

普通高等教育测绘类规划教材

# 工程测量学

张正禄 主编

武汉大学出版社



普通高等教育测绘类规划教材

# 工程测量学

主 编 张正禄  
编 委 李广云 章书寿 刘庆元 黄全义  
主 审 沈迪宸



A1020820

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

工程测量学/张正禄主编. —武汉: 武汉大学出版社, 2002. 7

普通高等教育测绘类规划教材

ISBN 7-307-03581-2

I. 工… II. 张… 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(2002)第 029989 号

责任编辑: 王金龙

责任校对: 刘欣 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.whu.edu.cn)

印刷: 华中科技大学印刷厂

开本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 369 千字

版次: 2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-03581-2/TB·9 定价: 21.50 元

---

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

# 前 言

近二十年来，测绘科技的发展日新月异，学科的综合与细分以及学科之间的交叉趋势十分明显。本书旨在反映工程测量学的主要内容和 development 情况。

该书共分十章，第一章和第十章分别介绍工程测量学的概况和发展趋势；第二章叙述了工程测量学的原理、方法和技術；第三章专门讨论工程控制网的布设理论；第四、五、六章分别为地形图测绘、施工放样和变形监测，与工程建设的勘测设计、施工建设、运营管理三个阶段相对应；第七章属于工业测量的内容；第八章对六种典型工程的测量工作进行了概括性的介绍；第九章简述了工程测量信息系统及其应用。从内容和结构上看，本书与已有的各种工程测量学教材和参考书有很大的差别。

参加本书编写的作者及分工情况为：

李广云教授（解放军信息工程大学），撰写第一章、第七章和第十章。

章书寿教授（河海大学），撰写第五章和第八章一、二节。

刘庆元教授（中南大学），撰写第三章、第八章五、六节和第九章。

黄全义研究员（武汉大学），撰写第四章。

张正禄教授（武汉大学），撰写第二章、第六章和第八章三、四节。负责全书的组织、设计和统稿工作。

该书由《测绘工程》杂志原主编沈迪宸教授审阅，沈教授提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。作者根据主编和主审的意见进行了反复修改。

由于编者水平有限，书中难免存在不少缺点甚至错误，敬请读者不吝指正。

编 者

2002年6月

# 目 录

<b>第一章 工程测量学概述</b> .....	1
第一节 工程测量学的起源及历史沿革 .....	1
第二节 工程测量学的研究对象及特点 .....	3
第三节 工程测量学的地位及其与邻近学科的关系 .....	7
第四节 工程测量学的发展趋势 .....	8
<b>第二章 工程测量学的原理、方法和技术</b> .....	14
第一节 观测量和测量定位原理 .....	14
第二节 通用的地面测量方法和技术 .....	19
第三节 专用测量方法和技术 .....	27
第四节 空间测量方法和技术 .....	35
<b>第三章 工程控制网的布设理论</b> .....	44
第一节 工程控制网的参考基准 .....	44
第二节 工程控制网的质量标准 .....	47
第三节 工程控制网的优化设计 .....	55
第四节 工程控制网的布设及内外业数据处理一体化 .....	61
<b>第四章 大比例尺图数字化测绘</b> .....	65
第一节 工程建设各阶段对地形图的要求 .....	65
第二节 大比例尺数字测图 .....	70
第三节 水下地形图测绘方法和技术 .....	74
第四节 数字高程模型及其应用 .....	78
<b>第五章 工程建筑物的施工放样测量</b> .....	83
第一节 概 述 .....	83
第二节 建筑限差及施工放样的精度 .....	83
第三节 施工放样的方法和技术 .....	86
第四节 曲线测设 .....	95
<b>第六章 工程的变形监测、分析与预报</b> .....	102
第一节 基础理论 .....	102
第二节 变形监测方案和方法设计 .....	106

第三节	变形观测数据处理·····	116
第四节	变形监测成果整理、表达和解释·····	129
<b>第七章</b>	<b>设备的安装与检校测量·····</b>	<b>141</b>
第一节	精密微型控制网·····	141
第二节	精密定线和短边方位传递·····	144
第三节	工业测量系统·····	150
<b>第八章</b>	<b>典型工程的测量工作·····</b>	<b>166</b>
第一节	道路工程测量·····	166
第二节	水利水电枢纽工程测量·····	171
第三节	大型桥隧工程测量·····	178
第四节	高层及高耸建筑施工测量·····	184
第五节	矿山工程测量·····	189
第六节	海洋工程测量·····	194
<b>第九章</b>	<b>工程测量信息系统·····</b>	<b>199</b>
第一节	信息分类和采集·····	199
第二节	信息处理、管理及信息系统设计·····	200
第三节	工程测量信息系统的应用·····	205
<b>第十章</b>	<b>21 世纪工程测量学展望 ·····</b>	<b>210</b>
第一节	21 世纪工程测量学科发展展望 ·····	210
第二节	工程测量内外业一体化和自动化·····	211
第三节	快速实时动态测量技术·····	218
<b>参考文献</b> ·····		<b>222</b>

# 第一章 工程测量学概述

## 第一节 工程测量学的起源及历史沿革

工程测量学与大地测量学、摄影测量与遥感学、地图制图学、海洋测绘和测绘仪器学一样，是现代测绘学的分支学科。工程测量是一门历史悠久的测绘技术。古代社会生产力水平不高，自然科学不发达，测绘学中分门别类的测绘技术水平不高，它们之间没有严格的学科界限。只是到了近代，随着大规模工程和工业建设的出现，以及自然科学的迅速发展，解决重大工程问题的测绘理论与技术的形成和使用仪器的日臻完善，在测绘学的体系中逐渐形成了工程测量学（Engineering Surveying 或 Engineering Geodesy）这一学科。

当我们打开人类文明的历史画卷时，我们的祖先在测绘学方面所表现出来的智慧让我们惊叹，古今中外，概莫能外。工程测量学的历史源远流长，早在公元前 27 世纪埃及大金字塔的建设，其形状与方向都很准确，这说明当时已有放样的工具和方法。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测定。我国早在二千多年前的夏商时代，为了治水就开始了实际的工程测量工作。对此，伟大的史学家司马迁在《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。”其中“准”是古代用的水准器，“绳”是一种测量距离、引画直线和定平用的工具，是最早的长度度量及定平工具之一，“规”是校正圆形的工具，“矩”是古代画方形的用具，也就是曲尺。这里所记录的就是当时勘测的情景。你看，大禹带领测量队到野外搞“外业”，带的工具就是“准、绳、规、矩”。在山东嘉祥县汉代武梁祠石室造像中，就有拿矩的伏羲和拿规的女娲的图像，说明我国在西汉以前，“规”和“矩”是用得很普遍的测量仪器。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。秦代李冰父子开凿的都江堰水利枢纽工程，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，虽不如水尺那样精确，但却是我国水利工程测量发展的标志。而宋代汴渠的水准测量就比较精确，对此北宋的科学家沈括在他的《梦溪笔谈》中有着十分珍贵的记述，沈括主持进行了八百多里的水准测量，测得京师（今开封）的地面要比泗州高出十九丈四尺八寸六分。用分层筑堰的方法来进行水准测量是当时的一项新创造。当时常用的测量工具是“水平”、“望尺”和“千尺”等，其最小测量单位是百分之一尺，相当于公制的 3mm 左右，这在当时的测量条件下，实在是非常难得。1973 年长沙马王堆汉墓出土的三副帛地图（地形图、驻军图和城邑图），是轰动世界的惊人发现。它表明了我国在二千一百多年前的汉代，地图制图学已有了蓬勃的发展；无论从地图的内容、精度、艺术水平来说，都是罕有可比的，它已成为目前世界上发现最早的古典地图。再如，我国的地籍最早出现在原始社会崩溃、奴隶社会形成的时候。那时，土地已变成私有财

产，因此产生了调查和统计土地数量的需要。从秦、汉到唐朝，人口、土地和赋税都登记在一起，并以户籍登记为主。到了明清两代，对全国土地进行了大清查，编制了鱼鳞图册，从而成为政府摊派赋役的主要依据。

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等。到了周代金属工具已普遍应用，这说明采矿业已很发达。据《周礼》的记载，在周代已设立了专门的采矿部门，而且在开采时还重视矿体形状，并使用矿产地质图以辨别矿产的分布。这说明当时我国的矿山测量已经有相当的成就。我国又是发明指南针的国家，对矿山测量和其他工程勘测有过很大的贡献，可惜的是我们还缺乏系统的研究。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世纪埃及有了按比例缩小的巷道图。公元前1世纪，希腊学者格罗·亚里山德里斯基已对地下测量和定向进行了叙述。德国在矿山测量发展方面起了很大作用，1556年，格·阿格里柯拉出版了《采矿与冶金》一书。该书专门论述了用罗盘测量井下巷道问题和解决在开采过程中所发生的某些几何问题。

战争也促进了工程测量学的发展。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”的直道，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，修建中都曾应用简易测量工具进行地形勘测、定线测量和隧道测量。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”，说明了测量地势高下对军事成败的作用。还有我们中华民族的象征万里长城修建于秦汉时期，对于这样规模巨大的防护工程，从整体布局到修筑，都进行了详细的勘察测量工作。

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，工程测量愈发显得重要，受到人们的重视，并发展成为测绘学科的一个重要分支。以核子、电子和空间技术为标志的所谓第三次科技革命，使工程测量获得了迅速的发展。20世纪以来，世界各国在城市建设、铁路建设、大型钢铁联合企业建设中对施工测量、施工控制网的建立和设计提出了一系列的要求；摩天大楼的建设、长隧道和地铁建设、空间技术试验和导弹发射场的建设促使工程测量向精密（高精度）工程测量方向发展；随着工程测量自动化程度和测量精度的提高，工程测量的技术和方法已经在大型设备安装、巨型实验设备建设以及航空、航天工业、汽车、船舶制造业中得到了广泛的应用，出现了工业测量学科方向；大型水工建筑物的建设、水利枢纽和电站工程的建设，使工程建筑物的安全监测、变形分析和预报成为工程测量研究的主要方向。20世纪末，现代科学技术有了飞速的发展，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，包括核电站、海底隧道、跨海大桥、电子对撞机工程等。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、文物调查，甚至在医学、体育运动和罪证调查中，都应用了最新的工程测量和精密工程测量的仪器和方法。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。

生产的需要始终是推动测绘学以及其他一切科学发展的原动力。从工程测量学的历史沿革我们可以看出，它的发展经历了一条从简单到复杂、从手工操作到测量生产的自动化、从常规精度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



人们在工程建设中对测量的需要。

## 第二节 工程测量学的研究对象及特点

工程测量学是一门应用学科，它是研究地球空间中具体几何实体测量和抽象几何实体测设的理论、方法和技术<sup>[60]</sup>。主要研究在工程与工业建设、城市建设与国土资源开发、水陆交通与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。工程测量若按工作进程和作业性质可分为工程建设的勘察设计、施工建造和运营管理阶段所进行的各种测量工作。

在工程建设的勘察设计阶段，测量工作主要是提供各种比例尺的地形图，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。在工程建设的施工建造阶段，主要的测量工作是施工放样和设备安装测量，即把图纸上设计好的各种建筑物按其设计的三维坐标测设到实地上去，并把设备安装到设计的位置上。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，作为施工放样与设备安装的基础，然后再按照施工的需要进行点位放样。在工程建设的运营管理阶段，为了监视建筑物的安全和稳定的情况，验证设计是否合理、正确，需要定期对其位移、沉陷、倾斜以及摆动等进行观测。因此，这一阶段的主要测量工作是工程建筑物的变形观测。

工程测量按其研究对象可分为：建筑、水利、铁路、公路、桥梁、矿山、城市、国防等工程测量，以及精密工程测量、工程摄影测量等。主要有以下一些内容：

### 一、建筑工程测量

建筑工程测量是建筑工程的勘测、设计、施工、管理等各个阶段的测量工作。根据不同的施测对象和阶段，建筑工程测量包括如下内容：

(1) 测图 在勘测阶段，为了对建筑物的具体设计提供地形资料，需在建筑地区测图。由于只在局部范围内测图，可以不顾及地球曲率的影响。因而测图只需按一定的测量程序，测定具有代表性的地物、地貌，就可绘制一定比例尺的地形图。建筑物竣工后，为了工程验收和维修管理，还要测绘竣工图。

此外，与建筑工程有关的土地划分，用地边界和产界的测定，需要测绘地物平面图。对于道路、管线和特殊构造物的设计，还需测绘带状地形图和沿某方向的断面图。

(2) 用图 建筑物的设计方案，力求经济、合理、实用、美观，合理使用土地，正确处理建筑物和环境的关系，做到人工美和自然美的结合。因此，用图（地形图、地物图和断面图）贯穿于设计阶段的全过程。

用图就是利用成图的基本知识和原理，如构图方法、坐标轴系等在图上进行量测，并把图面量测的数据，反算为现场地面相应的测量数据，从而解决设计和施工提出的问题，用图是一个逆向成图知识的过程。

(3) 放样 建筑物、构筑物进入施工阶段，就需根据它的设计图，按照设计要求，通过测量的定位、放线、安装和检查，将其平面位置和高程标定到施工的作业面上，为施工提供正确位置，指导施工。放样是测图的逆过程，贯穿施工全过程。

此外，对某些特殊要求的建筑物，为了监视在各种应力作用下它的安全性和稳定性，或

检查它的设计理论和施工质量，还需要进行变形观测。为此，要在建筑物上设置若干观测点，按照测量的观测程序和周期，测定建筑物及其地基在建筑物荷重和外力作用下随着时间产生的变形，包括沉降观测、位移观测、倾斜观测、挠曲观测、裂缝观测等。

## 二、矿山测量

矿山测量学是一门边缘学科，它综合运用测绘、地质及采矿等多种学科的知识，来研究和处理矿山地质在勘探、建设和采矿过程中由矿体到围岩、从井下到地面在静态和动态下的各种空间几何问题。在勘探、设计、建设、生产各个阶段直至矿井报废为止，都要进行矿山测量工作。

在矿床勘探阶段，要建立勘探区域的地面控制网，测绘1:5 000比例尺地形图，标定设计好的勘探工程，并将其测绘到平面图上，与地质人员共同测绘、编制图纸资料 and 进行储量计算。

在矿山设计阶段，需要测绘比例尺为1:1 000，1:2 000的地形图，作为工业广场、建（构）筑物、线路等的设计用图，并进行土石方计算。

在矿山建设阶段，主要进行一系列施工测量。如工业与民用建筑物放样，凿井开巷测量，设备安装测量及线路测量等。

在矿山生产阶段，需要进行巷道标定与测绘，储量管理，开采监督，岩层与地表移动观测与研究，露天矿边坡稳定性的观测与研究，参加采矿计划编制和环保工作等。

## 三、水利工程测量

水利工程测量是水工建设中不可缺少的一个组成部分，无论是在水利枢纽工程的勘测设计阶段，还是在施工建造阶段，以及其后的运营管理阶段中，都要进行相应内容的测量工作。

在勘测设计阶段，测量工作的主要任务是为水工建（构）筑物设计提供必要的地形资料和其他测量数据。随着水利枢纽工程设计阶段的不同，枢纽位置的地理地貌特点，以及建筑物规模大小等因素的影响，对地形图的比例尺要求也不相同。因而在为水利枢纽工程设计提供地形图资料时，应根据具体情况确定相应的比例尺。由于为水利枢纽工程提供的地形图是一种专业性用图，在测量精度、地形图所表示的内容方面都有特殊要求。一般来说，与国家基本图相比，平面位置精度要求较宽，而对地形精度要求有时较严。在勘测设计阶段除了提供上述地形图资料外，还应满足其他勘测工作的要求。如地质勘探工作中的各种比例尺的地形底图，联测钻孔的平面位置和高程，测定地下水位的高程；在水文勘测中测定流速、流向、水深以及提供河流的纵横断面图；此外，还需为各种专用输电线、运输线和附属企业、建筑材料场地提供各种比例尺的地形图及相应的测量资料。

在水利枢纽工程的施工期间，测量工作的主要任务是按照设计的意图，将设计图纸上的建筑物以一定的精度要求测设于实地。此外，在施工过程中，有时还要对地基及水工建筑物本身或基础进行施工中的变形观测，以了解建筑物的施工质量，并为施工期间的科研工作收集资料。在工程竣工或阶段性完工时，要进行验收和竣工测量。

在水利枢纽中，大坝是最重要的建筑物，因此要定期或不定期地对其进行变形观测，以监视安全并且为科研之需。我们常把用工程测量的方法观测水工建筑物几何形状的空间变化称为外部变形观测。包括水平位移观测、垂直位移观测、挠度观测和倾斜观测等。其观测范

围不仅包括建筑物的基础、建筑物本身，还包括建筑物附近受水压力影响的部分地区。在这一时期，测量工作的特点是精度要求高、重复性大、仪器设备多。

#### 四、线路工程测量

线路工程包括铁路、公路、输电线路、灌渠以及各种地下管线等线型工程。各种线路工程在勘测设计阶段、施工建设阶段和竣工阶段所进行的测量工作，统称为线路工程测量。其主要内容有中线测量（包括曲线测设），纵、横断面测量、带状地形图测绘以及施工测量。

##### 1. 勘测设计阶段的测量工作

(1) 初测 初测是根据计划任务书确定的修改原则和线路的基本走向，通过对有价值的线路具体方案的勘测，从中确定采用的路线，为编制初步设计文件提供资料。测量的主要内容有：导线测量，高程测量，地形测量等。

(2) 定测 定测是根据批准的初步设计文件和确定的路线方向及有关构造物的布设方案进行的测量工作。定测应结合自然条件，通过实地放线和局部线路调整，测定线路位置及有关构造物的准确位置，为施工图设计提供资料。定测的主要内容包括中线测量、高程测量、横断面测量和地形图测绘等。

##### 2. 施工阶段的测量工作

在施工阶段，首先要检测勘测设计阶段所建立的平面、高程控制桩，在检测基础上进行恢复中线测量。此外还要放样路基和路基边坡，测定竖曲线，放样线路上建（构）筑物轴线及其结构尺寸。

##### 3. 竣工阶段的测量工作

线路工程竣工以后，为了检查工程质量是否符合设计要求，为以后线路运营养护提供依据，应进行竣工测量。竣工测量应在导线测量和高程测量的基础上进行。主要是标定中线位置及里程桩。测定线路中心线纵断面图和路基横断面图。在大型建（构）筑物附近设置平面和高程控制点，供以后工程养护管理使用，例如沉降、位移观测等。

#### 五、军事工程测量

军事工程测量是在军事工程建设的勘测设计、施工建设和运营管理阶段所进行的测量工作<sup>[11]</sup>。为各种军事工程建设提供精确测量数据、地形图、地籍图和断面图，保障工程建设按照设计竣工和安全有效的使用。军事工程测量的内容主要包括：军用道路测量、地下军事工程测量（军用坑道、洞库测量等）、军港测量、机场测量、靶场工程测量及军事设施测量，以及军工建筑物变形观测等。

军事工程测量的最新发展还包括为军事和国防部门提供应用测量服务，主要体现在如下三个方面：一是为军事和国防的一切部门解决计量和基准问题，如测量距离、方向、速度、加速度及三维坐标等；二是为大容量器具（油罐、货舱）测算容积、体积以及为舰船、飞机等测绘外形；三是为营房管理、军垦土地等部门建立信息服务和管理系统。

#### 六、精密工程测量

随着现代科学技术的飞速发展，人类科学技术不断向宏观宇宙和微观粒子世界延伸。由于发展空间科学，进行大型特种精密科学实验以及各种现代化建设的需要，工程建筑物的规模越来越大，结构也越来越复杂，为了保证大型精密设备的安全和正常运行，不但对各工艺

构件间相互位置的精度要求越来越高，而且对测量的速度也要求越来越快，因此出现了精密工程测量。精密工程测量的主要任务是解决各种大型特种精密工程所提出的高精度的测量课题。它的特点是：极高的测量精度要求；非传统的测量方法和专用仪器设备；合理的数据处理方法和测量过程的自动化等。精密工程测量是工程测量学内容的丰富、扩展和延伸，它和工程测量学有着密不可分的联系。

精密工程和一般建筑工程一样，包括规划设计、施工放样和运营管理三个阶段，其中大部分测量工作和一般工程的测量工作相近。但是，大型精密工程的特点是：由于它们的大型和稀有性，耗资巨大，必须确保在极其安全可靠的状态下无故障、高效能地运行，因此它们的精度要求极高。精密工程测量与普通工程测量有许多不同之处：在精密工程的规划设计阶段，要研究地壳形变及局部重力场不均匀性对工程稳定性的影响，要根据工程所处位置的地形、地质、水文以及人工活动等因素进行地形变监测，为设计提供必要和准确的资料；对有统一工艺流程和结构的大型建筑物，除了要建立高精度的施工测量控制网外，还要建立高精度的安装测量控制网，对控制点的稳定性要求较高；为了保证大型工艺设备的正常运行，要实现用仪器和自动装置来代替人进行工作的测量自动化等。

## 七、工程摄影测量

工程摄影测量是摄影测量理论及方法在工程测量中的具体应用。它是利用摄影机或其他数据获取设备，对一定范围内的研究对象进行静态或动态摄影取得记录相片，根据相片上的图像进行量测、分析，从而求定研究对象上点的二维或三维坐标等数据或绘制对象的各种图解图的科学技术和工艺。由于摄影构像能真实而详尽地记录摄影瞬间客观物体的形态，并有良好的量测性和判读性能，因此，工程摄影测量被广泛地应用于水力学及水利工程、矿山测量、环境工程、建筑学、地质学、考古学、生物学、材料力学、结构力学、岩土力学、流体力学、空气动力学、核子物理、医学、生物立体量测学、宇航、海洋学、工业、农业、铁路工程、航道测量、交通管理、体育等领域。

工程摄影测量的研究范围主要有：建筑施工过程利用摄影测量方法检查建筑物的装配精度，测量工程建筑物与构筑物的变形。如可以测定烟云扩散参数，并提供某些设计参数。可在实验室内对试验模型进行测量。在船舶制造中，可进行超级舰艇、油轮的船体安装及容积测定、大型断面锥度与形状的检核、工艺过程的监测、船内管道布置的模型测量及螺旋桨测量等。在军车制造中，可用于坦克、汽车车身模型尺寸的量测以及运行中与障碍物碰撞后的特性测定，轮胎变形测定等。在研究动态目标时，可用于研究高速流逝过程，如测量导弹、炮弹、飞机的运动速度及轨迹。

工程摄影测量的主要特点表现在：(1) 像片信息丰富、容量大，显示能力客观、影像逼真，适用于不规则物体的外形测量；(2) 在工程摄影测量中，所涉及到的目标大小、摄影距离、精度要求、静态或动态等各方面均有不同，但只要合理地选择摄影仪器、摄影方式与布设控制，就可以解决科研和生产中的若干复杂问题；(3) 对安全监测测量来说，往往希望能同时测定许多的点，以利于对问题的分析，而工程摄影测量的一个重要特点，就是能在瞬间摄取很多个点，这样就可在量测仪器上量测并计算出所需的大量的物方点空间坐标；(4) 摄影像片可以长期保存，便于日后对成果的查核、比较和分析；(5) 与传统的工程测量相比，可减少外业工作量，减轻劳动强度，提高经济效益。可以相信工程摄影测量在工程测量中的应用领域将越来越广。

### 第三节 工程测量学的地位及其与邻近学科的关系

工程测量学科的发展，与现代科学技术的发展水平和速度、与人类社会改善生活和工作环境所进行的生产活动、与现代战争的要求和军事活动密切相关。工程测量的发展已经突破原来的土木工程的狭窄概念，而向所谓的“广义工程测量”发展。正如苏黎世工业学院马西斯教授所指出：“一切不属于地球测定，不属于有关国家地图集的陆地测量和不属于公务测量的实际测量课题，都属于工程测量。”可见工程测量应用领域之广泛，与其他学科联系之紧密。

广义工程测量学是研究并提供地表上、下及周围空间建筑和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课题，因此它不是一个单一的学科，而是与许多学科之间互相渗透、互相补充、互相促进的技术学科。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理论新技术解决工程测量中的难题，丰富其内容；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。例如 GPS 空间定位技术在工程建设部门获得极为广泛的应用；GIS 地理信息系统和 RS 遥感技术应用于工程勘探、资源开发、城市和区域专用信息管理系统及工程管理信息数据库；CCD 固态摄影机使“立体视觉系统”迅速发展，应用到三维工业测量系统中；机器人技术应用于施工测量自动化；传感器技术和激光技术、计算机技术促进了工程测量仪器的自动化。由此可见，这些新技术新理论不断充实工程测量，成为工程测量不可缺少的内容，同时也促进了这些学科本身的发展和应

用。我国的工程测量在国家建设中发挥了很大的作用，并促进了工程测量学科的进步。随着我国改革开放和社会主义现代化建设的不断发展，大规模的经济和国防建设及科学研究与实验，给工程测量学的发展开辟了无限广阔的前景。

解放后我国建成了独立的比较完整的工业体系，完成了成千上万项重要工程建设，在国防工业和尖端武器的研制等方面也有了很大进展，在所有这些工程建设项目中，都进行了大量的工程测量工作，工程测量工作者为发展国民经济和巩固国防作出了巨大的贡献。

在国防工业和军事工程建设方面，配合各种武器型号的试验，卫星、导弹和其他航天器的发射，进行了大量的军事工程测量工作，工程测量发挥了很大的作用。

在冶金建筑方面，从武钢、包钢到宝钢等大小钢铁企业的建设中，从铁矿勘探与开采，运输线路建设到基础工程，机器设备和结构安装，高炉施工等一系列的工程项目建设中，进行了大量的控制测量、大比例尺测图、建筑方格网测量、施工放样，以及精密机械安装测量等工程测量。

在交通运输方面，修筑了无数条公路、铁路、高速公路，建造了数不清的长短隧道，架设了千百座桥梁。像知名的跨越世界屋脊的长达 2 271km 的康藏公路、兰新铁路和成昆铁路，一直到京九铁路等，都是巨大而艰难的工程，为了保证工程建设的顺利进行，工程测量工作者进行了线路测量、曲线放样、桥梁测量、隧道控制测量和贯通测量等精密而细致的工程测量工作。

在水利建设方面，在祖国无数条大小河流上建设了成千上万座水库、水坝、引水隧洞、水电站工程。例如，正在建设中举世瞩目的长江三峡工程，已建成的长江葛洲坝工程，正在

建设的黄河小浪底工程以及已建成的刘家峡、万家寨工程等，都是大型的拦洪蓄水、发电、灌溉的水利枢纽工程。这些工程不仅在清理坝基、浇灌基础、树立模板、开凿隧洞、建设厂房与设备安装中进行多种工程测量，而且建成后还要进行长期的变形观测，监视大坝的安全。

我国的工程测量在国家建设中发挥了很大的作用，还有很多例子。如新丰江大坝地震发生横向裂缝，被迫泄库，修复后的大坝在倒锤仪的严密监视下，得以重新蓄满和发电，缓解了广东省的能源紧张问题。北京正负电子对撞机工程是一项测量工作量大、项目齐全、复测周期短、监测时间长的大型工程。对基础稳定性的测量、施工控制网和设备安装测量不仅难度大，而且精度要求高，例如要求磁铁安装误差要小于 0.1mm，直线加速器真空管的准直精度要求达到  $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 。我国工程测量工作者成功地解决了这些复杂测量课题，保证了正负电子机对撞的一次成功。

#### 第四节 工程测量学的发展趋势

随着传统测绘技术走向数字化测绘技术，工程测量的服务面不断拓宽，与其他学科的互相渗透和交叉不断加强，新技术、新理论的引进和应用更加深入。因此今后工程测量总的发展趋势为：测量数据采集和处理向一体化、实时化、数字化方向发展；测量仪器和技术向精密、自动化、智能化、信息化方向发展；工程测量产品向多样化、网络化、社会化方向发展。具体表现在以下几个方面：

##### 一、大比例尺工程测（成）图数字化

大比例尺地形图和工程图的测绘是工程测量的重要内容和任务。工程建设规模扩大、城市迅速发展以及土地利用、地籍测量的紧迫要求，都希望缩短成图周期和实现成图自动化。目前，国内外已经研制成大比例尺成图数字化系统，正在推广和完善。

野外数据采集、处理到绘图的数字化系统，以 20 世纪 80 年代初瑞士 Wild 厂的 Geomap 整体式测图系统为代表。整个系统形成了一个数据流，而且是双向的，包括全站型仪器、计算机和数控绘图桌。另一种是 Geocomp 机助测量系统，实际上是一个组合式的系统。它们的功能包括机助测量和工程软件两部分，前者为彩色及黑色的各种图的显示和绘制，如由控制绘图机画出工程地形图、等高线图、带状平面图、立体透视图、纵横断面图、剖面图、地籍图、竣工图、地下管网图等；后者工程软件包括数据处理软件、数字地面模型软件及应用软件三大部分，可以进行工程量计算，如计算模型面积、体积及填挖方量等，还可进行土地规划及工程设计。这种机助成图系统不仅用在城市、工矿地区测图和地籍测量中，而且在欧美一些先进国家也用在公路、铁路、输电线路及水利等测量部门。

国内大比例尺工程测图数字化在近几年内得到了迅速的发展，已经推出了多种商业化数字测（成）图软件系统。利用袖珍计算机、掌上计算机和便携机及全站仪、半站仪进行数据采集和成图处理，适合中国国情，为数字化测图作出了贡献。

##### 二、工业测量系统的最新进展

20 世纪 80 年代以来，现代工业生产进入了一个新的阶段。许多新的设计、工艺要求对生产的自动化流程、生产过程控制、产品质量检验与监测等工作进行快速、高精度的测点、

定位, 并给出工件或复杂形体的三维数学模型, 这是传统的光学、机械等工业测量方法所无法完成的。工业测量系统是指以电子经纬仪、全站仪、数字相机等为传感器, 在计算机的控制下, 完成工件的非接触和实时三维坐标测量, 并在现场进行测量数据的处理、分析和管理的系统。与传统的工业测量方法相比较, 工业测量系统在实时性、非接触性、机动性和与 CAD/CAM 联接等方面有突出的优点, 因此在工业界得到了广泛的应用。

随着电子经纬仪朝高精度和自动化方向的发展以及激光干涉测量技术和数字摄影测量技术的应用, 世界上出现了诸多商用的工业三维坐标测量系统, 它们在航空航天工业、汽车工业、造船工业、电力工业、机械工业和核工业等行业和部门得到了极大地推广和应用。

### 1. 经纬仪测量系统

经纬仪测量系统 (MTS) 是由多台高精度电子经纬仪构成的空间角度前方交会测量系统, 如 Leica 在 1995 年前推出的 ManCAT 系统和 ECDS3 系统, 最多可接 8 台电子经纬仪, 现在波音和麦道飞机制造公司及其合作伙伴 (如中国沈飞、上飞、西飞等) 还在使用 ManCAT 系统。经纬仪测量系统的硬件设备主要由高精度的电子经纬仪 T2000/T3000 与 TPS5000 系列 (也可联 Kern 的 E2/E20 电子经纬仪)、基准尺、接口和联机电缆及微机等组成。采用手动照准目标, 经纬仪自动读数, 逐点观测的方法。MTS 在几米到十几米的测量范围内的精度可达到  $0.02 \sim 0.05\text{mm}$ 。

### 2. 全站仪极坐标测量系统

全站仪极坐标测量系统是由一台高精度的测角、测距全站仪构成的单台仪器三维坐标测量系统 (STS), 例如 Leica 1995 年前所推出的商业化系统 PCMSplus, 其全站仪采用 TC2002, 测角精度为  $0.5''$ , 测距标称精度为  $1\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot D$ 。TC2002 在近距离测距时, 无需棱镜作为测距目标, 只需采用特制的不干胶 (或磁性) 反射片贴到被测物的表面上, 在软件处理时顾及了标志的厚度。

极坐标测量系统的发展方向是自动极坐标测量系统 (APS), 自动极坐标测量系统是由一台 TM3000D 马达驱动电子经纬仪和一台 Leica 测距仪构成的。APS 的照准和观测完全自动化, 特别适用于露天矿建设工地等的滑坡变形监测。最新的 APS-Win 系统采用 TM1800 马达经纬仪或 TCA1800/TCA2003 自动跟踪全站仪。TCA 系列全站仪采用了所谓的自动目标识别 (ATR) 技术, 能自动瞄准棱镜进行测量。它的基本原理是 ATR 与望远镜同轴安装, 并向目标发射激光束, 返回的激光束被仪器中的 CCD 相机捕获从而计算出反射光点中心的位置并化算为水平角和垂直角改正数, 最后驱动马达步进到棱镜的中心位置。

由多台 TCA1800 构成的自动极坐标测量系统已经应用于香港地铁的变形监测中, 其中一台仪器可监测近 200m 左右的断面, 每个断面上按一定间隔安装专用的微型棱镜, 并在固定点上也安装棱镜, 多台仪器同时对固定站和变形点进行观测, 从而实现了 2 个地铁车站间隧道的 24 小时不间断自动化测量。

### 3. 激光跟踪测量系统

激光跟踪测量系统 (LTS) 的代表产品为 SMART 310。与常规经纬仪测量系统不同的是, SMART 310 激光跟踪测量系统可全自动地跟踪反射装置, 只要将反射装置在被测物的表面移动, 就可实现该表面的快速数字化。由于干涉测量的速度极快 (每秒最多到 500 次读数), 其坐标重复测量精度高 (达到  $5\text{ppm}$ ), 因此它特别适用于动态目标的监测, 如机器人的检校等。SMART 310 的测量原理同样是极坐标法, 测量硬件为一台激光跟踪仪 (Laser Tracker), 它的测量头的设计与经纬仪类似, 也有横轴和竖轴, 并用码盘分别测量水平角和

垂直角。斜距通过激光干涉测量法获得，由于干涉测量只能获得相对距离，因此绝对距离需从某一距离已知的点上起算。

最新的激光跟踪测量系统为 Axyz-LTM，它的硬件为 LT500/LTD500 激光跟踪仪，其测量速度比 SMART 310 快一倍，而 LTD500 为带绝对测距仪的激光跟踪仪，在测量信号遮挡后，绝对测距仪能及时测出绝对距离，保证跟踪仪能继续测量，因此工作速度更快，可用于放样和检测。

#### 4. 数字摄影测量系统

美国大地测量服务公司 (GSI) 生产的 V-STARS 是数字摄影测量系统的典型产品。它是采用数字近景摄影测量原理，通过 2 台高分辨率的柯达数字相机对被测物同时拍摄，得到物体的数字影像，经计算机图像处理得到精确的 X、Y、Z 坐标。V-STARS 系统为了保证最佳的图像量测精度和效果，被测点的标志比较讲究，采用特制的回光反射标志 (Retro Reflective Target)。在拍摄图像时采用多姿态和不同角度以消除镜头的畸变差，数字相片的相对定向和绝对定向采用专用磁性定向标志和标准尺放在物方空间，同时被拍摄到图像中。相对定向由鼠标控制完成，而影像匹配则由计算机自动完成。V-STARS 特别适合于动态物体的快速坐标测量，操作方便，对现场环境无任何要求，尤其在有毒、有害的环境下是其他工业测量系统所无法比拟的。在近距离范围内它的测量精度达到了 0.01~0.03mm。

数字摄影测量的最新进展是采用高分辨率的数字相机来提高测量精度，另外，利用条码测量标志可以实现控制点编号的自动识别，采用专用纹理投影设备可以代替物体表面的标志设置，这些最新的技术正在使数字摄影测量朝完全自动化的方向发展。

### 三、施工测量自动化和智能化的进展

计算机立体视觉是主动式机器人的眼睛，它能实时地提供有关机器人操作目标及其周围环境的方位、距离、形状、色彩和纹理等信息，用以控制机器人完成动态目标和环境的操作任务并促使机器人智能化。施工自动化是通过测量和定位的自动化而实现的。

施工测量的工作量大，现场条件复杂，施工测量的自动化、智能化应是长期的目标。目前出现的“自动寻标全站仪”是向这个目标前进了一步，新型电子速测系统 Geodimeter4000 系列，是由一台 Geodimeter4000 和智能反射器 RPU (Remote Positioning Unit) 组成。操作时测量员只需携带一个反射器到待测设的点上，由 RPU 发射一个信号，则速测仪接收后自动启动并搜索 RPU，寻到后自动照准并显示方向、距离、竖角、平距及三维坐标，测量员利用 RPU 键盘和显示器检查测量过程。

由 GPS 和智能全站仪构成的自动测量和控制系统在施工测量自动化方面已迈出了可喜的一步，实现了开挖和掘进的自动化。我国自行开发的利用多台 TCA1800 自动目标照准全站仪构成的顶管自动引导测量系统，已在上海市的地下顶管施工中发挥了巨大的作用。系统利用 4 台 TCA1800 全站仪，在计算机的控制下按自动导线测量方式，实时测出机头的位置并与设计坐标进行比较，从而在不影响顶管施工的情况下实时引导机头走向正确的位置。

### 四、工程测量仪器和专用仪器向自动化方向发展

(1) 精密角度测量仪器，发展到用光电测角代替光学测角，光电测角能够实现数据的自动获取、改正、显示、存储和传输，测角精度与光学仪器相当并有超过。如 T2000、T3000 电子经纬仪采用动态测量原理，测角精度达到 0.5"。马达驱动的电子经纬仪和目标识别功



能实现了目标的自动照准。

(2) 精密工程安装、放样仪器，以全站式电子速测仪发展最为迅速。全站仪不仅具有测角和电子测距的功能，而且具有自动记录、存储和运算能力，有很高的作业效率。最新的全能型全站仪，在完善的硬件条件下，包含了丰富的软件，可实现地面控制测量、施工放样和大比例尺碎部测量的一体化，同时还具有中文菜单提示和人机交互操作功能。

(3) 精密距离测量仪器，其精度与自动化程度愈来愈高。干涉法测距精度很高，例如，欧洲核子中心（CERN）在美国 HP5526A 激光干涉仪上，设计了有伺服回路控制的自准直反射器系统，施测 60m 以内距离误差小于 0.01mm；瑞士与英国联合生产的 ME5000 电磁波测距仪，采用 He-Ne 红色激光束，单镜测程达 5km，精度为  $\pm 0.2\text{mm} \pm (0.2 \sim 0.1\text{ppm}) \cdot D$ 。

(4) 高精度定向仪器，陀螺经纬仪在自动化观测方法上有了较大进步。采用电子计时法，定向精度从  $\pm 20''$  提高到  $\pm 4''$ 。新型陀螺经纬仪由微处理器控制，可以自动观测陀螺连续摆，并能补偿外部干扰，因此时间短、精度高，例如德国 DMT 生产的 Gyromat 2000 陀螺经纬仪只需 9min 观测就能获得  $\pm 3''$  的精度。目前陀螺经纬仪正向激光陀螺定向发展。

(5) 精密高程测量仪器，采用数字水准仪实现了高程测量的自动化。例如，Leica NA3003 和 Topcon DL101 全自动数字式水准仪和条码水准标尺，利用图像匹配原理实现自动读取视线高和距离，测量精度达到每公里往返测高差均值的标准差为 0.4mm，测量速度比常规水准测量快 30%；德国 REN002A 记录式精密补偿器水准仪和 Telamat 激光扫平仪实现了几何水准测量的自动安平、自动读数和记录、自动检核，为高程测量和放样提供了极大的方便。

(6) 工程测量专用仪器，主要指用于应变测量、准直测量和倾斜测量等需要的专用仪器。应变测量仪器有直接使用的各种传感器，及用机械法和激光干涉法的精密测量应变的仪器，如欧洲核子中心研制的 Distinvar 是精密机械法测距的装置，精度达 0.05mm；激光干涉仪测量精度达  $10^{-7}$  以上，可用于直接变形测量，还可检核其他仪器。用于地面或高大建筑物倾斜测量的倾斜仪，一类是根据“长基线”做成的静力水准仪，精度高达  $0.001''$ ，如国产的 FSQ；另一类采用垂直摆或水平气泡作为参考线，通过机械法或电学法测量倾斜，精度为  $0.01''$ 。遥测倾斜仪主要用于监测滑坡、地面沉陷、地壳形变等方面。波带板激光准直系统的精度在大气中为  $10^{-4} \sim 10^{-3}$ ，在真空中可达  $10^{-7}$ 。它已成功的用于精密的轨道安装和加速器磁块的定位、大坝变形观测等，例如北京正负电子对撞机工程的直线加速器的安装。

## 五、特种精密工程测量的发展

为了保证各种大型建设工程的顺利进行，需要进行特种精密工程测量。特种精密工程测量的特点是把现代大地测量学和计量学结合起来，使用精密测量和计量仪器，在超出计量的条件下，达到  $10^{-6}$  以上的相对精度<sup>[8]</sup>。

大型精密工程不仅结构复杂，而且对测量精度有很高要求，例如研究基本粒子结构和性质的高能粒子加速器工程，要求安装两相邻电磁铁的相对径向误差不超过  $\pm 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ ，在直线加速器中漂移管的横向精度为  $0.05 \sim 0.3\text{mm}$ 。紧缩场工程的检校测量精度为  $0.02\text{mm}$ 。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，包括选择最优布网方案，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，进行数据处理和建立数据库等。以大型核电厂工程测量为例，60m 长、20m 宽的汽轮发电机组，其平面控制点