

GEO-SPATIAL INFORMATION SCIENCE

● 高等学校测绘工程专业核心教材



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 工程测量学

Engineering Geodesy

张正禄 等编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

TB22  
Z-983.2

高等学校测绘工程专业核心教材



普通高等教育“十五”国家级规划教材

# 工程测量学

Engineering Geodesy

张正禄 李广云 潘国荣 靳奉祥 编著  
张献洲 刘庆元 岳建平 郑文华

5.11

教10/03



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程测量学/张正禄等编著. —武汉:武汉大学出版社, 2005. 10  
高等学校测绘工程专业核心教材  
普通高等教育“十五”国家级规划教材  
· ISBN 7-307-04626-1

I. 工… I. 张…[等] III. 工程测量—高等学校—教材  
IV. TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 062397 号

责任编辑:王金龙      责任校对:程小宜      版式设计:支 笛

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:湖北新华印务有限责任公司

开本:787×1092 1/16 印张:29.125 字数:701千字

版次:2005年10月第1版 2005年10月第1次印刷

ISBN 7-307-04626-1/TB·17 定价:45.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

## 内 容 提 要

---

工程测量学是测绘科学技术的二级学科，也是一门技术性、应用性很强的学科。本书既注重讲述该学科的基本理论、方法与勘测技术，又结合典型工程的测量实践，涵盖了从经典理论到最新技术应用，从工程建筑物的设计、施工放样到变形监测以及工业测量、精密工程测量等的全部内容，包括了作者的教学、科研和科技开发的经验、知识和成果。

本书被列为普通高等教育“十五”国家级教材，可作为国内各大专院校测绘工程专业在校、函授、成人教育本科生及专科生的教材，对从事各种测绘工作的教学、科研、生产人员来说，该书也是一本必备的工具性参考书。

# 前 言

目前,国内测绘工程专业的《工程测量学》教材主要采用由李青岳教授1982年主编、1993年由陈永奇教授主持修订的高等学校试用教材,基本按所谓纵向处理原则即工程建设三个阶段(设计阶段、施工阶段、运行阶段)的测量内容进行编写。

新编著的《工程测量学》被列为普通高等教育“十五”国家级教材。为了将这本书编好,博采众家之长,我们采用了校际合作、集体编著的方式进行。参加编写的有武汉大学、解放军信息工程大学、同济大学、西南交通大学、河海大学、中南大学和山东科技大学等七所大学。编写中坚持以辩证唯物主义思想为指导,理论与实际相结合的原则,充分反映工程测量学科的全貌和最新发展;做到有新体系、新思想、新材料、新内容、新成果;资料翔实可靠,论述清楚严谨,文字深入浅出,图表生动齐全;体现宽口径、复合型人才培养的教改精神。

全书共分十五章,每章给出了习题和思考题。第一章绪论,主要讲述工程测量学的内容与发展历史,与相邻课程的关系等。第二章到第八章为第一篇:工程测量学的基本理论、方法与技术。内容包括工程测量学的仪器与方法,工程控制网布设的理论与方法,工程建设各阶段的测量工作,从大比例尺地形图测绘、工程建筑物的施工放样到变形监测,还有工业设备的安装和检校测量等。第九章到第十四章为第二篇:典型工程的测量和实践。主要介绍线状工程、桥梁工程、水利工程、工业与民用建筑、地下工程等典型工程以及以大型粒子加速器为代表的精密工程等典型工程的有关测量理论和实践。

参加编写的作者及分工情况如下:

张正禄教授,博士生导师(武汉大学),撰写第一章、第三章、第七章,负责全书的组织、设计、统稿。

李广云教授,博士生导师(解放军信息工程大学),撰写第四章、第八章、第十五章。

潘国荣教授,博士生导师(同济大学),撰写第六章、第十二章。

靳奉祥教授,博士生导师(山东科技大学),撰写第十四章。

张献洲教授,博士生导师(西南交通大学),撰写第九章、第十章。

刘庆元教授,博士生导师(中南大学),撰写第二章、第五章。

岳建平教授,博士生导师(河海大学),撰写第十一章。

郑文华副教授,硕士生导师(山东科技大学),撰写第十三章。

张松林博士、罗长林、邓勇博士生和黎明、王志华硕士对本书的电子文稿和排版打印稿件作了整理、校对工作,在此表示感谢。

本书的部分图表取自所列的参考文献,在此向原作者致谢。

由于编著者的水平有限,书中存在谬误之处,敬请读者批评指正。

作 者  
2005年5月1日

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 工程测量学在测绘学中的定位和研究应用领域 .....	1
1.2 工程测量学的内容 .....	3
1.3 工程测量学的结构体系 .....	7
1.4 工程测量学的发展概况 .....	8
1.5 工程测量学与相邻课程的关系.....	11
<b>第二章 工程建设中的测量工作与信息管理</b> .....	13
2.1 工程勘测设计阶段测量工作.....	13
2.2 工程施工建设阶段的测量工作.....	16
2.3 工程运营管理阶段的测量工作.....	18
2.4 工程建设中的测量信息管理.....	19
<b>第三章 工程控制网布设的理论与方法</b> .....	27
3.1 工程控制网的分类和作用.....	27
3.2 工程控制网的基准和建立方法.....	31
3.3 工程控制网的质量准则.....	35
3.4 工程控制网的优化设计.....	43
3.5 典型工程控制网.....	49
3.6 控制点的标石与标志.....	53
3.7 工程控制测量内外业一体化.....	58
<b>第四章 工程测量的仪器与方法</b> .....	62
4.1 角度测量.....	62
4.2 距离测量.....	70
4.3 高程测量.....	77
4.4 准直测量.....	85
4.5 坐标测量.....	89
4.6 其他测量仪器 .....	105

<b>第五章 工程建设中的地形图与应用</b> .....	109
5.1 工程规划阶段对地形图的要求 .....	109
5.2 大比例尺地形图及应用 .....	112
5.3 工程竣工图测绘 .....	120
5.4 水下地形图测绘 .....	126
5.5 数字地面模型和勘测设计一体化 .....	135
<b>第六章 工程建筑物的施工放样</b> .....	142
6.1 概述 .....	142
6.2 建筑限差和精度分配 .....	142
6.3 常用的施工放样方法 .....	143
6.4 特殊的施工放样方法 .....	153
6.5 曲线测设 .....	163
6.6 施工放样一体化 .....	170
<b>第七章 工程的变形监测和数据处理</b> .....	175
7.1 工程变形监测的基础知识 .....	175
7.2 变形监测方案设计 .....	181
7.3 变形监测方法和自动化 .....	187
7.4 变形观测数据处理 .....	195
7.5 变形监测资料整理、成果表达和解释 .....	212
<b>第八章 工业设备的安装和检校测量</b> .....	228
8.1 精密微型安装测量控制网的建立 .....	228
8.2 设备安装和检校测量仪器与方法 .....	231
8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量 .....	236
8.4 三维工业测量系统 .....	249
8.5 大型天线安装测量实践 .....	270
<b>第九章 线状工程测量</b> .....	283
9.1 线状工程测量的特点 .....	283
9.2 铁路工程测量 .....	283
9.3 公路工程测量 .....	296
9.4 管线测量 .....	302
9.5 线路勘测设计一体化 .....	307

<b>第十章</b>	<b>桥梁工程测量</b> .....	<b>315</b>
10.1	桥梁结构基础知识.....	315
10.2	桥址选线测量.....	317
10.3	桥梁施工控制测量.....	318
10.4	桥墩台基础的施工放样.....	323
10.5	大型斜拉桥、悬索桥高塔柱施工测量.....	328
10.6	大型斜拉桥索道管精密定位测量.....	332
10.7	桥梁施工和运营期的变形监测.....	337
<b>第十一章</b>	<b>水利工程测量</b> .....	<b>346</b>
11.1	概述.....	346
11.2	河流梯级开发规划阶段的测量.....	348
11.3	水利枢纽工程设计阶段的测量.....	351
11.4	水利枢纽工程的施工控制测量.....	353
11.5	水利枢纽工程的施工放样.....	354
11.6	水利枢纽工程的变形监测.....	357
<b>第十二章</b>	<b>工业与民用建筑测量</b> .....	<b>363</b>
12.1	概述.....	363
12.2	大型工业厂区的控制测量和施工测量.....	363
12.3	市政工程测量.....	371
12.4	高层和高耸建筑物测量.....	374
12.5	文物和古建筑测量.....	379
<b>第十三章</b>	<b>地下工程测量</b> .....	<b>387</b>
13.1	地下工程的种类、特点及对测量的要求.....	387
13.2	隧道贯通误差预计.....	388
13.3	地面和地下控制测量.....	392
13.4	联系测量.....	397
13.5	陀螺经纬仪及定向测量.....	403
13.6	隧道施工与竣工测量.....	413
<b>第十四章</b>	<b>大型粒子加速器的精密工程测量</b> .....	<b>419</b>
14.1	粒子加速器及其测量工作概述.....	419
14.2	工程设计阶段的测量工作.....	422
14.3	工程施工阶段的测量工作.....	424



14.4	设备安装阶段的测量工作 .....	433
14.5	探测器的组装测量 .....	435
14.6	测量实验室介绍 .....	438
<b>第十五章 展 望 .....</b>		<b>441</b>
15.1	现代测绘学与广义工程测量学 .....	441
15.2	工程测量内外业一体化和自动化 .....	442
15.3	工程测量学的明天 .....	448
<b>参考文献 .....</b>		<b>451</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 工程测量学在测绘学中的定位和研究应用领域

### 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(高压输电线、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的信息进行管理和使用的学科,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的理论、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,包括存在(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

测绘学或称测绘科学和技术是一门具有悠久历史和现代发展的一级学科。该学科无论怎样发展,服务领域无论怎样拓宽,与其他学科的交叉无论怎样增多或加强,学科无论出现

怎样的综合和细分,学科名称无论怎样改变,学科的本质和特点都不会改变。总的来说,测绘学的二级学科仍应作如下划分:

—大地测量学(包括天文大地测量、几何大地测量、物理大地测量、空间大地测量、卫星大地测量和海洋大地测量等);

—工程测量学(含矿山测量。国际上,许多矿山测量工作者认为他们所从事的工作与工程测量不同,应从工程测量中分离出来,并成立了矿山测量协会,但矿山测量是工程测量的分支);

—摄影测量学与遥感;

—地图制图学;

—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。

值得说明的是,随着社会的发展、科技的进步,教育不断改革,目前我国测绘本科只有“测绘工程”一个专业,且有 60 余所高校设有此专业,这对宽口径培养人才无疑很有好处,但从就业角度来说,还需要将其二级学科作为专业方向进行培养。在这 60 余所高校中,大多数是以工程测量学这一学科方向为主。

### 1.1.3 研究应用领域

如上所述,国内一般把与工程建设有关的工程测量划分为规划设计、施工建设和运营管理三个阶段;也有按行业划分成:线路工程测量(铁路、公路和管线等)、水利工程测量、桥梁工程测量、隧道工程测量、建筑工程测量、矿山测量、海洋工程测量、军事工程测量、三维工业测量等,几乎每一行业的工程测量都有相应的著作或教材。

由 Hennecke、Mueller、Werner 三位德国学者所编著的德文工程测量学原著,主要按下述内容进行划分和编写:

—测量仪器和方法;

—线路、铁路、公路工程测量;

—高层建筑测量;

—地下建筑测量;

—安全监测。

由于工程测量的研究应用领域非常广泛,发展变化也很快,因此编写一本能反映整个学科全貌和个别工程特点的教科书十分困难。目前国内外尚没有一本全面涉及工程测量学理论、方法、技术和实际应用的现代专著或教材。

国际测量师联合会(FIG)的第六委员会称做工程测量委员会,开始,它下设四个工作组:测量方法和限差;土石方计算;变形测量;地下工程测量。此外还设了一个特别组:变形分析与解释。后来,变成了六个工作组和两个专题组。六个工作组分别是:

—大型科学设备的高精度测量技术与方法;

—线路工程测量与优化;

—变形测量;

—工程测量信息系统;

—激光技术在工程测量中的应用;

—电子科技文献和网络。

两个专题组分别是：

- 工程和工业中的特殊测量仪器；
- 工程测量标准。

现在,又有一些改变。德国、瑞士、奥地利三个德语语系国家自 20 世纪 50 年代发起组织了一个每隔 3~4 年举行一次的“工程测量国际学术讨论会”,到 2004 年已有 14 届了,每一届都有几个与当时发展有关的专题,如 1988 年前的专题有：

- 测量仪器和数据获取；
- 数据解释、处理和应用；
- 高层建筑物和设备安装测量；
- 地下和深层建筑物测量；
- 环境和工程建筑物变形监测。

1992 年的专题是：

- 测量理论与测量方案；
- 测量技术和测量系统；
- 信息系统和 CAD；
- 在建筑工程和工业中的应用。

1996 年的专题是：

- 测量和数据处理系统；
- 监测和控制；
- 在工业和建筑工程中的质量问题；
- 数据模型和信息系统；
- 交叉学科的大型工程项目。

2004 年的专题是：

- 大型工程测量项目；
- 测量和数据处理技术；
- 监测和风险管理；
- 瑞士阿尔卑斯山特长隧道。

中国测绘学会下设有工程测量分会,每两年举办一次全国性的学术会议,会议内容和主题根据当时的情况确定。各省的测绘学会,下设有工程测量专业委员会,开展经常性的活动。从以上可见,工程测量学研究专题很多、应用领域很广,涉及建筑工程和工业中的大型工程项目,既要研究测量的理论、技术与方法,又要研究数据的获取、处理与应用;既有测量仪器的研制,又有信息系统的建立;既有相对的稳定性,又在不断的发展变化,与时俱进。

## 1.2 工程测量学的内容

### 1.2.1 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以及工程竣工测量、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。

## 1.2.2 按服务对象划分

工程测量学按所服务的对象分为建筑工程测量、水利工程测量、线路工程测量、桥隧工程测量、地下工程测量、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) 工程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 万至 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 1:2 000 到 1:5 000 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测图。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 1:1 000, 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测绘。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 1:1 000 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,属于多学科的交叉领域。

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多彩:网的精度是愈高愈好,需要具有更高的可靠性和灵敏度;应针对精度、可靠性以及灵敏度作网的优化设计计算;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、自动化程度愈来愈高。测量机器人是电子全站仪中的极品,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,称为基维线测量或准直测量。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 与振动激光快速遥测仪等。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,显著的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,还能直接切换到 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、无接触、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。

### 1.2 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。

## 1.3 工程测量学的结构体系

在这本《工程测量学》教材中,我们采用了“特殊与一般”、“纵向与横向处理”相结合的结构体系。所谓“特殊”,指每一个工程的特殊性;“一般”指各种工程的共性(一般性)。对于共性,进行统一讲解,而对于特殊性,则针对某一个工程进行具体描述。所谓“纵向处理”,是指按工程建设的三个阶段阐述测量工作的理论、方法和技术;而“横向处理”是指按典型工程分别进行讲述。

本《工程测量学》教材,采用了纵向结构体系,在第一篇“工程测量学的基本理论、方法与技术”中,分别用一章来讲述“工程建设中的测量工作与信息管理”、“工程控制网布设的理论和方法”、“工程测量学的仪器与方法”、“工程建设中的地形图测绘”、“工程建筑物的施工放样”、“工程建筑物的变形监测”、“工业设备的安装和检校测量”,突出了该二级学科的基本理论、方法与技术,具有一般性,是纵向处理。这一篇也是测绘工程专业各选修方向的必学内容。第二篇“典型工程的测量和实践”则体现了各典型工程的特殊性,具有横向结构体系特点,可根据各测绘工程专业和选修方向的特点选择性地学习。“绪论”和“展望”前



后相呼应,既是铺垫,又有总结,统领全书和指明本学科的发展方向。

## 1.4 工程测量学的发展概况

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(Engineering Surveying 或 Engineering Geodesy)。

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一定的工具和方法。我国早在二千多年前的夏商时代,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,山行乘桴,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(kuf)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达分不开。

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。宋朝按乡登记和清丈土地,出现地块图。到了明朝洪武四年,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。

我国的采矿业是世界上发展最早的国家,在公元前二千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,在周朝已建立有专门的采矿部门,开采时很重视矿体形状,并使用矿产地质图来辨别矿产的分布。我国四大发明之一的指南针,从司南、指南鱼算起,有二千多年的历史,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“蜃山堙谷,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。唐代李筌指出“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