



高等学校精品规划教材

SHUILI SHUIDIAN GONGCHENG CELIANG

水利水电工程测量

刘普海 梁勇 张建生 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校精品规划教材

水利水电工程测量

主 编 刘普海 梁 勇 张建生

副主编 王 京 孔明明 帕尔哈提

编写人员 (按姓氏笔画排序)

王 京 孔明明 李晓玲 刘丽霞

刘普海 张建生 张婷婷 帕尔哈提

姜 放 梁 勇



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 简 介

本书是《高等学校精品规划教材》之一。全书共十六章。第一~四章为测量学基础知识,主要介绍测量学基本知识、测量误差基本知识及观测结果精度分析;重点介绍高差测量、角度测量及距离测量所采用的各类仪器和工具、测量原理、测量方法、精度要求等内容。第五~九章介绍地形图测绘的原理、方法和步骤,加大了数字化测图的比重,并且对地形图的一般应用及在水利水电工程中的应用作了详细介绍。第十章着重介绍GPS定位原理和应用。第十一章介绍全站仪在地形测量和工程放样中的具体应用。第十二~十六章为工程测量部分,主要介绍渠道、道路、管道和输电线路测量,施工放样基本工作,水工建筑物放样,水工建筑物的变形观测等内容,并在第十四章对河道(水下)地形测量作了详细介绍。每章附有复习思考题,书后附有主要仪器技术参数和参考文献,以便读者在学习和使用时练习、参考和查阅。

本教材适用于高等学校水利水电工程、水土保持、农业水土工程、水文地质、水资源管理等专业使用,也适用于上述专业成人教育、工程管理和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程测量/刘普海等主编. —北京:中国水利水电出版社, 2005

高等学校精品规划教材

ISBN 7-5084-2972-9

I. 水... II. 刘... III. ①水利工程测量—高等学校—教材②水力发电工程—工程测量—高等学校—教材
IV. TV221

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第057082号

书 名	高等学校精品规划教材 水利水电工程测量
作 者	刘普海 梁勇 张建生 主编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 17.25印张 409千字
版 次	2005年7月第1版 2005年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	27.00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

本书是《高等学校精品规划教材》之一。本教材在编写中充分体现严谨性、成熟性和前瞻性,不仅介绍常规的测量理论、仪器和方法,还介绍了现代测绘科技的新理论、新仪器、新方法、新动向。

本教材内容翔实,结构严谨,层次分明,文字简明扼要,插图美观齐全。总体力求重点突出,定义准确,概念明晰,既便于基本理论、基本知识、基本技能的学习与掌握,又充分考虑到不同院校教学条件和教学时数的差异,具有很强的通用性。

第一章由刘普海编写;第二章、第三章由刘普海(甘肃农业大学)、李晓玲(甘肃农业大学)、刘丽霞(甘肃农业大学)合编;梁勇(山东农业大学)编写了第四章、第十一章;张建生(甘肃农业大学)编写了第五章、第六章和第七章;第八章由刘丽霞、刘普海、李晓玲合编;帕尔哈提(新疆农业大学)编写了第九章;张婷婷(沈阳农业大学)编写了第十章;孔明明(扬州大学)编写了第十二章、第十四章;姜放(长春工学院)编写了第十三章;王京(石河子大学)编写了第十五章;第十六章由王京、张建生、李晓玲合编。本书由刘普海组织统稿,参加统稿的人员有梁勇、张建生、李晓玲、刘丽霞,最后由刘普海、张建生修改定稿。

甘肃农业大学成自勇教授任主审、甘肃省基础地理信息中心白建荣高级工程师审阅了本书全部书稿,编者在此表示衷心的感谢。

在编写和统稿过程中,参阅了国内外同类测量学教材和文献,吸收采用了其中有益思想和内容,在此本教材全体编写人员对这些文献的作者表示诚挚的谢意。甘肃农业大学王引弟老师在文字录入、文字校对及插图制作等方面做了大量工作,编者在此表示感谢。

由于编者的水平有限,本教材如有错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2005年5月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 水利水电工程测量的任务	1
第二节 地球的形状和大小	3
第三节 地面点位的确定与表示	4
第四节 测量工作概述	10
第五节 直线定向	13
第六节 测量误差基本知识	16
复习思考题	20
第二章 水准测量	22
第一节 水准测量的原理	22
第二节 水准测量仪器和工具的构造及使用	23
第三节 普通水准测量	27
第四节 水准测量成果的内业平差计算	30
第五节 自动安平水准仪与电子水准仪	32
第六节 水准测量误差及精度分析	35
复习思考题	38
第三章 角度测量	39
第一节 角度测量原理	39
第二节 DJ ₆ 级光学经纬仪	39
第三节 DJ ₂ 级光学经纬仪	43
第四节 电子经纬仪	44
第五节 水平角测量	46
第六节 竖直角测量	49
第七节 角度观测的误差及精度分析	52
复习思考题	55
第四章 距离测量	56
第一节 钢尺量距	56
第二节 视距测量	59
第三节 光电测距	61

复习思考题	63
第五章 平面控制测量	64
第一节 平面控制测量概述	64
第二节 导线测量	65
第三节 小三角测量	72
第四节 前方交会定点	77
复习思考题	80
第六章 高程控制测量	81
第一节 高程控制测量概述	81
第二节 三、四等水准测量	82
第三节 三角高程测量	84
复习思考题	85
第七章 大比例尺地形图测绘	86
第一节 比例尺及其精度	86
第二节 地物地貌在地形图中的表示方法	87
第三节 测图前的准备工作	92
第四节 碎部测量方法	94
第五节 地形图的拼接与检查	98
第六节 地形图的整饰、清绘与复制	99
复习思考题	101
第八章 数字化测图	102
第一节 概述	102
第二节 数字化测图的硬件设备	104
第三节 数字化测图的常用软件	108
第四节 数字化测图的作业程序	110
复习思考题	117
第九章 地形图的应用	119
第一节 概述	119
第二节 地形图的分幅和编号	119
第三节 地形图的识读	126
第四节 地形图应用的基本内容	127
第五节 地形图在水利水电工程中的应用	129
第六节 在地形图上量算图形的面积	132
复习思考题	137
第十章 全球定位系统及其应用	138
第一节 GPS 概述	138

第二节 GPS 的组成	141
第三节 GPS 定位的基本原理	144
第四节 GPS 技术的实施与应用	148
复习思考题	155
第十一章 全站仪及其应用	156
第一节 全站仪简介	156
第二节 全站仪在控制测量中的应用	160
第三节 全站仪在碎部测量中的应用	162
第四节 全站仪在施工放样的应用	165
第五节 全站仪应用的相关知识	168
复习思考题	171
第十二章 施工放样的基本工作	172
第一节 概述	172
第二节 施工控制网的布设	173
第三节 测设的基本工作	174
第四节 测设地面点平面位置的基本方法	177
第五节 圆曲线的测设	180
复习思考题	183
第十三章 渠道及线路测量	185
第一节 渠道测量	185
第二节 道路测量	197
第三节 管道测量	198
第四节 输电线路测量	200
复习思考题	204
第十四章 河道测量	205
第一节 概述	205
第二节 水位测量	205
第三节 水深测量	206
第四节 河道纵横断面测量	210
第五节 水下地形测量	214
复习思考题	217
第十五章 水工建筑物的放样	218
第一节 重力坝的放样	218
第二节 拱坝的放样	223
第三节 水闸的放样	226
第四节 隧道的放样	231

复习思考题	239
第十六章 水工建筑物的变形观测	240
第一节 概述	240
第二节 水工建筑物的位移观测	241
第三节 土坝的固结观测	255
第四节 水工建筑物的裂缝观测	257
第五节 混凝土建筑物伸缩缝的观测	257
第六节 建筑物变形观测资料的整理	258
复习思考题	262
附录	264
附录 1 水准仪系列技术参数	264
附录 2 电子水准仪系列技术参数	264
附录 3 经纬仪系列技术参数	265
参考文献	266

第一章 绪 论

第一节 水利水电工程测量的任务

测量学是研究地球形状和大小以及确定地面点位置的科学。

一、传统测量学的分支学科

根据研究范围和对象的不同,传统的测量学已经形成以下几个分支学科:

普通测量学——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,主要研究图根控制网的建立,地形图测绘及一般工程施工测量,因此,普通测量学的核心内容是地形图的测绘和应用。

大地测量学——研究在广大区域建立国家大地控制网,测定地球形状、大小和地球重力场的理论、技术与方法的学科。由于空间科学技术的发展,常规的大地测量已发展到人造卫星大地测量,测量对象也由地球表面扩展到空间星球,由静态发展到动态。

摄影测量学——利用摄影或遥感的手段获取物体的影像和辐射能的各种图像,经过对图像的处理、量测、判释和研究,以确定物体的形状、大小和位置,并判断其性质的学科。

工程测量学——研究工程建设在勘测、设计、施工和管理阶段所进行测量工作的理论、方法和技术的学科。工程测量学的应用领域非常广阔。

地图制图学——利用测量获得的资料,研究地图及其制作的理论、工艺和应用的学科。其任务是编制与生产不同比例尺的地图。

二、水利水电工程测量的内容和任务

水利水电工程测量是为水利水电工程建设提供服务的专业性测量,属于普通测量学和工程测量学的范畴。主要有三方面的任务:

测绘——使用常规或现代测量仪器和工具,测绘水利水电工程建设项目区域的地形图,供规划设计使用。

测设——将图上已规划设计的工程建筑物或构筑物的位置准确地测设到实地上,为工程施工提供依据,亦称为施工放样。

变形观测——在工程施工过程中及工程建成运行管理中,对其进行技术性监测和稳定性监测,以确保工程质量和安全运行。

本课程涉及的普通测量学内容,是非测绘专业学生的共修内容,水利水电工程测量部分是本专业学生的必修内容。由于测绘科学具有超前服务性、现时服务性及事后服务性的特点,决定了从事水利水电工程类工作的专业人员,在工程勘测、规划设计、施工组织和工程管理中,应具有坚实的测绘知识和熟练的测绘技能,以便更好地为本专业服务。

需要说明的是,在测量实施中,测绘手段可以采用常规的测绘方法,也可以利用现代

测绘技术与成果，这就需根据所在单位现有的技术条件、工程的大小与性质、场地的自然条件及施工的难易程度等因素确定。如库区淹没线的确定可以根据传统的纸质地形图上的等高线勾绘，也可利用 GIS 提供的分析功能确定；水位动态监测可以用传统的航空摄影方法，也可用遥感的方法。简言之，既要考虑技术和实践上的可行性，又要考虑经济上的合理性。

三、现代测绘科学技术的发展及其在水利工程中的应用

随着国民经济的发展和科学技术的进步，尤其是计算机科学与信息科学的迅猛发展，电子计算机、微电子技术、激光技术、遥感技术和空间技术的发展和运用，为测量学提供了新的手段和方法，推动着测量学理论和测绘技术不断发展与更新。测量仪器的小型化、自动化和智能化，促使测量工作正朝着数据的自动获取、自动记录和自动处理的方向发展。

先进的光电测距仪、电子经纬仪、电子水准仪、电子全站仪在测量中已经得到了广泛的应用，为测量工作的现代化创造了良好的条件；全球定位系统 GPS 的运用与发展，为测量提供了高速度、高精度、高效率的定位技术；电子全站仪与电子计算机、数据绘图仪组成的数字化测图系统迅猛发展，已成为数字化时代不可缺少的地理信息系统（GIS）的重要组成部分。

“3S”技术是 RS、GIS 和 GPS 技术的统称，是目前对地观测系统中空间信息获取、管理、分析和应用中的核心支撑技术。它广泛应用于各种空间资源和环境问题的决策支持。目前正发展为一门较为成熟的技术在国土资源统计、水资源管理、灾害评估、自然环境监测以及城建规划等领域得到迅速应用。

水利信息化建设涉及海量的数据，而其中约 70% 与空间地理位置有关。组织和存储这些数据是普通的关系型数据库系统难以办到的，而 GIS 不仅可以存储、管理各类水利信息，还能提供可视化查询、网络发布与决策辅助支持等功能。目前，网络 GIS、组件式 GIS、三维四维 GIS、VR-GIS 等技术的发展使 GIS 为水利行业服务的领域越来越广泛和实用。此外，这些与空间位置有关的水利信息的存在也为 GPS 技术的应用提供了广阔的需求。随着 3S 技术与网络计算机等高新技术以及水利行业本身传统技术的更紧密结合，必将进一步促进水利信息化的快速发展，从而提高我国水利建设的管理水平和工作效率。

在 20 世纪 90 年代后，RS 技术的快速发展和日趋成熟，已成为水利信息采集的重要手段，被广泛应用于水旱灾害监测与评估、水资源动态监测与评价、生态环境监测、土壤侵蚀监测与评价以及水利工程建设与管理等水利业务，并取得显著的社会经济效益。随着遥感信息获取技术的不断快速发展，各类不同时空分辨率的遥感影像的获取越来越容易，应用将会越来越广泛，遥感信息必将成为现代水利的日常信息源。

目前，水利信息化建设一刻也离不开 3S 技术的支持。GIS 技术已经成为水利信息存储、管理和分析的强有力工具和平台，而 GPS 技术也成为获取定位信息的必不可少的手段。包括水情、雨情、汛旱、灾情、水量、水质、水环境、水工程等信息在内的各种水利信息的获取需要一个庞大的信息监测网络的支持，由于 RS 技术相对于传统信息获取手段具有宏观、快速、动态、经济等特点，而被越来越广泛地应用。

第二节 地球的形状和大小

测量工作是在地球表面上进行的,其表面是一个高低不平,极其复杂的自然面,陆地最高的珠穆朗玛峰高达 8848.13m,海底最低的马里亚纳海沟深达 11022m,但这样的高低起伏相对于半径为 6371km 的地球而言是可以忽略不计的。由于海洋约占地球表面的 71%,陆地仅占 29%,因此,地球总的形状可以认为是被海水包围的球体。可以假想将静止的海水面延伸到大地球内部,形成一个封闭曲面,这个静止的海水面称为水准面。海水有潮汐变化,所以水准面有无数多个,其中通过平均海水面的一个水准面称为大地水准面,它所包围的形体称为大地体,如图 1-1 所示,它非常接近一个两极扁平,赤道隆起的椭球。大地水准面的特性是处处与铅垂线正交,然而,由于地球内部物质分布不均匀,引起重力方向发生变化,使大地水准面成为一个不规则的复杂曲面,且不能用数学公式来表达,因此,大地水准面还不能作为测量成果的基准面。为了便于测量、计算和绘图,选用一个椭圆绕它的短轴旋转而成的椭球体来表示地球形体,称为参考椭球体,如图 1-2 所示。

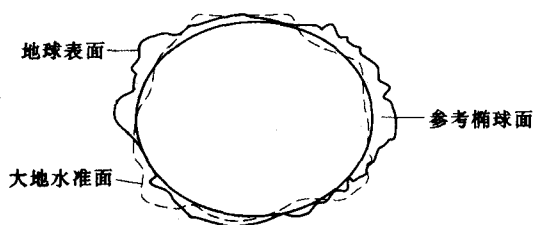


图 1-1 地球的形状

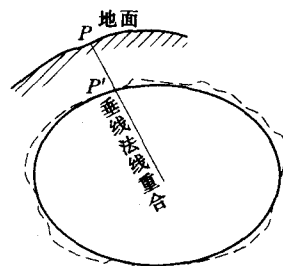


图 1-2 参考椭球定位

椭球体形状、大小与大地体非常接近,通常用这个椭球面作为测量与制图的基准面,并在这个椭球面上建立大地坐标系。

决定地球椭球体形状大小的参数为椭圆的长半径 a 和短半径 b ,扁率 α 。随着空间科学技术的进步与发展,可以越来越精确地测定这些参数。目前使用的最新参数为

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

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

$$\alpha = \frac{a-b}{a} = \frac{1}{298.257}$$

由于参考椭球体的扁率很小,当测区面积不大时,可以把地球视为圆球体,其半径

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

地球的形状确定后,还应进一步确定大地水准面与旋转椭球面的相对关系,才能把观测结果化算到椭球面上。如图 1-2 所示,在一个国家的适当地点,选择一点 P ,设想把椭球与大地体相切,切点 P' 点位于 P 点的铅垂线方向上,这时椭球面上 P' 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

地水准面差距尽量的小, 于是椭球与大地水准面的相对位置便固定下来, 这就是参考椭球的定位工作, 根据定位的结果确定了大地原点的起算数据, 并由此建立了国家大地坐标系。

第三节 地面点位的确定与表示

测量工作的基本任务就是测定地面点的位置, 而地面点的位置是用三维坐标来表示的。用以确定地面点位的坐标系有以下几种。

一、测量坐标系

(一) 地理坐标系

地理坐标系属球面坐标系, 依据采用的投影面不同, 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, 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。

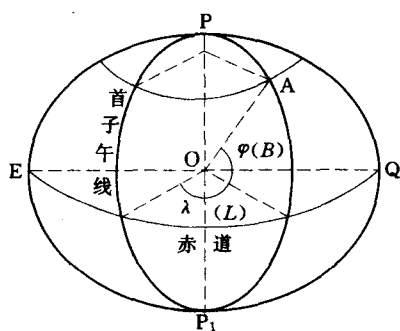


图 1-3 地理坐标系

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。PP₁ 为地球的自转轴, P 为北极, P₁ 为南极。地面上任一点 A 的铅垂线与地轴 PP₁ 所组成的平面称为该点的子午面。子午面与球面的交线称为子午线, 也称经线。A 点的经度 λ 是 A 点的子午面与首子午面所组成的二面角。它自首子午面向东量度, 称为东经, 向西量度, 称为西经。其值各为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。垂直于地轴的平面与球面的交线称为纬线; 垂直于地轴并通过地球中心 O 的平面为赤道面; 赤道面与球面的交线为赤道。A 点的纬度 φ 是过 A 点的铅垂线与赤道平面之间的交角, 其计算方法从赤道面向北量度, 称为北纬, 向南量度, 称为南纬。其值为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

天文地理坐标可以在地面上用天文测量的方法测定。

2. 大地地理坐标系

大地地理坐标系表示地面点投影在地球参考椭球面上的位置, 用大地经度 L 和大地纬度 B 表示 (图 1-3), 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。确定球面坐标 (L, B) 所依据的基准线为椭球面的法线, 基准面为旋转椭球面, A 点的大地经度是 A 点的大地子午面与子午面所夹的二面角, A 点的大地纬度 B 是过 A 点的椭球面法线与赤道面的交角。大地经纬度是根据一个起始的大地点 (称为大地原点, 该点的大地经纬度与天文经纬度相一致) 的大地坐标系, 按大地测量所得的数据推算而得。

我国以位于陕西省泾阳县永乐镇的大地原点为大地坐标的起算点, 由此建立的坐标系称为“1980 年国家大地坐标系”。

(二) 地心坐标系

地心坐标系属空间三维直角坐标系，用于卫星大地测量。由于人造地球卫星围绕地球运动，地心坐标系的原点与地球质心重合，如图 1-4 所示。Z 轴指向北极且与地球自转轴相重合，X、Y 轴在地球赤道平面内，首子午面与赤道面的交线为 X 轴，Y 轴垂直于 XOZ 平面。地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 X_A 、 Y_A 、 Z_A 来表示。WGS—84 世界大地坐标系是地心坐标系的一种，应用于 GPS 卫星位置测量，并可将该坐标系换算为大地坐标系或其他坐标系。

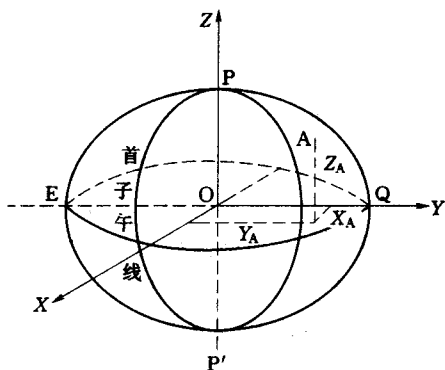


图 1-4 地心坐标系

(三) 平面直角坐标系

1. 高斯平面直角坐标系

(1) 投影变形的概念。

大地坐标只能用来表示地面点在椭球体上的位置，不能直接用来测图。在规划、设计和施工中均使用平面图纸反映地面形态，而且在平面上进行数据运算比在球面上要方便得多。由于椭球体面是一闭合曲面，要将曲面展开为平面必然产生长度、面积和角度变形。为了解决这一矛盾，必须研究地图投影的问题。

考察椭球面上一个微小的图形（微分圆）在投影过程中表象的变化可知，投影后将出现图 1-5 所示的几种情况。

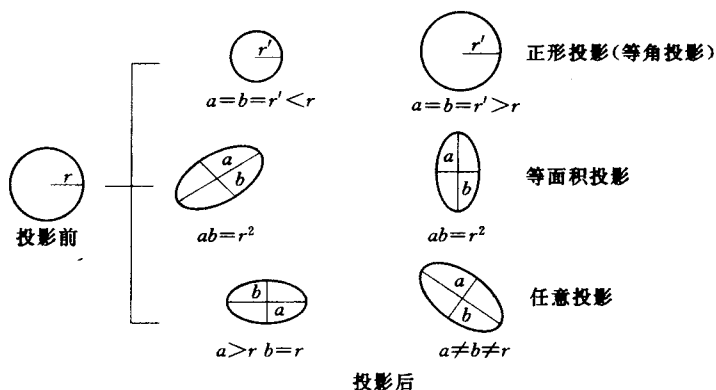


图 1-5 微分圆投影变形情况

据图 1-5 所示的变形性质，可将地图投影分为正形投影、等面积投影和任意投影。正形投影和等面积投影是两种常用的地图投影方式。

正形投影有两个基本条件：一是保角性；二是长度比的固定性。所谓保角性，是指角度投影后大小不变，这就保证了微分图形投影后的相似性。长度比是投影平面上无穷小线段 ds 与椭球上相应的无穷小线段 dS 之比，以 m 表示， $m = ds/dS$ ，长度比是一个变量，在一般情况下，它不仅随点位的不同而变化，也随方向角不同而不同（即使在同一点上）。

正形投影在无穷小范围内保持椭球面与平面上的相应图形相似,其长度比 m 仅随点位而变化,与方向无关,即正形投影的长度虽然产生变形,但在同一点的各个方向上的微分线段,投影后长度比为一常数,即所谓的长度比的固定性。

(2) 高斯投影的概念。

高斯—克吕格投影简称高斯投影,是正形投影的一种。除了满足正形投影的两个基本条件外,高斯投影还必须满足本身的特定条件,即:中央子午线投影后为一直线,且长度不变。设想有一个椭圆柱面横套在地球椭球的外面,并与某一子午线相切,椭圆柱的中心轴通过椭球中心,与椭圆柱面相切的子午线称为中央子午线或轴子午线。然后将椭球面上中央子午线附近有限范围的点线按正形投影条件向椭圆柱面上投影,之后将椭圆柱面通过极点的母线切开,展为平面,于是不可展曲面上的图形就转换成可展曲面(椭圆柱面)上的图形。

高斯投影的规律是:

1) 投影后中央子午线成为一直线,且长度不变,其他子午线投影后均为曲线,对称地凹向中央子午线。

2) 投影后的赤道为一直线,且与中央子午线正交,平行的纬圈投影后为曲线,以赤道为对称轴凸向赤道。

3) 经纬线投影后仍保持相互正交的关系,即投影后无角度变形。

(3) 高斯投影分带。

高斯投影中,除中央子午线投影后为直线,且长度不变外,其他长度均产生变形,且离中央子午线愈远,变形愈大。

当长度变形大到一定限度后,就会影响测图、施工的精度,为此必须对长度变形加以控制。控制的方法就是将投影区域限制在靠近中央子午线两侧的有限范围内,这种确定投影带宽度的工作,叫做投影分带。

投影带宽度是以相邻两子午面间的经度差 l 来划分的,有 6° 带和 3° 带两种。 6° 带是自英国格林尼治子午面起,自西向东每隔 6° 将椭球划分为 60 个度带,编号为 1~60,各带的中央子午线的经度 L_0 依次为 3° 、 9° 、 15° 、 $\dots$ 、 357° 。我国疆域内有 11 个 6° 带,自西向东编号为 13~23,各带的中央子午线的经度自 75° 至 135° 。 3° 带是自 1.5° 开始以经差 3° 划分,编号为 1~120,各带的中央子午线的经度 L_0 依次为 3° 、 6° 、 9° 、 $\dots$ 、 360° 。在我国范围内, 3° 带的编号自西向东为 25~45,共 21 个。不难看出, 3° 带的中央子午线经度一半与 6° 带中央子午线经度相同,另一半是 6° 带分带子午线的经度,如图 1-6 所示。

带号与中央子午线的关系为

$$\left. \begin{aligned} L_0^6 &= 6n - 3 \\ L_0^3 &= 3k \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 L_0^6 、 L_0^3 —— 6° 带和 3° 带的中央子午线经度;

n 、 k —— 6° 带和 3° 带的带号。

式 (1-2) 可用来求得带号及某中央子午线的经度。

例如,北京某地所在 6° 投影带的中央子午线 $L_0^6 = 117^\circ$,由式 (1-2) 第一式,应有

$$n = (L_0^6 + 3) / 6 = (117^\circ + 3^\circ) / 6^\circ = 20$$

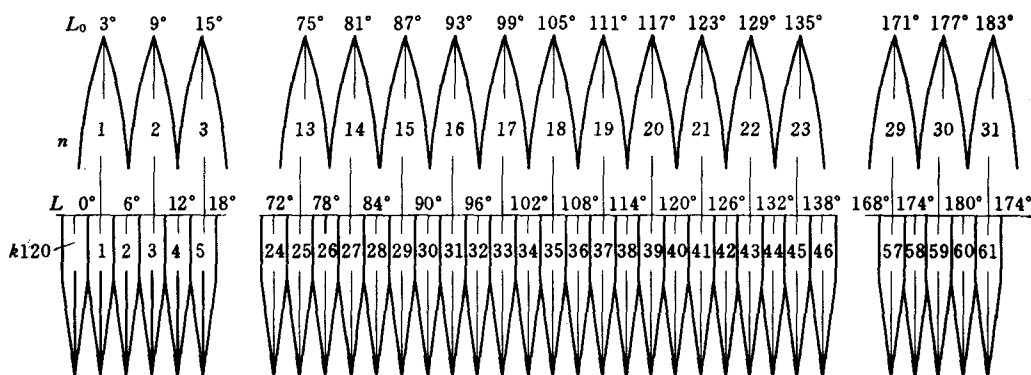


图 1-6 分带投影

可知北京某地位于 6°带第 20 带。

根据我国测图精度的要求，用 6°分带投影后，其边缘部分的变形能满足 1 : 25000 或更小比例尺的精度，而 1 : 10000 以上的大比例尺测图，必须用 3°分带法。

(4) 高斯平面直角坐标系的建立。

在椭圆柱内，使椭球绕短轴旋转，依次使各投影带的中央子午线与椭圆柱内表面相切，分别进行正形投影，然后沿径向将横椭圆柱剪开，展开平面，则每个投影带就形成一个高斯平面直角坐标系。如图 1-7 所示，中央子午线与赤道为正交的两条直线，其交点 O 为坐标原点，中央子午线为纵坐标轴，以 x 表示，赤道为横坐标轴，以 y 表示。这样，对六度带而言，形成 60 个高斯平面直角坐标系，对三度带来说，形成 120 个高斯平面直角坐标系。

地面点在高斯平面直角坐标系的坐标，用点到两个坐标轴的垂直距离量度，其中，点到横坐标轴的距离 x 为点的纵坐标，到纵坐标轴的距离 y 为点的横坐标。点的纵横坐标有正负之别，位于赤道以北的点， x 值均为正，在赤道以南时， x 值为负；在一个投影带内，位于中央子午线以东的点， y 值为正，在中央子午线以西时， y 值为负。

点的坐标的实际值称为坐标自然值。为了区别点位于哪一个投影带，在 y 值前冠以带号；而且为了使用坐标的方便，避免 y 值出现负值，将纵坐标轴向西移动 500km（见图 1-8），也就是说，在 y 坐标的自然值上统统加上一个常数 500km。经过以上两项处理后，点的坐标值称为坐标通用值。例如 A 点位于 6°带第 19 带，其平面坐标的自然值为

$$x'_A = 359628.367$$

$$y'_A = -169274.586$$

其平面坐标通用值应为

$$x_A = 359628.367\text{m}$$

$$y_A = (\text{带号})y'_A + 500 \times 10^3 = 19330725.414 (\text{m})$$

测绘部门提供的坐标成果均为通用值。

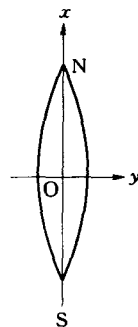


图 1-7 高斯-克吕格平面直角坐标系

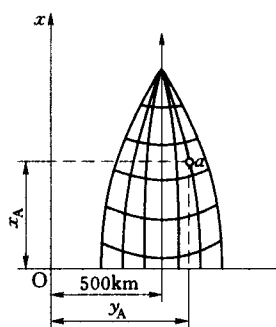


图 1-8 x 轴平移后的高斯平面直角坐标系

测量学上的高斯平面直角坐标系与数学上的笛卡尔平面直角坐标系的不同点可归纳为：

1) 坐标轴不同。高斯坐标系的纵坐标为 x ，正方向指向北，横坐标轴为 y ，正方向指向东，而笛卡尔坐标系的坐标轴 x 为横坐标， y 为纵坐标。

2) 坐标象限不同。高斯坐标系以北东区 (NE) 为第一象限，顺时针划分为四个象限，代号为 I、II、III、IV。笛卡尔坐标也是以北东区 (NE) 为第一象限，但逆时针划分为四个象限。

3) 表示直线方向的方位角 α 起算基准不同。高斯坐标系以纵轴 x 的北端起算，顺时针计值。笛卡尔坐标系以横轴 x 东端起算，逆时针计值 (见图 1-9)。

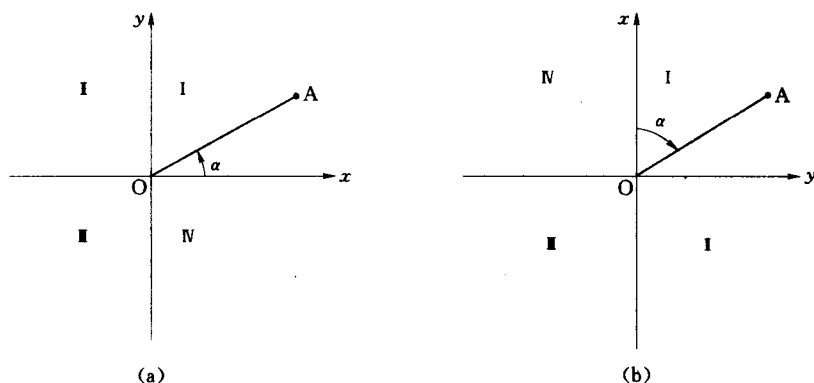


图 1-9 笛卡尔坐标系与测量坐标系对比

(a) 笛卡尔坐标系；(b) 测量坐标系

2. 自由平面直角坐标系

当测区半径较小时，可直接将地面点沿各自的铅垂线方向投影到水平面上，用平面直角坐标 x 、 y 表示点的平面位置。该测区可以与国家点连测，也可以假定起始点坐标。

二、测量高程系

地面点到大地水准面的铅垂距离定义为点的绝对高程，简称为高程或标高、海拔，记为 H ，如图 1-10 所示，A 点的高程为 H_A 。当基准面是一般水准面时，点的高程叫相对高程或假定高程。可见，建立高程系的核心问题是如何确定高程基准面。

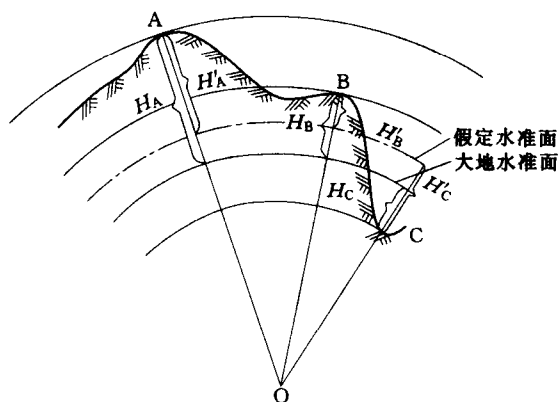


图 1-10 高程示意图

(一) 1956 年黄海高程系和 1985 年国家高程基准

1949 前, 我国采用的高程基准面十分混乱。新中国成立后, 国家测绘局统一了高程基准面, 以设在山东省青岛市的国家验潮站 1950 年到 1956 年的验潮资料, 推算的黄海平均海面作为我国高程起算面, 并以其高程为零推求出青岛国家水准原点的高程为 72.289m。这个高程系统称为“1956 年黄海平均海面高程系统”, 简称“1956 年黄海高程系”。全国各地高程控制点的高程均依此引测而得, 所有测绘成果, 如地形图、控制点高程等都注有该高程系字样。

20 世纪 80 年代初, 国家又根据 1953 年到 1979 年青岛验潮站观测资料, 推算出新的黄海平均海面零位置, 并以此为起算面, 测得青岛国家水准原点的高程为 72.2604m, 称为“1985 年国家高程基准”。

(二) 假定高程

全国各地的地面点的高程, 都是在统一高程系统下建立的, 即以青岛国家水准原点的黄海高程为起算数据, 在全国布设各种精度等级的高程网, 主要以水准测量方法求得各点高程。在局部地区, 也可建立假定高程系统, 所求点的高程均为相对高程, 如图 1-10 中的 H'_A 、 H'_B 及 H'_C 。

三、水平面代替水准面的限度

在普通测量学中, 由于测区范围较小, 往往用水平面代替水准面, 那么, 在多大的范围内才能够允许用水平面代替曲面, 而不考虑地球曲率对测量结果的影响。

(一) 地球曲率对距离的影响

在图 1-11 中, 设 AB 为水准面一段弧长 D , 所对应的圆心角为 θ , 地球半径为 R , 自 A 点作水平切线 AB', 设长为 l 。若将切于 A 点的水平面代替水准面, 则产生距离误差 ΔD

$$\Delta D = l - D = R(\tan\theta - \theta)$$

将 $\tan\theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \dots$ 代入, 得

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-3)$$

上式两端同除以 D , 得相对误差为

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{D^2}{3R^2} \quad (1-4)$$

取 $R=6371\text{km}$, ΔD 值见表 1-1。由该表可知, 当 $D=10\text{km}$ 时, $\Delta D/D=1:120$ 万, 小于目前精密的距离测量误差 $1:100$ 万, 因此, 可以认为, 在半径为 10km 的区域, 地球曲率对水平距离的影响可以忽略不计, 即可把该部分球面当作水平面看待。在精度要求较低的测量工作中, 其半径可扩大到 25km 。

(二) 地球曲率对高差的影响

由图 1-11 可知, A、B 两点在同一水准面上, 高程相等, 若以水平面代替水准面, 则 B 点移到 B' 点, 高差误差为 Δh , 可知

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + l^2$$

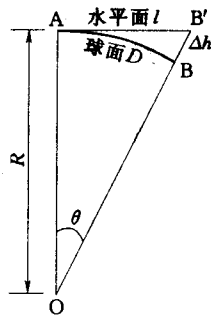


图 1-11 地球曲率的影响