



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水利工程测量

赵 红 主 编

张养安 李聚方 王建华 副主编

Higher Education

. 1-43



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

二、藥：調劑本基麻油工本基

水利工程测量

量技术的要求。根据《水利行业职业技能鉴定题库》、《水利职业技能鉴定工电专业题库》、《杨凌职业技术学院》、《黄河水利职业技术学院》和《浙江同济科技职业学院》共同编写。

水利工程施工测量是水利水电类专业的技术基础课。随着电子技术、计算机技术和空间技术的发展,现代测绘技术也得到了飞速进步的发展。新技术、新仪器、新方法大量涌现,为了更好地适应新世纪水利工程专业应用型人才培养,及时反映测量的新进展,本书在编写过程中充分考虑到目前水利工程专业学生的具体情况,力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进,力求做到叙述和公式推导,特别强调实践环节,对学生实际能力的培养做了有益的探索;同时,还重视测量新技术、新仪器



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材共十五章。第一章绪论,叙述测量的基本概念、基本工作和基本原则;第二章地形图基本知识,讲述地形图的基本概念和基本知识;第三章至第七章阐述测量的基本工作原理和方法,包括水准测量、角度测量、距离测量和直线定向、全站仪及其使用,以及误差的基本知识;第八章、第九章讲述大比例尺地形图测绘的方法,包括控制测量和大比例尺地形图测绘;第十章地形图应用,概述地形图的一般应用及在工程上的应用;第十一章至十五章讲述测量在水利工程中的应用,包括施工测量基本工作、大坝施工测量、隧洞施工测量、渠道测量和大坝变形观测等。

本教材可供水利工程、水利水电建筑工程、水信息、水文、工程地质、农林、环境工程等专业的师生使用,也可供从事水利水电的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水利工程测量 / 赵红主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5084-7240-9

I. ①水… II. ①赵… III. ①水利工程测量—高等学校—教材 IV. ①TV221.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第026973号

书 名	普通高等教育“十一五”国家级规划教材 水利工程测量
作 者	赵红 主编 张养安 李聚方 王建华 副主编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 20.25印张 480千字
版 次	2010年2月第1版 2010年2月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	37.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前言

本教材是按照高职高专教育教学的要求,以及水利水电类专业对工程测量技术的要求,根据多年来的教学和实践经验编写的,由浙江水利水电专科学校、杨凌职业技术学院、黄河水利职业技术学院和浙江同济科技职业学院共同编写。

水利工程测量是水利水电类专业的技术基础课。随着电子技术、计算机技术和空间技术的发展,现代测绘技术也得到了突飞猛进的发展,新技术、新仪器、新方法大量涌现。为了更好地培养高素质、高技能的应用型人才,及时反映测量的新知识,突出能力培养和技能训练的职业教育特点,本书在编写过程中充分考虑到高职高专类学生的具体情况,以阐明基本理论、基本知识和培养学生的实际动手能力为宗旨,力求简化理论知识的叙述和公式推导,特别强调实践环节,对学生实际能力的培养做了有益的探索;同时,还重视测量新技术、新仪器和新方法的讲述,如介绍了电子水准仪、电子经纬仪、全站仪、GPS、数字化地形图测绘等内容。

本教材由浙江水利水电专科学校赵红担任主编,杨凌职业技术学院张养安、黄河水利职业技术学院李聚方、浙江同济科技职业学院王建华担任副主编。其中:第六章、第十一章、第九章的第三节、第十章的第四节、附录一和附录二由赵红编写;第三章和第十章由张养安编写;第八章由李聚方编写;第五章和第九章由王建华编写;第十三章由王稳江编写;第十四章由鲁有柱编写;第一章由黄文彬编写;第二章由毛迎丹编写;第四章、第七章由黄伟朵编写;第十二章、第十五章由唐继权编写。全书由赵红统稿,浙江大学陈丽华副教授审稿。

囿于编者水平,书中的差错或不当之处在所难免,恳盼使用本教材的教师和读者多提宝贵意见,以帮助我们改进,使本教材日臻完善。

编者

2009年10月

目录

18	第一节 地形图在工程规划中的应用	192
28	第三节 面积量算	195
28	第四节 数字地形图的应用	195
29	习题	204
29	第十一章 施工测量基本工作	205
101	第一节 施工测量概述	205
201	第二节 施工控制网的布设	208
201	第三节 基本的测设工作	207
201	第四节 测设点的平面位置的基本方法	207
前言		
第一章 绪论		1
第一节 测绘工作的任务及作用		1
第二节 地球的形状和大小		2
第三节 地面点位置的表示方法		5
第四节 空间直角坐标与大地坐标间的转换		10
第五节 用水平面代替水准面的限度		11
第六节 测量工作的基本原则		13
第七节 测量常用的计量单位		15
习题		15
第二章 地形图基本知识		16
第一节 地形图的比例尺		16
第二节 地物符号和地貌符号		19
第三节 地形图的图外注记		26
第四节 地形图的分幅和编号		28
习题		32
第三章 水准测量		34
第一节 水准测量原理		34
第二节 水准测量的仪器和工具		35
第三节 水准测量的方法		45
第四节 普通水准测量高差闭合差的调整与高程计算		49
第五节 微倾式水准仪的检验与校正		52
第六节 水准测量的误差来源及其影响		55
习题		58
第四章 角度测量		61
第一节 角度测量原理		61
第二节 光学经纬仪和电子经纬仪		62
第三节 水平角测量		69
第四节 竖直角测量		75
第五节 经纬仪的检验和校正		79
第六节 角度测量的误差及削减方法		84

习题	87
第五章 距离测量和直线定向	89
第一节 钢尺量距	89
第二节 视距测量	95
第三节 电磁波测距	97
第四节 直线定向	101
习题	105
第六章 全站仪及其使用	107
第一节 全站仪的结构与功能	107
第二节 全站仪的基本使用方法	109
第三节 全站仪的程序测量	113
第四节 全站仪的存储管理模式与数据通信	116
第五节 几种新型全站仪	121
习题	123
第七章 测量误差基本知识	124
第一节 测量误差的来源及分类	124
第二节 偶然误差的特性	126
第三节 衡量精度的指标	128
第四节 观测值函数的中误差——误差传播定律	130
第五节 等精度观测的最或是值计算及精度评定	131
第六节 不等精度观测的最或是值计算及精度评定	135
习题	137
第八章 小地区控制测量	138
第一节 控制测量概述	138
第二节 图根导线测量的外业工作	141
第三节 图根导线测量的内业计算	144
第四节 交会法测量	151
第五节 高程控制测量	152
第六节 GPS 在控制测量中的应用	157
习题	163
第九章 大比例尺地形图测绘	165
第一节 大比例尺地形图的传统测绘方法	165
第二节 数字化测图方法	172
第三节 南方 CASS 测图软件	178
第四节 水下地形的测绘	184
习题	187
第十章 地形图应用	189
第一节 地形图应用的基本内容	189

第二节	地形图在工程规划设计中的应用	192
第三节	面积量算	195
第四节	数字地形图的应用	200
习题		204
第十一章	施工测量基本工作	205
第一节	施工测量概述	205
第二节	施工控制网的布设	206
第三节	基本的测设工作	207
第四节	测设点的平面位置的基本方法	210
第五节	已知坡度直线的测设	212
第六节	圆曲线的测设	213
习题		217
第十二章	大坝施工测量	219
第一节	土坝的控制测量	219
第二节	土坝清基开挖与坝体填筑的施工测量	221
第三节	混凝土坝的施工控制测量	223
第四节	混凝土坝清基开挖线的放样	225
第五节	混凝土重力坝坝体的立模放样	226
习题		229
第十三章	隧洞施工测量	230
第一节	概述	230
第二节	洞外控制测量	231
第三节	隧洞内施工测量	235
第四节	竖井和旁洞的测量	239
第五节	隧洞工程竣工图的测绘	241
习题		242
第十四章	渠道测量	243
第一节	渠道选线测量	243
第二节	中线测量	244
第三节	纵断面测量	247
第四节	横断面测量	250
第五节	土方计算	252
第六节	渠道施工放样	254
习题		255
第十五章	大坝变形观测	257
第一节	概述	257
第二节	垂直位移观测	258
第三节	视准线法观测水平位移	259
第四节	波带板激光衍射法观测水平位移	260

第五节	引张线法观测水平位移	262
第六节	前方交会法观测水平位移	263
第七节	挠度观测	264
第八节	变形监测及自动化系统	265
第九节	成果整理	268
习题		272
附录一	Excel 表格计算	273
附录二	测量实训	282
训练单元一	水准测量	285
训练一	普通水准测量	285
训练二	闭合水准测量	287
训练三	水准仪的检检与校正	288
训练单元二	角度测量	291
训练一	测回法观测水平角	291
训练二	方向法观测水平角	292
训练三	竖直角观测	293
训练四	经纬仪的检验与校正	294
训练单元三	全站仪使用	297
训练一	全站仪的角度测量和距离测量	297
训练二	全站仪的坐标测量	300
训练单元四	导线测量	302
训练一	全站仪的导线测量	302
训练二	全站仪导线测量的内业计算	303
训练单元五	高程控制测量	305
训练一	四等水准测量	305
训练二	三角高程测量	306
训练单元六	大比例尺地形图测绘	308
训练一	经纬仪测绘法	308
训练二	草图法数字测图	309
训练单元七	地形图应用	311
训练一	纸质地形图的应用	311
训练二	数字地形图的应用	312
训练单元八	放样测量	313
训练一	已知高程的测设	313
训练二	全站仪放样建筑物轴线交点	314
参考文献		316



第一章 绪论

内容提要

本章共分7节,主要介绍了地面点位置的表示方法,测量工作的基本概念和基本原则,以及地球曲率对观测量的影响。本章的重点内容是:水利工程测量的主要任务;水准面、大地水准面、相对高程、绝对高程、高差;独立平面直角坐标系;测量的基本工作和基本原则;地球曲率对水平距离、高程和水

第一节 测绘工作的任务及作用

测绘是测量和地图制图的统称。测绘科学研究的对象主要是地球的形状、大小和地球表面上各种固定物体的几何形状及空间位置。测绘科学的成果通常将地形信息结合某些社会信息和自然信息编制成图或地理数据库供人们直观、方便地使用,传统的测绘学科主要包括大地测量学、普通测量学、航空摄影测量学、工程测量学、海洋测量学、地籍测绘学、地图制图学等分支。

随着科学技术的进步,光电技术、人造地球卫星技术、计算机技术在测绘技术中得到了普遍应用,测绘学研究对象不再仅仅只是地球,而已扩展到地球外层空间的各种自然和人造实体。测绘的作业方式和应用领域都已经发生了重大变化,传统的按作业方式或应用领域的分类方法已经不能完全适应测绘学科的现状。

20世纪末,以全球定位系统技术(GPS)、遥感技术(RS)和地理信息系统技术(GIS)——“3S”技术为代表的现代测绘技术得到快速地发展并已普遍应用于测绘生产中,测绘产品也逐步实现向数字高程模型(DEM)、数字正射影像(DOM)、数字线划图(DLG)和数字栅格图(DRG)——“4D”产品方面过渡。随着“数字地球”的建立,测绘将为经济建设提供越来越多的服务。

测绘工作常被人们称为建设的尖兵,在经济建设和国防建设中具有重要作用。这是由于不论是国民经济建设还是国防建设,其勘测、设计、施工、竣工及保养维修等阶段都需要测绘工作,而且都要求测绘工作走在这类任务的前面。如农田水利建设、国土资源管理、地质矿藏的勘探与开发、交通运输的设计、工矿企业和城乡建设的规划、海洋资源的开发、江河的治理、大型工程建设等,都必须首先进行测绘并提供地形图与数据等资料,才能保证规划设计与施工的顺利进行。因此,在国防建设中,军事工程的设计与施工、火炮及导弹武器的发射、战役及战斗方案的部署、各军兵种军事行动的协同等,都离不开地形图和测绘工作的保障。所以,人们形象地称地形图是“指挥员的眼睛”。在其他领域,如地震灾害的预报、航天、考古、探险,甚至人口调查等工作中,也都需要测绘工作的配合。



新中国成立以来,我国测绘的主要成就有:①在全国范围内(除台湾省外),建立了高精度的大地控制网,统一了坐标系统与高程系统;②完成了国家基本比例尺地形图的测绘,测图比例尺随着我国经济建设发展的需要逐步增大,测图方法从以平板仪地形测量和模拟立体摄影测量为主,发展到以内外业一体化地面数字测图和全数字摄影测量为主;③编制和出版了各种地图、专题图及其地图集,制图逐渐实现从手工编绘向数字化、自动化过渡;④制定了各种测绘技术规范和法规,统一了技术规格和精度指标;⑤建立了从中等测绘职业教育到高等测绘教育的完整教育体系,培养和造就了大量测绘技术人才;⑥测绘技术步入世界先进行列,向着自动化和数字化发展,近10年来,研制出了大量具有世界先进水平的测绘软件,如全数字摄影测量系统——VirtuoZo、面向对象的地理信息系统——GeoStar(吉奥之星)、地理信息系统软件平台——MAPGIS、数字测图系统——清华山维的EPSW、武汉瑞得的RDMS、南方测绘的CASS等;⑦测绘仪器的制造从无到有,不仅能生产各种不同等级的光学经纬仪、水准仪、平板仪等,还能批量生产电子经纬仪、电磁波测距仪、自动安平水准仪、全站仪、GPS接收机、解析测图仪等。

水利水电建设中的测量工作我们称之为水利工程测量。水利工程测量是为水利工程建设服务的专门测量,属于工程测量学的范畴。它的主要任务是:

(1) 为水利工程规划设计提供所需的地形资料。规划时需提供中、小比例尺地形图及有关信息,建筑物设计时要测绘大比例尺地形图。

(2) 施工阶段要将图上设计好的建筑物按其位置、大小测设于地面,以便据此施工,称为施工放样。

(3) 工程完工后,需要测绘竣工图,供日后扩建、改建和维修使用。在施工过程及工程建成后运行管理中,需要对建筑物的稳定性及变化情况进行监测,即变形观测,以确保工程安全。

本课程是水利类专业的技术基础课。作为一个水利工作者,必须掌握测量的知识和技能,才能担负起工程勘测、规划设计、施工及管理任务。学习该课程,具体要求掌握:现代测量学的基本知识、基本理论;具有使用常规测量仪器的操作技能,掌握先进测绘仪器的原理、使用方法,如全站仪、GPS等;基本掌握小区域大比例尺地形图测绘的原理、方法;掌握数字测图的过程与方法;在水利工程规划、设计和施工中能正确地使用地形图和测量信息;掌握处理测量数据的理论和评定精度的方法;在施工过程中,能正确使用测量仪器进行一般水利工程的施工放样工作。

水利工程测量是一门实践性很强的课程,在教学过程中,除了课堂讲授之外,还有实验课和教学实习。在掌握课堂讲授内容的同时,要认真参加实验课,以便巩固和验证所学理论,掌握各种实践技能。教学实习是一个系统的实践环节,要自始至终完成各项内容的实习,才能对测量的理论、知识和实践过程有一个完整的、系统的认识,实践技能才能得到巩固和提高。

第二节 地球的形状和大小

测量工作研究的主要对象是地球的自然表面(地球在长期的自然变化过程中形成的表



面),即岩石圈的表面。它是一个形状极其复杂而又不规则的曲面。地面上有高山、丘陵、平原、江河、湖泊、海洋等。如果仅从某一局部地区来推断,很难确定出地球的形状和大小。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。不过,从整体来看,地面的起伏与地球平均半径(约 6371000m)相比是微不足道的。

通过长期的测绘工作和科学调查,人们了解到地球表面上的海洋面积约占 71%,陆地面积约占 29%。我们可以把地球总的形状看成是一个被海水包围的形体,也就是设想一个静止的海水面(即没有波浪、无潮汐的海水面)向大陆内部延伸,最后包围起来的闭合形体。我们将水在静止时的表面叫做水准面。水准面有无穷多个,其中一个与平均海水面重合并延伸到大陆内部的水准面叫做大地水准面,如图 1-1 所示。大地水准面是唯一的。大地水准面是决定地面点高程的起算面。由大地水准面所包围的形体叫做大地体。通常认为大地体可以代表整个地球的形状。

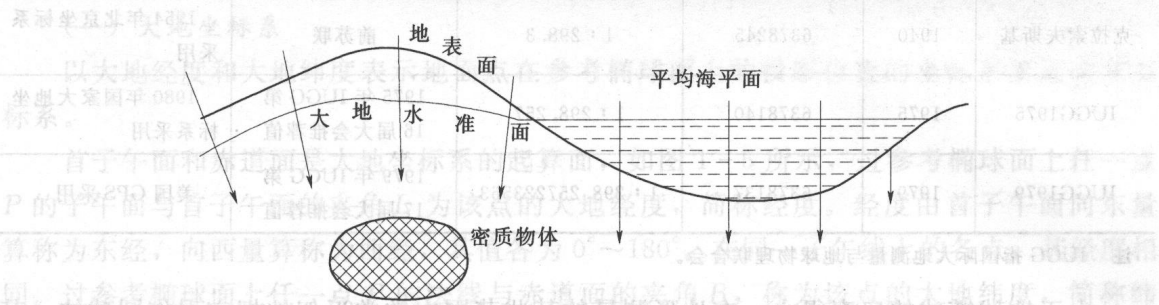


图 1-1 大地水准面示意图

水准面是一个连续封闭曲面,通过水准面上某一点而与水准面相切的平面称为过该点的水平面。水准面有这样的物理特征:处处都与其铅垂线方向相垂直。铅垂线方向又称为重力方向。重力是地球引力和离心力的合力,地球表面离心力与引力之比约为 1:300,所以重力方向主要取决于引力方向。由于地球内部物质分布不均匀,使得地面各点铅垂线方向发生不规则的变化,大地水准面实际上是略有起伏而不规则的封闭曲面,如图 1-2 所示。

显然,要在这样的曲面上进行各种测量数据的计算和成果、成图的处理是相当困难的,甚至是不可能的。然而,人们经过长期的精密测量,发现大地体十分接近于一个两轴稍扁的旋转椭球体,如图 1-3 所示。这个与大地体形状和大小十分接近的旋转椭球体,

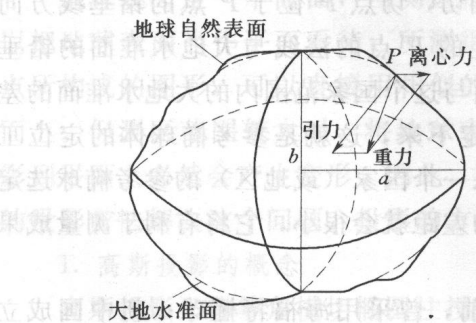


图 1-2 大地水准面与地球自然表面

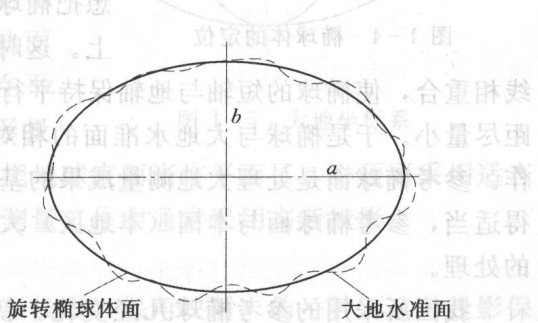


图 1-3 旋转椭球面



我们称之为地球椭球体。它是一个符合 $\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1$ 公式的数学曲面, 用 a 表示地球椭球体的长半径, b 表示其短半径, 则地球椭球的扁率 f 为:

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

所以地球椭球的元素用 a 、 b 、 f 表示即可。

世界各国推导和采用的地球椭球元素很多, 现摘录几种典型的地球椭球元素以作参考。

表 1-1 几种典型的地球椭球元素

地球椭球名称	年份	长半径 a (m)	扁 率	国别或国际组织	备 注
白塞耳	1841	6377397	1 : 299.1528128	德国	
海福特	1910	6378388	1 : 297.0	美国	
克拉索夫斯基	1940	6378245	1 : 298.3	前苏联	1954 年北京坐标系采用
IUGG1975	1975	6378140	1 : 298.257	1975 年 IUGG 第 16 届大会推荐值	1980 年国家大地坐标系采用
IUGG1979	1979	6378137	1 : 298.257223563	1979 年 IUGG 第 17 届大会推荐值	美国 GPS 采用

注 IUGG 指国际大地测量与地球物理联合会。

由于地球椭球的扁率很小, 在地形测量的某些范围内常常近似地把它看作圆球体, 其半径取为:

$$R = \frac{a+a+b}{3} \approx 6371(\text{km}) \quad (1-2)$$

一个国家为了处理自己的大地测量成果, 首先要在地面上适当的位置选择一点作为大地原点, 用于归算地球椭球定位结果, 并作为观测元素归算和大地坐标计算的起算点。采用与地球大小和形状接近的并确定了和大地原点关系的地球椭球体, 称为参考椭球体, 其表面称为参考椭球面。

如图 1-4 所示, 在地面上适当地方选择一点 P , 设想把椭球与大地体相切, 切点 P' 位于 P 点的铅垂线方向上。这时, 椭球面上的 P' 点的法线与大地水准面的铅垂线相重合, 使椭球的短轴与地轴保持平行, 且椭球面与这个国家范围内的大地水准面的差距尽量小。于是椭球与大地水准面的相对位置便确定下来, 这就是参考椭球体的定位工作。参考椭球面是处理大地测量成果的基准面。如果一个国家(或地区)的参考椭球选定得适当, 参考椭球面与本国(本地区)大地水准面的差距就会很小, 它将有利的测量成果的处理。

我国所采用的参考椭球几经变化。新中国成立前, 曾采用海福特椭球; 新中国成立后, 采用的是大地原点在前苏联普尔科沃的克拉索夫斯基椭球。由于克拉索夫斯基椭球参



数与 1975 年国际第三推荐值相比, 其长半轴相差 105m, 而 1978 年我国根据自己掌握的测量资料推算出的地球椭球为 $a=6378143\text{m}$, $\alpha=1:298.255$, 这个数值与国际第三推荐值十分接近, 我国决定自 1980 年起采用 1975 年国际第三推荐值 (表 1-1) 作为参考椭球, 它更适合我国大地水准面的情况, 从而使测量成果归算得更准确。

第三节 地面点位置的表示方法

由于地球自然表面高低起伏变化较大, 要确定地面点的空间位置, 就必须要有有一个统一的坐标系。在测量工作中, 通常用地面点在基准面 (如参考椭球面) 上的投影位置和该点沿投影方向到大地水准面的距离三个量来表示。投影位置通常用地理坐标或平面直角坐标来表示, 到大地水准面的距离用高程表示。

一、坐标

(一) 大地坐标系

以大地经度和大地纬度表示地面点在参考椭球面上的投影位置的坐标系就是大地坐标系。

首子午面和赤道面是大地坐标系的起算面, 如图 1-5 所示, 过参考椭球面上任一点 P 的子午面与首子午面的夹角 L 为该点的大地经度, 简称经度。经度由首子午面向东量算称为东经, 向西量算称为西经, 其值各为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。在同一子午线上的各点, 其经度相同。过参考椭球面上任一点 P 的法线与赤道面的夹角 B , 称为该点的大地纬度, 简称纬度。纬度由赤道面向北量算称为北纬, 向南量算称为南纬, 其值各为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。在同一平行圈上各点的纬度相同。大地经度 L 和大地纬度 B 统称为大地坐标。

由于参考椭球面与大地水准面之间的相关位置已固定下来, 地面上任何一点的位置都可以沿法线方向投影到参考椭球面上, 并用其大地经度、大地纬度表示出来。由此可见, 大地坐标是以法线为依据, 以参考椭球面为基准面。

用经度、纬度表示 P 点位置的坐标系是在球面上建立的, 故又称为球面坐标, 也称为地理坐标。

(二) 高斯平面直角坐标系

地球表面是一个曲面, 当测区范围较小时, 可以把地球表面当作平面看待, 所测得的一系列地面点所构成的图形, 可以直接用相似的方法缩绘在平面上。但测区范围较大时, 将地球表面上的图形投影到平面上必然会产生变形, 因此, 这时就不能把地球表面当作平面了, 必须要采用适当的投影方法解决这个问题。投影的方法有多种, 测量工作中通常采用高斯投影。

1. 高斯投影的概念

高斯投影又称等角横切圆柱投影, 它是正形投影 (保角映射) 的一种。这种投影保持图上任意两个方向的夹角与实地相应的角度相等, 在小范围内保持图上形状与实地相

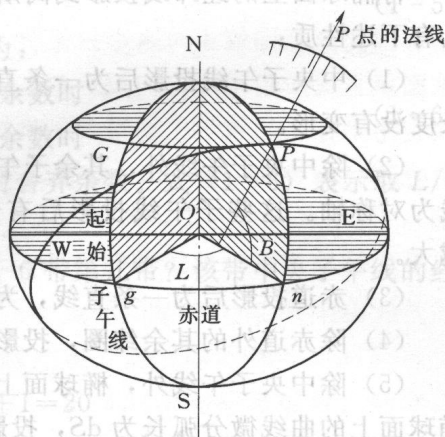


图 1-5 大地坐标系



似。这种方法是由德国数学家高斯首先创立并经克吕格改进完善的, 所以又称高斯—克吕格投影, 通常简称高斯投影。

为简要说明高斯投影的概念, 设想用一个椭圆柱横套在参考椭球体的外面 (图 1-6), 并使椭圆柱与参考椭球体的某一子午线相切, 相切的子午线 $NKOS$ 称为轴子午线或中央子午线; 椭圆柱的中心轴 ZZ' 与赤道面相重合, 并通过椭球中心 C 。将中央子午线两侧一定经度范围内 (如 6° 或 3°) 的点、线投影到椭圆柱面上。然后, 沿过南北极的母线 AA' 、 BB' 将椭圆柱面剪开, 并将其展成一平面 (称为高斯平面), 就可得到椭球面投影到平面上的图形了。

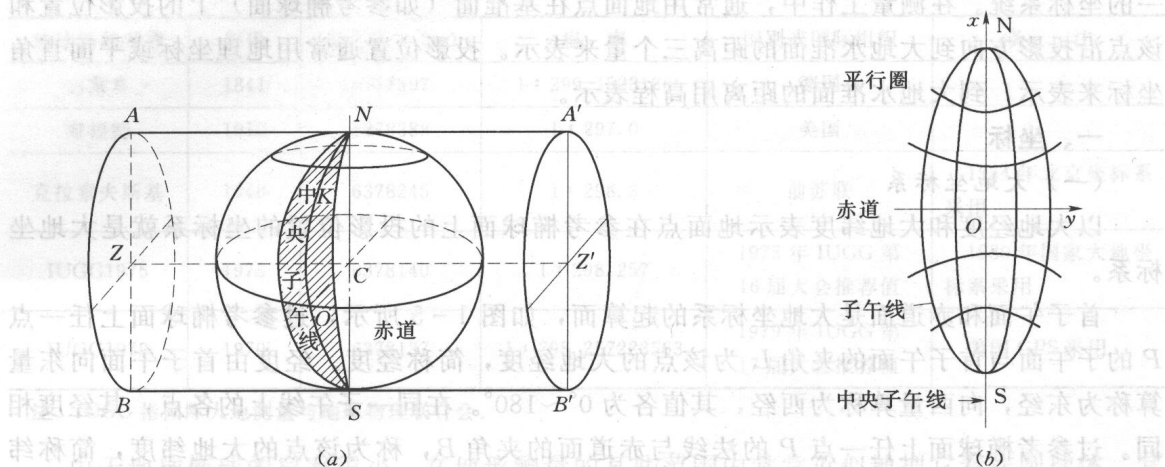


图 1-6 高斯投影

将椭球面上的经纬线投影到高斯平面上后, 这些曲线的形状或长度发生了变化, 它们具有下述性质:

(1) 中央子午线投影后为一条直线, 为 x 轴, 并且是投影的对称轴。中央子午线的长度没有变形。

(2) 除中央子午线外, 其余子午线投影后均为凹向中央子午线的曲线, 并以中央子午线为对称轴。这些子午线投影后有长度变形, 且离中央子午线越远, 投影后长度变形越大。

(3) 赤道投影后为一条直线, 为 y 轴, 其长度有变形。

(4) 除赤道外的其余纬圈, 投影后均为凸向赤道的曲线, 并以赤道为对称轴。

(5) 除中央子午线外, 椭球面上所有的曲线弧投影后长度都有变形。在任一点处, 设椭球面上的曲线微分弧长为 ds , 投影到平面上后其微分弧长变为 ds' , 则其长度比:

$$m = \frac{ds'}{ds} > 1 \quad (1-3)$$

(6) 经线与纬圈投影后仍保持正交。

由此可见, 凡是参考椭球面上其大地位置对称于中央子午线或赤道的点, 其在高斯投影面上的平面位置也将对称于相应的坐标轴。

2. 投影带的划分

高斯投影虽然不存在角度变形, 但长度变形还是存在的。除中央子午线外, 投影在平



面上的长度都要发生变形，并且离中央子午线越远，长度变形越大。变形太大对于测图和用图都是不方便的，因此，必须设法加以限制。通常是采用分带投影（即限制投影范围）的办法来限制长度变形。

具体做法是，把投影的区域限制在中央子午线两边一条狭小的范围内，这个范围的宽度一般为经差 6° 、 3° 或 1.5° 等几种，分别简称 6° 带、 3° 带和 1.5° 带。按照这种做法，国际上统一把椭球分成许多 6° 或 3° 带，并依次进行编号，如图 1-7 (a) 所示。

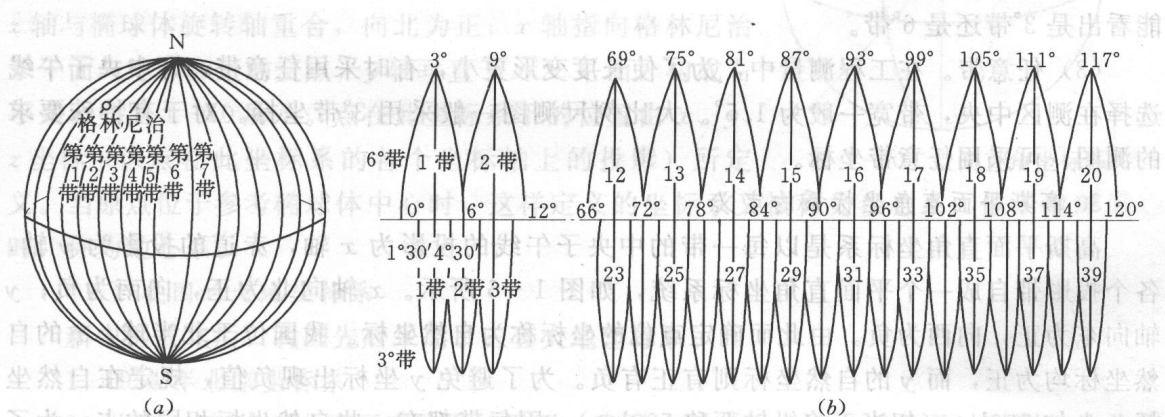


图 1-7 投影带的划分

(1) 6° 带。如图 1-7 (b) 所示， 6° 带的带号是由起始子午线算起，自西向东每隔经差 6° 划分一带，可将地球分成 60 个带，每带的带号可按 1~60 依次编号。第 N 带中央子午线的经度 L_{N0} 与带号 N 的关系为：

$$L_{N0} = 6N - 3 \quad (N = 1, 2, \dots, 60) \quad (1-4)$$

或写成

$$N = (L_{N0} + 3) / 6 \quad (1-5)$$

如已知某点的经度为 L ，则该点所在 6° 带的带号为：

$$N = [L/6] + \begin{cases} 1, \text{前项有余数时} \\ 0, \text{前项无余数时} \end{cases} \quad (1-6)$$

这里的 $[\cdot / \cdot]$ 表示“取整数运算”，不能整除时舍弃余数。式 (1-6) 表示取 $L/6$ 的“整数”，当不能整除时，无论余数多小，一律进位。

【例 1-1】 已知某点的经度为 $115^\circ 30'$ ，该点位于 6° 带第几带？该带中央子午线的经度是多少度？

解： 因为 $115.5/6 = 19 \dots 1.5$

所以

$$N = [115.5/6] + 1 = 19 + 1 = 20$$

$$L_{0} = 20 \times 6 - 3 = 117$$

该点位于第 20 带，其中央子午线的经度为 117° 。

(2) 3° 带。如图 1-7 (b) 所示， 3° 带是在 6° 带的基础上划分的。 6° 的中央子午线和分带子午线都是 3° 的中央子午线。 3° 带是由东经 1.5° 起算，自西向东每隔经差 3° 划分，其带号按 1~120 依次编号。 3° 带第 n 带的中央子午线的经度 L_{n0} 与带号 n 的关系为：

$$L_{n0} = 3n \quad (n = 1, 2, \dots, 120) \quad (1-7)$$

或写成

$$n = L_{n0} / 3 \quad (1-8)$$



如已知某点的经度为 L ，则该点所在的 3° 带的带号为

$$n = [(L - 1.5) / 3] + \begin{cases} 1, & \text{前项有余数时} \\ 0, & \text{前项无余数时} \end{cases} \quad (1-9)$$

因为 3° 带是从 1.5° 起，自西向东划分的，所以式 (1-9) 中要将 L 减去 1.5° 。

我国中央子午线的经度从 75° 到 135° ， 6° 带横跨 11 带 (13~23 带)； 3° 带横跨 21 带 (25~45 带)。因此，就我国而言，其 6° 带和 3° 带的带号是没有重复的，就带号本身，就能看出是 3° 带还是 6° 带。

(3) 任意带。在工程测量中，为了使长度变形更小，有时采用任意带，即中央子午线选择在测区中央，带宽一般为 1.5° 。大比例尺测图一般采用 3° 带坐标。对于有特殊要求的测图，可采用任意带坐标。

3. 高斯平面直角坐标系的定义

高斯平面直角坐标系是以每一带的中央子午线的投影为 x 轴，赤道的投影为 y 轴，各个投影带自成一个平面直角坐标系，如图 1-6 所示。 x 轴向北为正，向南为负； y 轴向东为正，向西为负。由此而确定点位的坐标称为自然坐标。我国位于北半球， x 的自然坐标均为正，而 y 的自然坐标则有正有负。为了避免 y 坐标出现负值，规定在自然坐标 y 上加 500km (相当于将纵轴西移 500km)。因每带都有一些自然坐标相同的点，为了说明某点的确切位置，则在加 500km 后的 y 坐标前加上相应的带号。将自然坐标 y 加 500km ，并在前面冠以带号的坐标称为通用坐标。例如，在图 1-8 中，假定 p_1 、 p_2 两点均位于第 21 带，其自然坐标分别为 $y'_{p1} = +180736.3\text{m}$ 、 $y'_{p2} = -105374.8\text{m}$ ，则其通用坐标为 $y_{p1} = 21680736.3\text{m}$ 、 $y_{p2} = 21394625.2\text{m}$ 。我国的 x 坐标均为正，因而 x 的自然坐标值和通用坐标值相同。

(三) 独立平面直角坐标系

当测区范围较小时 (半径不大于 10km 的区域内)，可把该区域的球面视为平面，将地面点直接沿铅垂线方向投影到水平面上并在该平面上建立直角坐标系。测量上使用的平面直角坐标系与数学上的笛卡尔坐标系有所不同。如图 1-9 所示，测量上将南北方向的坐标轴定为 x 轴 (纵轴)，自原点向北为正，向南为负；东西方向的坐标轴定为 y 轴 (横轴)，自原点向东为正，向西为负；象限按顺时针方向编号，并规定所有直线的方向都是以纵坐标轴北端为准按顺时针方向量度。这样，数学中的全部平面三角公式均可直接使

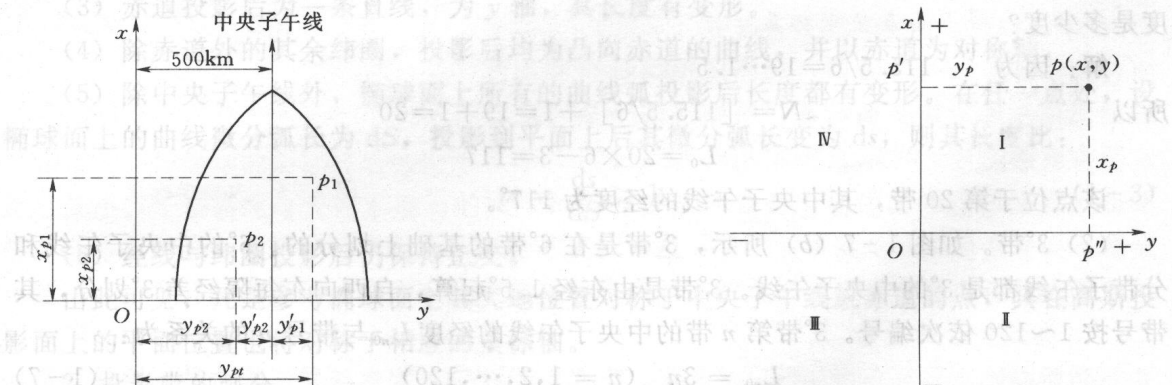


图 1-8 高斯平面直角坐标系

图 1-9 独立平面直角坐标系



用,同时又便于测量中的方向和坐标计算。为使用方便,测量上用的平面直角坐标系的原点有时是假设的。假设原点的位置应使测区内各点的 x 、 y 值为正。

图 1-10 空间直角坐标系

在测量应用中,常用空间直角坐标来表示空间点的位置。通常空间直角坐标系的原点设在参考椭球体中心 O , z 轴与椭球体旋转轴重合,向北为正; x 轴指向格林尼治子午面与地球赤道的交点, y 轴垂直于 xOz 平面,构成右手系,如图 1-10 所示。点在此坐标系下的位置由 x 、 y 、 z 坐标(该点在此坐标系的各个坐标轴上的投影)所定

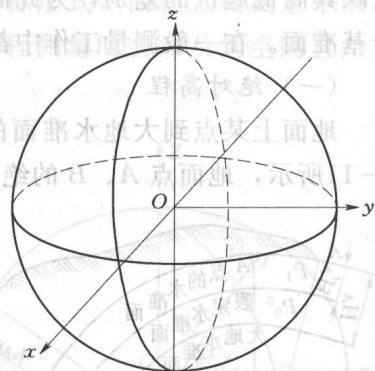


图 1-10 空间直角坐标系

义。当原点位于参考椭球体中心时,这样定义的坐标系又被称为参心系;位于地球质心时,称为地心系。

(五) 我国的大地坐标系

新中国成立后,我国先后采用了三套大地坐标系。

1. 1954 年北京坐标系

20 世纪 50 年代,由于国家建设的需要,我国地面点的大地坐标是通过联测,从前苏联经我国东北传算过来的,其坐标系统定名为 1954 年北京坐标系。实际上,这个坐标系统是前苏联 1942 年普尔科沃大地坐标系的延伸,它采用的是克拉索夫斯基椭球元素值,大地原点在原苏联普尔科沃。由于该坐标系大地原点距我国甚远(我国使用的参考原点在天津),在我国范围内该参考椭球面与大地水准面存在着明显的差距,在东部地区,差距更甚。因此,1978 年全国天文大地网平差会议决定建立我国独立的大地坐标系。

2. 1980 西安坐标系(1980 年国家大地坐标系)

自 1980 年起,我国采用 1975 年国际第三推荐值作为参考椭球,并将大地原点定在西安附近(陕西省泾阳县永乐镇),由此建立了我国新的国家大地坐标系——1980 西安坐标系。

两个系统的坐标可以转换,但不同的地区坐标转换系数不一样。使用控制点成果时,一定要注意坐标系的统一性。

3. 2000 国家大地坐标系

2000 国家大地坐标系是一种地心坐标系,坐标原点在地球质心(包括海洋和大气的整个地球质量的中心), z 轴指向 BIH1984.0 定义的协议地极方向(BIH 国际时间局), x 轴指向 BIH1984.0 定义的零子午面与协议赤道的交点, y 轴按右手坐标系确定。椭球参数有:长半轴 $a=6378137\text{m}$ 、扁率 $f=1/298.257222101$ 。我国自 2008 年 7 月 1 日起启用 2000 国家大地坐标系。

随着 GPS 的普及,出现了 WGS-84 坐标系。WGS 是 World Geodetic System(世界大地坐标系)的缩写,它是美国国防制图局为进行 GPS 导航定位于 20 世纪 80 年代中期建立的一个地心坐标系。

二、高程

大地坐标或平面直角坐标只能反映地面点在参考椭球面上或投影面上的位置,并不能