



普通高等教育应用型本科创新教材

周保兴 朱爱民 主 编  
宋 雷 余正昊 副主编  
夏小裕 王德保

# 工程测量学

Engineering  
Surveying



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.



普通高等教育应用型本科创新教材

主编 周保兴

Engineering  
Surveying

# 工程测量学

周保兴 朱爱民 主 编  
宋 雷 余正昊 副主编  
夏小裕 王德保



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 内 容 提 要

工程测量学是测绘工程专业的一门专业课程,它是在学习了“测量学基础”“控制测量学”“摄影测量学”等先修课程后开设的课程。

本书针对经济快速发展中工程建设对测量工作提出的新要求和测绘新技术的发展,详细介绍了工程测量控制网的布设、地形图的工程应用、工程施工放样方法等工程测量基本知识,并阐述了工业与民用建筑、道路、桥梁、隧道、水利枢纽等工程建设在规划设计、建筑施工和运营管理三个阶段所涉及的具体测量理论、方法和技术。本书结合典型的工程案例对相关的理论和方法进行分析和说明,增强了实用性。

本书可作为高等学校测绘工程专业本科生及专科生的教材,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 / 周保兴, 朱爱民主编. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018. 2

ISBN 978-7-114-14476-9

I. ①工… II. ①周… ②朱… III. ①工程测量  
IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 003766 号

书 名: 工程测量学

著 作 者: 周保兴 朱爱民

责任编辑: 王 霞 李 娜

责任校对: 张 贺

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15.75

字 数: 366 千

版 次: 2018 年 3 月 第 1 版

印 次: 2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14476-9

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

# 前 言

工程测量学是一门古老的科学。随着科学技术的发展和社会的进步,工程测量学逐步从普通的测量学中分离并成为一门相对独立的学科,主要研究各项工程在规划设计、施工建设和运营管理阶段所进行的各种测量工作,是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用,是来自于生产实践并服务于生产实践的一门应用科学。工程测量是直接为工程建设服务的,它的服务和应用范围包括公路、铁路、桥梁、隧道、建筑、港口等各种工程建设部门。随着我国国民经济持续快速发展,各种工程建设不断对测量工作提出新的要求,同时现代科学技术和测绘新技术的发展,给直接为经济建设服务的工程测量带来了严峻的挑战和极好的机遇。特别是道路、桥梁、隧道、港口等工程建设规模越来越大、要求越来越高,3S技术(全球定位系统 GPS、地理信息系统 GIS 和摄影测量与遥感 RS)以及数字化测绘和地面测量先进技术的快速发展,使工程测量的手段、方法和内涵产生了深刻的变化,工程测量的服务领域在进一步扩展。

本书以培养应用型人才为目标,结合我校多年来教学、测绘生产实践经验和当前现代测绘技术进行编写。内容主要包括工程测量基本知识(包括工程控制测量、地形图应用、工程施工放样基本方法等)(第1~4章)、工程测量技术在建筑、道路、水利、桥梁、隧道等工程中的应用(第5~9章)及参考文献三大部分。本书的重点内容包括工程测量基础知识、工程控制网的布设、地形图的应用、建筑工程测量、线路工程测量、水利工程测量、桥梁工程测量、地下工程测量等。内容涵盖了从经典理论到最新技术的工程应用,既注重讲述工程测量学的基本理论、方法与技术,又结合典型工程的测量实践,力求接近工程实际。

本教材由山东交通学院周保兴、朱爱民主编。编者有周保兴(第1、2章)、朱爱民(第3章)、范玉红(第4章)、夏小裕(第5章)、李斌(第6章)、余正昊(第7章)、宋雷(第8章)、王德保(第9章)。

本书的出版得到了山东省高等学校科技计划项目“融合多源空间数据的城市真三维模型构建技术研究”(J14LG07)、山东省交通运输厅科技计划项目“钢丝绳 MPC 符合材料进行空心板梁桥加固设计研究”(2017B97)、山东交通学院博士科研启动基金、山东交通学院教改课题《基于虚拟现实技术的三维实践教学平台构建研究》的资助。

在本书的编写中,作者参阅和引用了大量书籍、文章及网上相关的资料,在此向有关作者表示衷心感谢!由于编者水平有限,书中可能存在不少疏漏和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者  
2017年12月

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 工程测量学的概念、任务	1
1.2 工程测量学的内容和应用领域	2
1.3 工程测量学的发展历史	7
1.4 工程测量学与相邻课程的关系	10
思考题	11
第2章 工程测量控制网	12
2.1 控制测量的基本概念	12
2.2 工程控制网的布设	13
2.3 工程控制网质量标准和优化设计	22
2.4 工程控制网的技术设计	25
2.5 控制网的选点与标石埋设	29
2.6 典型的工程测量控制网	33
思考题	37
第3章 地形图的工程应用	39
3.1 地形图识读方法	39
3.2 地形图的基本应用	42
3.3 地形图的工程应用	46
3.4 电子地形图及其应用	52
3.5 竣工总图实测与编绘	54
思考题	57
第4章 工程施工放样的基本方法	58
4.1 概述	58
4.2 水平角放样	58
4.3 距离放样	59
4.4 点位放样	60
4.5 归化法放样	66
4.6 高程放样方法	69
4.7 刚体的放样定位	70
4.8 铅垂线放样	71

4.9 施工放样新技术 .....	73
思考题 .....	75
<b>第5章 建筑工程测量 .....</b>	<b>76</b>
5.1 概述 .....	76
5.2 建筑施工控制测量 .....	76
5.3 建筑限差及施工放样精度 .....	78
5.4 施工轴线及方格网建立 .....	80
5.5 民用建筑施工测量 .....	84
5.6 工业建筑施工测量 .....	89
5.7 高层建筑物测量 .....	100
5.8 高耸建筑物测量 .....	103
思考题 .....	117
<b>第6章 线路工程测量 .....</b>	<b>118</b>
6.1 概述 .....	118
6.2 线路工程控制测量 .....	120
6.3 线路勘测、中线及断面测量 .....	121
6.4 线路中线坐标计算 .....	125
6.5 单圆曲线放样 .....	128
6.6 缓和曲线放样 .....	132
6.7 复曲线放样 .....	138
6.8 竖曲线放样 .....	140
6.9 线路施工与竣工测量 .....	141
思考题 .....	145
<b>第7章 桥梁工程测量 .....</b>	<b>146</b>
7.1 概述 .....	146
7.2 桥位勘测设计测量 .....	147
7.3 桥梁施工控制测量 .....	149
7.4 桥梁基础施工测量 .....	158
7.5 桥梁墩、台、索塔施工测量 .....	163
7.6 桥梁架设施工测量 .....	177
7.7 桥梁竣工测量 .....	186
思考题 .....	187
<b>第8章 水利工程测量 .....</b>	<b>189</b>
8.1 水下地形测绘 .....	189
8.2 河道测量 .....	200
8.3 水闸的施工放样 .....	204
8.4 土坝的施工放样 .....	208
8.5 混凝土重力坝的施工放样 .....	212
思考题 .....	214

第9章 地下工程测量 .....	215
9.1 概述 .....	215
9.2 隧道贯通误差与估算 .....	216
9.3 地下工程的控制测量 .....	222
9.4 竖井联系测量 .....	228
9.5 隧道施工测量与竣工测量 .....	234
思考题 .....	241
参考文献 .....	242

# 第1章 绪论

## 1.1 工程测量学的概念、任务

### 1.1.1 学科定义

**定义一:**工程测量学是研究各种工程在规划设计、施工建设和运营管理阶段所进行的各种测量工作的学科。

各种工程包括:工业建设、城市建设、交通工程(铁路、公路、机场、车站、桥梁、隧道)、水利电力工程(河川枢纽、大坝、船闸、电站、渠道)、地下工程、管线工程(高压辅电线、输油送气管道)、矿山工程等。一般的工程建设分为规划设计、施工建设和运营管理三个阶段。工程测量主要包括这三阶段所进行的各种测量工作。

**定义二:**工程测量学是主要研究在工程、工业和城市建设以及资源开发各个阶段所进行的地形和有关信息的采集和处理、施工放样、设备安装、变形监测分析和预报等的理论、方法和技术,以及研究对测量和工程有关信息进行管理和使用的一门学科,它是测绘学在国民经济和国防建设中的直接应用。

**定义三:**工程测量学是研究地球空间(包括地面、地下、水下、空中)具体几何实体的测量描绘和抽象几何实体的测设实现理论、方法和技术的一门应用性学科。它主要以建筑工程和机器设备为研究服务对象。

具体几何实体指一切被测对象,包括在建(或已建成)的各项工程及其与工程有关的目标,抽象几何实体指一切设计的但尚未实现的、未建成的各项工程。

定义一比较大众化,易于理解。定义二较定义一更具体、准确,且范围更大。定义三更加概括、抽象和科学。定义二、三除建筑工程外,机器设备乃至其他几何实体都是工程测量学的研究对象,且都上升到了理论、方法和技术,强调工程测量学所研究的是与几何实体相联系的测量、测设的理论、方法和技术,而不是研究各种测量工作。

总的来说,工程测量学主要包括以工程建筑为对象的工程测量和以机器设备为对象的工业测量两大部分,主要任务是为各种服务对象提供测绘保障,满足它们所提出的各种要求,可分为普通工程测量和精密工程测量。精密工程测量代表工程测量学的发展方向,大型特种精密工程是促进工程测量学科发展的动力。

### 1.1.2 学科地位

工程测量学是测绘学的二级学科。测绘学又称测绘科学与技术,它是一门具有悠久发展历史和现代科技含量的一级学科。测绘学的二级学科可作如下划分:

(1) 大地测量学。包括天文大地测量学、几何大地测量学、物理大地测量学、地球物理大地测量学、卫星大地测量学、空间大地测量学和海洋大地测量学等。

(2) 工程测量学。包括矿山测量学、精密工程测量学、工程的变形监测分析与预报。

(3) 摄影测量学与遥感。可分为摄影测量学、遥感学,摄影测量与遥感有许多相同之处,也有本质上的不同之处。摄影测量学包括航空摄影测量学和地面摄影测量学,遥感学包括航空遥感学和航天遥感学。

(4) 地图制图学。包括地图投影、地图综合、地图编制和地图制印等。

(5) 地理信息系统。是测绘学、大气科学、地理学和资源科学等一级学科的二级学科。

(6) 不动产测绘(或称地籍测绘)。与工程测量并无多大差别,但在法律上有特殊意义。

### 1.1.3 工程测量的任务

工程测量的任务是为工程建设提供测绘保障,满足工程建设各阶段的各种需求。具体地讲,在工程勘测设计阶段,提供设计所需要的地形图等测绘资料,为工程的勘测设计、初步设计和技术设计服务;在施工建设阶段,主要是施工放样测量,保证施工的进度、质量和安全;在运营管理阶段,则是以工程健康监测为重点,保障工程的安全高效运营。

## 1.2 工程测量学的内容和应用领域

### 1.2.1 工程测量学的内容

#### 1) 按工程建设阶段划分

工程测量按工程建设的规划设计、施工建设和运营管理三个阶段分为“工程勘测”“施工测量”和“安全监测”,这三个阶段对测绘工作有不同的要求,现简述如下:

(1) 工程建设规划设计阶段的测量工作。每项工程建设都必须按照自然条件和预期目的进行规划设计。在这个阶段中的测量工作,主要是提供各种比例尺的地形图,另外还要为工程地质勘探、水文地质勘探以及水文测验等进行测量。对于重要的工程(例如某些大型特种工程)或在地质条件不良的地区(例如膨胀土地区)进行的工程建设,则还要对地层的稳定性进行观测。

(2) 工程建设施工阶段的测量工作。每项工程建设的设计经过讨论、审查和批准之后,即进入施工阶段。这时,首先要将所设计的工程建筑物按照施工的要求在现场标定出来(即所谓定线放样),作为实地修建的依据。为此,要根据工地的地形、工程的性质以及施工的组织与计划等,建立不同形式的施工控制网,作为定线放样的基础。然后再按照施工的需要,采用各种不同的放样方法,将图纸上所设计的内容转移到实地。此外,还要进行施工质量控制,这里主要是几何尺寸如高层建筑物的竖直度、地下工程的断面等的监控。为监测工程进度,还要进行开挖与建筑方量测绘、工程竣工测量、变形观测以及设备的安装测量等。

(3) 工程建设运营管理阶段的测量工作。在运营期间,为了监视工程建筑物安全情况,了解设计是否合理,验证设计理论是否正确,需要对工程建筑物的水平位移、沉陷、倾斜以及摆动等进行定期或持续的监测。这些工作,就是通常所说的变形观测。对于大型的工业设

备,还要进行经常性的检测和调校,以保证其按设计安全运行。为了对工程进行有效的管理、维护,为了日后扩展的需要,还应建立工程信息系统。

## 2)按服务对象划分

工程测量学按所服务的对象分为工程测量、水利工程测量、线路工程测量、桥隧工程测量、地下工程测量、海洋工程测量、军事工程测量、三维工业测量以及矿山测量、城市测量等。各项服务对象的测量工作各有特点与要求(个性),但从其测量的基本理论与方法来看,又有很多共同之处(共性)。学习时,我们要注意特殊和一般、个性与共性的关系。学习完工程测量学后,对于上述任一种工程测量,都能易于理解和掌握。

工程测量学的主要内容包括:模拟或数字的地形资料的获取与表达;工程控制测量及数据处理;建筑物的施工放样;大型精密设备的安装和调试测量;工业生产过程中的质量检测和控制在;工程变形及与工程有关的各种灾害的监测分析与预报;工程测量专用仪器的研制与应用;工程信息系统的建立与应用等。现将上述内容归纳为以下几个方面。

### (1)测量中的地形图测绘

在工程规划设计中所用的地形图比例尺一般较小,根据工程的规模可直接使用1:1万~1:10万比例尺的国家基本地形图。对于一些大型工程,往往还需要专门测绘1:2000~1:5000比例尺的区域性或带状性地形图,一般采用航空摄影测量的模拟法、解析法或全数字化法图。而对于一般工程的地形图测绘,则大多采用地面测量方法用模拟的白纸成图或数字化机助成图法。在施工建设和运营管理阶段,往往需要用数字成图法测绘1:1000、1:500乃至更大比例尺的地形图或专题图。工程测量中的地形测绘还包括水下(含江、河、库、湖、海等)地形测绘和各种纵横断面图绘。各种比例尺的地形图是工程信息系统的基础地理信息。

城市1:500或1:1000的基本地形图和城乡地籍图测绘属于国家基本测绘范畴,虽然与工程测量的关系密切,但不属于工程测量学的内容。

### (2)工程控制网布设及优化设计

工程控制网分为测图控制网、施工控制网、变形监测网和安装控制网,它们不同于国家基本网和城市等级网,在选点、埋标、观测方案设计、质量控制、平差计算、精度分析以及其他与之相关的数据处理等方面都具有自身的鲜明特色。目前,除特高精度的工程专用网和设备安装控制网外,绝大多数首级工程控制网都可采用GPS定位技术来建立。如何将现代卫星测量技术与地面测量技术相互结合、取长补短显得非常重要。无加密控制网的控制测量将走进工程测量领域。对于各种精密工程中的施工控制网、变形监测网以及安装控制网,都应该或者说都必须进行网的优化设计。优化设计涉及坐标系确定,基准选择,仪器与方法选取,网的精度、可靠性、灵敏度和建网费用等质量准则问题。

### (3)施工放样技术和方法

将设计的抽象的几何实体放样(或称测设)到实地上去,成为具体几何实体所采用的测量方法和技术称为施工放样,机器和设备的安装也是一种放样。放样可归纳为点、线、面、体的放样。点放样是基础,施样点必须满足特定的条件:如在一条给定的直线或曲线上,在已知曲面上且空间形状符合设计要求。放样与测量的原理相同,使用的仪器和方法也相同,只是目的不一样。放样一般采用方向交会法、距离交会法、方向距离交会法、极坐标法、坐标

法、偏角法、偏距法、投点法等。除常规的光学及电子经纬仪、水准仪、全站仪外, GPS 技术亦可用于工程的施工放样、施工机械导航定位和建筑物构件的安装定位。机器设备的安装往往需要达到计量级精度,为此,往往需要研究专门的测量方法和研制专用的测量仪器和工具。施工放样的工作量很大,因此,施工放样一体化、自动化显得特别重要。

#### (4) 工程的变形监测分析和预报

工程建筑物的变形及与工程有关的灾害监测、分析和预报是工程测量学的重要研究内容。变形分析和预报都需要对变形观测数据进行处理,还涉及工程、地质、水文、应用数学、系统论和控制论等学科,属于多学科交叉领域。

变形监测网的布设和优化设计较之其他工程控制网更加丰富,网的精度越高越好,需要具有更高的可靠性和灵敏度;应针对精度、可靠性以及灵敏度做网的优化设计计算;还要确定所使用的仪器、网的等级、观测周期和观测时间等。变形监测几乎包括了全部的工程测量技术,除常规的仪器和方法外,大量地使用各种传感器和专用仪器。变形观测数据处理,首先是对监测网周期观测值的处理。其中,参考点稳定性分析,目标点位移量计算,变形模型的建立、检验以及参数估计是变形几何分析的重要内容。其次是对目标点上的时间序列进行数据处理,包括多元线性回归分析、时间序列分析等方法。对周期性变形还可采用时间序列频谱分析法,对变形体的动态变化可用状态方程与观测方程描述和递推的卡尔曼滤波法。上述数据处理方法建立在大量变形观测值基础之上,属于统计分析法。

另一种基于受力和变形之间函数关系的分析方法称为确定函数法,它是变形的一种物理解释方法。根据变形体的物理力学参数和边界条件,常采用有限元法解算位移场的动力微分方程,计算在外力作用下变形体离散结点上的位移值,与实测值比较,可以反演物理学参数和改进动力微分方程模型。如果用低阶的、简化的、在数学上可解的动力学方程来描述变形体系统的运动,不是采用有限元法求解,而是直接求解,则要采用系统论方法求解并研究解空间的特征及解的拓扑结构,这种方法可以更深刻地描述系统的变化过程和机理。用系统论方法作为指导,基于精确完整的监测数据,以几何分析为基础,与物理解释相结合,可以对变形体的静态、准静态、运动态和动态模型作确切的描述,能满足工程安全对变形分析预报的要求。变形分析预报也包括对变形观测成果的整理和图表输出等内容。变形监测分析与预报是工程或设备安全运营的基本保障,变形分析结果是对设计正确性的检验,是修改设计或类似工程新设计的依据。

#### (5) 工程测量的通用和专用仪器

经纬仪、水准仪、全站仪是工程测量的通用仪器,光学经纬仪、水准仪逐渐被电子经纬仪、电子全站仪、电子水准仪代替。GPS 接收机也已成为通用仪器而被广泛使用。陀螺经纬仪可直接测定方位角,主要用于联系测量和地下工程测量。通用仪器可测方向、角度、距离、高差、坐标差等几何量。从数据获取到数据处理,一体化、自动化程度越来越高。测量机器人是电子全站仪中最先进的仪器,它实现了整个测量过程的自动化。将 GPS 接收机与电子全站仪或测量机器人连接在一起,称为超站仪,它将 GPS 的实时动态定位技术与全站仪灵活的三维极坐标测量技术完美结合,可实现无加密控制的各种工程测量。CCD 传感器与电子全站仪结合,构成摄像全站仪,可实现面状数据的快速获取,具有很好的应用前景。

专用仪器是工程测量学仪器发展最活跃的领域,主要应用在精密工程测量领域,包括机

械式、光电式及光机电(子)多传感器集成式仪器或测量系统。

用于建立水平或竖直的基准线或基准面,确定待测点相对于基准线(或基准面)的偏距(或垂距)的测量,称为基准线测量或准直测量。这方面的仪器有正锤、倒锤及垂线观测仪、引张线仪、各种激光准直仪、铅直仪(向下、向上)、自准直仪以及尼龙丝或金属丝准直测量系统等。

在距离测量方面,含中长距离(数百米至数十公里)、短距离(数米至数十米)和微距离(毫米至数厘米)及其变化量的精密测量。以 ME5000 为代表的精密激光测距仪和 TERRA-METER-LDM2 双频激光测距仪,使得中长距离测量精度可达亚毫米级;许多短距离、微距离测量都实现了测量数据采集的自动化,其中最典型的是钢瓦线尺测距仪 DISTINVAR、应变仪 DISTERMETER 与激光快速遥测仪等。采用多普勒效应的双频激光干涉仪,能在数十米范围内达到  $0.1\mu\text{m}$  的计量精度,成为重要的长度检校和精密测量设备;采用 CCD 线列传感器测量微距离可达到百分之几微米的精度,使距离测量精度从毫米、微米级进入到纳米级世界。

高程测量方面,显著发展是液体静力水准测量系统。这种系统通过各种类型的传感器测量容器的液面高度,可同时获取数十乃至数百个测点的高程,具有高精度、遥测、自动化、可移动和持续测量等特点。两容器间的距离可达数十公里,如用于跨河与跨海峡的水准测量。通过一种压力传感器,允许两容器之间的高差从过去的数厘米达到数米。

与高程测量相关的倾斜测量(又称挠度曲线测量)可用于确定被测对象(如桥、塔)在竖直平面内相对于水平或铅直基准线的挠度曲线。各种机械式测斜(倾)仪、电子测倾仪都向着数字显示、自动记录和灵活移动等方向发展,其精度达到微米级。

三维激光扫描仪可对被测对象在不同位置进行扫描,快速地获取物体在给定坐标系下的三维坐标,通过坐标转换和建模,可输出被测对象的各种图形和数字模型,还能直接转换到 CAD 成图。车载、机载激光扫描仪将成为 21 世纪地面数据采集的主要手段,一种称为图像工程测量的研究方向正悄然兴起。

具有多种功能的混合测量系统是工程测量专用仪器发展的显著特点,采用多传感器的高速铁路轨道测量系统,用测量机器人自动跟踪沿铁路轨道前进的测量车,测量车上装有棱镜、斜倾传感器、长度传感器和微机,可同时测量轨道的三维坐标、轨道的宽度和倾角。液体静力水准测量与金属丝准直集成的混合测量系统在百米长的基准线上可精确测量测点的高程和偏距。由 GPS 接收机、惯导仪、激光扫描仪、跟踪全站仪、CCD 相机以及其他传感器等集成的地面移动式测量系统和由 GPS OEM 板、通信模块、太阳能电源、自动寻标激光测距仪等集成的变形遥控监测预警系统都是典型的混合测量系统。

综上所述,工程测量专用仪器具有高精度(亚毫米、微米乃至纳米)、快速、遥测、无接、可移动、连续、自动记录、微机控制等特点,可进行精密定位测量、准直测量,可测量坐标、偏距、倾斜度、厚度、表面粗糙度和平直度,还可测量振动频度以及物体的动态变化等。

#### (6) 工程测量学中的误差及测量平差理论

最小二乘法广泛应用于测量平差。经典最小二乘法建立在观测值服从正态分布的随机变量的基础上。测量误差导致了测不准理论。在对误差的研究上,有平差中函数模型误差和随机模型误差诊断。方差和协方差分量估计实质上是通过观测值的权迭代计算精化平

差的随机模型。还要研究模型误差对参数估计的影响、对参数和残差统计性质的影响。研究病态方程与控制网及其观测方案设计的关系等。由于变形监测网参考点稳定性检验的需要,导致了自由网平差和拟稳平差的出现和发展。观测值粗差的研究促进了控制网可靠性理论以及变形监测网网点变形之间、变形与观测值粗差之间的可区别性理论的研究和发展。针对观测值存在粗差的客观实际,出现了稳健估计(或称抗差估计)。巴尔达的数据探测法对观测值中只存在一个粗差时有效,稳健估计法具有抵抗多个粗差影响的优点。建立改正数向量与观测值真误差向量之间的函数关系,可对多个粗差同时定位定值。针对法方程系数阵存在病态的可能,发展了有偏估计。为了与最小二乘估计相区别,稳健估计和有偏估计称为非最小二乘估计。与此同时,还有从参数估计到非参数估计和到半参数估计的发展,从线性估计到非线性估计的发展。

### 1.2.2 工程测量学的应用领域

工程测量学是一门应用性很强的工程学科,在国家经济建设、国防建设、环境保护及资源开发中都必不可少,其应用领域,可按工程建设阶段和服务对象划分。

按工程建设的勘测设计、施工建设和运营管理三个阶段,工程测量可分为工程勘测、施工测量和安全监测。工程勘测主要是提供各种大、中比例尺,如1:2000和1:5000的地形图,为工程地质、水文地质勘察等提供测量服务,重要工程的地层稳定性观测等。施工测量包括建立施工控制网、施工放样、施工进度和质量监控、开挖与建筑方量的测绘、施工期的变形监测、设备安装以及竣工测量等。运营管理阶段的测量工作主要是安全监测。

按所服务的对象,工程测量可分为建筑工程测量、水利工程测量、线路工程测量、桥隧工程测量、地下工程测量、矿山测量、海洋工程测量、军事工程测量、三维工业测量等。各项服务对象的测量工作,各有其特点与要求。

测量学是国家经济建设的先行。随着科学技术的飞速发展,测量学在国家经济建设和发展的各个领域发挥着越来越重要的作用。工程测量是直接为工程建设服务的,它的服务和应用范围包括城建、地质、铁路、交通、房地产管理、水利电力、能源、航天和国防等各种工程建设部门。

(1) 城乡规划和发展离不开测量学。我国城乡面貌正在发生日新月异的变化,城市和村镇的建设与发展,迫切需要加强规划与指导,而做好城乡建设规划,首先要有现势性好的地图,提供城市和村镇面貌的动态信息,以促进城乡建设的协调发展。

(2) 资源勘察与开发离不开测量学。地球蕴藏着丰富的自然资源,需要人们去开发。勘探人员在野外工作,离不开地图,从确定勘探地域到最后绘制地质图、地貌图、矿藏分布图等,都需要用测量技术手段。随着测量技术的发展,如重力测量可以直接用于资源勘探。工程师和科学家根据测量取得的重力场数据可以分析地下是否存在重要矿藏,如石油、天然气、各种金属等。

(3) 交通运输、水利建设离不开测量学。铁路公路的建设从选线、勘测设计,到施工建设都离不开测量。大、中水利工程也是先在地形图上选定河流渠道和水库的位置,划定流域面积,再测得更详细的地图(或平面图)作为河渠布设、水库及坝址选择、库容计算和工程设计的依据。如三峡工程从选址、移民,到设计大坝等,测量工作都发挥了重要作用。

(4) 国土资源调查、土地利用和土壤改良离不开测量学。建设现代化的农业,首先要进行国土资源调查,摸清土地“家底”,而且还要充分认识各地区的具体条件,进而制订出切实可行的发展规划。测量为这些工作提供了一个有效的工具。地貌图,反映出了地表的各种形态特征、发育过程。

### 1.3 工程测量学的发展历史

工程测量学是一门历史悠久的学科,是从人类生产实践中逐渐发展起来的。在古代,它与测量学并没有严格的界限。到近代,随着工程建设的大规模发展,才逐渐形成了工程测量学。

早在公元前 27 世纪的埃及大金字塔,其形状与方位都很准确,这说明当时就已有了解样的工具和方法。我国早在两千多年前的夏商时代,为了治水就开始了水利工程测量工作。司马迁在《史记》中对夏禹治水有这样的描述:“陆行乘车,水行乘船,泥行乘橇,山行乘撵,左准绳,右规矩,载四时,以开九州,通九道,陂九泽,度九山。”这里所记录的就是当时的工程勘测情景,准绳和规矩就是当时所用的测量工具,“准”是可揆平的水准器,“绳”是丈量距离的工具,“规”是画圆的器具,“矩”则是一种可定平,可测长度、高度、深度和画圆、画矩形的通用测量仪器。早期的水利工程多为河道的疏导,以利防洪和灌溉,其主要的测量工作是确定水位和堤坝的高度。秦代李冰父子领导修建的都江堰水利枢纽工程,曾用一个石头人来标定水位,当水位超过石头人的肩时,下游将受到洪水的威胁,当水位低于石头人的脚背时,下游将出现干旱。这种标定水位的办法与现代水位测量的原理完全一样。北宋时沈括为了治理汴渠,测得“京师之地比泗州凡高十九丈四尺八寸六分”,是水准测量的结果。1973 年从长沙马王堆汉墓出土的地图包括地形图、驻军图和城邑图三种,不仅所表示的内容相当丰富,绘制技术也非常熟练,在颜色使用、符号设计、内容分类和简化等方面都达到了很高水平,是目前世界上发现的最早的地图,这与当时测绘技术的发展分不开。

公元前 14 世纪,在幼发拉底河与尼罗河流域曾进行过土地边界的划分测量。我国的地籍管理和土地测量最早出现在殷周时期,秦、汉过渡到私田制。隋唐实行均田制,建立户籍册。宋代按乡登记和清丈土地,出现地块图。到了明代洪武四年,全国进行土地大清查和勘丈,编制的鱼鳞图册是世界最早的地籍图册。

我国是世界上采矿业发展最早的国家,在公元前两千多年的黄帝时代,就已开始应用金属如铜器、铁器等,到了周代,金属工具已普遍应用。据《周礼》记载,在周代已建立专门的采矿部门,开采时很重视矿体形状,并使用矿产地质来辨别矿产的分布。我国四大发明之一的指南针,从司南、指南鱼算起,有两千多年的历史,对矿山测量和其他工程勘测有很大的贡献。在国外,意大利都灵保存有公元前 15 世纪的金矿巷道图。公元前 13 世纪埃及也有按比例缩小的巷道图。公元前 1 世纪,希腊学者格罗·亚里山德里斯基对地下测量和定向进行了叙述。德国在矿山测量方面有很大贡献,1556 年格·阿格里柯拉出版的《采矿与冶金》一书,专门论述了开采中用罗盘测量井下巷道的一些问题。

工程测量学的发展也受到了战争的促进。中国战国时期修筑的午道,公元前 210 年秦始皇修建的“堑山堙谷,千八百里”直道,古罗马构筑的兵道,以及公元前 218 年欧洲修建的

通向意大利的“汉尼拔通道”等,都是著名的军用道路。修建中应用了测量工具进行地形勘测、定线测量和隧道定向开挖测量。唐代李荃指出“以水佐攻者强,…先设水平测其高下,可以漂城,灌军,浸营,败将也”,说明了测量地势高低对军事成败的作用。中华民族伟大象征的万里长城修建于秦汉时期,这一规模巨大的防御工程,从整体布局到修筑,都要进行详细的勘察测量和施工放样工作。

工程测量学的发展在很长的一段时间内是非常缓慢的。直到20世纪初,由于西方的第一、二次技术革命和工程建设规模的不断扩大,工程测量学才受到人们的重视,并发展成为测绘学的一个重要分支。以核子、电子和空间技术为标志的第三次技术革命,使工程测量学获得了飞速发展。20世纪50年代,世界各国在建设大型水工建筑物、长隧道、城市地铁中,对工程测量提出了一系列要求;20世纪60年代,空间技术的发展和导弹发射场建设促使工程测量进一步发展;20世纪70年代以来,高能物理、天体物理、人造卫星、宇宙飞行、远程武器发射等,需要建设各种巨型实验室,从测量精度和仪器自动化方面都对工程测量提出了更高的要求。20世纪末,人类科学技术不断向着宏观宇宙和微观粒子世界延伸,测量对象不仅限于地面,而且深入地下、水域、空间和宇宙,如核电站、摩天大楼、南北极站、太空站、海底隧道、跨海大桥、大型正负电子对撞机等。由于仪器的进步和测量精度的提高,工程测量的领域日益扩大,除了传统的工程建设三阶段的测量工作外,在地震观测、海底探测、巨型机器、车床、设备的荷载试验、高大建筑物(电视发射塔、冷却塔)变形观测、文物保护,乃至在体育、医学、法学领域,都应用了最新的精密工程测量仪器和方法。1964年,国际测量师联合会(FIG)为了促进和繁荣工程测量,成立了工程测量委员会(第六委员会),从此,工程测量学在国际上作为一门独立的学科开展活动。

现代工程测量已经远远突破了为工程建设服务的狭窄概念,而向所谓的“广义工程测量学”发展,认为“一切不属于地球测量,不属于国家地图集范畴的地形测量和不属于官方的测量,都属于工程测量”。

从工程测量学的发展历史可以看出,它的发展经历了一条从简单到复杂、从手工操作到测量自动化、从常规测量到精密测量的发展道路,它的发展始终与当时的生产力水平相适应,并且能够满足大型特种精密工程中对测量所提出的越来越高的需求。如举世瞩目的长江三峡水利枢纽工程,溪洛渡、向家坝、小浪底和二滩等大型水利枢纽工程;长达30多公里的杭州湾大桥和东海大桥工程;已竣工的秦岭隧道(18.4km),山西省引黄工程南干线的7号隧洞(长42.6km)以及辽宁省大伙房引水工程隧道(长达85.3km);上海磁悬浮铁路;北京国家

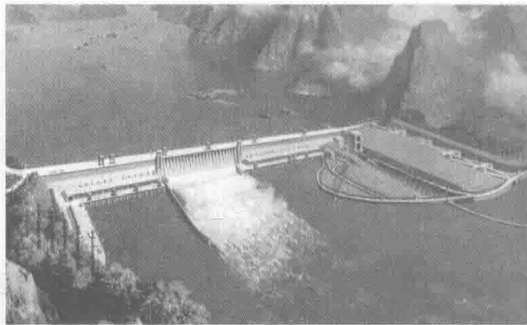


图 1-1 长江三峡水利枢纽工程

大剧院等大型精密特种工程,都堪称世界之最。大型特种精密工程建设和对测绘提出的越来越高的要求是工程测量学发展的动力。

长江三峡水利枢纽工程(图 1-1)变形监测和库区地壳形变、滑坡、岩崩以及水库诱发地震监测,其规模之大,监测项目之多,都堪称世界之最。如对滑坡体变形与失稳研究的计算机智能仿真系统,拟进行研究的三峡库区滑坡泥石流预报的 3S 工程等,都涉及精密工程测量。

隔河岩大坝外部变形观测的 GPS 实时持续自动监测系统,监测点的位置精度达到亚毫米级。该工程用地面方法建立的变形监测网,其最弱点精度优于  $\pm 1.5\text{mm}$ 。

北京正负电子对撞机(图 1-2)的精密控制网,点位精度达  $\pm 0.3\text{mm}$ ,设备定位精度优于  $\pm 0.2\text{mm}$ ,200m 长的直线段漂移管准直精度达  $\pm 0.1\text{mm}$ 。大亚湾核电站控制网最弱点点位精度达  $\pm 2\text{mm}$ ,秦山核电站的环形安装测量控制网的精度高达  $\pm 0.1\text{mm}$ 。

武汉长江二桥全桥的贯通精度(跨距和墩中心偏差)达毫米级。长达 30 多公里的杭州湾大桥的 GPS 首级控制网的最弱点点位精度高达  $\pm 1.4\text{mm}$ 。高 454m 的上海东方明珠电视塔对于长 114m、重 300t 的钢桅杆天线,安装的铅垂准直误差仅  $\pm 9\text{mm}$ 。

长 18.4km 的秦岭隧道(图 1-3),洞外 GPS 网的平均点位精度优于  $\pm 3\text{mm}$ ,一等精密水准线路长 120 多公里。已贯通的辅助隧道,在仅有一个贯通面的情况下,贯通后实测的横向贯通误差为 12mm,高程方向的贯通误差只有 3mm。

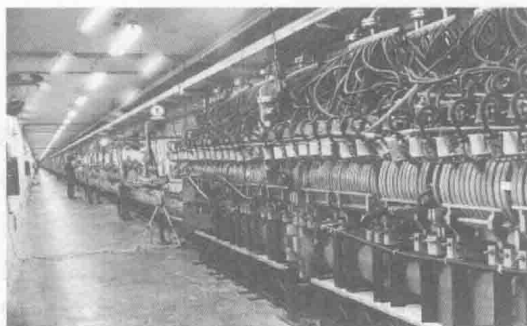


图 1-2 北京正负电子对撞机



图 1-3 秦岭隧道

国外的大型特种精密工程更不胜枚举。以大型粒子加速器为例,德国汉堡的粒子加速器研究中心,堪称特种精密工程测量的历史博物馆。1959 年建的同步加速器,直径仅 100m,1978 年的正负电子储存环,直径 743m,1990 年的电子质子储存环,直径 2000m。为了减少能量损失,改用直线加速器代替环形加速器,正在建的直线加速器长达 30km,100 ~ 300m 的磁件相邻精度要求优于  $\pm 0.1\text{mm}$ ,磁件的精密定位精度仅几个微米,并能以纳米级的精度确定直线度。用精密激光测距仪 TC2002K 进行距离测量,其测距精度与 ME5000 相当,平均边长为 50m 的 3800 条边,改正数小于  $\pm 0.1\text{mm}$  的占 95%。欧洲原子核研究中心 1990 年建成的环形正负电子对撞机,直径 8.6km,周长 27km,整个工程位于百米深的地下。美国的超导超级对撞机,其直径就长达 27km,为保证椭圆轨道上的投影变形最小且位于一平面上,采用了一种双重正形投影,所作的各种精密测量,均考虑了重力和潮汐的影响。

德国的露天煤矿大型挖煤机开挖量动态测量计算系统是 GPS、GIS 技术相结合在大型特种工程中应用的一个典型例子。大型挖煤机长 140m,高 65m,自重 8000t,其挖斗轮的直径达 17.8m,每天挖煤量可达 10 多万吨。为了实时动态地得到挖煤机的采煤量,在其上安置了 3 台 GPS 接收机,与参考站进行无线电实时数据传输和差分动态定位,挖煤机上两点间距离的精度可达  $\pm 1.5\text{cm}$ ,根据三台接收机的坐标,按一定几何模型可计算出挖煤机挖斗轮的位置及采煤层的截面,其平面精度为  $\pm 3\text{cm}$ ,高程精度为  $\pm 2\text{cm}$ 。结合露天煤矿的数字地面模型,可计算出采煤量,经对比试验,其精度高达 4%。

南非某一核电站的冷却塔高 165m,直径 163m,在整个施工过程中,要求每一高程面上

塔壁中心线与设计尺寸的限差小于  $\pm 50\text{mm}$ , 在塔高方向上每  $10\text{m}$  的相邻精度优于  $\pm 10\text{mm}$ 。由于在建造过程中发现地基地质构造不良, 出现不均匀沉陷, 使塔身产生变形, 为此, 要根据精密测量资料拟合出实际的塔壁中心线作为修改设计的依据。采用测量机器人用极坐标法做三维测量, 对每一施工层, 沿塔外壁设置了 1600 多个目标点, 在夜间可完成全部精密测量工作。对大量的测量资料, 通过恰当的数据处理模型使精度提高了一至数倍, 所达到的相邻精度高于设计要求。精密测量不仅可保证施工质量, 还为整治工程病害提供可靠的资料, 同时也能对整治效果作出精确评价。

瑞士阿尔卑斯山的哥特哈德特长双线铁路隧道长达  $57\text{km}$ , 为该工程的修改特别地重新进行了国家大地测量(LV95), 以厘米级的精度确定出了整个地区的大地水准面。为加快进度和避开不良地质段, 中间设了 3 个竖井, 共 4 个贯通面, 较只设一个贯通面可缩短工期 11 年。整个隧道的工程投资相当于我国的长江三峡水利枢纽工程。

## 1.4 工程测量学与相邻课程的关系

工程测量学与测绘学及其他学科课程之间有密切的关系(参见图 1-4)。大地测量学是工程测量学的理论基础, 主要包括: 几何大地测量中的椭球体部分, 国家控制网的建立和应用; 物理大地测量学中大地水准面、重力异常、垂线偏差等内容; 卫星大地测量学中的卫星轨道运动、GPS 定位原理及其应用等。在工程规划设计阶段, 常常需要用到国家中小比例尺的地形图系列; 建立工程或专题信息系统, 必须以各种比例尺的数字或电子地图为基础地理信息; 在新建铁路公路初步设计阶段, 常采用航空摄影测量方法生产供选线设计用的带状地形图; 近景摄影测量方法在特殊情况下的地形图测绘、变形监测、三维工业测量、文物保护、公安侦破、医疗体育等方面广为采用; 工程竣工测量与地籍测量和城市基本图测绘有密切关系。所以, 工程测量工作者必须具备大地测量学、地图制图学、摄影测量与遥感、地理信息系统以及地籍测量与土地管理方面的有关知识。

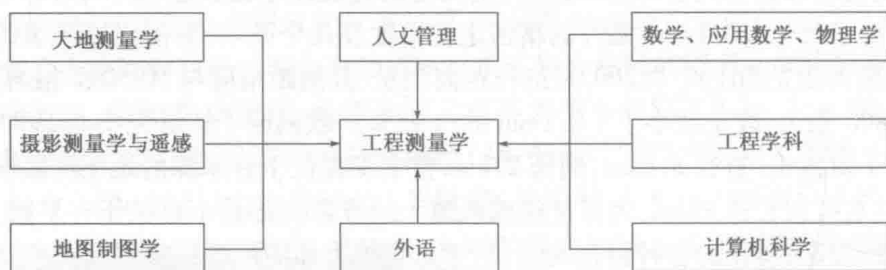


图 1-4 工程测量学与其他学科和课程的关系

误差理论、测量平差、数理统计是工程控制网及变形观测数据处理的基础, 与之相关的还包括最优化设计理论、数值计算方法、线性代数等方面的知识。

高等数学中的级数、微积分、微分方程, 物理学中的电磁波传播、力学、光学等内容在工程测量学中也应用得很普遍; 工程测量专用仪器及测量自动化则要求具备光、机、电(子)以及传感器方面的基础知识。

工程测量的服务对象是各种工程, 因此, 必须具备有关土建工程、机械工程、工程地质、