

普通高等学校教学用书

测量学教程

主 编 崔希民

副主编 彭小沾

刘文龙

煤炭工业出版社

普通高等学校教学用书

测量学教程

主 编 崔希民

副主编 彭小沾 刘文龙

煤炭工业出版社

·北 京·

内 容 提 要

本书主要介绍测量的基本知识、角度测量、高程测量、距离测量与直线定向、测量误差分析与精度评定、小地区控制测量、地形图及其成图方法、地理空间信息分析与应用、测设的基本工作、建筑施工测量、隧道测量等,并适当增加了现代测量仪器、测绘技术和测绘软件应用等内容。

本书可作为测绘工程、土地资源管理、地理信息系统等专业的普通测量学教材以及采矿工程、土木工程、地质工程、资源环境与城乡规划等专业的工程测量学教材,也可供测绘、采掘工程等领域相关技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

测量学教程/崔希民主编. —北京:煤炭工业出版社,2009

普通高等学校教学用书

ISBN 978-7-5020-3491-7

I. 测… II. 崔… III. 测量学—高等学校—教材
IV. P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 099615 号

*
煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京市联华印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行
*

开本 787mm×1092mm^{1/16} 印张 14^{1/2}
字数 345 千字 印数 1—5,000
2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷
社内编号 6296 定价 30.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

《中华人民共和国高等教育法》规定:高等教育的任务是培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才。实践能力一般是指综合运用专业技术知识完成某项任务的能力,其衡量标准是完成任务的质量与效率。测量作为测绘工程、地理信息系统、土地资源管理、采矿工程、地质工程、土木工程、资源环境与城乡规划等专业的专业基础课,不仅要求学生掌握测量的基本知识、基本概念、基本原理和方法,同时要求培养学生具有观测、计算和绘图等综合实践能力。

我们深知,测绘行业的特点是它与现代科学技术的发展密切相关,新仪器、新方法、新技术不断涌现。原有教材大多以介绍老式的光学仪器为主,内容陈旧,很少涉及现代测绘仪器;在章节编排上,内容相互交叉,不利于学生理解和教师讲授,且大多数教材缺少例题和实例。如何既继承传统的测量学内容,又补充和完善现代测绘仪器、技术方法等教学内容,正确处理现代测绘科学技术与现代科学技术的关系,体现现代测绘科学技术水平和测绘方法,这是教材编写者首先要考虑的问题。

为满足现代社会对测绘人才的培养要求,我们在广泛查阅相关文献的基础上,对课程体系、内容衔接等进行了多次研讨。在内容上,增加了测量学发展简史、现状和趋势的详细分析,增加了测距仪、数字水准仪、电子经纬仪、全站仪、GPS控制等现代测绘仪器内容,以及数字测绘、CASS软件和Excel在测量中的应用等;在结构上,以测量基本工作内容和程序为主线,前后衔接,循序渐进,以期促进测绘高素质人才的培养。

本书由崔希民任主编,彭小沾、刘文龙任副主编。参加编写的有:崔希民(绪论)、刘文龙(第1章、第6章)、崔旭升(第2章至第4章)、彭小沾(第5章、第7章至第9章)、孙国庆(第10章、第11章)。

本教材承蒙杨可明副教授的详细审阅,并提出了宝贵的修改意见;得到了中国矿业大学(北京)、华北科技学院、北京工业职业技术学院、淮海工学院等院校的支持;硕士研究生张兵和赵瑞完成了部分插图的绘制工作,在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,恳请读者批评指正!

联系方式:cxm@cumtb.edu.cn

编 者

2009年3月

目 录

0	绪论	1
0.1	测量学的基本概念与研究内容	1
0.2	测量学的学科分类	1
0.3	测量学发展简史	3
0.4	测量学的现状与发展趋势	4
0.5	测量学的作用	8
0.6	学习目的与要求	9
	练习思考题	9
1	测量的基本知识	10
1.1	1.1 地球的形状和大小	10
1.2	1.2 地面点位置的表示方法	12
1.2.1	1.2.1 地理坐标系	12
1.2.2	1.2.2 高斯平面直角坐标系	12
1.2.3	1.2.3 高程	15
1.3	1.3 测量工作概述	16
1.4	1.4 测量常用的计量单位与换算	16
	练习思考题	17
2	角度测量	18
2.1	2.1 角度测量原理	18
2.1.1	2.1.1 水平角测角原理	18
2.1.2	2.1.2 竖直角测角原理	18
2.2	2.2 DJ ₆ 型光学经纬仪及其操作	19
2.2.1	2.2.1 DJ ₆ 型光学经纬仪的构造	19
2.2.2	2.2.2 DJ ₆ 型光学经纬仪的读数装置	21
2.2.3	2.2.3 DJ ₆ 型光学经纬仪的基本操作	22
2.3	2.3 角度测量方法	24
2.3.1	2.3.1 水平角观测	24
2.3.2	2.3.2 竖直角观测	27
2.4	2.4 DJ ₆ 型光学经纬仪的检验与校正	30
2.4.1	2.4.1 照准部水准管的检验校正	30

2.4.2	十字丝竖丝垂直于横轴的检验校正	31
2.4.3	视准轴垂直于横轴的检验校正	31
2.4.4	横轴垂直于竖轴的检验校正	32
2.4.5	竖盘指标差的检验校正	33
2.4.6	光学对中器的检验校正	33
2.5	角度测量的误差	34
2.5.1	仪器误差	34
2.5.2	仪器对中误差和目标偏心误差	36
2.5.3	观测误差	37
2.5.4	外界条件的影响	37
2.6	其他经纬仪的介绍	37
2.6.1	DJ ₂ 型光学经纬仪	37
2.6.2	电子经纬仪	39
	练习思考题	42
3	高程测量	43
3.1	水准测量原理	43
3.2	DS ₃ 型水准仪及其操作	45
3.2.1	DS ₃ 型水准仪构造	45
3.2.2	水准尺、尺垫和三脚架	48
3.2.3	水准仪的操作	49
3.3	水准测量方法及其成果处理	50
3.3.1	水准点	50
3.3.2	水准路线	51
3.3.3	水准测量外业方法	52
3.3.4	水准测量内业成果处理	53
3.3.5	Excel在水准测量内业成果处理中的应用	56
3.4	微倾式水准仪的检验与校正	57
3.4.1	水准仪的轴线及其应满足的几何条件	57
3.4.2	水准仪的检验与校正	58
3.5	水准测量误差分析	60
3.5.1	仪器误差	60
3.5.2	观测与操作者的误差	61
3.5.3	外界环境的影响	61
3.5.4	水准测量注意事项	63
3.6	三角高程测量	63
3.7	其他水准仪介绍	65
3.7.1	自动安平水准仪	65
3.7.2	精密水准仪	66

3.7.3	数字水准仪	68
练习思考题		70
4	距离测量与直线定向	72
4.1	钢尺量距	72
4.1.1	钢尺量距的工具	72
4.1.2	直线定线	73
4.1.3	钢尺量距的一般方法	74
4.1.4	钢尺量距的精密方法	75
4.1.5	钢尺量距的误差分析及注意事项	75
4.2	视距测量	76
4.2.1	视线水平时的视距测量原理	76
4.2.2	视线倾斜时的视距测量原理	77
4.2.3	视距测量的观测方法	77
4.2.4	视距测量的误差分析	78
4.3	电磁波测距	78
4.3.1	电磁波测距基本原理	79
4.3.2	光电测距仪及其使用	81
4.3.3	光电测距精度分析及注意事项	82
4.3.4	全站仪介绍	83
4.4	直线定向	84
4.4.1	标准方向的种类	85
4.4.2	直线方向的表示方法	85
4.4.3	几种方位角之间的关系	86
4.4.4	用罗盘仪测定磁方位角	87
4.4.5	陀螺定向	88
练习思考题		88
5	测量误差分析与精度评定	90
5.1	概述	90
5.2	误差的来源	91
5.3	误差的分类与性质	91
5.4	衡量观测值精度的指标	93
5.4.1	中误差	94
5.4.2	相对误差	95
5.4.3	极限误差	95
5.5	误差传播定律	95
5.6	算术平均值中误差与白塞尔公式	97
5.6.1	算术平均值及其中误差	97

80	5.6.2 白塞尔公式	98
07	练习思考题	99
65	6 小地区控制测量	101
55	6.1 概述	101
57	6.1.1 控制测量的意义和方法	101
65	6.1.2 国家控制网简介	101
45	6.1.3 城市控制网	103
25	6.1.4 小地区控制测量	105
65	6.2 经纬仪导线测量	106
05	6.2.1 导线布设形式	106
05	6.2.2 经纬仪导线测量外业	107
55	6.2.3 经纬仪导线测量内业计算	108
55	6.3 Excel 在经纬仪导线内业计算中的应用	113
85	6.4 交会定点	116
85	6.4.1 角度交会法	116
05	6.4.2 距离交会法	119
18	6.5 高程控制测量	121
58	6.6 GPS 技术在控制测量中的应用	123
68	6.6.1 概述	123
48	6.6.2 GPS 卫星定位原理	124
28	6.6.3 GPS 定位方式与定位模式	125
28	6.6.4 影响 GPS 定位精度的因素	126
08	练习思考题	127
78	7 地形图及其成图方法	129
88	7.1 地形图基本知识	129
	7.1.1 地形图的基本概念与分类	129
08	7.1.2 图的比例尺	129
08	7.1.3 地形图符号	131
18	7.1.4 地形图的图幅、图名、图号、接图表和图廓	134
18	7.2 等高线特性及其描绘方法	136
68	7.2.1 等高线的特性	136
48	7.2.2 等高线的种类	137
28	7.2.3 等高线的描绘方法	137
28	7.3 空间信息采集与成图方法	138
28	7.3.1 常规成图方法	138
58	7.3.2 数字化测图技术	142
58	7.4 基于 CASS 5.1 数字化测图	144

7.4.1	CASS 5.1 简介	144
7.4.2	草图法数字测图	145
7.5	基于 CASS 5.1 的电子平板法数字测图	149
7.6	等高线的处理	153
7.7	地形图的分幅及编号	157
7.7.1	梯形分幅	157
7.7.2	矩形图幅的分幅及编号	162
7.7.3	北京市大比例尺地形图分幅及编号	163
	练习思考题	163
8	地理空间信息分析与应用	165
8.1	目视分析	165
8.2	量算分析	165
8.2.1	坐标量算	165
8.2.2	高程量算	166
8.2.3	坡度量算	166
8.2.4	直线长度与坐标方位角的量算	167
8.2.5	平整场地土方量的量算	167
8.2.6	确定汇水面积	168
8.2.7	图形面积量算	169
8.2.8	根据等高线计算体积	171
8.3	图解分析	171
8.3.1	剖面图、块状断面图和玫瑰图表的绘制	171
8.3.2	在地形图上确定通视情况	173
8.4	数理统计分析	173
8.4.1	地图要素分布的统计特征和分布密度	173
8.4.2	制图现象相互关系密切性分析	174
8.5	数学模型分析	175
	练习思考题	176
9	测设的基本工作	177
9.1	水平距离、水平角度和设计高程的测设	177
9.1.1	水平角度的测设	177
9.1.2	水平距离的测设	178
9.1.3	设计高程的测设	179
9.2	点的平面位置的测设方法	180
9.2.1	直角坐标法	180
9.2.2	极坐标法	181
9.2.3	角度交会法	181

9.2.4	方向线交会法	182
9.2.5	距离交会法	182
9.3	设计坡度线的测设方法	182
	练习思考题	183
10	建筑施工测量	184
10.1	概述	184
10.2	施工控制网的建立	185
10.2.1	施工控制网形式	185
10.2.2	平面控制测量	185
10.2.3	建筑场地的高程控制测量	188
10.3	民用建筑施工测量	189
10.3.1	建筑物的定位和放线前的准备工作	189
10.3.2	建筑物定位与放线	190
10.3.3	建筑物基础施工测量	192
10.3.4	墙体施工测量	193
10.4	高层建筑物施工测量	194
10.4.1	高层建筑物轴线的投测	194
10.4.2	高层建筑物的高程传递	195
10.5	工业建筑施工测量	195
10.5.1	厂房矩形控制网测设	195
10.5.2	厂房柱列轴线测设和柱基施工测量	195
10.5.3	厂房构件安装测量	196
10.6	竣工总平面图的编绘	198
10.6.1	竣工测量	198
10.6.2	竣工总平面图的编绘	199
	练习思考题	199
11	隧道测量	200
11.1	概述	200
11.1.1	隧道测量内容与作用	200
11.1.2	贯通误差及分类	201
11.1.3	贯通误差来源及分配	201
11.2	地面控制测量	202
11.2.1	平面控制测量	202
11.2.2	高程控制测量	204
11.3	联系测量	204
11.3.1	联系测量目的	204
11.3.2	几何定向	205

11.3.3 传递高程	209
11.4 隧道控制测量	210
11.4.1 隧道内平面控制测量	210
11.4.2 隧道内高程控制测量	212
11.5 隧道施工测量	213
11.5.1 隧道的中线测设	213
11.5.2 曲线巷道的中线标定	213
11.5.3 腰线的标定	214
练习思考题	216
主要参考文献	217

0 绪论

0.1 测量学的基本概念与研究内容

1. 测量学的基本概念

测量是以地球为研究对象,利用测量仪器测定地球表面自然形态的地理要素和地表人工设施的形状、大小、空间位置及其属性等,再根据观测到的数据通过地图制图的方法将地面的自然形态与人工设施等绘制成图。

一般情况下,测量工作仅限于较小区域的测量与制图,将地面当成平面,不考虑地球曲率与大气折光的影响。但是地球表面并不是平面,测量范围也不限于较小区域,特别随着现代测绘科学技术应用领域的不断扩大,测量范围不仅是一个地区或一个国家等大区域,有时甚至需要进行全球的测绘工作。测量工作变得越来越复杂,不仅要研究地球表面自然形态与人工设施的几何信息的获取与表述,而且要把地球作为一个整体,研究获取与表述几何信息以外的物理信息,例如地球重力场信息以及这些信息随时间的变化等。因此,现代测量学研究的对象不仅是地球,而且其研究范围已经扩大到地球外层空间的各种自然与人造物体。

一个比较完整的测量学基本概念应该是研究实体(包括整个地球、表面以及外层空间各种自然和人造物体)与地理空间分布有关的各种几何、物理、人文及其随时间变化的信息的采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。就地球而言,测量学就是研究测定和推算地面的几何位置,确定地球形状和重力场,获取地球表面自然形态和人工设施的几何分布以及与其属性有关的信息,编制各种比例尺的普通地图与专题地图,给各种地理信息系统提供基本数据,为国民经济的发展、国家与国防建设和地学研究服务。

2. 测量学的研究内容

传统测量学的研究对象是地球及其表面,并对与其地理空间有关的信息进行采集、处理、管理、更新和利用。因此,测量学的主要内容包括测定和测设两部分。测定是使用测量仪器和工具,将测区内的地物和地貌测绘成图,供规划设计、工程建设和国防使用;测设又称放样,是将图上设计好的建筑物或构筑物的位置标定到实地上,以便施工,同时对已建成的建筑物、构筑物进行竣工测量和变形监测。

0.2 测量学的学科分类

随着科学技术的发展和社会文明的进步,各行各业对测量精度的要求也在不断提高,测量学科的分类也越来越细,形成了各分支学科。

1. 大地测量学

大地测量学是研究和测定整个地球的形状、大小、重力场和特定地面点位置的科学。从大地测量的发展来看,又可将其分为几何大地测量、物理大地测量和卫星大地测量三个学科分支。几何大地测量是用天文测量方法研究一个与地球外形最接近的几何体的形状与大小,该几何体称为旋转椭球体;物理大地测量是用物理方法测定地球形状及其外部重力场;卫星大地测量是利用人造地球卫星进行地面点定位及测定地球形状、大小和地球重力场。现代大地测量学是利用几何、物理和空间对地观测的理论和方法,研究和确定地球形状、大小、重力场和地面点位置的综合学科。

2. 地形测量学

地形测量学是研究局部小地区地形图测绘问题,把地球表面当平面看待,不考虑地球曲率影响,将地球表面的高低起伏以及各种自然物体和人工建筑物测绘成图。

3. 摄影测量学

摄影测量学是利用摄影像片来获取被摄物体的信息,通过分析和处理,确定物体的形状、大小、空间位置并判别其属性。摄影测量不与探测目标直接接触,从远处把目标的电磁波特性记录下来,通过分析,揭示出物体的特征、性质及其变化的综合性探测技术。摄影测量学按摄像机或传感器所处的平台不同,可分为地面摄影测量、航空摄影测量、航天摄影测量和水下摄影测量等。

4. 海洋测绘学

海洋测绘学是以海洋和陆地水域为对象进行的测量工作。同陆地一样,在海洋、江河、湖泊上进行开发的第一个阶段工作是水下地形测图。同时根据《联合国海洋公约》200海里约370km专属经济区和大陆架制度已经在世界范围内确立起来,加强本国大陆架和专属经济区的勘探开发和管理、维护海洋权益和解决海域划界问题,海洋测绘学尤显重要。而我国300万平方公里的海洋国土有近一半存在争议,海洋安全形势十分严峻。

5. 制图学

不管利用传统的测量手段还是利用现代测绘科学与技术,所获得的地面点位置与属性信息大都以图的形式展现在人们的面前。制图学就是研究利用所获得的测量成果,编绘和印制各种地图,研究通过地图图形信息来反映自然界和人类社会各种现象的空间分布、相互关系和动态变化。

6. 工程测量学

工程测量学是为了满足工程建设需要,结合各种工程建设特点,研究工程建设和资源开发中,在规划、设计、施工和运营管理各个阶段进行的控制测量、地形测绘、施工放样以及变形监测的理论、技术和方法。工程测量按其工作顺序和性质可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以及

变形监测和维修养护测量等;工程测量按工程建设对象又可分为建筑工程测量、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、军事工程测量等。不同工程对测量精度的要求也不同,因此按测量精度可分为精密工程测量和特种精密工程测量等。

0.3 测量学发展简史

社会发展历史证明,生产决定了科学的产生与进步。由于生活与社会生产的需要,在远古时代,测量工作就被应用于人类生活实际,可以说测绘科学是人类通过长期生产生活与自然界斗争实践而形成的。

据《史记·夏本记》记载,公元前 21 世纪禹奉舜命治水就有对测量工作的描述。“(禹)陆行乘车,水行乘舟,泥行乘橇,山行乘撵,左准绳,右规矩……”据考证,“准、绳、规、矩”是古代的测量工具。“准”指古代用的水准器,“绳”指测距工具,“规”指校正圆形的工具,“矩”指画方形的工具。“左准绳”是用“准”和“绳”来测量地势高低;“右规矩”是用“规”和“矩”来绘制成图。

另据在埃及肥沃的河谷和平原上发现的证据表明,早在公元前 1400 年,就有地产边界的测定。公元前 3 世纪,中国人已经知道了天然磁石的磁性,有了某些形式的磁罗盘。地球是测绘学研究的对象,早期认为天圆地方,直到公元前 6 世纪古希腊的毕达哥拉斯才提出了地球是球形的概念;公元前 4 世纪,亚里士多德进一步论证了地圆说;公元前 3 世纪,埃拉托斯尼采用两地观测日影的方法,首次推算出地球子午圈的周长和地球的半径并证实了地圆说;公元 8 世纪南宫说在张遂(一行)指导下,在河南境内的白马到上蔡最早进行了实地弧度测量,根据测绳丈量的距离和日影长度测得的纬度推算 1° 子午线的弧长为 132.31km,但由于当时所用的尺子迄今未得到确认,无法验证该弧度测量的精度。

17 世纪末,为了用地球的精确大小定量证实万有引力定律,英国的牛顿和荷兰的惠更斯首次从力学原理提出了地扁说;18 世纪中叶,法国科学院在南美的秘鲁和北欧的拉普兰进行弧度测量,证实了地扁说;1743 年,法国的克莱洛论证了地球几何扁率与重力扁率之间的关系,为物理大地测量打下了基础。19 世纪初,随着测量精度的提高,通过各处弧度测量结果的研究,法国的拉普拉斯和德国的高斯相继指出了地球的非椭球性;1849 年,斯托克斯提出利用重力观测资料确定地球形状的理论 and 计算方法;1873 年,利斯廷创造了“大地水准面”一词,提出了用大地水准面代表地球形状,从此确认了大地水准面比椭球面更接近地球真实形状的概念。直到 1945 年苏联的莫洛坚斯基创立了用地面重力测量数据直接研究真实地球自然表面形状的理论。可以说人类对地球形状的认识经历了圆形、椭球、大地水准面到真实地球自然表面的过程,该过程促进了距离、角度、弧度等测量技术的进步以及地球形状确定理论的创立。

为了测定地球表面的地物和地貌,就要使用各种测量仪器,测量仪器的发展也是随着社会生产和生活要求逐步更新。公元前 3 世纪,中国已经用指南仪器——司南来确定方向;公元 400 年,中国发明了记里鼓车,用以测量距离。1276 年,元朝的郭守敬创制了多种天文仪器,用于测定天体的高度和方位。15 世纪,航海和地理开发的需要,研究地球形状的科学得到发展;同时,军事和经济建设的需要,对测量仪器提出了更高的精度要求。1608 年荷兰人

汉斯发明了望远镜。1667年法国首先在全圆分度器上安装了望远镜,进行测角;1783年,英国制成了度盘直径90cm、重达91kg的经纬仪;17世纪后期,丹麦天文学家奥拉夫-鲁默尔将测微器和显微镜用于读取度盘读数,大大提高了读数精度。1858年,意大利工程师波尔勒发明了内对光望远镜,未能推广应用;1892年,减反射涂层的发明,使内对光望远镜的制造得到发展;1920年,威特等人成功制造了世界上第一台光学经纬仪,定名TH1型,1923年生产出T2型经纬仪。至此,现代光学测量仪器的基本结构已经确定。

测量成果的表现形式是地(形)图。地(形)图是人类生产和军事活动的重要图件资料。早在公元前20世纪,就开始出现画在或刻在陶片、铜板等材料上的地图,但大都是根据文字记述或见闻绘制,可靠性差,精度低;公元前7世纪,春秋时期管仲所著的《管子》一书中已有地图的论述;平山县发掘出土的春秋战国时期的“兆域图”上,已经有了表示比例和符号的概念;在湖南长沙马王堆出土的公元前168年的长沙国地图和驻军图上,有地物、地形和军事要素表示;到公元224—271年,我国西晋的裴秀在总结前人制图经验的基础上,拟定了小比例尺地图的编制法规,称为“制图六体”,是世界上最早的制图规范之一。在国外,公元前3世纪,埃拉托斯尼首先在地图上绘制了经纬线;公元2世纪,古希腊的托勒密在其巨著《地理学指南》中汇集了当时已经明确的有关地球的一般知识,阐述了编制地图的方法,提出了将地球曲面表示为平面的地图投影问题。空间信息的获取总是带有一定的误差,1794年年仅17岁的高斯提出了解决从带有误差的观测值中找出未知量最佳估值的最小二乘法;1806年,勒让德从代数观点也独立提出了最小二乘法;1816—1820年,高斯首先推得了将地球曲面表示为平面的横圆柱正形投影计算公式;1912年克吕格对其加以补充和完善。高斯-勒让德最小二乘法、高斯-克吕格横圆柱正形投影仍然是目前测量数据处理和地形图绘制广泛采用的方法之一。

0.4 测量学的现状与发展趋势

测量的基本工作是测距、测角和测高差。随着电子学、信息学、计算机科学和空间科学的发展,推动了测绘科学技术与仪器的变革和进步,测绘仪器的发展导致了测绘技术的变革。1960年,美国贝尔实验室发明了世界上第一台红宝石激光器;1962年砷化镓半导体激光器研制成功。激光的出现,对传统测量仪器产生了深刻影响。激光测距仪或电磁波测距仪的出现,彻底改变了传统的钢尺量距或视距测量的工作模式,也改变了大地测量中以测角换算距离的面貌。例如,Wild测距仪的精度达到 $\pm(3\text{mm}+1\times 10^{-6}D)$, D 为所测距离,单位为km,测程达14km,氦氖激光光源的应用则使测程达到60km以上,精度达到 $\pm(5\text{mm}+5\times 10^{-6}D)$ 。20世纪80年代开始,多波段载波测距仪的出现,抵偿、减弱了大气折射的影响,测距精度大大提高,如ME5000测距仪达到了 $\pm(0.2\text{mm}+0.1\times 10^{-6}D)$ 的标称精度。同时,测距仪的体积和重量也大大减轻。

测角仪器的发展经历了三个阶段,即第一代的金属度盘经纬仪,用游标方法读取读数,仪器重、精度低,操作不便;第二代的光学度盘经纬仪,用玻璃度盘代替金属度盘,增加了光路系统,通过目镜读数窗进行读数,精度大大提高,重量明显减轻,体积减小,对高精度仪器角度读数可达到 $1''$ 甚至 $0.2''$;而第三代电子经纬仪,则用光栅度盘、编码度盘代替了玻璃度盘,通过光电转换,实现了角度的自动显示。

在高程测量中,微倾式水准仪的水准管上方安装了复合棱镜系统,将水准管两端半个气泡的像经过三次全反射,进入望远镜旁边的放大镜内,以提高目估水准管气泡居中精度;为了简化仪器的安置与操作过程,自动安平水准仪取消了复合棱镜系统,增加了补偿器,使仪器粗略整平后就可使视线精确水平。精密光学水准仪测量精度可达到 $\pm 0.5\text{mm}/\text{km}$,但由于光学望远镜分辨力的限制和大气湍流的影响,当视距跨越河流、深谷且大于 50m 时,读数和照准误差急剧增大,满足不了建筑物变形观测、大型工程结构安装等特殊工程的需要。激光水准仪利用垂直安装的激光管发出激光束后,由分光棱镜分成两部分:一部分折转 90° 水平射出,一部分垂直向下照射到光电对中检测器上,即使采用普通水准尺,在视距 200m 时精度为 $\pm 0.7\text{mm}/\text{km}$;如果视距在 100m 内,高差测量精度可达到 $\pm (0.01\sim 0.1)\text{mm}/\text{km}$ 。数字水准仪将编了码的水准尺影像进行一维处理(条形码),用传感器代替观测者的眼睛,从望远镜中看到水准尺间隔的测量信息,由微处理器自动计算出水准尺上的读数和仪器至立尺点间的水平距离,并以数字的形式将测量结果显示出来。

20世纪70年代,出现了测距仪与电子经纬仪合为一体的全站仪,具有跟踪测量、挡光停测、斜距、平距、水平角、垂直角、坐标、高差、曲率改正、气象改正等功能,实现了测角、测距的数字化,距离和方向都以数字的形式显示在屏幕上;再配以电子记录手簿和相应的软件即可实现数据记录和处理的内外业一体化。目前全站仪已经向电脑化、自动化、信息化和网络化方向发展。例如,日本 Sokkia SET-2100 和拓普康 GTS-700 等,安装了标准的 MS-DOS 操作系统,增加了存储系统,内存通常包括系统内存、程序内存、数据内存和工作内存,对于 SET-2100/3100/3100s/4100/4100s 系列,其内部存储器可存储 3000 个点的数据;而 Leica 公司开发的 TPS1000 系列全站仪,还向用户提供了一套在 Windows 下运行的开放式的软件开发及计算机仿真平台 Geobasic,主要包括 Gbc.exe 源代码编译程序和 Tps-sim.exe 计算机仿真程序,只要用户具有一定的 Basic 编译基础并拥有此开发软件及其配套的加密卡,即可开发出本行业野外作业实用的机载应用软件,将其加载到 TPS1000 系列全站仪中,可实现一台智能型、专业化或多用途全站仪的二次开发。全站仪种类繁多,生产厂家包括日本 Sokkia SET 系列、瑞士 Leica 系列、日本 Topcon 系列、德国 ZEISS Eita 系列、瑞典捷创力 Geodimeter 系列、日本 PENTAX 系列、日本 NIKON 系列,中国常州大地测距仪厂生产的 DTM 系列、南方测绘仪器公司生产的 NTS 系列等。

为了提高测量的数字化与自动化,奥地利维也纳技术大学的卡门教授首次提出了测量机器人的概念,于 1983 年用视觉经纬仪改制成功世界上第一台测量机器人,并用于监测矿区的地表移动。测量机器人是一种能代替人进行自动搜索、跟踪、辨识和精确照准目标并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息的电子全站仪。它是在全站仪基础上集成步进马达、CCD 影像传感器构成的视频成像系统,并配置智能化的控制及应用软件而发展形成的。自 20 世纪 80 年代以来,测量机器人的发展分为三种类型,第一种需要在被测物体上设置标志,主要是以反射棱镜为合作目标,称为被动式三角测量或极坐标法测量;第二种是以结构光作为照准标志,即用结构光形成的点、线、栅格扫描被测物体,通过空间前方交会法来确定被测点的坐标,称为主动式三角测量,由两台带步进马达、CCD 传感器的视频电子经纬仪和计算机组成;第三种是目前正在进行研制的测量机器人,它不需要合作目标,根据物体的特征点、轮廓线和纹理,用影像处理的方法自动识别、匹配和照准目标,仍采用空间前方交会的原理获取物体的三维坐标及形状。第一种测量机器人主要用于工程或局部地壳形变监

测以及大型工程的施工放样,也可用于水下地形测量和大比例尺数字化测图,称为单人测量系统。以滑坡监测为例,若在滑坡体上布设目标点,其上安置棱镜,在测量机器人测站上通过设置或初期观测后,测量机器人通过学习训练可对监测点进行持续监测或周期观测,测量数据和变形结果以有线通信和无线通信方式传输到中央处理站,可实现无人值守的持续性监测和早期预警,在危险状态下不需要人到现场作业。其优点是监测的点更多、速度更快,但需要地面点通视,受雨雾等外界条件的影响大,且随距离的增加精度降低较快。第二、第三种类型的测量机器人主要用于三维工业测量,如飞机、轮船、轿车等的外形测量,大坝、桥梁、滑坡的变形监测和产品的质量检核与控制等。

三维工业测量技术是以电子经纬仪、全站仪、近景摄影机或激光扫描仪等为传感器,在电子计算机和软件的支持下形成的三维测量系统。三维工业测量系统分为3大类,即以电子经纬仪或全站仪为传感器的工业大地测量系统;以近景摄影机为传感器的工业摄影测量系统;以激光扫描仪为传感器的激光扫描测量系统。

工业大地测量系统发展最早,应用较广,如美国研制的AIMSRT系统三维测量精度达到了0.05mm;瑞士和法国联合研制的RMS200系统,在抛物面天线三维测量中,抛物面焦距值与设计值之差为1mm,功效提高3~4倍;德国研制的IMS系统,在飞机表面三维测量中,位置和高度精度均达到 ± 0.1 mm;瑞士研制的SPACE全自动工业测量系统,望远镜内装微型CCD摄影机,能进行数字图像处理,每小时可测500点三维坐标,点位精度高于0.1mm。武汉大学冯文灏教授等人研制的“基于测角仪器的联机工业测量系统”,在大型物体表面三维测量方面,点位和高度精度达到0.5mm以内,解放军信息工程大学李广云教授等人研制的工业测量系统精度达到0.5mm。

工业摄影测量系统,通常以近景摄影的方式实现,其优点是通过像片提供大量信息,施测周期短,可在瞬间完成测量全过程,可对动态目标进行测量,可以多重摄影,有多余观测值,精度可靠,最好的相对精度可达百万分之一。在我国也采用此技术进行过大型飞机外形、古建筑、大佛建造、船闸、高炉、流速动态等测量或监测。

激光扫描测量系统,是以激光扫描仪为传感器的三维工业测量系统。激光扫描“点阵”可再现所测物体的三维立体景观,可直接用于点对点的量测,利用拟合软件,点阵可转换成三维模型、二维平面图、等高线图或断面图等,也可以同时用于CAD及相关应用。如瑞士研制的Cyrax[®]激光扫描仪,具有扫描范围大、速度快、分辨率高、建模快、拼接好的特点。激光扫描仪的问世,使三维工业测量系统进一步向自动化、智能化、多用途方向发展。

目前,基于微电子技术、信息技术、计算机科学和空间科学技术,形成了现代测绘科学与技术。GPS、RS和GIS——3S为其代表。

1. GPS——全球定位系统

GPS是全球定位系统的简称,是美国国防部为满足其军事部门(海、陆、空)高精度导航、定位和定时的要求而建立的一种卫星定位和导航系统。它由24颗工作卫星组成,其中包括3颗可随时启动的备用卫星。工作卫星均匀分布在6个相对于赤道面倾角为 55° 的近似圆形轨道面内,每个轨道面上有4颗卫星,轨道之间的夹角为 60° ,轨道平均高度为20200km,卫星运行周期为11小时58分。同时在地平线以上的卫星数目随时间和地点而异,最少为4颗,最多时达11颗。保证了在地球任一点任一时刻均可收到4颗以上卫星的