

SURVEYING

普通高等教育规划教材

测量学

李希灿 齐建国 主编



化学工业出版社

普通高等教育规划教材

测 量 学

李希灿 齐建国 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要包括：现代测量学的基本概念、原理和方法，角度、距离和高程的测量方法，控制测量，地形图测绘，数字测图，地形图的应用，施工放样，水利工程测量，民用建筑测量，路桥工程测量，农林工程测量，地籍测量，3S技术简介等。本书编写重视培养学生的学习能力，突出基础理论，加强实践性教学环节，理论联系实际，拓宽专业口径，注意精选保留传统测绘技术的基本内容，适当充实了数字测图、全站仪的应用、3S技术等较多的测绘科学新技术。教材内容精炼，文字通俗易懂，便于自学，专业覆盖面广。

本书为普通高等教育土木工程、水利工程、路桥工程、农林工程等有关专业的“测量学”课程的教材，有较宽的适用面，亦可供广大工程技术人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

测量学/李希灿，齐建国主编. —北京：化学工业出版社，2014.3
普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-19748-1

I. ①测… II. ①李…②齐… III. ①测量学-高等学校-教材 IV. ①P2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 023735 号

责任编辑：王文峡
责任校对：边 涛

文字编辑：刘莉珏
装帧设计：史利平

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）
印 刷：北京云浩印刷有限责任公司
装 订：三河市前程装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张16¼ 字数420千字 2014年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：<http://www.cip.com.cn>
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：35.00 元

版权所有 违者必究

编写人员

主 编	李希灿	齐建国		
副主编	刁海亭	赵立中	厉彦玲	常小燕
参 编	万 红	杜 琳	董 超	丛康林
	胡 晓	齐广慧		
主 审	梁 勇			

前言

为满足我国当前高等教育改革和高校素质教育的需要，由山东农业大学测绘系根据高校农林工程、水利工程、土木工程、路桥工程等专业的测量学课程教学大纲的要求编写此书。

本书重视培养学生的学习能力，突出基础理论，加强实践性教学环节，理论联系实际，拓宽专业口径，注意精选保留传统测绘技术的基本内容，适当充实了数字测图、全站仪的应用、3S技术等较多的测绘科学新技术。教材内容精炼，文字通俗易懂，便于自学，专业覆盖面广。除可作为有关专业的“测量学”教材外，亦可供广大工程技术人员阅读参考。

本书共分16章，参加本书编写工作的有：李希灿（编写第1、12章），刁海亭（编写第2、6章），万红（编写第3章），董超（编写第4章），厉彦玲（编写第5章），杜琳（编写第7章），胡晓（编写第8章），齐广慧（编写第9章），齐建国（编写第10、16章），丛康林（编写第11章），赵立中（编写第13、14章），常小燕（编写第15章）。全书由李希灿、齐建国担任主编并统稿，刁海亭、赵立中、厉彦玲、常小燕担任副主编。本书由山东农业大学梁勇担任主审，在此深表谢意！对于本书中参考的有关文献资料的原作者表示诚挚的谢意！感谢化学工业出版社所做的辛勤工作！

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2014年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 测量学的任务与作用	1
1.1.1 测量学的概念	1
1.1.2 测量学的分类	1
1.1.3 测量学的任务	2
1.1.4 测量学的作用	2
1.1.5 测量学的发展概况	2
1.2 地球的形状与大小	4
1.2.1 水准面与大地体	4
1.2.2 参考椭球体	4
1.2.3 参考椭球定位	4
1.3 地面点位的表示方法	5
1.3.1 地面点的坐标	5
1.3.2 地面点的高程	8
1.4 地球曲率对基本观测量的影响	9
1.4.1 地球曲率对水平距离的影响	9
1.4.2 地球曲率对高程的影响	9
1.4.3 地球曲率对水平角度的影响	10
1.5 测量工作概述	10
1.5.1 测量的基本工作	10
1.5.2 测量工作的基本原则	10
1.5.3 测量的几个基本概念	10
本章小结	11
思考题	11
第2章 水准测量	12
2.1 水准测量的原理	12
2.1.1 高差测量	12
2.1.2 高程计算	12
2.2 微倾水准仪及其使用	13
2.2.1 微倾式水准仪的构造	13
2.2.2 水准尺和尺垫	14
2.2.3 水准仪的使用	15
2.3 普通水准测量	16
2.3.1 水准点与水准路线	16
2.3.2 水准测量的实施	17
2.3.3 水准测量的校核方法	18
2.4 四等水准测量	19
2.4.1 四等水准测量的技术要求	19
2.4.2 四等水准测量的实施	20
2.5 水准测量成果的内业计算	22
2.5.1 水准测量成果的内业计算步骤	22
2.5.2 闭合水准路线计算	22
2.5.3 附和水准路线计算	23
2.5.4 支水准路线计算	23
2.6 水准仪的检验与校正	24
2.6.1 圆水准器轴的检验与校正	24
2.6.2 十字丝横丝的检验与校正	25
2.6.3 水准管轴的检验与校正	25
2.7 水准测量的误差来源及消减方法	26
2.7.1 仪器误差	26
2.7.2 观测误差	26
2.7.3 外界条件影响	26
2.8 自动安平水准仪和电子水准仪	27
2.8.1 自动安平水准仪	27
2.8.2 电子水准仪	27
本章小结	28
思考题	28
第3章 角度测量	30
3.1 角度测量原理	30
3.1.1 水平角测量原理	30
3.1.2 竖直角测量原理	30
3.2 DJ ₆ 光学经纬仪及其使用	31
3.2.1 经纬仪的构造	31
3.2.2 经纬仪的读数方法	32
3.2.3 经纬仪的使用	34
3.3 水平角测量	35
3.3.1 测回法	35
3.3.2 方向观测法	36
3.4 竖直角测量	37
3.4.1 竖盘构造	37
3.4.2 竖直角及指标差的计算方法	38
3.4.3 竖直角的观测方法	39
3.4.4 竖盘指标自动补偿装置	40
3.5 经纬仪的检验和校正	40
3.5.1 长水准管轴的检验与校正	40
3.5.2 十字丝的检验与校正	41

3.5.3 视准轴的检验与校正	41	3.7 电子经纬仪简介	44
3.5.4 横轴的检验与校正	42	3.7.1 电子经纬仪的结构与功能	45
3.6 角度测量的误差来源及消减方法	43	3.7.2 电子经纬仪的测角原理	45
3.6.1 仪器误差	43	本章小结	47
3.6.2 观测误差	43	思考题	47
3.6.3 外界条件的影响	44		
第4章 距离测量与直线定向	48		
4.1 钢尺量距	48	4.3.5 手持激光测距仪简介	55
4.1.1 丈量工具	48	4.4 直线定向	55
4.1.2 直线定线	48	4.4.1 标准方向的种类	55
4.1.3 距离丈量的方法	49	4.4.2 直线方向的表示方法	56
4.1.4 距离丈量的精度	50	4.4.3 直线定向的方法	57
4.2 视距测量	50	4.5 坐标方位角推算与坐标计算	59
4.2.1 视距测量的基本原理	50	4.5.1 坐标方位角推算	60
4.2.2 视距测量的观测与计算	52	4.5.2 坐标增量计算	60
4.3 光电测距	52	4.5.3 坐标正算	60
4.3.1 光电测距的基本原理	52	4.5.4 坐标反算	61
4.3.2 相位式光电测距仪工作原理	53	本章小结	61
4.3.3 光电测距仪的使用	54	思考题	61
4.3.4 光电测距仪的成果整理	54		
第5章 测量误差的基本知识	63		
5.1 测量误差的来源与分类	63	5.3.3 线性函数	69
5.1.1 测量误差的概念	63	5.3.4 一般函数	70
5.1.2 测量误差的来源	63	5.4 观测值的算术平均值及其中误差	71
5.1.3 测量误差的分类	63	5.4.1 观测值的算术平均值	71
5.1.4 偶然误差的特性	64	5.4.2 算术平均值的中误差	71
5.2 衡量精度的标准	66	5.4.3 由改正数计算中误差	72
5.2.1 平均误差	66	5.5 误差传播定律的应用	73
5.2.2 中误差	66	5.5.1 距离测量的精度	73
5.2.3 极限误差	67	5.5.2 水准测量的精度	73
5.2.4 相对误差	67	5.5.3 角度测量的精度	74
5.3 误差传播定律	67	本章小结	75
5.3.1 倍数函数	68	思考题	75
5.3.2 和差函数	68		
第6章 小区域控制测量	77		
6.1 控制测量概述	77	6.3.5 导线定向	81
6.1.1 平面控制测量	77	6.4 导线测量的内业计算	81
6.1.2 高程控制测量	78	6.4.1 闭合导线坐标计算	81
6.2 导线及技术指标	79	6.4.2 附和导线坐标计算	84
6.2.1 导线的布设形式	79	6.4.3 支导线坐标计算	85
6.2.2 导线的技术指标	80	6.5 高程控制测量	86
6.3 导线测量的外业工作	80	6.5.1 三、四等水准测量	86
6.3.1 踏勘选点	80	6.5.2 三角高程测量	86
6.3.2 边长测量	81	本章小结	88
6.3.3 角度测量	81	思考题	88
6.3.4 高程测量	81		

第 7 章 大比例尺地形图传统测绘方法	90
7.1 比例尺及其精度	90
7.1.1 比例尺的种类	90
7.1.2 比例尺精度	91
7.2 地物地貌在地形图上的表示方法	91
7.2.1 地物符号	91
7.2.2 地貌符号	93
7.3 测图前的准备工作	96
7.3.1 图幅的划分	96
7.3.2 图纸的准备	97
7.3.3 展绘控制点	97
7.4 碎部测量	97
7.4.1 碎部点的选择	97
7.4.2 测定碎部点的基本方法	98
7.4.3 经纬仪测绘法测图	98
7.4.4 地物、地貌的测绘	100
7.5 地形图的检查、整饰与清绘	102
7.5.1 地形图的检查	102
7.5.2 地形图的整饰与清绘	103
本章小结	103
思考题	103
第 8 章 全站仪、GPS 与数字测图	105
8.1 全站仪及其使用	105
8.1.1 全站仪概述	105
8.1.2 全站仪的基本结构及其功能	105
8.1.3 全站仪的使用	106
8.1.4 全站仪的存储管理	108
8.1.5 全站仪导线控制测量	108
8.2 全球定位系统组成与定位原理	109
8.2.1 全球定位系统的组成	109
8.2.2 全球定位系统的定位特点	110
8.2.3 全球定位系统的定位原理	111
8.2.4 全球定位系统定位模式	112
8.2.5 GPS 控制测量	113
8.3 数字测图	117
8.3.1 数字测图及其特点	117
8.3.2 数字测图系统及其分类	117
8.3.3 地面数字测图作业模式	118
8.4 地面数字测图的野外数据采集	120
8.4.1 全站仪法野外数据采集	120
8.4.2 GPS RTK 野外数据采集	120
8.5 地面数字测图的内业数据处理	123
8.5.1 CASS 9.0 软件操作界面	123
8.5.2 数据传输	124
8.5.3 平面图绘制与属性注记	125
8.5.4 等高线绘制与编辑	125
8.5.5 数字地图的分幅与输出	126
本章小结	126
思考题	126
第 9 章 地形图的应用	128
9.1 概述	128
9.1.1 地形图的基本知识	128
9.1.2 国家基本比例尺地形图系列	128
9.2 地形图的分幅和编号	129
9.2.1 梯形分幅和编号	129
9.2.2 矩形分幅和编号	133
9.3 地形图的识图	134
9.3.1 图名与图号	134
9.3.2 接图表	134
9.3.3 图廓和坐标格网线	134
9.3.4 其他图外注记	135
9.4 地形图应用的基本内容	136
9.4.1 确定点的平面位置	136
9.4.2 确定点的高程	137
9.4.3 确定两点间的水平距离	137
9.4.4 确定直线的方向	138
9.4.5 确定地面坡度	138
9.5 地形图在工程中的应用	138
9.5.1 利用地形图绘制纵断面图	138
9.5.2 利用地形图选线	139
9.5.3 利用地形图确定汇水面积	140
9.5.4 利用地形图确定水库库容	140
9.6 面积量算	141
9.6.1 解析法	141
9.6.2 图解法	141
9.6.3 斜坡面积计算	142
9.7 地形图的修测	142
9.7.1 地形图修测概述	142
9.7.2 地形图修测的方法	143
本章小结	143
思考题	144
第 10 章 施工放样的基本知识	145
10.1 概述	145
10.1.1 放样的原则	145

10.1.2	放样的精度要求	145	10.3.3	角度交会法	148
10.1.3	施工控制网的建立	145	10.3.4	距离交会法	149
10.2	放样的基本工作	145	10.3.5	全站仪法	150
10.2.1	水平角放样	145	10.3.6	GPS-RTK 法	152
10.2.2	水平距离放样	146	10.4	圆曲线放样	153
10.2.3	高程放样	147	10.4.1	圆曲线主点的放样	153
10.3	放样点位的基本方法	148	10.4.2	圆曲线的细部放样	155
10.3.1	直角坐标法	148	本章小结		155
10.3.2	极坐标法	148	思考题		155
第 11 章 水利工程测量		156	11.3.2	水闸底板及基坑开挖线的放样	165
11.1	渠道测量	156	11.3.3	闸墩轴线和闸墩基础开挖线的放样	165
11.1.1	渠道选线	156	11.3.4	底板立模线和底板高程的标定	166
11.1.2	渠道中线测量	156	11.3.5	翼墙放样	166
11.1.3	渠道纵横断面测量	156	11.3.6	上部建筑物轴线的标定	166
11.1.4	渠道土方计算	160	11.4	水工隧洞的施工测量	166
11.1.5	渠道放样	161	11.4.1	洞外控制测量	166
11.2	混凝土坝施工测量	162	11.4.2	隧洞施工测量	167
11.2.1	坝轴线的测设	162	11.4.3	洞内控制测量	167
11.2.2	坝体控制测量	162	11.4.4	竖井联系测量	167
11.2.3	清基中的放样工作	163	本章小结		169
11.2.4	坝体立模的放样工作	163	思考题		169
11.3	水闸的放样	164	12.4.2	轴线投测	177
11.3.1	水闸中心轴线的确定和工程控制的建立	164	12.4.3	高程传递	178
第 12 章 民用建筑施工测量		170	12.5	地下管道施工测量	178
12.1	概述	170	12.5.1	地下管道施工测量的任务	178
12.1.1	施工测量的资料准备	170	12.5.2	地下管道放线测设	179
12.1.2	施工测量的主要内容	170	12.5.3	地下管道施工测量	179
12.1.3	施工测量的主要技术要求	170	12.6	建筑物的变形观测	181
12.2	建筑场地的施工控制测量	171	12.6.1	概述	181
12.2.1	平面施工控制网	171	12.6.2	建筑物的沉降观测	182
12.2.2	施工高程控制	173	12.6.3	建筑物的倾斜观测	184
12.3	建筑物的施工测量	173	12.6.4	建筑物的水平位移观测	184
12.3.1	准备工作	173	12.7	竣工总平面图的绘制	185
12.3.2	建筑物的定位	173	12.7.1	竣工测量	185
12.3.3	建筑物的轴线控制	174	12.7.2	竣工总平面图的绘制	185
12.3.4	基础施工测量	175	本章小结		186
12.3.5	墙体施工测量	176	思考题		186
12.4	高层建筑物的施工测量	177	13.2.1	中线测量概述	188
12.4.1	基础定位与矩形控制网的设置	177	13.2.2	中线桩点的坐标计算	189
第 13 章 路桥工程施工测量		188	13.2.3	中线实地测设	190
13.1	概述	188	13.3	道路立交匝道测设	191
13.1.1	道路工程测量的任务	188			
13.1.2	桥梁工程测量的任务	188			
13.2	路线中线测量	188			

13.3.1	匝道的形式	191	13.6.1	路基边桩放样	196
13.3.2	匝道中桩坐标计算	192	13.6.2	路基边坡放样	198
13.3.3	匝道测设	194	13.6.3	机械化施工路基横断面的控制	198
13.4	竖曲线的测设	194	13.7	路面施工放样	199
13.4.1	竖曲线测设数据计算	194	13.7.1	路槽放样	199
13.4.2	竖曲线测设	195	13.7.2	路面放样	200
13.5	桥梁施工测量	195	13.7.3	路拱放样	200
13.5.1	桥梁施工控制测量	195	本章小结		201
13.5.2	桥墩、桥台中心和轴线控制桩的测设	196	思考题		201
13.6	路基边桩与边坡放样	196			
第14章 农林工程测量		202			
14.1	平原土地平整测量	202	14.3.1	平原地区定植测量	210
14.1.1	利用方格法平整土地	202	14.3.2	山丘地区定植测量	211
14.1.2	小范围的田面平整	204	14.4	园林主要工程测设	212
14.1.3	利用地形图平整土地	204	14.4.1	园林不规则建筑物测设	212
14.1.4	小块田合并的田面平整	205	14.4.2	园路测设	213
14.2	山地梯田规划和平整测量	205	14.4.3	公园水体测设	213
14.2.1	梯田规划	205	14.4.4	公园堆山测设	213
14.2.2	梯田定线测量	207	14.4.5	平整场地的测设	213
14.2.3	水平梯田施工	209	本章小结		214
14.2.4	条田的平整测量	209	思考题		214
14.3	果园定植测量	210			
第15章 地籍测量		215			
15.1	概述	215	15.4	地籍图的测绘	224
15.1.1	地籍	215	15.4.1	地籍图的基本内容	224
15.1.2	地籍管理	216	15.4.2	地籍图的测绘	225
15.1.3	地籍调查	216	15.4.3	宗地图的绘制	226
15.1.4	地籍测量	217	15.5	面积量算与统计	227
15.2	地籍调查	217	15.5.1	面积量算	227
15.2.1	地籍调查单元划分与宗地编号	217	15.5.2	面积汇总与统计	228
15.2.2	土地权属调查	218	15.6	数字地籍测量	228
15.2.3	土地利用现状调查	219	15.6.1	数字地籍测量的特点	228
15.2.4	土地的分等定级	222	15.6.2	数字地籍测量的作业流程	229
15.2.5	变更地籍调查	222	15.6.3	数字地籍绘图软件介绍	230
15.3	地籍测量	223	15.6.4	数字地籍图的绘制	231
15.3.1	地籍平面控制测量	223	本章小结		231
15.3.2	界址点坐标测量	223	思考题		231
第16章 3S 技术及其应用		232			
16.1	GNSS 技术及应用	232	16.2.1	遥感的概念及其特点	237
16.1.1	GNSS 的发展概况	232	16.2.2	遥感过程及其技术系统	238
16.1.2	北斗系统导航定位	233	16.2.3	遥感信息获取	239
16.1.3	CORS 技术	235	16.2.4	遥感图像处理	240
16.1.4	GNSS 技术的应用	236	16.2.5	遥感技术的应用	243
16.2	RS 技术及其应用	237	16.2.6	最新遥感对地观测技术前景	

展望	244	16.3.4 GIS技术的应用	247
16.3 地理信息系统技术及应用	245	16.4 3S技术集成应用	248
16.3.1 地理信息系统概述	245	本章小结	249
16.3.2 GIS的基本组成	246	思考题	249
16.3.3 GIS的主要功能	247		
参考文献	250		

第1章 绪论

测量学是一门古老而又年轻的学科，具有悠久的历史，又随着现代科学技术的发展而不断发展。本章主要介绍测量学的任务与作用、地球的形状与大小、地面点位置的表示方法、测量工作的基本原则。

1.1 测量学的任务与作用

1.1.1 测量学的概念

测量学是研究地球的形状和大小以及测定地面点或空间点相对位置的一门科学，其目的是为人们了解自然和改造自然服务。

测量学已广泛应用于资源勘察、农田水利建设、工业与民用建筑、交通及矿产开采、城市规划、军事等领域，为社会经济发展、国防建设、科学研究提供基础资料和技术支持。

现代科学技术的发展，为测量提供了新的技术手段，同时丰富了测量学科的内涵。现代测量学是利用先进测绘仪器和技术，研究空间数据的采集、传输、处理、存储、分析、制图、应用的科学与技术。

测绘学是测量学与制图学的统称。它是研究空间实体（包括地球整体、表面以及外层空间的各種自然和人造物体）的各種几何、物理、人文及其随时间变化的空间和属性信息的采集、处理、管理、更新、利用的科学与技术。可见，测量学是测绘学的重要组成部分。但一般而言，测量学等同于测绘学，不需要严格区分。

1.1.2 测量学的分类

随着科学技术的发展，测量学的分支越来越细，根据其研究对象、应用范围和技术手段的不同，测量学分为以下几个主要分支学科。

(1) 普通测量学 普通测量学是研究地球表面小区域内测量的基本理论、方法和技术的学科。由于范围较小，在研究过程中不考虑地球曲率对测量结果的影响。普通测量学也称为地形测量学。

(2) 大地测量学 大地测量学是研究整个地球的形状、大小和重力场，或研究在大区域内进行精密测量的理论和方法的学科。由于范围较大，在其研究过程中要顾及地球曲率对测量结果的影响。现代大地测量学可分为几何大地测量学、物理大地测量学和空间大地测量学。

(3) 摄影测量学 摄影测量学是利用摄影技术研究地表物体的形状、大小及空间位置的学科。根据摄影平台不同，摄影测量学可分为地面摄影测量、航空摄影测量和航天摄影测量；按技术处理方法，其可分为模拟法摄影测量、解析法摄影测量和数字摄影测量。

(4) 工程测量学 工程测量学是研究测量学的基本理论、方法和技术在工程建设中的应用，解决工程建设中施工放样、竣工测量和变形监测等实际问题的学科。工程测量学按其应用领域可分为土木工程测量、水利水电测量、矿山测量、道路工程测量和精密工程测量等。

(5) 地图制图学 地图制图学是研究利用测量的数据资料，编制、印刷、出版地图、地形图和专题图的理论和方法的学科。地图是测绘工作的重要产品形式。地图制图学为生产国

标的地图产品提供技术和方法。

(6) 海洋测量学 海洋测量学是以海洋水体和海底为对象,研究海洋定位、测定大地水准面、海底地形、海洋重力、海洋磁力、海洋环境等自然和社会信息的地理分布及其编制各种海图的理论和技术的学科。海洋测量学为海洋资源监测和管理、船舶和潜艇导航等方面提供服务。

随着电子计算机、信息技术、激光技术、遥感技术等现代科技的发展,尤其是以“3S”技术(GPS、GIS、RS)为核心的测绘科学技术与其他学科的交叉发展,测绘学科的各个分支学科开始由独立走向综合,逐渐形成一门新兴学科——地球空间信息学(Geo-spatial Information Science,简称 Geomatics)。

1.1.3 测量学的任务

测量学是一门用途极为广泛的应用科学,一般而言,其主要任务有两个:测图和测设。利用测量仪器和工具,通过测量地面点的有关数据,按一定的方法将地表形态及其信息绘制成图,这项工作称为地形图测绘,简称测图;利用测量仪器和工具,将在图纸上设计好的建筑物或构筑物的位置在地面上标定出来,这项工作称为施工放样,简称测设。可见,测图与测设的工作过程是相反的。

1.1.4 测量学的作用

测量学已广泛应用在经济建设、国防建设和科学研究等领域,如资源勘察、城市规划、农田水利建设、河道治理、工业与民用建筑、道路与桥梁工程建设、风景区与园林规划设计、矿产开采等。测量工作贯穿于工程建设的全过程,测绘工作者是工程建设的尖兵。对于土建类工程,在工程的规划、设计、施工、竣工和运行阶段都离不开测量工作。国防工程修建也需要测量工作,“地形图是将军的眼睛”形象表达了测绘在战争的重要作用,战略、战役布置,行军路线的选择,后勤供应站的设置等,尤其是现代化战争,要想精确打击目标,都要以准确的测绘资料为依据。在科学研究方面,诸如地壳变形、地震预报、滑坡监测、灾害预报、航天技术等其他科学研究中,都需要测量技术的支持。

在农业、林业生产中,诸如农林资源调查、土地利用规划、土地平整、灌溉工程设计与布置、苗木定植、绿化面积统计、水土保持等方面均需要进行测量工作。

随着信息农业的发展,各种精细农业信息的获取与传输,包括土壤养分、作物种植、施肥浇灌、灾害防治、农产品产销信息发布等,需要一个庞大的信息监测网络的支持,其中“3S”技术及其集成技术被越来越广泛地应用,成为信息农业技术的一部分。

1.1.5 测量学的发展概况

1.1.5.1 传统测量技术

测绘科学是人类长期以来改造自然、从事生产建设的经验总结,是一门古老而又年轻的学科。我国古代夏禹治水、古埃及尼罗河泛滥后农田边界再划分中,就已使用简单的测量工具和方法。夏禹治水所用的“准、绳、规、矩”,就是当时的测量工具。

据历史记载,我国的测量始于公元前7世纪前后。公元前5世纪~公元前3世纪,我国就制造出了世界上最早的定向工具“司南”。公元前130年,西汉初期的《地形图》为我国所发现的最早的地图。东汉张衡(78—139年)发明了世界上最早的“浑天仪”和“地动仪”。西晋裴秀(224—271年)的《制图六体》是世界上最早的制图规范。公元724年,我国历史上第一次应用弧度测量的方法测定地球的形状和大小,也是世界上最早的一次子午线弧长测量。北宋沈括(1031—1095年)创造分层筑堰法,用水平尺和罗盘进行地形测量,其制作的立体地形模型(“木图”),比欧洲最早的地形模型早700多年。元代郭守敬

(1231—1316年)在全国进行了27个点的纬度测量。18世纪初,我国绘制了全国地图《皇舆全览图》,1761年又改编成《大清一统舆图》。我国的万里长城、四川都江堰等宏伟的历史性建筑工程,至今仍蕴含着我国测量技术发展的历史辉煌。

随着社会生产力的发展,测绘科学也随之发展和更新。1492年,欧洲人哥伦布发现美洲新大陆,促进了航海事业的发展。从而对测绘科学提出了新的要求,也激发了人们对制图学以及地球形状和大小的研究。17世纪初,测绘科学在欧洲得到较大发展。1608年荷兰人汉斯发明了望远镜,使测量仪器和方法有了很大的改进,克服了测绘工作者的视觉限制。1617年荷兰人斯纳留斯首次进行了三角测量。1683年法国通过弧度测量证明地球是两极略扁的椭球体。19世纪,德国数学家高斯提出了基于最小二乘法的测量平差方法,而后又提出横圆柱投影学说,进一步完善了测绘科学的基本理论。1903年,飞机的出现和摄影测量理论的发展,航空摄影技术开始应用于测绘领域,使测绘手段有了巨大的变革。

1.1.5.2 现代测量技术

20世纪中期,随着电子技术、激光技术、电子计算机技术和空间科学技术等的迅速发展,测绘科学的理论、方法和手段都发生了根本变化,形成了以“3S”技术为代表的现代测量技术。

20世纪40年代出现了自动安平水准仪,提高了水准测量速度。20世纪60年代中期,激光测距仪的问世,使距离测量实现了自动化和高精度。1968年,电子经纬仪的诞生,标志着角度测量开始自动化。1990年电子水准仪的问世,实现了水准测量的自动化。随后,激光测距技术、自动测角技术和计算机技术的集成应用,促进了测绘仪器的大发展,电子速测仪(全站仪)、自动全站仪(测量机器人)的问世,实现了测量、记录、计算和成果输出的自动化、数字化,实现了测量内外业的一体化,从而大大提高了测量工作效率。

1957年,前苏联成功发射的人类历史上第一颗人造地球卫星,拓展了测绘科学的研究范围和方法。1966年,开始进行卫星大地测量。20世纪80年代,美国的全球定位系统(GPS)问世,因其具有全球、全天候、快速、高精度、不受通视条件限制等优点,GPS技术被广泛应用于大地测量、工程测量、地形测量,以及导航、通信、定位的军事、管理等领域。目前,全球导航卫星系统(GNSS)包含了美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、中国的Compass(北斗)、欧盟的Galileo系统。

20世纪50年代,摄影测量由模拟法向解析法过渡;20世纪80年代末,解析法摄影测量发展为数字摄影测量;将GPS定位技术与CCD摄影技术相结合,数字摄影测量又发展到实时摄影测量。20世纪70年代末,遥感技术(RS)趋于成熟,并在资源勘查、环境监测、自然灾害预警、军事等领域得到广泛应用,摄影测量发展为摄影测量与遥感。目前,遥感技术正向高光谱、超光谱遥感方向发展,其应用前景更为广阔。

随着计算机技术的发展,20世纪80年代出现了地理信息系统(GIS)。GIS因其具有数据综合、模拟与分析评价等技术优势,已被广泛应用在社会、经济、军事等领域的管理方面。随着计算机和网络技术的迅速发展,GIS正朝着一个可运行的、分布式的、开放的、网络化的全球GIS发展,其中三维GIS、时态GIS和网络GIS已经成为GIS发展的趋势和研究热点。

近几十年来,随着测绘“3S”技术的发展,以及计算机和网络通信技术的普及,测绘科学的研究领域早已从陆地扩展到海洋和宇宙空间,由地球表面延伸到内部;测绘成果从三维发展到四维、从静态转向动态;测绘技术体系从模拟转向数字、从地面转向空间,并进一步向网络化和智能化方向发展。

1.2 地球的形状与大小

1.2.1 水准面与大地体

测量的大部分工作是在地球表面进行的, 所以必须首先研究地球的形状与大小。地球的自然表面高低起伏、错综复杂, 有高山、丘陵、平原、海洋、河流和湖泊等。最高的山峰珠穆朗玛峰高达 8844.43m, 最深的马里亚纳海沟深达 11022m。从总体看, 海洋约占整个地球表面积的 71%, 陆地约占 29%。虽然地球表面的高低起伏很大, 但与地球的半径相比却微乎其微 (假设地球的半径为 700mm, 则珠穆朗玛峰的相对高度约为 1mm), 可以忽略不计。因此, 可以把地球总的形状看成是被海水包围的球体。

假想静止不动的海水面延伸穿过所有的陆地与岛屿, 形成一个封闭的曲面, 这个曲面称为水准面。水准面是水在地球重力作用下形成的静止闭合曲面, 因此水准面处处与铅垂线相垂直。受海水潮汐的影响, 海面时高时低, 所以水准面有无数个。由于地球内部质量分布不均匀, 造成水准面是一个不规则的曲面。测量上把通过平均海水面的水准面称为大地水准面。大地水准面在一个时期内是唯一的。大地水准面所围成的形体称为大地体。

如图 1-1 所示, 大地体可以代表地球的形状与大小。测量上把大地水准面作为高程测量的基准面。

1.2.2 参考椭球体

由于大地水准面是一个不规则的曲面, 无法用严密的数学公式表达, 不能作为测量上计算的基准面。因此, 人们用一个既可以用数学公式表达又很接近大地水准面的参考椭球面代替它。如图 1-1 所示, 参考椭球面是由一个椭圆绕其短轴旋转而形成的椭球面。参考椭球面所围成的形体称为参考椭球体。通常用这个参考椭球面作为测量与制图的基准面。

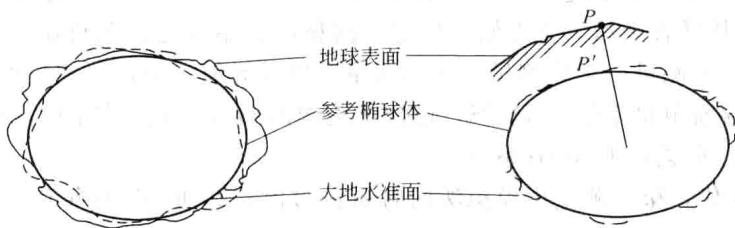


图 1-1 地球的形状

图 1-2 参考椭球定位

参考椭球体的形状和大小由椭圆的长半轴 a 和短半轴 b (或扁率 e) 决定。随着空间科学技术的发展, 可以越来越精确地测定椭球参数。目前, 我国采用 1975 年国际大地测量与地球物理联合会 (IUGG) 通过并推荐的椭球参数:

$$a = 6378137\text{m}$$

$$b = 6356752\text{m}$$

$$e = (a - b) / a = 1 / 298.257$$

由于参考椭球体的扁率很小, 接近于圆球, 当测区面积不大或测量精度要求不高时, 可以近似的将其视为圆球体, 其半径取参考椭球三半轴的平均值, 即 $R = (2a + b) / 3 \approx 6371$ (km)。

1.2.3 参考椭球定位

如图 1-2 所示, 在地球上选择适当的点 P , 设想把参考椭球与大地体相切, 切点 P' 点位

于 P 点的铅垂线方向上, 这时椭球面上 P' 点的法线与大地水准面的铅垂线相重合, 使椭球的短半轴与地轴保持平行, 且椭球面与大地水准面的差距尽量小。因此, 椭球表面与大地水准面的相对位置就得以确定。这项工作称为参考椭球定位。地球上的 P 点若为一个国家的坐标起算点, 则称大地原点。若对参考椭球面的数学表达式加入地球重力异常变化等参数的改正, 便可得到大地水准面的较为近似的数学表达式, 可以把观测结果归化到参考椭球面上。

从严格意义上讲, 测绘工作是选取参考椭球面作为测量的基准面, 但在实际工作中, 为了使用方便仍选取大地水准面作为测量的基准面。大地水准面和铅垂线便成为实际测绘工作的基准面和基准线。

1.3 地面点位的表示方法

测量工作的根本任务是确定地面点的空间位置, 而点的空间位置是用三维坐标来表示的。在工程上, 为方便使用通常采用平面直角坐标和高程表示地面点位的位置。

1.3.1 地面点的坐标

1.3.1.1 地理坐标系

用经纬度表示地面点空间位置的坐标系称为地理坐标系。地理坐标系属于球面坐标系, 依据采用的基准面和基准线的不同, 又分为天文地理坐标系和大地地理坐标系。

(1) 天文地理坐标系 天文地理坐标系又称天文坐标系, 用天文经度 λ 和天文纬度 φ 表示地面点投影在大地水准面上的位置。如图 1-3 所示。确定球面坐标 (λ, φ) 所依据的基准线为铅垂线, 基准面为大地水准面。

过地面点 A 与地轴的平面称为子午面。子午面与球面的交线称为子午线, 也称经线。子午面与首子午面间的夹角为天文经度 λ 。自首子午面向东 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为东经, 向西 $0^\circ \sim 180^\circ$ 称为西经。垂直于地轴的平面称为纬面。纬面与球面的交线称为纬线。垂直于地轴并通过地球中心 O 的平面称为赤道面。赤道面与球面的交线称为赤道。过 A 点的铅垂线与赤道面的交角称为天文纬度 φ 。纬度从赤道面向北 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为北纬, 向南 $0^\circ \sim 90^\circ$ 称为南纬。如泰山玉皇顶的天文地理坐标为东经 $117^\circ 05'$, 北纬 $36^\circ 15'$ 。

天文地理坐标可以在地面上用天文测量的方法确定。因其定位精度不高 (测角精度 $0.5''$, 相当于地面长度 10m), 常用于天文控制网、卫星导弹发射或独立工程控制网起始点的定位定向。

(2) 大地地理坐标系 大地地理坐标系又叫大地坐标系, 是以参考椭球面和法线为基准建立的坐标系。大地地理坐标表示地面点投影在参考椭球面上的位置, 其坐标原点并不与地球质心相重合。这种原点位于地球质心附近的坐标系, 又称参心大地坐标系。如图 1-4 所示, 地面点 A 沿着法线投影到椭球面上为 A' , 过 A' 点的子午面和首子午面间的夹角为大地经度 L , 过 A 点的法线与赤道面的交角为大地纬度 B , 过 A 点沿法线到椭球面的铅垂距离称为大地高, 用 $H_{\text{天}}$ 表示, 所以地面点 A 的大地坐标为 $(L, B, H_{\text{天}})$ 。

根据大地原点 (该点的大地经纬度与天文经纬度一致) 的坐标, 按大地测量方法所得的数据可以推算出任意地面点的大地经纬度, 而大地原点坐标是经过天文测量获得的天文经纬度。采用不同的椭球时, 大地坐标系是不一样的。采用参考椭球建立的坐标系叫参心坐标系, 采用总地球椭球并且坐标原点在地球质心的坐标系叫地心坐标系。我国目前常用的坐标系中, 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系是参心坐标系, 而 WGS-84 大地坐标系

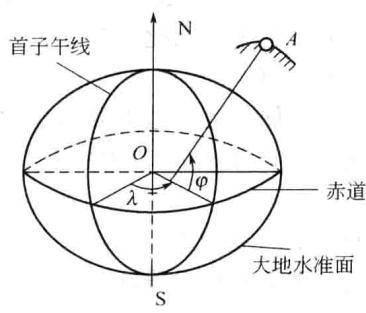


图 1-3 天文地理坐标系

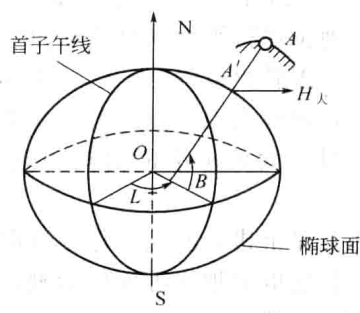


图 1-4 大地地理坐标系

和 2000 国家大地坐标系是地心坐标系。四种坐标系的对比分析见表 1-1。

表 1-1 我国常用坐标系

项目	1954 年 北京坐标系	1980 年 西安坐标系	WGS-84 大地坐标系	2000 国家大地坐标系
原点位置	苏联的普尔科沃	陕西省泾阳县永乐镇	地球质心	整个地球质心
长半径 a	6378245m	6378140m	6378137m	6378137m
椭球扁率	1/298.3	1/298.257	1/298.257223563	1/298.257222101
启用年份	1954 年	1980 年	1987 年	2008 年
坐标系类别	参心坐标系	参心坐标系	地心坐标系	地心坐标系

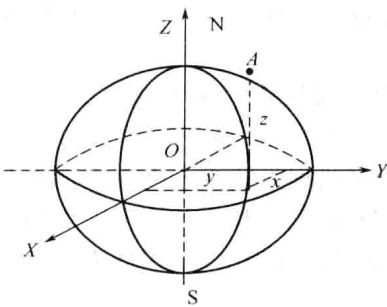


图 1-5 空间直角坐标系

1.3.1.2 空间直角坐标系

空间直角坐标系是以地球质心为原点的坐标系，坐标原点 O 选在地球椭球中心，对于总地球椭球，坐标原点与地球质心重合； Z 轴指向地球北极； X 轴为格林尼治子午面与地球赤道面交线； Y 轴垂直于 XOZ 平面，构成右手坐标系。如图 1-5 所示，地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 (x, y, z) 来表示。

地面点可以用大地坐标表示，也可以用空间直角坐标表示，两种坐标之间可以进行坐标转换。具体计算方法请参考有关文献，不再赘述。

1.3.1.3 WGS-84 坐标系

WGS-84 坐标系是全球定位系统 (GPS) 采用的坐标系，属地心空间直角坐标系。WGS-84 坐标系采用 1979 年国际大地测量与地球物理联合会第 17 届大会推荐的椭球参数 (见表 1-1)。WGS-84 坐标系的原点位于地球质心； Z 轴指向 BIH (国际时间服务机构) 1984.0 定义的协议地球极 (CTP) 方向； X 轴指向 BIH184.0 的零子午圈和 CTP 赤道的交点； Y 轴垂直于 X 、 Z 轴。 X 、 Y 、 Z 轴构成右手直角坐标系。

1.3.1.4 高斯平面直角坐标系

(1) 地图投影的概念 大地坐标可以使全球的坐标统一，但只能用来表示地面点在椭球上的位置，不能直接用来测图，对工程测量等很不方便。在工程建设中均使用平面图纸反映地面形态，测量计算和绘图多采用平面直角坐标。球面是一个不可展的曲面，就需要将球面上的大地坐标按照一定的数学法则归算到平面上，转换为平面直角坐标。把球面上的图形或数据归算到平面上的过程称为地图投影。将曲面转化成平面就会产生变形，包括长度变形、面积变形和角度