$$

(5) 高程系 高程系是一维坐标系。地面点的高程是指地面点沿投影基线到某一高程基准面的距离。也就是说高程基准面的高程为零。由于高程基准面与投影基线选择的不同, 就产生了不同的高程系统。这里只介绍常用的海拔高。

海拔高也称作正高、绝对高程, 是以大地水准面作为高程基准面, 即地面点沿铅垂线到大地水准面的距离。图 1-2-10 中  $A$ 、 $B$  两点的绝对高程分别是  $H_A$ 、 $H_B$ 。