



高职高专“十二五”规划教材

土木建筑工程类

GongChengCeLiang
JiShu

■ 主编 王伟 郭清燕

工程测量 技术



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

高职高专“十二五”规划教材·土木建筑工程类

工程测量技术

主 编	王 伟	郭清燕
副主编	陈照平	史丽丽
	马华宇	李 璐
	周 鹏	贾延玲
	韩文平	

中国海洋大学出版社

· 青 岛 ·

内 容 简 介

本书作为建筑工程类专业基础课教材, 主要对工程测量的基础理论和方式方法进行了专业系统的讲解。内容叙述简明、准确、通俗易懂。

全书共分 12 个项目, 项目 1 介绍了测绘学的基本知识; 项目 2 至项目 4 介绍了测量的三项基本工作, 包括高程测量、角度测量、距离测量; 项目 5 介绍了测量误差基本知识; 项目 6 介绍了小地区控制测量的施测与计算; 项目 7 介绍了大比例尺地形图测绘方法; 项目 8 至项目 11 分别介绍了工业与民用建筑、线路工程、水利工程、桥梁与地下工程施工测量基本方法; 项目 12 介绍了变形观测。

本书可作为建设工程各类专业高职高专教材, 也可作为相关工程测量技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测量技术/王伟, 郭清燕主编. —青岛: 中国海洋大学出版社, 2012.9

ISBN 978-7-5670-0093-3

I. ①工… II. ①王…②郭… III. ①工程测量—教材
IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 213290 号

出版发行 中国海洋大学出版社

社 址 青岛市香港东路 23 号

邮政编码 266071

网 址 <http://www.ouc-press.com>

电子信箱 bjzhangxf@126.com

责任编辑 韩玉堂

印 制 北京天正元印务有限公司

版 次 2012 年 9 月第 1 版

印 次 2012 年 9 月第 1 次印刷

印 数 1-3000 册

成品尺寸 185mm×260mm 1/16

印 张 19.75

字 数 468 千字

定 价 38.00 元

本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换

前 言

本书是根据国家高等院校工程测量课程教学大纲要求，结合编者多年的教学经验，并广泛征求同行和专家的意见，由多所院校从事本课程教学的教师共同编写而成。本书可作为土木工程、交通工程、市政工程、桥梁工程、水利工程、矿山工程、建筑学、工程管理、房地产经营管理及农林等专业的专业基础课教学专用教材，也可供有关工程测量人员和教师参考。

全书共分 12 个项目单元，编写的主要特点是：

(1) 主题思想上，采用目前新兴的项目教学法，它是通过“项目”的形式进行教学。它具有的特点：把整个学习过程分解为一个个具体的工程或事件，设计出一个个项目教学方案，按行动回路设计教学思路，不仅传授给学生理论知识和操作技能，更重要的是培养他们的职业能力。

(2) 内容上，突出基础性，体现通用性，项目 1 至项目 7 着重阐述了测绘学的基本理论和知识，各工程专业都必须学，项目 8 至项目 12 结合不同工程专业详细介绍了多类工程测量中涉及的测量技术和方法，以供不同专业选用，适用于环境资源、土地规划、工民建、桥梁、隧道、水利工程、公路交通、房地产管理、园林绿化等众多专业的需求。

(3) 取材上，体现科学性、实用性、先进性，内容主要反映当代测绘的新一起、新技术，详述数字化测图的原理、基本配置及外业实施的主要步骤。

(4) 叙述上，深入浅出，图文并茂，概念阐述清晰准确，操作叙述条理化，既方便教学，也适用于自学。

本书由王伟、郭清燕任主编，陈照平、史丽丽、马华宇、李璐、周鹏、贾延玲、韩文平任副主编，柴伟杰、张文明、黎瑾慧、陈献军、刘延伦、戚振中参加编写。

由于编者水平所限，书中如有不足之处敬请使用本书的师生与读者批评指正，以便修订时改进。如读者在使用本书的过程中有其他意见或建议，恳请向编者(bjzhangxf@126.com)踊跃提出宝贵意见。

编 者

目 录

项目1 认识测绘学	1	2.4.1 水准点	23
任务 1.1 测绘学的概念及其分支	1	2.4.2 水准路线	24
1.1.1 测绘学的概念	1	2.4.3 水准测量的实测方法	24
1.1.2 测绘学的分类	2	2.4.4 水准测量检核方法	27
任务 1.2 地球的形状与大小	3	任务 2.5 水准测量的成果计算	29
1.2.1 人类对地球形状认识的演变	3	2.5.1 闭合水准路线测量成果计算	29
1.2.2 地球的形状与大小	4	2.5.2 附和水准路线测量成果计算	30
任务 1.3 地面点位置的确定	6	2.5.3 支水准路线测量成果计算	32
1.3.1 地理坐标系	6	任务 2.6 水准仪的检验与校正	32
1.3.2 高斯投影平面直角坐标系	7	2.6.1 圆水准器轴平行于仪器竖轴	
1.3.3 独立平面直角坐标	10	的检验与校正	32
1.3.4 地心坐标系	10	2.6.2 十字丝横丝垂直于仪器竖轴	
1.3.5 高程	11	的检验与校正	33
任务 1.4 用水准面代替水准面的限度	11	2.6.3 视准轴平行于水准管轴的检	
1.4.1 对距离的影响	11	验与校正	34
1.4.2 对高差的影响	12	任务 2.7 水准测量误差与注意事项	35
1.4.3 对水平角测量的影响	12	2.7.1 仪器误差	35
任务 1.5 测量工作概述	13	2.7.2 观测误差	36
1.5.1 测量工作过程简述	13	2.7.3 外界条件的影响	36
1.5.2 测量的基本工作	14	任务 2.8 其他水准仪简介	37
1.5.3 测量工作的程序和原则	15	2.8.1 DS ₁ 水准仪简介	37
项目2 水准测量	17	2.8.2 自动安平水准仪简介	38
任务 2.1 水准测量原理	17	2.8.3 电子水准仪简介	39
2.1.1 高差法	17	项目3 角度测量	43
2.1.2 视线高法	17	任务 3.1 角度测量原理	43
任务 2.2 水准测量的仪器和工具	18	3.1.1 水平角测量原理	43
2.2.1 DS ₃ 微倾式水准仪的构造	18	3.1.2 竖直角测量原理	44
2.2.2 水准尺与尺垫	21	任务 3.2 光学经纬仪的构造	45
任务 2.3 水准仪的使用	21	3.2.1 DJ6 型光学经纬仪构造	45
2.3.1 安置仪器(置架)	21	3.2.2 DJ6 读数装置及方法	47
2.3.2 粗略整平(粗平)	22	任务 3.3 经纬仪的使用方法	48
2.3.3 瞄准水准尺	22	3.3.1 经纬仪的测站设置	48
2.3.4 精确整平(精平)	23	3.3.2 调焦与瞄准	49
2.3.5 读数	23	3.3.3 读数	49
任务 2.4 水准测量的实测方法	23	任务 3.4 水平角观测方法	49

3.4.1 测回法	50	任务4.4 直线定向	80
3.4.2 全圆观测法	51	4.4.1 标准方向	80
任务3.5 竖直角观测方法	53	4.4.2 表示直线方向的方法	80
3.5.1 竖盘构造	53	4.4.3 方位角的计算	82
3.5.2 竖直角的观测和计算	54	项目5 测量误差	85
3.5.3 竖盘指标差	55	任务5.1 测量误差的基本知识	85
任务3.6 经纬仪的检验与校正	56	5.1.1 测量误差产生的原因	85
3.6.1 照准部水准管轴垂直于竖轴的 检验与校正	56	5.1.2 测量误差的分类	86
3.6.2 十字丝竖丝垂直于横轴的 检验与校正	57	5.1.3 测量误差的特性	87
3.6.3 视准轴垂直于横轴的检验 与校正	57	任务5.2 衡量精度的标准	88
3.6.4 横轴垂直于竖轴的检验与 校正	58	5.2.1 中误差	88
3.6.5 竖盘指标差的检验与校正 ...	59	5.2.2 相对误差	89
3.6.6 光学对点器的检验与校正 ...	60	5.2.3 极限误差和容许误差	89
任务3.7 角度测量误差	60	任务5.3 误差传播定律	89
3.7.1 仪器误差	60	5.3.1 和差函数的中误差	89
3.7.2 观测误差	61	5.3.2 倍数函数的中误差	90
3.7.3 外界条件的影响	62	5.3.3 线性函数的中误差	90
任务3.8 电子经纬仪简介	63	5.3.4 一般函数的中误差	90
3.8.1 电子经纬仪的测角原理	63	任务5.4 误差传播定律的应用	91
3.8.2 ET-02 电子经纬仪的使用 ...	64	5.4.1 水准测量的精度	91
项目4 距离测量与直线定向	67	5.4.2 角度测量的精度	92
任务4.1 钢(皮)尺量距	67	5.4.3 距离测量的精度	93
4.1.1 钢(皮)尺量距工具	67	5.4.4 坐标计算的精度	94
4.1.2 直线定线	69	任务5.5 等精度直接观测平差	94
4.1.3 钢尺量距的一般方法	70	5.5.1 求最或是值	94
4.1.4 钢尺量距的精密方法	72	5.5.2 观测值中误差	94
4.1.5 钢尺量距误差及注意事项 ...	72	5.5.3 算术平均值(最或是值) 中误差	95
任务4.2 视距测量	73	任务5.6 非等精度观测平差	96
4.2.1 视距测量原理	73	5.6.1 权	96
4.2.2 视距测量的观测与计算	75	5.6.2 加权平均值及其中误差	96
4.2.3 视距测量误差及注意事项 ...	75	项目6 控制测量	99
任务4.3 光电测距与全站仪使用	76	任务6.1 控制测量概述	99
4.3.1 光电测距原理	76	6.1.1 平面控制测量	99
4.3.2 光电测距仪的精度指标	78	6.1.2 高程控制测量	102
4.3.3 全站仪光电测距	78	6.1.3 GPS 控制测量	103
4.3.4 光电测距的误差及注意事项...	79	任务6.2 平面坐标计算	104
		6.2.1 坐标正算	104
		6.2.2 坐标反算	105
		任务6.3 导线测量	106

6.3.1 导线布设形式	106	7.4.1 地形图的识读	162
6.3.2 导线外业测量	107	7.4.2 地形图应用的基本内容	163
6.3.3 闭合、附和导线内业计算	108	7.4.3 图形面积量算	165
6.3.4 导线测量错误的查找方法	114	7.4.4 工程建设中的地形图应用	167
6.3.5 支导线计算	115	7.4.5 数字地形图的应用	169
任务 6.4 高程控制测量	116	项目8 工业与民用建筑施工测量	171
6.4.1 三、四等水准测量	116	任务 8.1 建筑施工测量概述	171
6.4.2 光电测距三角高程测量	119	8.1.1 概述	171
任务 6.5 交会测量	122	8.1.2 施工测量的特点	172
6.5.1 前方交会	122	任务 8.2 施工测量的基本工作	172
6.5.2 距离交会	123	8.2.1 测设的基本工作	172
6.5.3 侧方交会	124	8.2.2 测设点位的方法	176
6.5.4 后方交会	126	8.2.3 已知坡度的测设	179
任务 6.6 全球卫星定位系统(GNSS)	127	任务 8.3 施工场地控制测量	179
6.6.1 当前的全球卫星定位系统	127	8.3.1 建筑基线	180
6.6.2 GPS 卫星定位系统的组成	128	8.3.2 建筑方格网	181
6.6.3 GPS 卫星定位基本原理	130	8.3.3 坐标转换	182
项目7 地形图的测绘与应用	134	任务 8.4 民用建筑施工测量	184
任务 7.1 地形图的基本知识	134	8.4.1 施工测量之前准备工作	184
7.1.1 地形图概述	134	8.4.2 场地平整测量	187
7.1.2 地形图的比例尺	135	8.4.3 建筑物的定位和放线	190
7.1.3 地形图的图名、分幅与图号、 图廓及接合图表	137	8.4.4 建筑物基础施工测量	192
7.1.4 地物符号	141	8.4.5 墙体施工测量	192
7.1.5 地貌符号	145	8.4.6 高层建筑施工测量	193
任务 7.2 大比例尺地形图的测绘方法	148	任务 8.5 工业建筑施工测量	197
7.2.1 测图前的准备工作	148	8.5.1 概述	197
7.2.2 碎部点的选择	150	8.5.2 厂房施工控制网的测设	198
7.2.3 大比例尺地形图的 测绘方法	151	8.5.3 厂房柱列轴线与柱基测设	198
7.2.4 成图方法	153	8.5.4 厂房构件安装测量	199
7.2.5 地形图的拼接与整饰	154	8.5.5 机械设备安装测量	203
7.2.6 地形图的检查与验收	155	项目9 线路工程测量	205
7.2.7 纸质地形图的数字化	155	任务 9.1 概述	205
任务 7.3 数字化测图	156	9.1.1 线路测量的任务和内容	205
7.3.1 数字化成图简介	156	9.1.2 线路测量的基本特点	206
7.3.2 野外数据采集	157	任务 9.2 中线测量	207
7.3.3 使用软件进行数据处理	158	9.2.1 概述	207
7.3.4 检查验收	162	9.2.2 里程桩和加桩的测设	208
任务 7.4 地形图的应用	162	9.2.3 转角测量与交点和转点 的测设	209
		任务 9.3 曲线测量	213

9.3.1 圆曲线概述	213	10.2.3 河道纵横断面测量	255
9.3.2 圆曲线要素计算与主点测设	214	10.2.4 水下地形测量	259
9.3.3 缓和曲线概述	217	任务 10.3 水库测量	260
9.3.4 带有缓和曲线的圆曲线要素 计算与主点测设	217	10.3.1 水库淹没调查及 淹没线测量	261
9.3.5 困难条件下曲线的测设	219	10.3.2 水库库容计算	262
9.3.6 其他类型曲线的测设	223	项目11 桥梁与地下工程测量	265
任务 9.4 道路纵断面测量	224	任务 11.1 桥梁工程测量	265
9.4.1 纵断面测量	224	11.1.1 概述	265
9.4.2 纵断面图的绘制	225	11.1.2 桥梁施工控制测量	265
任务 9.5 道路横断面测量	227	11.1.3 桥梁施工测量	268
9.5.1 测设横断面方向	227	任务 11.2 地下工程测量	274
9.5.2 测定横断面上点位和高差	228	11.2.1 概述	274
任务 9.6 道路施工测量	229	11.2.2 地面控制测量	275
9.6.1 概述	229	11.2.3 地下控制测量	277
9.6.2 准备工作	229	11.2.4 竖井联系测量	280
9.6.3 恢复中线	230	11.2.5 隧道施工测量	286
9.6.4 路基施工测量	230	11.2.6 全自动陀螺经纬仪 定向测量	291
9.6.5 路面施工测量	233	项目12 变形观测	295
9.6.6 道路竣工测量	235	任务 12.1 变形观测概述	295
任务 9.7 管道工程施工测量	235	12.1.1 建筑物产生变形的原因	295
9.7.1 概述	235	12.1.2 变形观测的分类	296
9.7.2 管道中线测量	236	任务 12.2 沉降观测	297
9.7.3 管道纵横断面测量	237	12.2.1 高程控制点的布设 与测量	297
9.7.4 埋管施工测量	238	12.2.2 沉降观测点的布设	298
9.7.5 顶管施工测量	238	12.2.3 建筑沉降观测	299
9.7.6 管道竣工测量	239	12.2.4 沉降观测的成果整理	300
项目10 水利工程施工测量	241	12.2.5 应上交成果	302
任务 10.1 渠道与堤线施工测量	241	任务 12.3 位移观测	303
10.1.1 踏勘选线	241	12.3.1 平面控制点的布设 与测量	303
10.1.2 中线测量	242	12.3.2 建筑主体倾斜观测	304
10.1.3 纵横断面测量	243	12.3.3 建筑水平位移观测	306
10.1.4 纵横断面图的绘制	246	12.3.4 裂缝观测	307
10.1.5 土(石)方量计算	248	参考文献	308
10.1.6 施工断面放样	250		
任务 10.2 河道测量	251		
10.2.1 水位测量	251		
10.2.2 水深测量	253		

项目 1 认识测绘学

知识目标

- (1) 掌握测绘学的概念及其分类;
- (2) 掌握大地水准面、测量的基准面及基准线等概念;
- (3) 了解高斯投影及高斯平面直角坐标系的设计原理;
- (4) 明确测量的三项基本工作。

能力目标

- (1) 能区分不同坐标系的设计原理及坐标元素;
- (2) 能明确本教材学习主题及学习重点。

引言

工程测量学是测绘学下属分支学科中的一门实用技术课,也是土木工程、道路工程、水利工程和桥梁隧道工程等专业的一门必修课,学习本课程的目的为了掌握地形图测绘、地形图应用和工程施工放样的基本理论和方法。

在各类工程施工过程中测绘人员所提供的技术服务一般分为三个阶段:

(1) 地形图测绘。运用各种测量仪器、软件,通过实地测量,把待建设工程所在范围内地面上的地物、地貌按一定的比例尺测绘成大比例尺图,为工程设计人员提供设计所需要的资料;

(2) 施工放样。将工程设计图上设计的建、构筑物各个结构的点、线位置信息在现场做出标记,作为施工的依据;

(3) 变形观测。监测建、构筑物在施工与使用阶段的沉降和位移状态,以便采取措施防治,保证建筑物的安全运营。

任务 1.1 测绘学的概念及其分支

测绘学是一门古老的学科,有着悠久的历史。随着人类社会的进步、经济的发展和科技水平的提高,测绘学科的理论、技术、方法及其学科内涵也随之不断地发生变化。尤其是在当代,由于空间技术、计算机技术、通信技术和地理信息技术的发展,致使测绘学的理论基础、工程技术体系、研究领域和科学目标正在适应新形势的需要而发生深刻的变化。

1.1.1 测绘学的概念

(1) 传统测绘学的概念。研究地球的形状、大小和地表(包括地面上各种物体)的几何形状及其空间位置的科学。

(2) 最新测绘学的概念。研究对实体(包括地球整体、表面以及外层空间各种自然和人造的物体)中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进行采集、处理、管理、更新和利用的科学与技术。该概念与传统概念相比具备三个方面的优点:一是研究对象的扩大;二是将空间理念由三维扩大到了四维(附带了时间要素);三是将所有空间点的坐标和与其相关的其他信息(作为属性)联系在了一起来研究,即目前测绘学已不仅仅是专门研究坐标理论的学科了。

1.1.2 测绘学的分类

依据不同的界定标准,可以对测绘学进行不同的分类。

1.1.2.1 按性质分类

按照不同的工作性质,可以将测绘工作分为测定与测设两类。

(1) 测定(求坐标)。测定是指使用测量仪器和工具,通过测量和计算,得到一系列测量数据或成果,从而确定各类目标点的坐标,供经济建设、国防建设及科学研究使用,比如地形图测绘工作。

(2) 测设(找目标)。测设(放样)是指使用测量仪器和工具,把图纸上规划设计好的建(构)筑物的位置坐标信息,用一定的测量方法将其标定在实地上,作为施工的依据。

1.1.2.2 按学科分类

根据研究对象及任务的不同,又可将测绘学分为以下几个分支学科。

(1) 大地测量学。它是研究和确定地球形状、大小、重力场、整体与局部运动和地表面点的几何位置以及它们的变化的理论和技术的学科。其基本任务是建立国家大地控制网;测定地球的形状、大小和重力场及其随时间的变化;研究地球表面观测量向椭球面和平面的投影变换及相关的大地测量计算问题;研究月球和行星大地测量理论和方法等。按照测量手段的不同,本学科又分为实用大地测量学、椭球面大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学等。

(2) 普通测量学。它是研究如何将地球表面局部小范围区域内(测区半径 $R \leq 10\text{km}$)的地物、地貌及其他有关信息测绘成地形图的理论、方法和技术的学科。按成图方式的不同,地形测图可分为模拟化测图和数字化测图。

(3) 摄影测量学。它是研究利用摄影或遥感的手段获取目标物的影像数据,从中提取几何的或物理的信息,并用图形、图像和数字形式表达测绘成果的学科。本学科又分为地面(近景)摄影测量学、航空摄影测量学和航天摄影测量学等。

(4) 工程测量学。它是研究在工程建设的设计、施工和管理各阶段中进行测量工作的理论、方法和技术的学科。工程测量学是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用。按工程测量所服务的工程种类,本学科也可分为建筑工程测量学、线路工程测量学、桥梁与隧道工程测量学、矿山工程测量学、水利工程测量学和精密工程测量学等。

(5) 地图学。它是研究模拟和数字地图的基础理论、设计、编绘、复制的技术、方法以及应用的学科。它的基本任务是利用各种测量成果编制各类地图,其内容一般包括地图投影、地图编制、地图整饰和地图制印等分支。

(6) 海洋测量学。它是研究以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制理论和方法的学科,主要包括海道测量,海洋大地测量,海洋专题测量以及航海图、海底地形图、海底地形测量,各种专题图和海洋图集等的编制。

(7) 3S学。随着空间技术、计算机技术和信息技术以及通信技术的发展,测绘学出现了以3S技术为代表的现代测绘科学技术,使测绘学科从理论到手段发生了根本性的变化。3S学包含了以下三门学科:

1) 全球卫星定位系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)。它是利用卫星信号进行导航定位的各种定位系统的统称。目前已建或正在建的全球卫星定位系统有美国已建的GPS卫星定位系统、俄罗斯已建的GLONASS卫星定位系统、欧盟在建的伽利略(GALILEO)卫星定位系统及我国在建的北斗卫星定位系统。GNSS用于实时、快速地提

供目标的空间位置。

2) 遥感 (Remote Sensing, RS)。它是不接触物体本身,用传感器采集目标物的电磁波信息,经处理、分析后识别目标物,揭示其几何、物理性质和相互联系及其变化规律的现代科学技术。一切物体,由于其种类及环境条件不同,因而具有反射或辐射不同波长的电磁波的特性。遥感技术就是利用物体的这种电磁波特性,通过观测电磁波,从而判读和分析地表的目标及现象,达到识别物体及物体所在的环境条件的技术。RS 用于实时、快速地提供大面积地表物体及其环境的几何、物理信息和各种变化。

3) 地理信息系统 (Geographic Information System, GIS)。它是在计算机软件和硬件支持下,把各种地理信息按照空间分布及属性以一定的格式输入、存储、检索、更新、显示、制图和综合分析应用的技术系统。它是将计算机技术与空间地理分布数据相结合,通过一系列空间操作和分析方法,为地球科学、环境科学和工程设计乃至政府行政职能和企业经营提供对规划、管理和决策有用的信息,并回答用户提出的有关问题。GIS 用于多种来源的时空数据的综合处理分析和应用平台。

任务 1.2 地球的形状与大小

测绘工作大多是在地球表面上进行的,测量基准的确定、测量成果的计算及处理都与地球的形状和大小有关。在科学技术高速发展的今天,人类对自己居住的地球面貌已愈来愈清楚明白。但是,人们对地球到底是什么样子的认识,是经历了相当漫长的过程的。

1.2.1 人类对地球形状认识的演变

1.2.1.1 “天圆地方”说

古代,由于科学技术不发达,有关地球的样子曾流传过许多传说和神话,人类只能通过简单的观察和想象来认识地球。例如,中国的古人观察到“天似穹窿”,就提出了“天圆地方”的说法。西方的古人按照自己所居住的陆地为大海所包围,就认为“地如盘状,浮于无垠海洋之上”。

1.2.1.2 “地圆”说

公元前 6 世纪后半叶,毕达哥拉斯提出了地为圆球的说法。又过了两个世纪之后,亚里士多德根据月食等自然现象也认识到大地是球形,并接受其老师柏拉图的观点,发表了“地球”的概念,但都没有得到可靠的证明。直到公元前 3 世纪,亚历山大学者埃拉托色尼首创子午圈弧度测量法,实际测量纬度差来估测地圆半径,最早证实了“地圆说”。稍后,我国东汉时期的天文学家张衡在《浑仪图注》中对“浑天说”作了完整的阐述,也认识到大地是一个球体,但在其天文著作《灵宪》中又说天圆地平。这些都说明当时人们对地球形状的认识还是很不明晰的。直到 1522 年,航海家麦哲伦率领船队从西班牙出发,一直向西航行,经过大西洋、太平洋和印度洋,最后又回到了西班牙,才得以事实证明地球确实是一个球体。

1.2.1.3 “地扁”说

近代科学家牛顿曾仔细研究了地球的自转,根据力学原理得出地球是赤道凸起、两极扁平的椭球体,形状像个桔子,他于 1687 年提出“地扁说”。荷兰的惠更斯于 1690 年在其著作《论重力起因》中,根据地球表面的重力值从赤道向两极增加的规律,得出地球的外

形为两极略扁的扁球体的论断。1743 年法国的 A·C·克莱洛发表了《地球形状理论》，提出了克莱洛定律。惠更斯和克莱洛的研究为由物理学观点研究地球形状奠定了理论基础。

1.2.1.4 “大地水准面”说

随着大地测量精度要求的提高，认识到以椭球面作为地球模型用来进行推算点位是非常方便的。德国的大地测量学家利斯廷于 1873 年创立了大地水准面概念。大地水准面理论的提出使人类对测定地球的基本形状与大小及测定地球上地面点的几何位置有了一个统一的参考标准。

1.2.1.5 “真实地球”说

随着动态大地测量学的发展，人们研究发现地壳不是固定不动的，由于日、月引力和构造运动等原因，它经历着微小而缓慢的运动，所以最好把地球看作是一个“不规则的运动球体”。为此，1945 年苏联学者莫洛坚斯基提出一种新的理论，他避开了大地水准面的概念和地壳密度分布问题，而是直接取一个非常接近于地球表面的似地球表面（即地形表面）为边界面，用地面上的大地测量和重力测量数据直接确定出地球表面的真实形状。近代空间技术的发展为研究地球形状提供了新手段，确定地球形状的近代空间技术需要全球均匀分布的测量资料。对地球的研究也不能仅局限于地球表面，还应包括地下及空中的任何一个与地球相关且以地球质心为中心的点，每个点的空间几何位置可以用一个以地球质心为原点的空间直角坐标系中的三维坐标来表示。因此，现在我们可以把地球看作是一个由无数个点组成的“点集”。

1.2.2 地球的形状与大小

1.2.2.1 大地水准面

地球的自然表面是很不规则的，其上有高山、深谷、丘陵、平原、江湖和海洋等，最高的珠穆朗玛峰高出海水面达 8 844.43m，最低的马里亚纳海沟低于海水面达 11 034m。其相对高差不足 20km，与地球的平均半径 6 371km 相比，是微不足道的，就整个地球表面而言，陆地面积仅占 29%，而海洋面积占了 71%。

因此，我们可以设想地球的整体形状是被海水所包围的球体，即设想将一静止的海洋面扩展延伸，使其穿过大陆和岛屿，形成一个封闭的曲面，静止的海水面称作水准面。由于海水受潮汐风浪等影响而时高时低，故水准面有无穷多个，其中与平均海水面相吻合的水准面称作大地水准面。由大地水准面所包围的形体称为大地体。通常用大地体来代表地球的真实形状和大小。

1.2.2.2 基准线与基准面

地球是太阳系中的一颗行星，它围绕着太阳旋转，又绕着自己的旋转轴自转。地球上的各种物体都受到地心引力、地球自转的离心力及太阳、月亮等星体的引力作用。这里主要考虑地心引力和离心力作用，这两个力的合力称为重力，一条细绳系一个锤球，细绳在重力作用下形成的下垂线，称为铅垂线。铅垂线方向即重力的方向，铅垂线是测量工作的基准线。

水是均质流体，而地球表面的水受重力的作用，其表面就形成了一个处处与重力方向垂直的连续曲面，称为水准面。与水准面相切的平面称为水平面。自由、静止的海洋和湖泊等的水面都是水准面。水准面因其高度不同而有无穷多个，但水准面之间因高度不同不会相交。所以，我们以大地水准面作为测量工作的基准面。

1.2.2.3 参考（旋转）椭球体、参考椭球面

由于地球内部质量分布不均匀，致使地面上各点的铅垂线方向产生不规则变化，所以大地水准面是一个不规则的无法用数学式表示的曲面，在这样的面上是无法进行测量数据的计算及处理的。因此人们进一步设想，用一个既与大地体非常接近又能用数学式表示的规则球体即旋转椭球体来代表地球的形状。如图 1-1 所示，它是由椭圆 *NESW* 绕短轴 *NS* 旋转而成。它是一个规则的曲面体，可以用数学公式来表示，即：

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \tag{1-1}$$

式中 *a*、*b* 为参考椭球体的几何参数，*a* 为长半径，*b* 为短半径。参考椭球体扁率 α 应满足下式：

$$\alpha = \frac{a - b}{a} \tag{1-2}$$

某一国家或地区为处理测量成果而采用与大地体的形状大小最接近，又适合本国或本地区要求的旋转椭球，这样的椭球体称为参考椭球体。确定参考椭球体与大地体之间的相对位置关系，称为椭球体定位。参考椭球体面只具有几何意义而无物理意义，它是严格意义上的测量计算基准面。

几个世纪以来，不少学者分别测算出了许多椭球体元素值，表 1-1 列出了几个著名的椭球体。我国 1954 年北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球，1980 年国家大地坐标系采用的是 1975 国际椭球，而全球定位系统（GPS）采用的是 WGS-84 椭球。

由于参考椭球的扁率很小，在小区域的普通测量中可将地（椭）球看作圆球，其半径 $R = (a + a + b) / 3 = 6\,371\text{km}$ 。

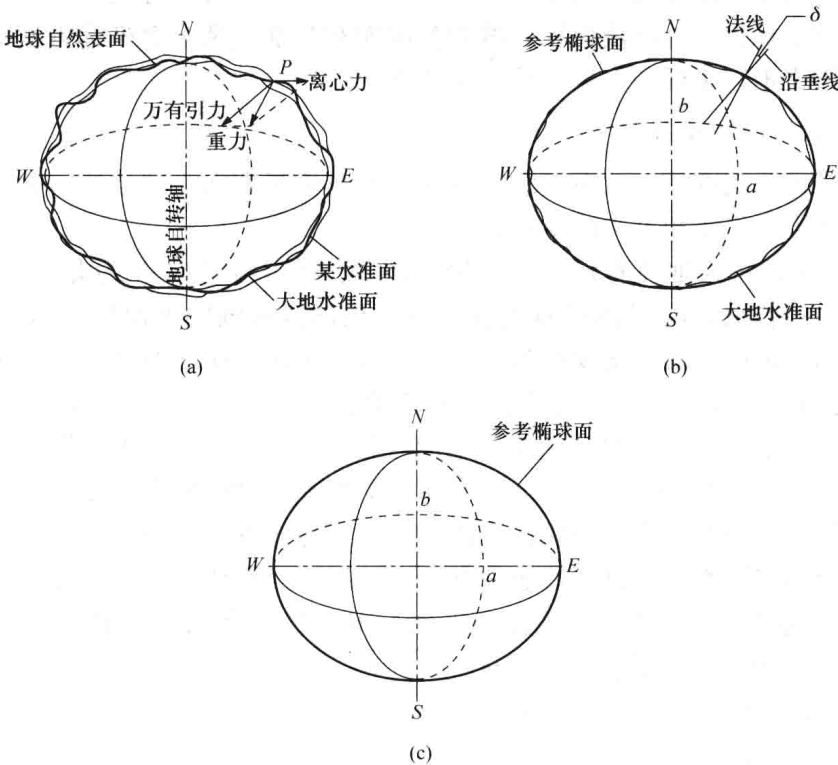


图 1-1 地球的形状与大小

表 1-1 椭球体

椭球名称	长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	计算年代和国家	备注
贝塞尔	6 377 397	6 356 079	1:299.152	1841 德国	
海福特	6 378 388	6 356 912	1:297.0	1910 美国	1942 年国际 第一个推荐值
克拉索夫斯基	6 378 245	6 356 863	1:298.3	1940 苏联	中国 1954 年 北京坐标系采用
1975 国际椭球	6 378 140	6 356 755	1:298.257	1975 国际 第三个推荐值	中国 1980 年国家 大地坐标系采用
WGS-84	6 378 137	6 356 752	1:298.257	1979 国际 第四个推荐值	美国 GPS 采用

任务 1.3 地面点位置的确定

测量上常用的坐标系有空间直角坐标系、地理坐标系、高斯投影平面直角坐标系和独立平面直角坐标系等。地面点位的三维在空间直角坐标系中用 X 、 Y 、 Z 表示，在地理坐标系和高斯投影平面直角坐标系中，两个量为平面坐标，它表示地面点沿着基准线投影到基准面上后在基准面上的位置，第三个量是高程，表示地面点沿基准线到基准面的距离。

1.3.1 地理坐标系

当研究和测定整个地球的形状或进行大区域的测绘工作时，可用地理坐标来确定地面点的位置。地理坐标是一种球面坐标，按照基准面和基准线及求算坐标方法的不同，地理坐标又可分为天文地理坐标和大地地理坐标两种。

1.3.1.1 天文地理坐标

以大地水准面为基准面，地面点沿铅垂线投影在该基准面上的位置，称为该点的天文坐标。该坐标用天文经度和天文纬度表示。

如图 1-2 所示，将大地体看作地球， NS 即为地球的自转轴， N 为北极， S 为南极， O 为地球体中心。包含地面点 M 的铅垂线且平行于地球自转轴的平面称为 M 点的天文子午面。天文子午面与地球表面的交线称为天文子午线，也称经线。而将通过英国格林尼治天文台埃里中星仪的子午面称为起始子午面，相应的子午线称为起始子天文午线或零子午线，并作为经度计量的起点。过点 M 的天文子午面与起始子午面所夹的两面角就称为 M 点的天文经度。用 λ 表示，其值为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ，在本初子午线以东的叫东经，以西的叫西经。

通过地球体中心 O 且垂直于地轴的平面称为天文赤道面。它是纬度计量的起始面。赤道面与地球表面的交线称为赤道。其他垂直于地轴的平面与地球表面的交线称为纬线。过点 M 的铅垂线与赤道面之间所夹的线面角就称为 M 点的天文纬度。在赤道以北的叫北纬，以南的叫南纬，用 Φ 表示，其值为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

天文坐标 (λ, Φ) 是用天文测量的方法实测得到的。

1.3.1.2 大地地理坐标

以参考椭球面为基准面，地面点沿椭球面的法线投影在该基准面上的位置，称为该点的大地坐标。该坐标用大地经度和大地纬度表示。如图 1-3 所示，包含地面点 P 的法线且

通过椭球旋转轴的平面称为 P 的大地子午面。过 P 点的大地子午面与起始大地子午面所夹的两面角就称为 P 点的大地经度。用 L 表示，其值分为东经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和西经 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。过点 P 的法线与椭球赤道面所夹的线面角就称为 P 点的大地纬度。用 B 表示，其值分为北纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 和南纬 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。我国 1954 年北京坐标系和 1980 年国家大地坐标系就是分别依据两个不同的椭球建立的大地坐标系。

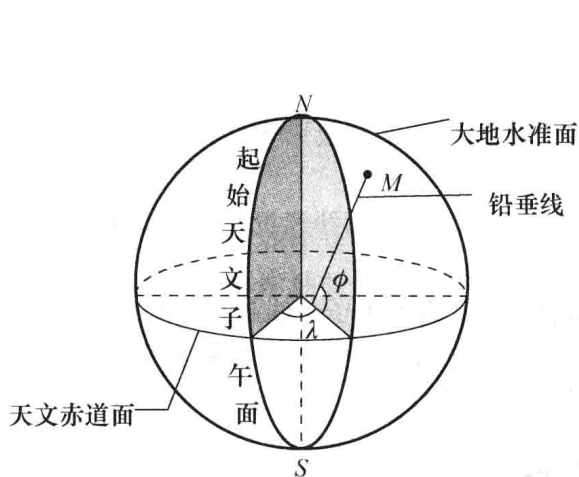


图 1-2 天文地理坐标系

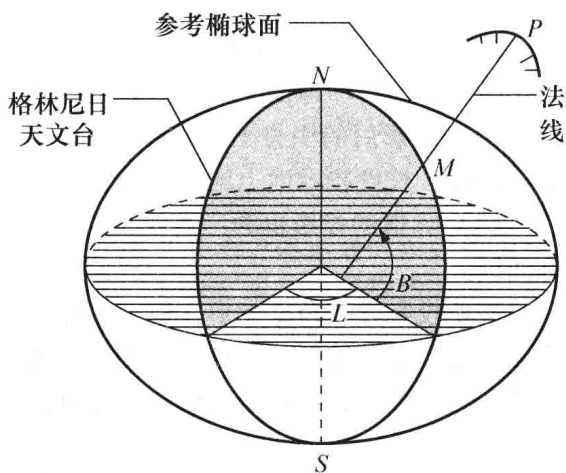


图 1-3 大地地理坐标系

1.3.2 高斯投影平面直角坐标系

为了解决球面与平面这对矛盾，则必须采用地图投影的方法将球面上的大地坐标转换为平面直角坐标。利用高斯投影法建立的平面直角坐标系，称为高斯平面直角坐标系。在广大区域内确定点的平面位置，一般采用高斯平面直角坐标。

目前我国采用的是高斯投影，高斯投影是由德国数学家、测量学家高斯提出的一种横轴等角切椭圆柱投影，该投影解决了将椭球面转换为平面的问题。从几何意义上看，就是假设一个椭圆柱横套在地球椭球体外并与椭球面上的某一条子午线相切，这条相切的子午线称为中央子午线。假想在椭球体中心放置一个光源，通过光线将椭球面上一定范围内的物象映射到椭圆柱的内表面上，然后将椭圆柱面沿一条母线剪开并展成平面，即获得投影后的平面图形，如图 1-4 所示。

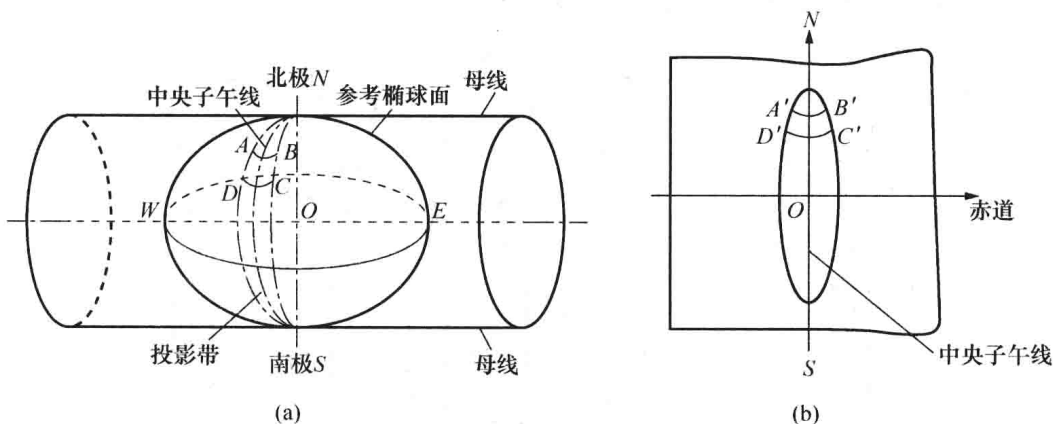


图 1-4 高斯投影

该投影的经纬线图形有以下特点：

(1) 保角条件。经纬线投影后仍然保持相互垂直的关系，说明投影后的角度无变形，即投影后角度大小不变。

(2) 长度变形固定性。即长度投影后会变形，但是在一点上各个方向的微分线段变形比 m 是个常数 k ：

$$m = \frac{ds}{dS} = k \tag{1-3}$$

式中 ds ——投影后的长度；
 dS ——球面上的长度。

(3) 投影后的中央子午线为直线，无长度变化。其余的经线投影为凹向中央子午线的对称曲线，长度较球面上的相应经线略长。

(4) 赤道的投影也为一直线，并与中央子午线正交。其余的纬线投影为凸向赤道的对称曲线。

高斯投影没有角度变形，但有长度变形和面积变形，离中央子午线越远，变形就越大，为了对变形加以控制，测量中采用限制投影区域的办法，即将投影区域限制在中央子午线两侧一定的范围，这就是所谓的分带投影，如图 1-5 所示。

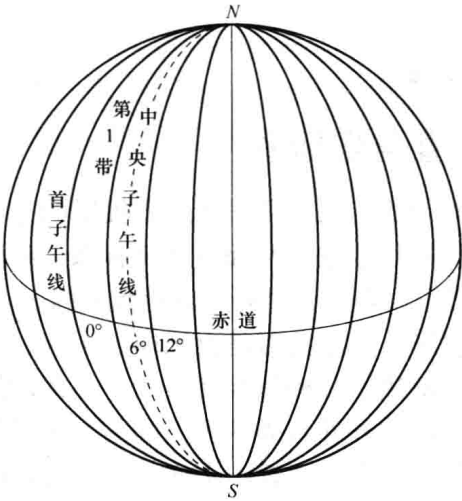


图 1-5 高斯平面直角坐标的分带

投影带一般分为 6°带和 3°带两种，如图 1-6 所示。

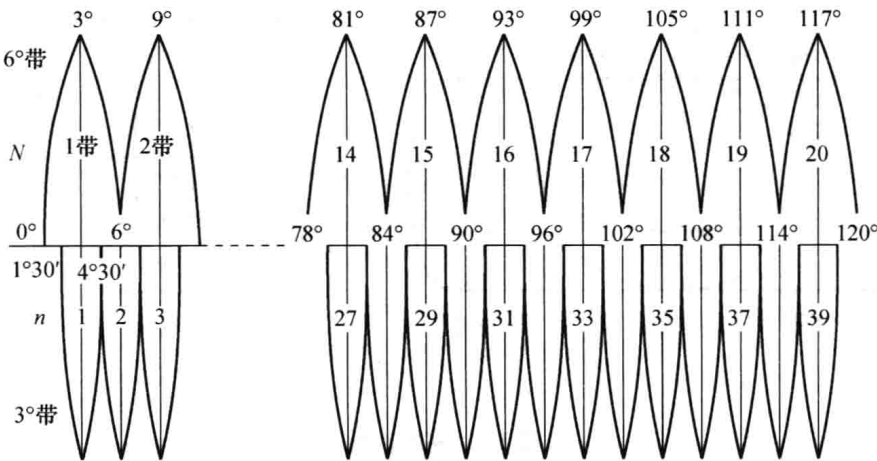


图 1-6 高斯平面直角坐标系 6°带投影与 3°带投影的关系

(1) 6°带投影是从英国格林尼治起始子午线开始，自西向东，每隔经差 6°分为一带，将地球分成 60 个带，其编号分别为 1, 2, …, 60。每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_6 = (6n - 3)^\circ \tag{1-4}$$

式中 n 为 6°带的带号。6°带的最大变形在赤道与投影带最外一条经线的交点上，长度变形为 0.14%，面积变形为 0.27%。

(2) 3°投影带是在 6°带的基础上划分的。每 3°为一带，共 120 带，其中央子午线在奇数带时与 6°带中央子午线重合，每带的中央子午线经度可用下式计算：

$$L_3 = 3^\circ n' \tag{1-5}$$

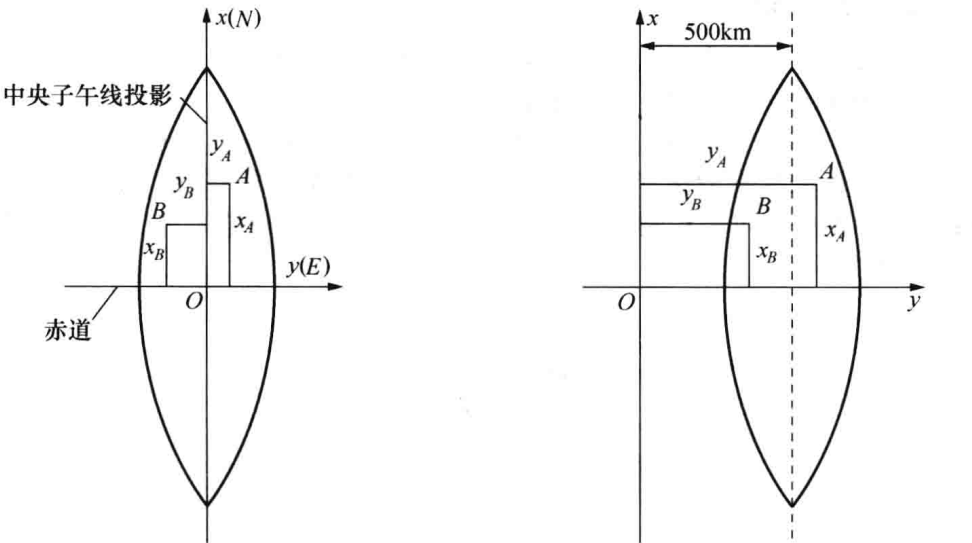
式中 n' 为 3°带的带号。3°带的边缘最大变形现缩小为长度 0.04%，面积 0.14%。
我国领土位于东经 72°~136°，共包括了 11 个 6°投影带，即 13~23 带；22 个 3°投影带，即 24~45 带。

通过高斯投影，将中央子午线的投影作为纵坐标轴，用 x 表示，将赤道的投影作为横坐标轴，用 y 表示，两轴的交点作为坐标原点，由此构成的平面直角坐标系称为高斯平面直角坐标系。对应于每一个投影带，就有一个独立的高斯平面直角坐标系，区分各带坐标系则利用相应投影带的带号。

由于我国位于北半球， x 坐标均为正值， y 坐标则有正有负，这对计算和使用均不方便，为了使 y 坐标都为正值，故将纵坐标轴向西平移 500km（半个投影带的最大宽度不超过 500km），并在 y 坐标前加上投影带的带号。

如图 1-7 (a) 中的 A、B 点位于 18 投影带，其自然坐标为 $x_A = 4\,585\,361\text{m}$ ， $y_A = 82\,368\text{m}$ ； $x_B = 3\,395\,451\text{m}$ ， $y_B = -182\,261\text{m}$ ，它们在 18 带中的高斯通用坐标如图 1-7 (b) 所示，分别为 $X_A = 4\,585\,361\text{m}$ ， $Y_A = 18\,582\,368\text{m}$ ； $X_B = 3\,395\,451\text{m}$ ， $Y_B = 18\,317\,739\text{m}$ 。

我国使用的大地坐标系有“1954 年北京坐标系”和“1980 年西安坐标系”，利用高斯平面直角坐标的方法建立了全国统一坐标系。我国现在使用的“1980 年国家大地坐标系”，简称“80 系”或“西安系”。选择陕西泾阳县永乐镇某点为大地原点，进行大地定位。以前使用的是“1954 年北京坐标系”，其原点位于苏联列宁格勒天文台中央，为与苏联 1942 年普尔科夫坐标系联测，经东北传递过来的坐标。



(a) 坐标原点西移前的高斯平面直角坐标 (b) 坐标原点西移后的高斯平面直角坐标

图 1-7 高斯平面直角坐标

在同一个大地坐标系中，地理坐标与高斯平面坐标可以相互变换。由地面点的大地经纬度 L 、 B 计算其在高斯平面坐标系中的坐标 x 、 y 称为高斯投影正算，反之称为高斯投影