



# 工程测量学

*Gongcheng Celiangxue*

胡荣明 主编

中国矿业大学出版社



# 工程测量学

胡荣明 主编

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书较为系统地介绍了工程测量学的基本理论、技术与方法。全书共12章,其中第1章至第5章为工程测量的基础理论部分,第6章至第11章为工程测量应用部分,主要介绍了不同类型工程测量的技术与方法,第12章为现代工程测量信息化管理。基础理论部分主要介绍了工程控制网理论与应用、工程地形图测绘与应用、工程测量常用仪器与方法、工程建筑物施工放样;工程测量应用部分主要介绍了线路工程测量、高速铁路工程测量、城市轨道交通测量、水利工程测量、隧道工程测量、建筑工程测量等各种工程从勘测、施工到运营监测的内容、技术与方法;第12章系统介绍了现代信息化测量工程的管理方法及系统构成。

本书可作为高等学校测绘工程本科专业的教学用书,也可作为其他相关专业学生和技术人员的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程测量学/胡荣明主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2013.4

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1842 - 1

I. ①工… II. ①胡… III. ①工程测量—高等学校—教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第063399号

书 名 工程测量学  
主 编 胡荣明  
责任编辑 潘俊成  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83885307 83884995  
出版服务 (0516)83885767 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×1092 1/16 印张 24 字数 614 千字  
版次印次 2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷  
定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



## 前 言

工程测量学是测绘学的重要分支,也是一门技术性、应用性很强的学科。它涵盖工业与民用建筑、铁路、公路、轨道交通、水利、隧道等建设领域,贯穿于工程建设的始终,直接为工程建设服务。

随着社会的进步和科学技术的发展,测量工作面临着前所未有的机遇和挑战。一方面是新、奇、特工程建设越来越多,工程建设的规模越来越大,难度增大,另一方面则是新技术和新方法的不断涌现,使得工程测量的内涵、手段发生了深刻的变化,同时进一步扩展了工程测量的服务领域。

作者在编写过程中收集了大量资料,并结合自身教学、科研及科技开发的经验、知识和成果,注重理论、技术和方法与工程实际应用的结合。本书与同类教材相比,主要特色为:① 全书加强了工程测量的基础理论编写,对地形图测绘方法与应用、工程测量常用仪器、工程控制网理论与方法部分均增加了新的内容;② 工程应用部分详细介绍了高速铁路工程测量、城市轨道交通测量、水利水电工程测量等新内容;③ 工程应用部分在内容编排上将同类工程的勘测、施工放在同一章节中进行编写;④ 本书介绍了现代测量信息管理的方法及测量信息管理系统的建立及其意义。

本书各个章节的安排如下:第一章,绪论;第二章,工程控制网理论和方法;第三章,工程地形测绘与应用;第四章,工程测量常用仪器与方法;第五章,工程建筑物的施工放样;第六章,线路工程测量;第七章,高速铁路工程测量;第八章,城市轨道交通测量;第九章,水利施工测量;第十章,隧道工程测量;第十一章,建筑工程测量;第十二章,测量信息管理系统。

本书各部分内容由浅入深、循序渐进。全书由西安科技大学胡荣明副教授主编,杨成斌、魏曼硕士研究生对本书电子文稿和排版打印稿做了部分整理和校对工作,在此表示感谢。

本书在编写过程中引用了大量的参考文献,在此向原作者深表感谢。由于编者水平所限,书中难免存在不足和疏漏,恳切希望同仁及读者批评指正。

作 者

2012年12月

<b>目 录</b>	
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 工程测量学的学科定义 .....	1
1.2 工程测量学的研究内容 .....	2
1.3 工程测量学在国家经济建设和发展中的作用 .....	3
1.4 工程测量学的研究应用领域及其特点 .....	3
1.5 工程测量学的发展 .....	6
<b>第 2 章 工程控制网理论与方法</b> .....	9
2.1 概述 .....	9
2.2 工程测量坐标系统.....	13
2.3 工程控制网的基准.....	15
2.4 坐标变换与基准变换.....	19
2.5 工程控制网的建立.....	23
<b>第 3 章 工程地形图测绘与应用</b> .....	28
3.1 工程规划对地形图的要求.....	28
3.2 全数字化野外测图.....	31
3.3 大比例尺无人机测图.....	35
3.4 水下地形图测绘.....	36
3.5 纵横断面图绘制.....	43
3.6 工程竣工图测绘.....	46
3.7 大比例尺地形图应用.....	52
<b>第 4 章 工程测量常用仪器与方法</b> .....	59
4.1 智能全站仪.....	59
4.2 GPS-RTK .....	68
4.3 三维激光扫描仪.....	71
4.4 陀螺经纬仪.....	74
4.5 电子水准仪.....	78
4.6 其他测量仪器.....	80

<b>第 5 章 工程建筑物的施工放样</b> .....	82
5.1 工程放样概述 .....	83
5.2 建筑限差和精度分配 .....	84
5.3 施工放样的方法和技术 .....	85
5.4 曲线放样 .....	94
<b>第 6 章 线路工程测量</b> .....	104
6.1 概述 .....	104
6.2 线路初测 .....	104
6.3 线路定测 .....	105
6.4 线路施工测量 .....	115
6.5 桥梁施工测量 .....	119
<b>第 7 章 高速铁路工程测量</b> .....	123
7.1 高速铁路控制测量 .....	123
7.2 CP I、CP II 和 CP III 控制网 .....	131
7.3 高速铁路工程测量的内容和方法 .....	147
7.4 高速铁路工程变形监测 .....	159
<b>第 8 章 城市轨道交通测量</b> .....	171
8.1 概述 .....	171
8.2 暗挖隧道施工测量 .....	177
8.3 变形监测 .....	203
<b>第 9 章 水利施工测量</b> .....	243
9.1 大坝施工测量 .....	243
9.2 大坝的变形观测 .....	255
<b>第 10 章 隧道工程测量</b> .....	267
10.1 地面控制测量 .....	267
10.2 联系测量 .....	271
10.3 隧道内控制测量 .....	289
10.4 隧道施工测量 .....	295
10.5 隧道竣工测量 .....	315
<b>第 11 章 建筑工程测量</b> .....	317
11.1 概述 .....	317
11.2 建筑控制测量 .....	318
11.3 建筑场地平整测量 .....	322

---

11.4	建筑物轴线放样	330
11.5	建筑物基础施工测量	336
11.6	高层建筑物测量	342
<b>第 12 章</b>	<b>测量信息管理系统</b>	<b>344</b>
12.1	地铁施工测量管理	344
12.2	传统测量管理模式	346
12.3	地铁施工安全管理的网络化模式	346
12.4	测量信息管理系统的构建	347
12.5	小结	370
<b>参考文献</b>		<b>372</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 工程测量学的学科定义

广义工程测量学是研究并提供地表上下、周围空间建筑及非建筑工程几何物理信息和图形信息的应用技术学科。一切高科技发展的成就,都可以用来解决精密复杂的工程测量问题,因此它不是一个单一的学科,而是许多学科之间相互渗透、相互补充、相互促进的技术学科。工程测量主要是应用大地测量和摄影测量的仪器、工具、方法以及计算和平差理论,解决工程建设中测量问题的一门应用学科。因此,它与其他测量学科的关系非常密切。工程测量的显著特点是与工程的设计、施工紧密联系。工程测量的程序,从属于工程施工的程序。工程测量的精度要求与工程的性质和施工方法直接相关。一方面,它需要应用现代大地测量、摄影测量与遥感、地图制图、地理学、环境科学、建筑学、力学、计算机科学、人工智能、自动化理论、计量技术、电子工程和网络技术等的新技术、新理论解决工程测量中的难题,丰富其内容(参见图 1-1);另一方面,通过在工程测量中的应用,才会使这些新的科学成就更富有生命力。

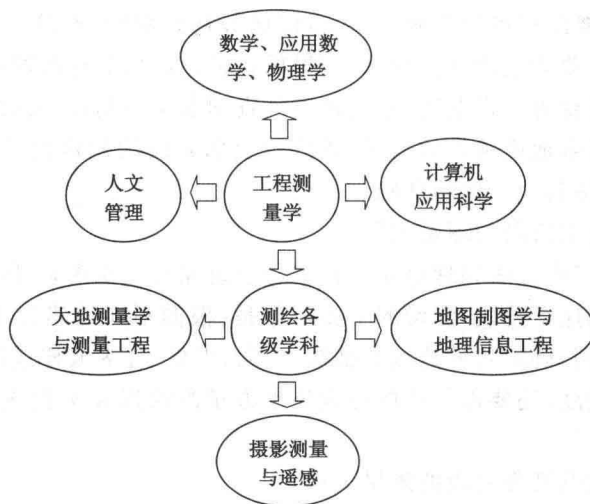


图 1-1 工程测量学与其他学科的关系

工程测量(Engineering Surveying)是研究在各种工程建设的规划设计、施工建设和运营管理各阶段进行测量工作的理论、方法和技术,是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用,是综合性的应用测绘科学与技术。



按工程建设的进行程序,工程测量可分为规划设计阶段的测量、施工兴建阶段的测量和竣工后的运营管理阶段的测量。规划设计阶段的测量主要是提供地形资料,取得地形资料的方法是在所建立的控制测量的基础上进行地面测图或航空摄影测量。施工兴建阶段的测量的主要任务是按照设计要求在实地准确地标定建筑物各部分的平面位置和高程,作为施工与安装的依据。一般也要求先建立施工控制网,然后根据工程的要求进行各种测量工作。竣工后的运营管理阶段的测量,包括竣工测量以及为监视工程安全状况的变形观测与维修养护等测量工作。

按工程测量所服务的工程种类,可分为建筑工程测量、线路测量、桥梁与隧道测量、矿山测量、城市测量和水利工程测量等。此外,还将用于大型设备的高精度定位和变形观测称为高精度工程测量;将摄影测量技术应用用于工程建设称为工程摄影测量;而将以电子全站仪或地面摄影仪为传感器在电子计算机支持下的测量系统称为三维工业测量。

## 1.2 工程测量学的研究内容

工程测量学研究的内容随着工程建设的不同而变化,涵盖工业与民用建筑、铁路、公路、桥梁、隧道、水利、管线、城市建设和地下工程等各个建设领域,贯穿于各种工程建设的始终,为工程建设直接服务。工程测量的基本方法、基本理论是相同的,但是根据工程的性质、要求、建筑环境不同而各有特点。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“工程勘察”、“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。

第一,建设工程勘察、规划与设计阶段的测量工作。

任何工程建设都要经过可行性研究、项目评估等初始阶段,在这个阶段里,测量作为工程建设的基础性工作,要为设计、可行性研究提供各种比例尺的地形图;大区域的工程建设,要建立测量控制网,还要为工程地质、水文地质勘查和水文检测提供图纸、资料 and 具体点位;对于一些重要工程、复杂地质条件的地区,要进行上部岩层的稳定性监测等工作。可以说,这个阶段的测量工作是其他工作的基础。

第二,建设工程施工阶段的测量工作。

施工阶段的测量工作方法和理论是工程测量学研究的主要内容,因工程的不同,其测量方法、要求也不同。在这个阶段,测量的主要工作是:根据不同的建设工程,建立各种等级、形状的建筑施工控制网;确定各种建筑的轴线、方向、点位(称为放样或标定),作为实地修建的依据;为监测工程进度,还要进行开挖与建筑土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。

第三,建设工程运营管理阶段的测量工作。

建设工程是为人类的生产、生活服务的,工程建设完工后,进入运营与管理阶段。在运营阶段,为了监测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、沉降、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监测。对于资源开发与勘察工程,测量主要是为生产服务,称为生产测量;对于其他工程,则要对建筑物进行变形监测,对大型设备的运行进行检测、校正,其目的是保证建设工程在使用过程中的稳定与安全,保证各种生产顺利进行。

## 1.3 工程测量学在国家经济建设和发展中的作用

工程测量学是国家经济建设的先行。随着科学技术的飞速发展,工程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、水利电力、能源、航天和国防等各种工程建设部门,可列举一些如下:

① 城乡规划和建设离不开工程测量学。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 need 要加强规划与指导,而搞好城乡建设规划,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工程测量学。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,都需要用工程测量技术手段。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工程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、水利建设离不开工程测量学。铁路、公路的建设从选线、勘测、设计到施工建设都离不开工程测量学。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,工程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工程测量学。建设现代化的农业,首先要进行土地资源调查,摸清土地“家底”,而且还要充分认识各地区的具体条件,进而制定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,反映了地表的各种形态特征、发育过程、发育程度等,对土地资源的开发利用具有重要的参考价值;土壤图,表示了各类土壤及其在地表分布特征,为土地资源评价和估算、土壤改良、农业区划提供科学依据。

总而言之,测量工作贯穿于各种建设工程的始终,是各种工程建设必不可少的基础性工作和辅助性工作。

## 1.4 工程测量学的研究应用领域及其特点

### 1.4.1 研究应用领域

测绘学科理论、技术和测绘仪器的发展,对工程测量理论和方法起到变革性的作用。工程测量学是一门应用学科,它是研究地球空间中几何实体测量和抽象几何实体测设的理论、方法和技术,主要研究在工程与工业建设、城市建设与国土资源开发、水陆交通环境工程和减灾救灾等事业中,进行地形和有关信息的采集与处理、施工放样、设备安装、变形监测与分析预报等方面的理论和技术,以及与之有关的信息管理与使用。

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(如铁路、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。本教材归纳总结了国内外有关工程测量专著及教材的主要内容,力图能全面地涉及工程测量学理论、方法、技术和实际应用。

#### 1.4.2 本教材的主要研究领域

本教材主要研究领域包括:工程控制测量及数据处理,介绍了工程测量的坐标系,控制网的基准,坐标变换与基准变换以及工程坐标系的建立;数字地形资料的获取与表达,研究了工程规划对地形图的要求,地形图获取的不同方式,不同应用地形图的获取以及大比例尺地形图应用等方面知识;工程测量专用仪器的研制与应用,包括智能全站仪, GPS-RTK, 三维激光扫描仪,陀螺经纬仪,电子水准仪等测量仪器的介绍;工程建筑物的施工放样,研究了工程测量中的建筑限差和精度分配,施工放样以及曲线放样的方法和技术;工程测量具体在行业中应用的方法和技术;测量信息管理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,现阶段一般采用数字化机助成图法。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) 工程建设施工阶段的测量工作

将设计的抽象的几何实体放样(或称测设)到实地上去,成为具体的几何实体所采用的测量方法和技术称为施工放样。放样可归纳为点、线、面、体的放样。点放样是基础,放样点必须满足特定的条件,如在一条给定的直线或曲面上,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、自动化就显得特别重要。在不同范畴的行业应用中工程测量的内容和技术不尽相同,下面概括介绍本书中探讨的工程测量在不同行业的具体应用。

铁路、公路、桥涵、隧道、输电线路和输油(气)管道等工程均属于线路工程。各种线路工程在勘测设计阶段、施工阶段以及运营管理阶段所进行的测量工作称为线路工程测量。它的主要任务:一是为线路工程的规划设计提供地形信息(包括地形图和断面图);二是将设计的线路位置测设于实地,为线路施工提供依据。这些内容将在本书第6章具体介绍。

由于客运专线铁路速度高等特点,为了达到在高速行驶条件下旅客列车的安全性和舒适性,要求客运专线铁路必须具有非常高的平顺性和精确的几何参数,精度要保持在毫米级的范围内。对于无砟轨道,轨道施工完成后基本不再具备调整的可能性,施工误差、线路运营以及线下基础沉降所引起的轨道变形只能依靠扣件进行微量的调整。这就要求比有砟轨道更严格的施工精度,其测量方法、测量精度与传统的铁路工程完全不同。这些内容将在本书第7章对其进行详细介绍。

城市轨道交通工程测量是工程测量的一个分支,是研究城市轨道交通工程和工程环境在建设及运营期间基础测绘、施工测量、变形监测等数据的采集、测设、处理、分析、预报以及测绘工作管理的理论和技术,是一门应用性学科。它主要以建筑工程、工程环境、施工机器和施工测量管理为研究服务对象,主要满足建设工程空间定位和测设、工程及其周边环境安全监测以及工程管理和监测等对测绘工作的要求。

水利工程测量是为水利工程建设服务的专门测量,属于工程测量学的范畴。在河流合适的河段修建不同类型的建筑物,用来控制和支配水流,这些建筑物被称为水工建筑物。由不同类型的水工建筑物组成的综合体称为水利枢纽,而大坝是水利枢纽的重要组成部分。本书第9章介绍了土坝及混凝土重力坝施工放样的主要内容及基本方法。

隧道工程有铁路隧道、公路隧道及水利工程的输水隧洞等,属于地下工程。由于隧道所处位置的地质条件及净空、形状、埋置深浅程度、长度、施工方法不同,因此对测量工作的要求也不同。本书第10章具体介绍了隧道工程测量中的地面控制测量、联系测量、隧道内控制测量、隧道施工测量、隧道竣工测量等测量方法和技术。

本书第11章具体介绍了工程测量在建筑方面的应用,即建筑工程测量。建筑工程测量是工程测量中十分重要的一部分,包括规划设计、建筑施工、运营管理三个阶段的测量工作。规划设计阶段主要是地形图测绘以及其他资料的收集。建筑施工阶段是把图纸上已经设计好的建筑物、构筑物,按照设计要求测设到相应的地面上,并设置各种标志,作为施工依据。运营管理阶段的测量主要是建筑物的变形监测。

在长期的测绘工作中会积累大量的测量资料,这些资料是与测绘相关的各项工作发展的重要基础信息资源。然而,在测量资料的保存和利用方面还存在着存储手段单一、纸质存储、人工管理低效等弊端,这已经无法满足现阶段对测量资料准确性、可靠性、安全性以及查询使用便捷性等方面的需求。因而,在信息化高速发展的今天,利用专业技术及计算机技术,通过建立统一的数据库管理系统,对测量数据进行统一管理,改变现有的资料存储单一、不安全、数据冗余、查找不便等缺点,实现测量资料的及时更新维护和有效管理。本书第12章介绍了测量信息管理系统,探讨测量管理系统的应用意义及其建立过程等内容。

## 1.5 工程测量学的发展

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而来的。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 世纪建设的埃及大金字塔,其形状与方向都很准确,这说明当时就已有放样的工具和方法。我国早在 2000 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,山行乘橇。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、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。

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。

早在公元前 1000 多年以前,我国就诞生了地图。《汉书·郊祀志》中有:“禹收九牧之金,铸九鼎,象九州”的记载。《左传》中有:“惜夏方有德也,远方图物,贡金九牧,铸鼎像物,百物而为之备,使民知神奸”。意思是说,在夏朝极盛时期,远方的人把地貌、地物以及禽兽画成图,而九州的长官把图和一些金属当做礼品献给夏禹,禹收下“九牧之金”铸成鼎,并把远方人画的画铸在鼎上,以便百姓从这些图画中辨别各种事物。文中的“百物而为之备”,很明显说明是供牧人、旅行者使用的图。可惜,原物流传至 2000 多年前的春秋战国时,因战乱被毁而失传。

根据宋代思想家朱熹推断,后来的《山海经图》是从夏代九鼎图像演变而来的,也是一种原始地图。在《山海经图》的“五藏三经图”上,画着山、水、动物、植物、矿物等,而且注记着它们的方位,是较规范的地图形式。由此可以说,中国在夏代已经有了原始的地图。

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,都进行了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迅速的发展。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、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,甚至在医学上和罪证调查中,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。苏黎世高等工业大学马西斯教授指出:“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同步,并且能够满足大型特种精密工程中对测量所提出的愈来愈高的需求。

举世瞩目的三峡水利枢纽工程,小浪底、二滩和溪洛渡等水利枢纽工程,长达30多千米的杭州湾大桥和东海大桥工程,已竣工的秦岭隧道(18.4 km),山西省引黄工程南干线5<sup>#</sup>隧洞(长26.5 km)、7<sup>#</sup>隧洞(长42.6 km),以及辽宁省大伙房引水工程隧道(长达85.3 km),上海磁悬浮铁路,北京国家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对测绘的要求是工程测量学发展的动力,大型精密工程不仅结构复杂,而且对测量精度有很高要求,工程测量要满足这样高的精度,就要开展一系列的研究工作,包括选择最优布设方案,埋设最稳定标志,研制专用的测量仪器,采用合理的测量方法、数据处理方法和建立数据库等。下面结合国内外有关工程实例予以说明。

三峡水利枢纽工程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 $\pm 1.5$  mm。

北京正负电子对撞机的精密控制网,点位精度达 $\pm 0.3$  mm,设备定位精度优于 $\pm 0.2$  mm,200 m长的直线段漂移管准直精度达 $\pm 0.1$  mm。大亚湾核电站控制网最弱点点位精度达 $\pm 2$  mm,秦山核电站的环形安装测量控制网的精度高达 $\pm 0.1$  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多千米的杭州湾大桥的GPS首级控制网的最弱点点位精度高达 $\pm 1.4$  mm。高454 m的上海东方明珠电视塔对于长114 m、重300 t的钢桅杆天线,安装的铅垂准直误差仅 $\pm 9$  mm。

长 18.4 km 的秦岭隧道,洞外 GPS 网的平均点位精度优于  $\pm 3$  mm,一等精密水准线路长 120 多千米。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 12 mm,高程方向的贯通误差只有 3 mm。

国外的大型特种精密工程更不胜数。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 100 m,1978 年的正负电子储存环,直径 743 m,1990 年的电子质子储存环,直径 2 000 m。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 30 km,100~300 m 的磁件相邻精度要求优于  $\pm 0.1$  mm,磁件的精密定位精度仅几微米,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 50 m 的 3 800 条边,改正数小于  $\pm 0.1$  mm 的占 95%。美国的超导超级对撞机,其直径达 27 km,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。所做的各种精密测量,均考虑了重力和潮汐的影响。主网和加密网采用 GPS 测量,精度优于 1 ppm。

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 140 m,高 65 m,自重 8 000 t,其挖斗轮的直径达 17.8 m,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,在其上安置了三台 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  $\pm 1.5$  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  $\pm 3$  cm,高程精度为  $\pm 2$  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 165 m,直径 163 m,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  $\pm 50$  mm,在塔高方向上每 10 m 的相邻精度优于  $\pm 10$  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 1 600 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。精密测量不仅是施工的质量保证,为整治工程病害提供可靠的资料,同时也能对整治效果做出精确评价。

瑞士阿尔卑斯山的哥特哈德特长双线铁路隧道长达 57 km,为该工程的建设特别地重新作了国家大地测量(LV95),采用 GPS 技术施测的控制网,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,中间设了三个竖井,共四个贯通面,整个隧道于 2010 年全线贯通。整个工程的测量工作集中反映了工程测量的最新技术。

高耸建筑物方面,有人设想,在 21 世纪将建造 2 000 m 乃至 4 000 m 的摩天大厦,这不仅 是建筑师的梦想,也是对测量工程师的挑战。

## 第2章 工程控制网理论与方法

### 2.1 概述

#### 2.1.1 测量控制网的分类

测量控制网由位于地面的一系列控制点构成,控制点的空间位置是通过已知点的坐标以及控制点之间的边长(或空间基线)、方向(角度)或(和)高差等观测量确定的。按其范围和用途,测量控制网分为三大类:全球控制网、国家控制网和工程控制网。全球控制网是由国际组织在全球范围建立的大地测量参考框架,主要用于确定、研究地球的形状、大小及其运动变化,确定和研究地球的板块运动等。国家控制网是由各国测绘部门建立的区域性大地测量参考框架。国家控制网的主要作用是提供全国范围内的统一地理坐标系统;保证国家基本图的测绘和更新;满足大比例尺测图的精度要求;为精密地确定地面点的位置提供已知点及其在特定坐标系下的坐标,如以地球参考椭球面为基准面的大地坐标或高斯平面坐标,以大地水准面为基准面的高程。为了控制测量误差积累,国家控制网采用逐级方式布设,其特点是控制面积大,控制点间距离较长,点位的选择主要考虑点的密度、稳定性和布网是否有利等。工程控制网是工程项目的空间位置参考框架,是针对某项具体工程建设测图、施工或管理的需要,在一定区域内布设的平面和高程控制网。工程控制网由工程建设单位或委托其他测绘单位建立。

#### 2.1.2 工程控制网的分类、作用和建网步骤

##### (1) 分类

按用途分为测图控制网、施工(测量)控制网、变形监测网、安装(测量)控制网;按网点性质分为一维网(或称水准网、高程网)、二维网(或称平面网)、三维网;按网形分为三角网、导线网、混合网、方格网;按施测方法分为测角网、测边网、边角网、GPS网;按坐标系和基准分为附合网(约束网)、独立网、经典自由网、自由网;按其他标准分为首级网、加密网、特殊网、专用网(如隧道控制网、建筑方格网、桥梁控制网等)。

##### (2) 作用

工程控制网的作用是为工程建设提供工程范围内统一的参考框架,为各项测量工作提供位置基准,满足工程建设不同阶段对测绘在质量(精度、可靠性)、进度(速度)和费用等方面的要求。工程控制网也具有控制全局、提供基准和控制测量误差积累的作用。工程控制网与国家控制网既有密切联系,又有许多不同的特点。

##### (3) 建网步骤

工程控制网的布设也遵循大地测量学的一些基本原理,如要有坐标系和基准,要构成网,采用逐级布设方式等。根据工程的精度要求进行网的布设,建网步骤主要是:① 确定控



制网的等级;② 确定布网形式;③ 确定测量仪器和操作规程(国家或行业规范);④ 在图上选点构网,到实地踏勘;⑤ 埋设标石、标志;⑥ 外业观测;⑦ 内业数据处理;⑧ 提交成果。

### 2.1.3 测图控制网

在规范中将测图平面控制网的等级依次划分为:二、三、四等三角网,一、二级小三角网,或一、二、三级导线网,或一、二级导线。现在,已不再有纯粹的测角三角网,首级控制一般采用 GPS 网,其平均边长和精度参照三角网的技术要求。

测图平面控制网的作用在于控制测量误差的累积,保证图上内容的精度均匀和相邻图幅正确拼接。测图控制网的精度是按测图比例尺的大小确定的,通常应使平面控制网能满足 1:500 比例尺测图精度要求。四等以下(包括四等)各级平面控制的最弱边的边长中误差不大于图上 0.1 mm,即实地的中误差不大于 5 cm。在布网前,应收集测区内已有的平面、高程控制和地形图等测绘资料。网点的密度视测图比例尺而定,点的位置取决于地形条件,控制范围应较大,应尽量均匀,便于施测和进行图根加密。测图控制网还应与国家控制点相连。如果测区内有国家控制点,且其精度高于测区首级控制网的要求,两三角点间距离投影到测区平均高程面所引起的边长改正小于最弱边误差(如四等网为 1/4.5 万)则可加以利用。如果测区内没有高级控制点或其精度不能满足要求,则应与附近的国家控制点联测。对于小型或局部工程,也可将首级测图控制网布成独立网。

测图网加密时应该尽可能减少布网的层次,有条件时应该一次性地加密。这样既可控制起始数据误差的影响,也使加密点的精度趋于均匀。过去对四等以下网多采用一、二级小三角或线形锁加密方法。由于测距仪、电子速测仪的广泛应用,导线或导线网的应用则愈来愈普遍,不仅用于网的加密,还常用做首级控制。

用 GPS 技术布设测图控制网,便于与国家控制点联测,不需要网点之间相互通视,而且对边长和网的图形无特别限制,可以使控制网的精度更均匀,可使测区边缘地区的精度大为改善。经济的做法是完全采用 GPS 技术作首级控制和加密测量,或者用 GPS 技术作首级控制,以常规的地面方法进行网的加密。

大比例尺测图所需的高程控制网,通常采用水准测量的方法建立。水准测量的等级分为二、三、四等,各等级的精度指标基本上与国家规范要求一致。用电磁波测距三角高程可代替三、四等水准测量,使用中要注意以下几点:

- ① 视线长度,以斜距不大于 1 km 为宜。
- ② 掌握有利观测时间进行竖直角观测;必须往返观测竖直角,而且往返测的时间间隔应尽量短暂。有条件时应该用两台仪器作对向观测。
- ③ 各控制点的高程观测应组成闭合环以增加平差条件。
- ④ 竖直角观测、仪器置平以及仪器高觇标高量测等作业都应严格按规范进行。

### 2.1.4 施工控制网

施工平面控制网的布设,应根据总平面设计和施工地区的地形条件来确定。对于起伏较大的山岭地区(如水利枢纽)及跨越江河的工程(如大桥),过去一般采用三角测量(或边角测量)的方法建网;对于地形平坦但通视比较困难的地区,例如扩建或改建的工业场地,多采用导线网;而对于建筑物多为矩形且布置比较规则和密集的工业场地,亦可将施工控制网布置成规则的矩形格网,即所谓建筑方格网。现在,大多数已被 GPS 网所代替。对于高精度的施工控制网,则将 GPS 网与地面边角网或导线网相结合,使两者的优势互补。