

TUMU GONGCHENG CELIANG

土木工程测量

张 豪 主编

非
外
借

中国建筑工业出版社

土木工程测量

张 豪 主编

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程测量/张豪主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 4

ISBN 978-7-112-23405-9

I. ①土… II. ①张… III. ①土木工程-工程测量
IV. ①TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 041687 号

本书既有较完整的理论, 又注重工程实用性; 既有基本测绘技术与方法, 又力求反映当代测量学科的最新技术。内容包括水准测量、角度测量、距离测量与直线定向、全站仪及其使用、全球定位系统的定位技术、测量误差及数据处理的基本知识、小区域控制测量、地形图测绘、地形图的应用、施工测量的基本知识、建筑施工测量、道路施工测量、桥隧及水利施工测量和无人机测量等。本书可供土木建筑类专业测量学或工程测量课程使用, 也可供工程勘察设计、工程施工等技术人员学习参考。

责任编辑: 石枫华 胡明安

责任校对: 芦欣甜

土 木 工 程 测 量

张 豪 主 编

中国建筑工业出版社出版、发行(北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京佳捷真科技发展有限公司制版

北京京华铭诚工贸有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21 $\frac{3}{4}$ 字数: 543 千字

2019年6月第一版 2019年6月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-23405-9

(33715)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书编者名单

主 编：张 豪(浙江工业大学)

副主编：陈竹安(东华理工大学)

张立亭(东华理工大学)

参 编：许四法(浙江工业大学)

罗亦泳(东华理工大学)

洪志强(南昌工学院)

姚天予(浙江工业大学)

俞旻韬(浙江工业大学)

张利莎(浙江工业大学)

谢明君(浙江工业大学)

钱 超(浙江工业大学)

陈 韵(浙江工业大学)

姚歆怡(南昌工程学院)

前 言

随着现代测绘科学技术的发展,涌现出许多新的测绘理论、技术、方法和设备。土木工程测量作为土建类专业必修的专业基础课,是一门实践性强,理论和实际应用紧密结合的课程,应紧跟测绘科技的发展进行调整和更新。本着与时俱进和紧密结合专业两个原则进行编写,主要编写内容和特色包括:

1. 坚持理论联系实际的原则,理论性较强章节,如水准测量成果计算、导线测量计算、测量误差及测量平差等部分,均增加实习案例、减少学生理论学习难度。且在简要介绍理论上,尽可能结合实际项目以点带面讲解实际应用,既加强基础理论知识,又突出能力的培养。但碍于教材要求,详细使用需参考相关软硬件教程。

2. 认真贯彻国家的测绘新规范、新细则、新规定、新图式等,如在地理空间信息基本知识介绍中,将地形图图式更新到最新的 2017 版。

3. 将一般的地形图知识、地形图采集、成图及应用提高到地理空间信息层次,包括地理空间信息基本知识、地理空间信息采集、成图及应用。

4. 突出测绘新技术、新仪器、新方法在土木工程测量中的应用,保持教材的现势性。包括:

(1) 第 4 章距离测量与直线定向部分,介绍了激光测距仪在建筑施工测量中的应用。

(2) 第 6 章控制测量部分,借助中海达 GPS 硬件及中海达静态数据处理软件 HGO,介绍 GPS 在建筑工程施工控制网外业测量及内业解算等实际操作。

(3) 第 8 章地理空间信息采集及成图部分,充实测绘新技术、新仪器、新方法在地理空间信息采集及成图的应用。结合全站仪、GPS、轻型无人机、三维激光扫描仪等地理空间信息数据采集硬件及 CASS、Pix4D、EPS2016 及 SouthLiDAR 等地理空间信息数据采集处理软件扩充数字测图、模拟地形图数字化测图、航空摄影测量测图及三维激光扫描测图等地理空间信息数据采集方法,用于采集、处理建筑工程领域 4D 产品。

(4) 第 9 章地理空间信息的应用部分,结合 CASS 等数字地图成图软件讲解地形图基本应用、地形图面积量算与应用、地形图按路线绘制断面图和地形图在场地平整中的应用。结合 ArcGIS 等专业 GIS 软件及 Revit 等 BIM 软件,介绍地理空间信息在建筑工程中的应用。

(5) 第 10 章建筑工程施工测量部分,介绍了全站仪及 GPS 测设点的平面位置,以及直线放样及场地高程控制等其他 GPS 在建筑工程施工测量的应用。

(6) 第 11 章线路工程测量部分,介绍了 GPS 在线路工程中的应用以及数字地形图在线路工程中的应用。

本书在编写过程中得到了南方测绘集团、武汉合众思壮电子商务有限公司、中海达卫星导航技术股份有限公司等多家测绘公司的大力支持。同时得到了浙江工业大学重点教材建设项目(JC1806)资助,在此一并表示感谢!

前 言

本书可作为高等学校土建、市政、规划、交通、港航等专业的配套教材，供课堂教学和实验实习使用。也可用于电大、职大、函大、自学考试及各类培训班的教学，以及相关的设计、技术人员的参考书。

由于作者水平所限，教材中的缺点、问题在所难免，请读者不吝指正。

编 者

2019年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 测绘学与测量学	1
1.2 我国测绘学发展概况	2
1.3 地球的形状和大小	3
1.4 测量坐标系统与地面点位的确定	5
1.5 用水平面代替水准面的限度	10
1.6 测量的基本工作与原则	12
习题与思考题	14
第 2 章 水准测量	16
2.1 水准测量原理	16
2.2 水准仪和水准尺	18
2.3 水准测量方法	23
2.4 水准测量成果计算	28
2.5 微倾式水准仪的检验与校正	30
2.6 水准测量误差分析及注意事项	34
2.7 精密水准仪和自动安平水准仪	35
习题与思考题	38
第 3 章 角度测量	39
3.1 角度测量原理	39
3.2 DJ ₆ 型光学经纬仪及其使用	41
3.3 水平角和竖直角测量	45
3.4 DJ ₆ 型光学经纬仪的检验与校正	52
3.5 角度测量误差分析	56
3.6 精密经纬仪和电子经纬仪	59
习题与思考题	63
第 4 章 距离测量与直线定向	64
4.1 钢尺量距	64
4.2 视距测量	69
4.3 电磁波测量	71
4.4 全站仪测量	75
4.5 直线定向及坐标正反算	78

习题与思考题	82
第 5 章 测量误差及测量平差	83
5.1 测量误差概述	83
5.2 衡量精度的标准	85
5.3 误差传播定律	87
5.4 等精度观测的直接平差	89
5.5 非等精度观测的直接平差	90
习题与思考题	92
第 6 章 控制测量	93
6.1 控制测量概述	93
6.2 导线测量	96
6.3 交会测量	106
6.4 高程控制测量	109
习题与思考题	112
第 7 章 全球定位系统定位技术在控制测量中的应用	114
7.1 全球导航卫星系统 (GNSS) 简介	114
7.2 卫星定位基本方法	120
7.3 GNSS 在控制测量中的应用	123
7.4 GNSS 控制测量外业观测	126
7.5 GNSS 控制测量内业静态数据处理	128
习题与思考题	138
第 8 章 地理空间信息采集及成图	140
8.1 地理空间信息采集及成图概述	140
8.2 地形图基本知识	145
8.3 传统模拟测图	157
8.4 数字测图	165
8.5 模拟地形图数字化测图	184
8.6 航空摄影测量测图	191
8.7 三维激光扫描测图	198
习题与思考题	204
第 9 章 地理空间信息的应用	205
9.1 地形图基本应用	205
9.2 地形图面积量算与应用	210
9.3 地形图上按路线绘制断面图	217
9.4 地形图在场地平整中的应用	219
9.5 地理空间信息在建筑工程中的应用	225
习题与思考题	240

第 10 章 建筑工程施工测量	241
10.1 施工测量概述	241
10.2 测设的基本工作	242
10.3 测设点的平面位置	247
10.4 施工控制测量	252
10.5 民用建筑施工放样	253
10.6 工业建筑施工放样	258
10.7 竣工测量	264
10.8 GPS 在建筑工程施工测量	265
习题与思考题	267
第 11 章 线路工程测量	268
11.1 道路工程测量概述	268
11.2 中线测量	268
11.3 路线纵、横断面测量	282
11.4 道路施工测量	288
11.5 管道施工测量	294
11.6 桥梁施工测量	297
11.7 隧道施工测量	301
11.8 GPS 在线路工程测量中的应用	306
11.9 数字地形图在线路工程中的应用	312
习题与思考题	319
第 12 章 建筑物与深基坑变形测量	321
12.1 概述	321
12.2 建筑物及深基坑垂直位移测量	324
12.3 建筑物及深基坑水平位移测量	328
12.4 建筑物及深基坑倾斜观测	330
12.5 挠度和裂缝观测	334
习题与思考题	336
附录 A 测量中常用的计量单位和换算	337
附录 B 凑整规则和有效数字	339
参考文献	340

第 1 章 绪 论

1.1 测绘学与测量学

测绘学是测量学与制图学的统称,研究的对象是地球整体及其表面和外层空间中的各种自然体、人造物体的有关空间信息,研究的任务是对这些与地理空间有关的信息进行采集、处理、管理、更新和利用。测量学是研究测定地面点的几何位置、地形形状、地球重力场,以及地球表面自然形态和人工设施的几何形态的科学;制图学是结合社会和自然信息的地理分布,研究绘制全球和局部地区各种比例尺的地形图和专题地图的理论和技术的科学。由此可见,测量学与制图学是测绘学的两个组成部分,其中测量学是它的重要组成部分。

1.1.1 测量学的基本内容

测量学是一门综合性的学科,根据其研究对象和工作任务的不同可分为大地测量学、地形测量学、摄影测量与遥感学、工程测量学等学科。

大地测量学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,为地形测图和各种工程测量提供基础起算数据;为空间科学、军事科学及研究地壳变形,地震预报等提供重要资料。按照测量手段的不同,大地测量学又分为常规大地测量学、卫星大地测量学及物理大地测量学。

普通测量学是研究地球表面较小区域内测绘工作的基本理论、技术、方法和应用的学科,是测量学的基础。主要研究内容有图根控制网的建立、地形图的测绘及一般工程的施工测量。具体工作内容有距离测量、角度测量、定向测量、高程测量、观测数据的处理和绘图等。

摄影测量与遥感学是研究利用电磁波传感器获取目标物的影像数据,从中提取语义和非语义信息,并用图形、图像和数字形式表达的学科。其基本任务是通过摄影相片或遥感图像进行处理、量测、解译,以测定物体的形状、大小和位置进而制作成图。根据获得影像的方式及遥感距离的不同,该学科又分为地面摄影测量学、航空摄影测量学和航天遥感测量学。

海洋测量学是以海洋和陆地水域为研究对象进行测量和海图编制工作的学科。主要研究港口、航道、江河、湖泊、海洋及水下范围内的控制测量、地形测量、水深测量等各种测量工作的理论、技术和方法。

工程测量学是研究各种工程在规划设计、施工建设和运营管理各阶段所进行的各种测量工作的学科。工程测量是测绘科学与技术国民经济和国防建设中的直接应用。

地图制图学是利用测量所得的资料,研究如何编绘成图以及地图制作的理论,方法和应用等方面的学科。

1.1.2 工程测量学的任务

工程测量学,按其对象分为工业建设工程测量、城市建设工程测量、公路铁路工程测量、桥梁工程测量、隧道与地下工程测量、水利水电工程测量、管线工程测量等。在工程建设过程中,工程项目一般分规划与勘测设计、施工、营运管理三个阶段,测量工作贯穿于工程项目建设的全过程,根据不同的施测对象和阶段,工程测量学的主要任务包括测定、测设两方面。

测定是指使用测绘仪器,按照一定的方法测定地面点的位置,将测区的地形缩绘成地形图,供国民经济建设使用。

测设主要针对施工放样而言,即按照设计图纸上工程建筑物的平面位置和高程,用一定的测量仪器和方法测设到实地上去的测量工作。

此外,施工中各工程工序的交接、检查、校核和验收工程质量的施工测量,工程竣工后的竣工测量,监视重要建筑物或构筑物在施工、运营阶段的沉降、位移和倾斜所进行的变形观测等,也是工程测量的主要任务。

1.1.3 工程测量学在建筑工程中的作用

将测量技术应用于建筑工程领域,产生了建筑工程测量。建筑工程测量是建筑工程施工中一项非常重要的工作,在建筑工程建设中有广泛的应用,它服务于建筑工程建设的每一个阶段,贯穿于建筑工程的始终。在工程勘测阶段,测绘地形图为规划设计提供各种比例尺的地形图和测绘资料;在工程设计阶段,应用地形图进行总体规划和设计;在工程施工阶段,要将图纸上设计好的建筑物、构筑物的平面位置和高程按设计要求测设于实地,以此作为施工的依据;在施工过程中进行土方开挖、基础和主体工程的施工测量;在施工中还要经常对施工和安装工作进行检验、校核,以保证所建工程符合设计要求;施工竣工后,还要进行竣工测量,施测竣工图,供日后扩建和维修之用;在工程管理阶段,对建筑和构筑物进行变形观测,以保证工程的安全使用。因此,在工程建设的各个阶段都需要进行测量工作,而且测量的精度和速度直接影响到整个工程的质量和进度。

1.2 我国测绘学发展概况

我国是世界四大文明古国之一,测绘科学技术有着悠久的历史。工程测量学是从人类生产实践中逐渐发展起来的。在古代它与测量学并没有严格的界限。《史记·夏本记》中所记载的“左准绳”、“右规矩”,就是对大禹治水时测量情景的描述。战国时期发明的指南针,促进了古代测绘技术的发展。1973年长沙马王堆西汉古墓出土的3幅《帛地图》是目前世界上保存最早的地图。西晋裴秀所著的《制图六体》,是一部世界最早系统的测绘地图的规范。唐朝张遂等人,在河南滑县至上蔡之间实测了一段长达351里80步(唐代1里为300步)的子午线弧长,并用日圭测量太阳的阴影来确定纬度,是世界上最早子午线弧长测量,计算的地球半径与现代测量的地球半径接近。宋代的沈括曾用水平尺、罗盘

进行地形测量，创立了分层筑堰的方法，并且制作了表示地形的立体模型，比欧洲最早的地形模型早 700 余年。元代郭守敬创造了多种天文测量仪器，在全国进行了大规模的天文观测，共实测了 72 个点，并首创以海平面为基准来比较不同地点的地势高低。明代郑和 7 次下西洋，绘制了中国第一部《航海图》。清康熙于 1781 年完成了《皇舆全图》。

到 20 世纪，我国开始采用了一些新的测量技术，测量作为一门现代科学，还是在新中国成立后才得以迅速发展。50 余年来，我国测绘工作的主要成就有：

(1) 在全国范围内（除台湾省），建立了统一的全国坐标系统和高程系统，建立了全国的大地控制网、国家水准网、基本重力网以及 GPS 大地控制网，并完成了大地网和水准网的整体平差。美国全球定位系统（GPS）、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统（GLO-NASS）、欧洲伽利略卫星导航系统（Galileo satellite navigation system）之后，建立了第四个成熟的卫星导航系统——中国北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System, BDS）是中国自行研制的全球卫星导航系统。进行了两次（1975 年和 2005 年）珠峰测量、南极长城站的地理位置和高程的测量。

(2) 完成了国家基本地形图的测绘，测图比例尺也随着国民经济建设的发展而不断增大，城市规划、工程设计都使用了大比例尺的地形图。测图方法也从常规经纬仪、平板仪模拟测图发展到全站仪（结合 GPS、测距仪等）数字成图、航空摄影测量测图及三维激光扫描测图等技术。编制并出版了各种地图、专题图。

(3) 制定了各种测绘技术规范（规程）和法规，统一了技术规格及精度指标。

(4) 测绘仪器制造方面，从无到有，发展迅速，已生产出多种不同等级、不同型号的电磁波测距仪、经纬仪、水准仪、全站仪，同时研发了大量现代测绘仪器，包括 GPS 接收机、三维激光扫描仪、低空轻型无人机。涌现出一批世界领先的测绘仪器制造企业，如南方测绘、中海达测绘、华测导航、合众思壮、大疆创新等测绘相关企业，测绘产品的性能和易用性均得到国内测绘用户的任何，部分产品如大疆无人机甚至领先全球。

(5) 测绘数据处理方面，研制了一批具有世界先进水平的测绘软件，如全数字摄影测量系统 Virtuo Zo，面向对象的地理信息系统 SuperMap、GeoStar（吉奥之星），地理信息系统软件平台 MapGIS，数字测图系统清华三维 EPSW、南方测绘 CASS 等，三维激光数据处理软件南方测绘 SouthLiDAR、中海达测绘 HD PTCLOUD VECTOR（AutoCAD 版或 ArcGIS 版）及数字绿土 LiDAR360，使测绘数字化、自动化的程度越来越高。

(6) 测绘技术及手段不断发展，随着 3S 技术（全球定位系统 GPS，遥感技术 RS，地理信息系统 GIS，简称“3S”技术）集成和信息化测绘技术发展，测绘产品应用范围不断拓宽，并可向用户提供“4D”数字产品（数字高程模型 DEM，数字正射影像 DOM，数字栅格地图 DLG，数字线划地图 DRG）。

1.3 地球的形状和大小

测量工作的主要研究对象是地球的自然表面，地球表面是不规则的，比如我国西藏与尼泊尔交界处的珠穆朗玛峰高达 8844.43m，而在太平洋西部的马里亚纳海沟深达 11022m，两者高度差近 2 万 m。尽管有这样大的高差，但相对于半径为 6371km 的地球来说还是很小的。因此，人们设想以一个静止不动的海水面延伸穿越陆地，形成一个闭合的

曲面包围整个地球，这个闭合的曲面称之为水准面。水准面有无穷多个，其中与平均海水面重合的一个水准面称为大地水准面（如图 1-1 (a)）。大地水准面是测量工作的基准面。大地水准面所包围的形体叫大地体。

铅垂线方向又称重力方向，而重力又是地球引力与离心力的合力。铅垂线可用悬挂垂球的细线方向表示（如图 1-2），它是测量工作的基准线。水准面与铅垂线方向具有处处正交的特性。

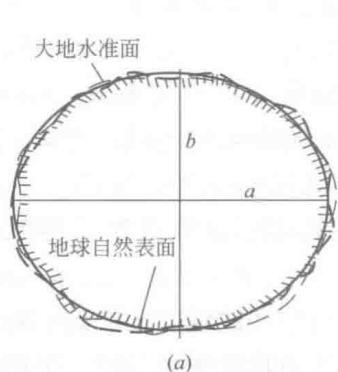


图 1-1 大地水准面

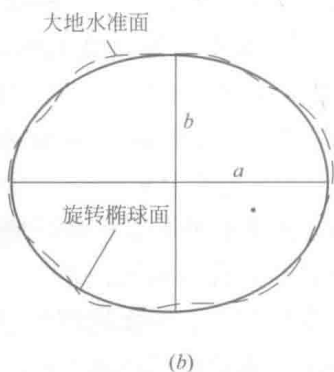


图 1-2 铅垂线

由于地球内部的质量分布不均匀，使得地面上各点铅垂线方向产生不规则的变化，而且地球各处引力的大小不同，这将造成大地水准面实际上是略有起伏、不规则的、很难用数学方程表示的复杂曲面，如图 1-3 所示。如果将地球表面上的物体投影到这个复杂的曲面上，计算起来非常困难。为了解决投影计算及制图的问题，通常选择一个与大地体十分接近的、能用数学方程表示的旋转椭球体来代替大地体，称为地球椭球体（如图 1-1 (b)）。其中与大地体最为接近的地球椭球体称之为地球椭球体，局部与大地体密合最好的地球椭球体称之为参考椭球体。在测量学中将地球椭球面代替大地水准面作为测量内业计算和制图的基准面，其对应的基准线为由地面任一点向地球椭球面所作的垂线——法线。

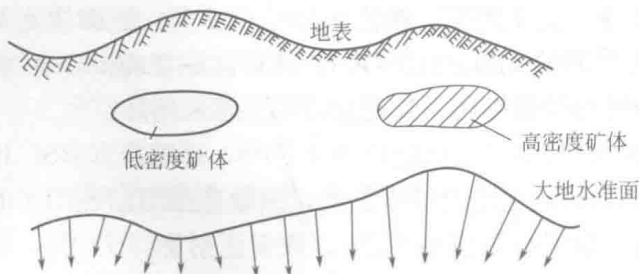


图 1-3 复杂的曲面

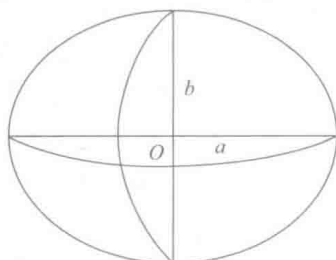


图 1-4 地球椭球体

地球椭球体是一个数学曲面，如图 1-4 所示，用 a 表示椭球体的长半轴， b 表示短半轴，则地球椭球体的扁率 f 可表示为式 (1-1)：

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (1-1)$$

随着科学技术的发展，椭球元素的测定将越来越精确。中华人民共和国成立后所建立的 1954 年北京坐标系采用的是苏联的克拉索夫斯基椭球，其参数为：

$$a=6378245\text{m}, f=1/298.3。$$

目前我国采用的 1980 年国家大地坐标系，所采用的椭球参数为 1975 年“国际大地测量与地球物理联合会”（IU-GG）通过推荐的值为：

$$a=6378140\text{m}, b=6356755\text{m}, f=1/298.257$$

由于地球椭球的扁率 f 很小，当测量面积不大时，可以把地球当作圆球来对待，其圆球半径 $R = \frac{1}{3}(2a+b)$ ， R 的近似值可取 6371km。

1.4 测量坐标系统与地面点位的确定

由于地表高低起伏不平，所以一般是用地面某点投影到参考曲面上的位置和该点到大地水准面的铅垂距离来表示该点在地球上的位置。测量上通常采用地理坐标系、高斯平面坐标系、独立平面坐标系。

1.4.1 地理坐标系

按坐标系所依据的基本线和基本面的不同以及求坐标方法的不同，地理坐标系又可分为天文地理坐标系和大地地理坐标系两种。

1. 天文地理坐标系

天文地理坐标又称天文坐标，表示地面点在大地水准面上的位置，它的基准是铅垂线和大地水准面，它用天文经度 λ 和天文纬度 φ 两个参数来表示地面点在球面上的位置。

如图 1-5 所示，过地面上任一点 P 的铅垂线与地球旋转轴 NS 所组成的平面称为该点的天文子午面。该子午面与经过英国格林尼治天文台的首子午面间的二面角为天文经度 λ 。从首子午面向东或向西计算，取值范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$ ，在首子午线以东为东经，以西为西经。过 P 点的铅垂线与赤道平面的夹角为天文纬度 φ 。自赤道起向南或向北计算，取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，在赤道以北为北纬，以南为南纬。

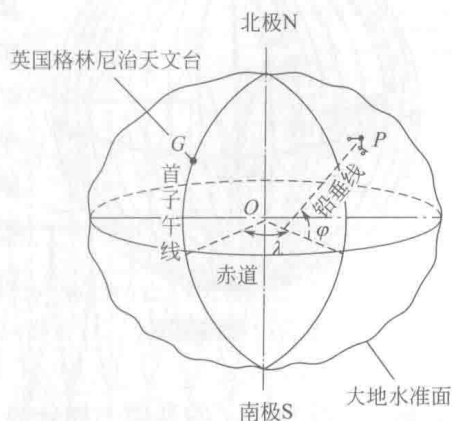


图 1-5 天文地理坐标系

地面点的天文坐标可以用天文测量方法测定。例如，广州地区的概略天文地理坐标为东经 $113^\circ 18'$ ，北纬 $23^\circ 07'$ 。由于天文测量定位精度不高，并且天文坐标之间在大地水准面上推算困难，使它在精确定位中较少使用，常用于导弹发射、天文大地网或独立工程控制网的起始点定向。

2. 大地地理坐标系

大地地理坐标又称大地坐标，是表示地面点在参考椭球面上的位置，它的基准是法线和参考椭球面，它用大地经度 L 和大地纬度 B 表示。如图 1-6 所示， P 点的大地经度 L 是过 P 点的大地子午面和首子午面所夹的两面角， P 点的大地纬度 B 是过 P 点的法线与赤道面的夹角。大地经度 L 、纬度 B 是根据起始大地点（又称大地原点，该点的大地经纬

度与天文经纬度一致)的大地坐标系,按大地测量所得的数据推算而得。

目前我国使用的是“1980年国家大地坐标系”,也称为“1980西安坐标系”;中华人民共和国成立初期使用的坐标系称“1954北京坐标系”,其大地原点位于苏联列宁格勒天文台中央。

1.4.2 高斯平面直角坐标系

在实际进行测量时,量距、测角或高程都是在水准面上以铅垂线为准,因此,所测得的数据若以大地坐标表示,必须精确地换算成大地坐标系。实践证明,在它上面进行计算是相当复杂和烦琐的,若将其直接用于工程建设规划、设计、施工等,则很不方便。为了便于测量计算和生产实践,要将椭球面上大地坐标按一定数学法则归算到平面上,并在平面直角坐标系中采用人们熟知的简单计算公式计算平面坐标。由椭球面上的大地坐标向平面直角坐标转化时采用地图投影理论,我国采用高斯-克吕格投影,简称高斯投影。

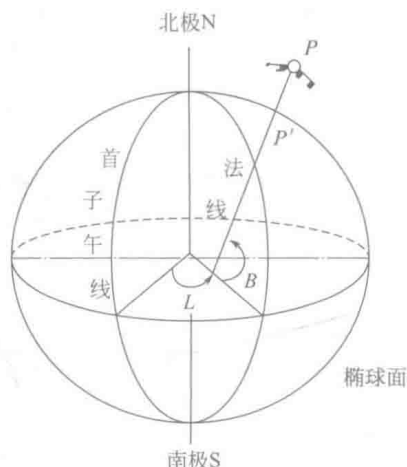


图 1-6 大地地理坐标系

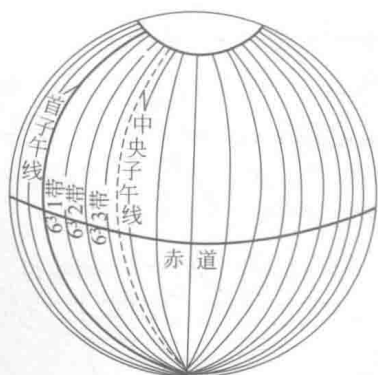


图 1-7 高斯投影

高斯投影首先是将地球按经线分为若干带,称为投影带。国际上统一把椭球体分为 6° 和 3° , 如图 1-7 所示,从首子午线开始,自西向东每隔 6° 划为一带,每带均有统一编排的带号,用 N 表示。从 0° 起算往东划分, $0^\circ \sim 6^\circ$ 为第 1 带, $6^\circ \sim 12^\circ$ 为第 2 带, ..., 全球依次划分为 60 个投影带,分带进行投影。各带中央的一条经线,例如第 1 带的 3° 经线,第 2 带的 9° 经线,称为中央子午线。 6° 带任一带的中央子午线经度 L 与投影带 N 的关系见式 (1-2):

$$L = 6N - 3 \quad (1-2)$$

当要求变形更小时,还可以按经差 3° 或 1.5° 划分投影带。 3° 带是在 6° 的基础上划分的,其中央子午线在奇数带时与 6° 带中央子午线重合,每隔 3° 为一带,共 120 带。任一带的中央子午线精度 L' 与投影带 N 的关系见 (1-3):

$$L' = 3N \quad (1-3)$$

如图 1-8,投影时是设想将一个空心的圆柱横套在地球椭球外面,使圆柱的中心轴线位于赤道面内并通过球心,并使投影带中央子午线与圆柱面相切,将椭球面上的图形按等角投影的原理投影到圆柱面上,然后将圆柱沿着过南北两极的母线切开,展成平面即可在该平面上定义平面直角坐标系。

图 1-9 为高斯投影分带情况,图中上半部为 6° 带分带情况,下半部为 3° 带分带情况,我国领土 6° 带是从第 13 带~第 23 带。

其中高斯投影的特点:

(1) 等角

椭球面上图形的角度投影到平面之后,其角度相等,无角度变形,但距离与面积稍有

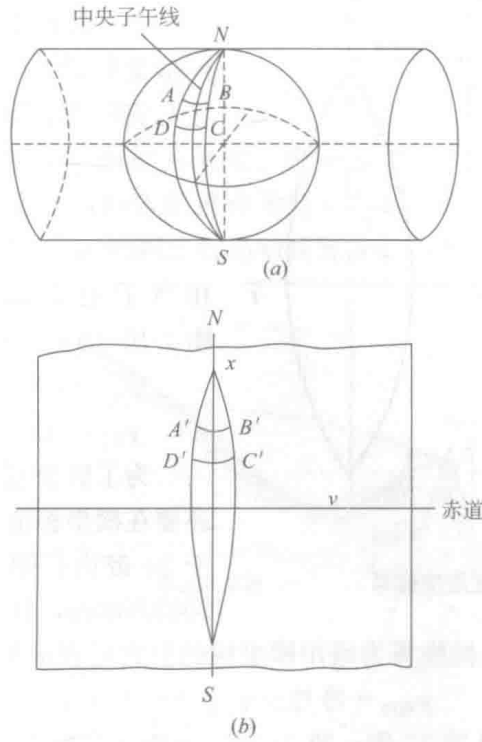


图 1-8 投影分析

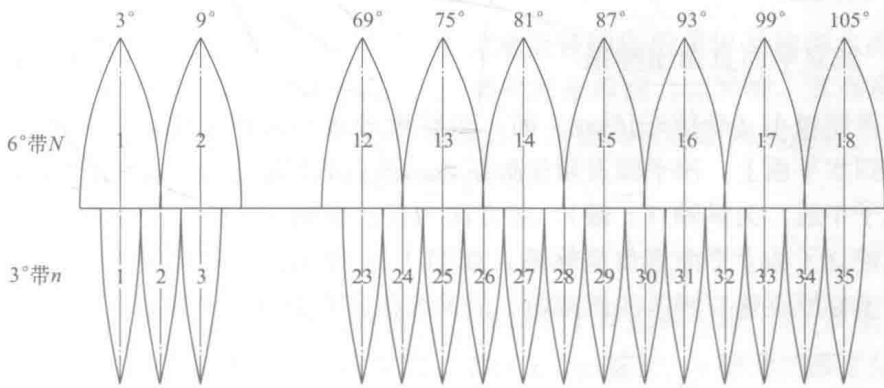


图 1-9 高斯投影分带

变形。

(2) 中央经线投影后仍是直线，且长度不变形

如图 1-9 所示，把中央经线作为平面直角坐标系的纵轴： x 轴。而两侧其他经线投影后呈向两极收敛的曲线，并与中央经线对称，距中央经线越远长度变形越大。

(3) 赤道投影也为直线

把赤道投影线作为平面直角坐标的横轴： y 轴。南北纬线投影后呈离向两极的曲线，且与赤道投影对称。

高斯平面直角坐标系是以各带的中央子午线投影为 x 轴，赤道投影为 y 轴，两轴的交点为坐标原点，构成各带独立的坐标系。我国位于北半球，所以纵坐标 x 均为正。横坐标 y 有正有负，如图 1-10 (a) 所示。

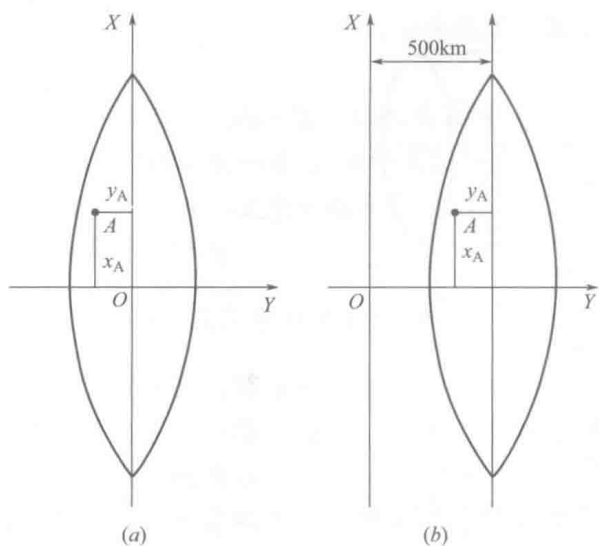


图 1-10 高斯平面直角坐标系

为了使横坐标不出现负值，通常将实际横坐标值加 500km，称为通用横坐标。它与实际横坐标的关系见式 (1-4)：

$$y_{\text{通用}} = y_{\text{实际}} + 500000\text{m} \quad (1-4)$$

例如：设 $y_A = +137680\text{m}$ ， $y_B = -274240\text{m}$ 。为了避免横坐标出现负值，相当于把坐标纵轴向西移 500km。如图 1-10 (b) 所示。这时

$$y_A = 500000 + 137680 = 637680\text{m}$$

$$y_B = 500000 - 274240 = 225760\text{m}$$

为了区分横坐标位于哪一个 6° 带内，还要在横坐标值前冠以带号。例如 A 点位于 20 带内，则 A 点通用横坐标 $y_{A\text{通用}} = 20637680\text{m}$ ，B 点通用横坐标 $y_{B\text{通用}} =$

20225760m。因此实际横坐标换算为通用横坐标的公式可表示为式 (1-5)：

$$y_{\text{通用}} = \text{带号} + y_{\text{实际}} + 500000\text{m} \quad (1-5)$$

由于我国领土 6° 带是从第 13 带~第 23 带，通用横坐标换算为实际横坐标时，通用横坐标数中前两位均为带号。当通用横坐标换算为实际横坐标时，首先应先去掉前两位带号，再减去 500km。

1.4.3 独立平面直角坐标系

当测区范围较小（半径 $\leq 10\text{km}$ ）时，可将地球表面视作平面，直接将地面点沿铅垂线方向投影到水平面上，用平面直角坐标系表示该点的投影位置。以测区子午线方向（真子午线或磁子午线）为纵轴（ x 轴），北方向为正；横轴（ y 轴）与 x 轴垂直，东方向为正。这样就建立了独立平面直角坐标系，如图 1-11 所示。实际测量中，为了避免出现负值，一般将坐标原点选在测区的西南角，故又称假定平面直角坐标系。

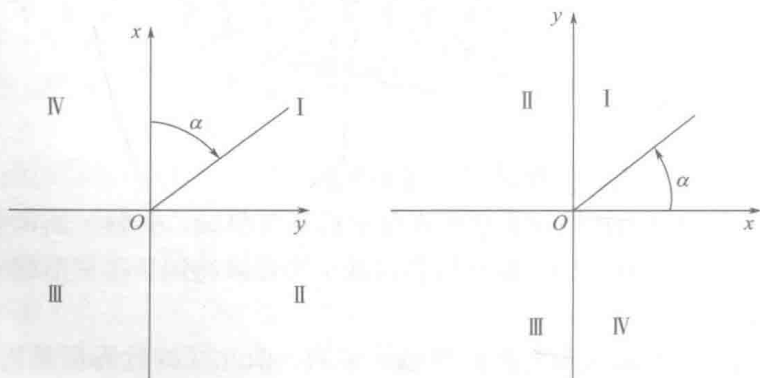


图 1-11 独立平面直角坐标系

两种平面直角坐标系，与数学坐标系相比较，区别在于纵横轴互换，且象限按顺时针方向 I、II、III、IV 排列，如图 1-11 所示，目的是便于将数学中的三角和几何公式不作