



普通高等学校“十二五”规划教材

工程测量

主 编 ◎ 丁建全 和万荣



國防工業出版社

National Defense Industry Press

普通高等学校“十二五”规划教材

工 程 测 量

主 编 丁建全 和万荣

副主编 李玉芝 何明岗 张健源

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书是适应新形势下职业院校测量教学需要开发的项目化教材。全书共分 7 个学习项目，主要内容包括：水准测量、角度测量、距离测量及直线定向、测量误差基础、控制测量、地形图测绘与应用、工程测量。教材开发由企业工程技术人员和学校一线教师共同完成，体现实用性、先进性，保证了教材理论与实际的结合，能够反映生产过程中的最新技术。

本书适用于土木工程类、水利工程类、环境工程类、交通工程类、建筑类、城市规划、农业和林业等专业的教学，也可作为土建工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程测量 / 丁建全, 和万荣主编. —北京: 国防工业出版社, 2016.2

普通高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-118-10742-5

I. ①工… II. ①丁… ②和… III. ①工程测量—高等学校—教材 IV. ①TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 038346 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 9¼ 字数 216 千字

2016 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

前 言

本书是依据专业人才培养方案和课程建设目标要求，并按照国家及行业有关工程测量的新规范、新法规、新标准编写完成的。在吸收有关教材和技术文献资料精华的基础上，充实了新思想、新理论、新方法和新技术；以“工学结合”为主线，以培养学生的实践动手能力为目标，不过分苛求学科的系统性和完整性，注重学生职业能力训练和综合素质培养，体现了高等职业教育的特点，突出了适用性、实践性、创新性的教材特色。

本书是通过对土建行业企业进行深入广泛的调研，与职业院校长期从事工程测量教学一线的教师及专家联合商讨，将多年教学使用的讲义进行解剖、分析、提炼，以“任务驱动、项目导向”的模式编写的基于工作过程的工程测量教材。

本书由丁建全、和万荣担任主编，丁建全负责全书统稿；由李玉芝、何明岗、张健源担任副主编。编写分工如下：山东水利职业学院丁建全编写项目 1、7；云南国土资源职业学院和万荣编写项目 2；山东水利职业学院李玉芝编写项目 3、4；山东省水利勘测设计院何明岗编写项目 5；青岛市勘察测绘研究院张健源编写项目 6。

本书在编写过程中，参考了其他院校和专家的一些著作和教材，得到了国防工业出版社等单位的大力支持，在此一并表示感谢！

由于编者水平有限，编写时间仓促，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正，提出宝贵意见。

作者
2015 年 12 月

目 录

项目 0 工程测量基础	1
任务 0-1 工程测量学的任务	1
一、概述	1
二、测量学分类	1
三、工程测量学任务	2
任务 0-2 地面点位的确定	3
一、地球的形状和大小	3
二、地面点位的确定	4
任务 0-3 用水平面代替水准面的限度	8
一、对距离的影响	8
二、对高程的影响	9
任务 0-4 测绘工作的基本原则	10
一、测绘的基本工作	10
二、测绘的基本原则	10
项目 1 水准测量	12
任务 1-1 水准仪认识	13
一、DS ₃ 微倾式水准仪的构造	13
二、自动安平水准仪	15
三、水准尺和尺垫	15
四、水准仪的使用	16
任务 1-2 普通水准测量	18
一、水准点	18
二、水准测量的方法	18
三、水准测量的检核	20
四、水准测量的内业	21
任务 1-3 三、四等水准测量	23
一、三、四等水准测量概述	23
二、测站的计算与检核	24
任务 1-4 水准测量误差及仪器检校	26
一、观测误差	26
二、外界条件的影响	26
三、水准仪的检验与校正	27

项目 2 角度测量	31
任务 2-1 认识经纬仪	32
一、DJ ₆ 光学经纬仪的结构及读数	32
二、DJ ₂ 光学经纬仪的结构及读数	36
三、光学经纬仪的使用	37
任务 2-2 认识电子经纬仪	39
一、电子经纬仪概述	39
二、电子测角原理简介	39
三、电子经纬仪的使用	40
任务 2-3 测回法测观测水平角	42
任务 2-4 全圆测回法观测水平角	43
任务 2-5 竖直角观测	45
一、竖盘构造	45
二、竖直角计算公式	45
三、竖盘指标差	46
四、竖直角观测	47
五、竖盘指标自动补偿装置	47
任务 2-6 经纬仪轴线及观测误差	48
一、经纬仪的主要轴线及应满足的几何条件	48
二、水平角观测的主要误差来源	48
项目 3 距离测量及直线定向	51
任务 3-1 钢尺量距	51
一、丈量工具	51
二、钢尺一般量距	52
三、钢尺量距的精密方法	54
任务 3-2 光电测距	55
一、光电测距的基本原理	55
二、ND3000 红外测距仪简介	56
三、手持激光测距仪简介	56
四、全站仪及距离测量	57
任务 3-3 直线定向	60
一、标准方向	60
二、方位角	61
三、三种方位角之间的关系	61
四、正反坐标方位角	61
五、坐标方位角的计算	62
项目 4 测量误差基础	64
任务 4-1 测量误差的基本概念	64
一、系统误差	64

二、偶然误差	65
任务 4-2 衡量精度的指标	65
一、中误差	66
二、平均误差	66
三、相对误差	67
四、容许误差(极限误差)	67
任务 4-3 误差传播定律	67
一、误差传播定律	68
二、误差传播定律的应用举例	68
项目 5 控制测量	70
任务 5-1 平面控制测量	70
一、概述	70
二、导线测量	72
三、交会定点	80
任务 5-2 高程控制测量	81
一、水准测量	81
二、三角高程测量	82
任务 5-3 GPS 测量技术	83
一、概述	83
二、GPS 全球定位系统的组成	84
三、GPS 定位基本原理	85
四、GPS 定位方法	86
五、GPS 技术的应用	89
项目 6 地形图测绘与应用	91
任务 6-1 地形图的基本知识	91
一、地形图的比例尺	91
二、大比例尺地形图图式	93
三、地貌的表示方法	97
四、1:500~1:2000 大比例尺地形图的分幅与编号	100
任务 6-2 三维坐标测量	100
一、三维坐标测量原理	100
二、全站仪坐标测量	101
三、外业数据采集	101
任务 6-3 数字成图	103
任务 6-4 地形图应用	105
一、地形图应用的基本内容	105
二、工程建设中的地形图应用	111
项目 7 工程测量	115
任务 7-1 施工测量基本任务	115

一、施工控制网的布设	115
二、距离、水平角和高程的放样	117
三、平面位置测设	119
任务 7-2 线路工程测量	119
一、圆曲线及其测设	120
二、路线纵横断面测量	123
任务 7-3 建筑工程测量	128
一、工业厂房施工测量	128
二、民用建筑施工测量	132
任务 7-4 水利工程测量	139
任务 7-5 隧洞工程测量	142
一、隧洞控制测量	142
二、掘进方向的测设	142
三、隧洞掘进中的测量工作	143
四、开挖断面放样	144
任务 7-6 竣工测量	144
参考文献	146

项目 0 工程测量基础

任务 0-1 工程测量学的任务

一、概述

测量学是研究地球的形状和大小，确定地球表面各种物体的形状、大小和空间位置的科学。测量学将地表物体分为地物和地貌。地物和地貌总称为地形。

地物：地面上天然或人工形成的物体，它包括平原、湖泊、河流、海洋、房屋、道路、桥梁等。

地貌：地表高低起伏的形态，它包括山地、丘陵和平原等。

测量学的主要任务是测定和测设。

测定：使用测量仪器和工具，通过测量和计算将地物和地貌的位置按一定比例尺、规定的符号缩小绘制成地形图，供科学研究和工程建设规划设计使用。

测设：将在地形图上设计出的建筑物和构筑物的位置在实地标定出来，作为施工的依据。

二、测量学分类

测绘学按照研究对象及采用技术的不同，又可分为下列学科：

1. 大地测量学

大地测量学是研究和测定地球形状、大小和地球重力场，以及测定地面点几何位置的学科。

大地测量工作为大规模测制地形图提供地面的水平位置控制网和高程控制网，为用重力勘探地下矿藏提供重力控制点，同时也为发射人造地球卫星、导弹和各种航天器提供地面站的精确坐标和地球重力场资料。

2. 摄影测量学

摄影测量学是研究利用摄影或遥感的手段获取被测物体的信息（影像的或数字的），进行分析和处理，以确定被测物体的形状、大小和位置，并判断其性质的一门学科。摄影测量学包括航空摄影测量、航天摄影测量、水下摄影测量和地面立体摄影测量等。航空摄影测量是摄影测量学的主要内容。摄影测量主要用于测制地形图，但它的原理和基本技术也适用于非地形测量。自从出现了影像的数字化技术以后，被测对象可以是固体、液体，也可以是气体；可以是微小的也可以是巨大的；可以是瞬时的也可以是变化缓慢的。这些特性使摄影测量方法得到广泛的应用。

3. 工程测量学

工程测量学是研究工程建设在设计、施工和管理各阶段中进行测量工作的理论、技

术和方法的学科, 又称实用测量学或应用测量学。它是测绘学在国民经济和国防建设中的直接应用。工程测量学所研究的内容, 按工程测量所服务的工程种类, 分为建筑工程测量、线路测量(如铁路测量、公路测量、输电线路测量和输油管道测量等)、桥梁测量、隧道测量、矿山测量、城市测量和水利工程测量等。按工程建设进行的程序, 又可分为规划设计阶段的测量、施工兴建阶段的测量和竣工后运营管理阶段的测量, 每个阶段测量工作的重点和要求各不相同。

4. 海洋测量学

海洋测量学是以海洋水体和海底为对象所进行的测量和海图编制工作。主要包括海道测量、海洋大地测量、海底地形测量、海洋专题测量, 以及航海图、海底地形图、各种海洋专题图和海洋图集等的编制。海洋测绘是海洋事业的一项基础性工作, 其成果广泛应用于经济建设、国防建设和科学研究的各个领域。例如海上交通, 海洋地质勘探, 海洋资源开发, 海洋工程建设, 海底电缆和管道的敷设, 海洋疆界的勘定, 海洋环境保护和地壳变迁、板块构造等理论的研究, 都离不开海洋测量。海洋测量的基本理论、技术方法和测量仪器设备等, 同陆地测量相比, 有它自己的许多特点。主要是测量内容综合性强, 需多种仪器配合施测, 同时完成多种观测项目; 测区条件比较复杂, 海面受潮汐、气象等影响起伏不定; 大多为动态作业, 精确测量难度较大。

5. 地图制图学

地图制图学是研究地图及其编制和应用的一门学科。它研究用地图图形反映自然界和人类社会各种现象的空间分布、相互联系及其动态变化, 具有区域性学科和技术性学科的两重性, 亦称地图学。传统的地图制图学由地图学总论、地图投影、地图编制、地图设计、地图制印和地图应用等部分组成。地图制图学同许多学科都有联系, 尤其同测量学、地理学和数学的联系更为密切。

三、工程测量学任务

工程测量学主要面向土木建筑、环境、道路、桥梁、水利等学科, 其主要任务如下:

(1) 研究测绘地形图的理论和方法。

地形图是土木工程勘察、规划、设计的依据。土木工程测量是研究确定地球表面局部区域建筑物、构筑物、天然地物和地貌、地面高低起伏形态的空间三维坐标的原理和方法, 是研究局部地区地图投影理论, 以及将测量资料按比例绘制成地形图或电子地图的原理和方法。

(2) 研究地形图在规划、设计中的应用方法。

地形图的应用十分广泛, 在土木工程建设过程中, 常常遇到区域规划、道路选线、场地平整等问题, 本书将对其中的主要问题进行研究讨论。

(3) 研究建筑物施工放样、质量检验的技术和方法。

施工放样是施工测量的主要工作, 它的主要任务是将设计好的建筑物位置在实地上标定出来。另外, 在施工过程中, 为保证工程的施工质量, 必须对施工结果分阶段进行检查验收。

(4) 研究变形监测的基本理论和方法。

在土木工程施工过程中或竣工后, 为确保工程的安全, 应进行工程的变形监测。本

课程重点介绍变形监测的原理和方法。

在城市规划、给水排水、煤气管道、工业厂房和民用建筑建设中的测量工作是：在设计阶段，测绘各种比例尺的地形图，供建筑物、构筑物的平面及竖向设计使用；在施工阶段，将设计建筑物、构筑物的平面位置和高程在实地标定出来，作为施工的依据；工程完工后，测绘竣工图，供日后扩建、改建、维修和城市管理应用，对某些重要的建筑物、构筑物，在建设中和建成以后还应进行变形观测，以保证建筑物的安全。

在铁路、公路建设中的测量工作是：为了确定一条经济合理的路线，应预先测绘路线附近的地形图，在地形图上进行路线设计，然后将设计路线的位置标定在地面上以指导施工；当路线跨越河流时，应建造桥梁，建桥前，应测绘河流两岸的地形图，测定河流的水位、流速、流量和河床地形图以及桥梁轴线长度等，为桥梁设计提供必要的资料，最后将设计桥台、桥墩的位置标定到实地；当路线穿过山岭需要开挖隧道时，开挖前，应在地形图上确定隧道的位置，根据测量数据计算隧道的长度和方向；隧道施工通常是从隧道两端相向开挖，这就需要根据测量成果指示开挖方向，保证其正确贯通。

任务 0-2 地面点位的确定

一、地球的形状和大小

测量工作是在地球表面上进行的，要确定地面点之间的相互关系，将地球表面测绘成地形图，需了解地球的形状和大小。对地球形状的研究是大地测量学和固体地球物理学的一个共同课题，其目的是运用几何方法、重力方法和空间技术，确定地球的形状、大小、地面点的位置和重力场的精细结构。

地球的自然表面高低起伏，是一个复杂的不规则曲面。海洋面积约占地球表面积的 71%，而陆地约占 29%。世界上最高的珠穆朗玛峰高出海平面 8844.43 m，最低的马里亚纳海沟低于海平面 11022 m，由于地球的半径约为 6371 km，因此，地表起伏相对于庞大的地球来说是微不足道的。

由于地球表面大部分是海洋，所以，海水所包围的形体基本表示了地球的形状。假想有一个静止的海水面，向陆地延伸形成一个封闭的曲面，这个曲面称为水准面。水准面上每一个点的铅垂线均与该点的重力方向重合。由于海水面受潮汐的影响而不断变化，所以水准面有无数个（图 0-1（a））。为此，人们在海滨设立验潮站，通过长期观测，求出平均高度的海水面，向陆地延伸形成的封闭曲面，称为大地水准面（图 0-1（b））。大地水准面所包围的形体称为大地体，它代表地球的一般形状。

由于地球表面起伏不平 and 地球内部质量分布不均匀，地面上各点的铅垂线方向产生不规则的变化，大地水准面仍然是一个复杂的不规则曲面，不是一个简单的数学曲面，不能用一个数学模型表达。因此，也就无法在这样的面上直接进行测量和数据处理。于是，人们进一步设想用一个合适的旋转椭球面来逼近大地水准面，旋转椭球面所包含的形体称为旋转椭球体，同大地水准面最为接近的椭球面称为平均地球椭球面。旋转椭球体是由椭球面 NWSE 绕其短轴 NS 旋转而成的形体（图 0-1（c）），其形状和大小取决于

长半轴 a 、短半轴 b 和扁率 $\alpha=(a-b)/a$ 。

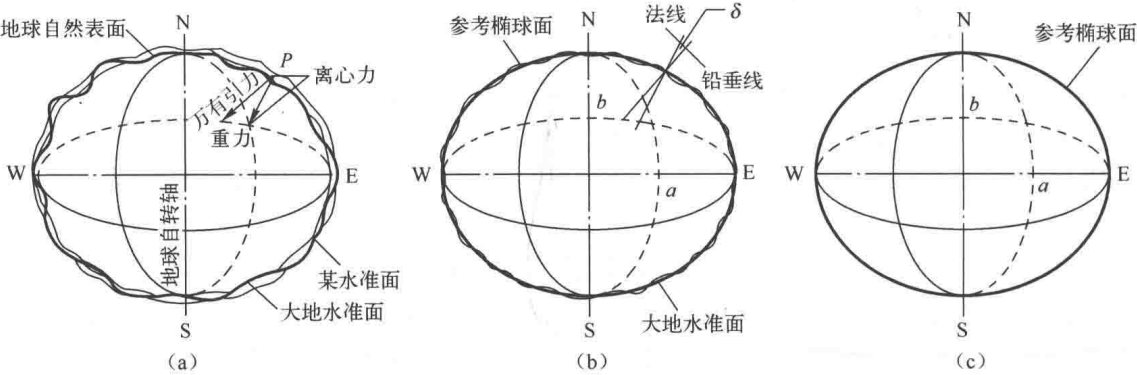


图 0-1 地球自然表面、水准面、大地水准面、参考椭球面、铅垂线、法线间的关系

为了将观测成果准确地化算到椭球面上，各国都根据本国的实际情况，采用与大地体非常接近于自己国家的椭球体，具体参数见表 0-1。

表 0-1 地球椭球参数

椭球名称	长半轴 a/m	短半轴 b/m	扁率 α	推算年代和国家
白塞尔	6377397	6356564	1:299.2	1841 年德国
克拉克	6378249	6356515	1:293.5	1880 年英国
德福特	6378388	6356912	1:297.0	1909 年美国
克拉索夫斯基	6378245	6356863	1:298.3	1940 年苏联
IUGG-75	6378140	6356755.3	1:298.257	1979 年国际大地测量与地球物理联合会
WGS-84	6378137	6356752	1:298.257223563	1984 年美国

二、地面点位的确定

测绘工作的主要任务之一是确定地面点的空间位置，其表示方法为坐标和高程，而地面点的空间位置与一定的坐标系相对应。在测绘工作中，常用的坐标系有大地坐标系、高斯投影平面直角坐标系、独立平面直角坐标系等。

1. 坐标系

1) 大地坐标系

大地地理坐标又称大地坐标，用于表示地面点在参考椭球面上的位置，它的基准是参考椭球面及其法线，它用大地经度和大地纬度表示。过 P 点的大地子午面与首子午面所夹的两面角称 P 点的大地经度；过 P 点的法线与赤道面的夹角称 P 点的大地纬度。

如图 0-2 所示，地心空间直角坐标系 (X, Y, Z) 的 Z 轴与地球平均自转轴重合，与 Z 轴垂直的赤道面构成 XOY 平面； XOZ 平面是包含平均自转轴和格林威治平均天文台的平面； Y 轴的指向使该坐标系成为右手坐标系。椭球的短轴与地心空间直角坐标系的 Z 轴重合，起始子午面和赤道面分别与该坐标系的 XOZ 平面和 XOY 平面重合。 P 点沿椭球面法线到椭球面上的投影是 Q ， $PQ=H$ ，称为 P 点的大地高程， L 和 B 是 P 点的大地经度和大地纬度。 P 点的大地坐标系 (L, B, H) 和地心空间直角坐标系 (X, Y, Z)

之间存在严密的数学关系，可以互相换算。

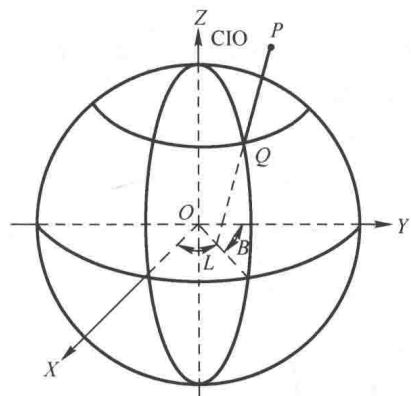


图 0-2 大地坐标系

目前，我国常用的大地坐标系统有：

(1) 1954 年北京坐标系。

我国建国初期采用克拉索夫斯基椭球建立的坐标系。由于该坐标系的大地原点在苏联，便利用我国东北边界的三个大地点与苏联大地网联测后的坐标作为我国天文大地网的起算数据，通过天文大地网坐标计算，推算出北京一点的坐标，故命名为 1954 年北京坐标系。该坐标系在我国的经济建设和国防建设中发挥了重要作用，但也存在点位精度不高等许多问题。

(2) 1980 年西安大地坐标系。

为了克服 1954 年北京坐标系存在的问题，我国于 20 世纪 70 年代末，对原大地网重新进行了平差。该坐标系采用 IUGG75 地球椭球，大地原点选在陕西省泾阳县永乐镇，椭球面与我国境内的大地水准面密合最佳，平差后的精度明显提高。

(3) WGS84 坐标系。

WGS 英文意义是“World Geodetic System”（世界大地坐标系），它是美国国防局为进行 GPS 导航定位于 1984 年建立的地心坐标系，1985 年投入使用。WGS84 地心坐标系可以与 1954 年北京坐标系或 1980 年西安坐标系等参心坐标系相互转换。

(4) 2000 国家大地坐标系。

我国当前最新的国家大地坐标系，英文名称为 China Geodetic Coordinate System2000，英文缩写为 CGCS2000。自 2008 年 7 月 1 日起，中国全面启用 2000 国家大地坐标系，国家测绘局授权组织实施。2000 国家大地坐标系是全球地心坐标系在我国的具体体现，其原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心。

2) 高斯平面直角坐标系

由于用大地经度和纬度表示的大地坐标是一种椭球面上的坐标，不能直接应用于测图。因此，需要将它们按一定的数学规律转换为平面直角坐标。

根据高斯-克吕格投影（简称高斯投影）所建立的平面坐标系称高斯平面直角坐标系。它是大地测量、城市测量、普通测量、各种工程测量和地图制图中广泛采用的一种平面坐标系。

高斯投影理论是德国的高斯于 1822 年提出的，后经德国的克吕格尔于 1912 年加以扩充而完善。

高斯投影属于横轴切圆柱正形投影。可以设想将截面为椭圆的一个圆柱体面套在地球椭球的外面（图 0-3），圆柱的中心轴 EE_1 在赤道面内，圆柱面同椭球面相切在中央子午线上。按正形条件将中央子午线东、西一定经度范围内的地区投影到圆柱面上，然后将该圆柱面展开成一平面，就得出中央子午线两侧的一部分地区在平面上的投影（图 0-4）。地球椭球赤道的投影也是直线，且与中央子午线正交，以前者为横轴，即 y 轴，东向为正；后者为纵轴，即 x 轴，北向为正；两者的交点 O 为原点，这就形成了高斯平面直角坐标系。

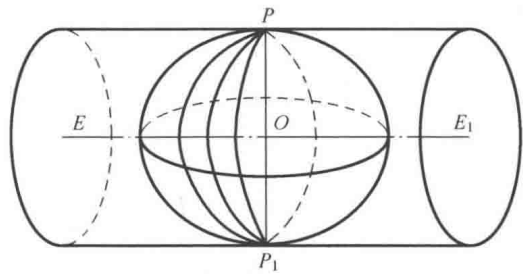


图 0-3 高斯投影

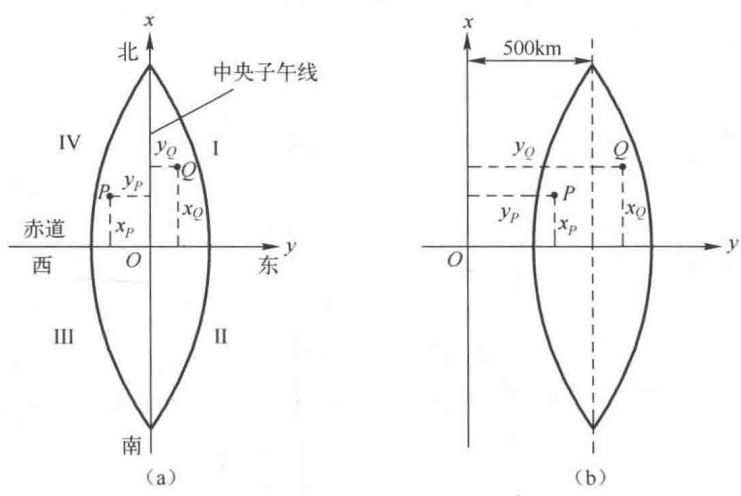


图 0-4 高斯投影展开

高斯投影是将一个不可平展的地球椭球面变换成平面。这种变换不可避免地会产生投影变形，其中长度变形随着离中央子午线距离的平方而增大。投影变形过大，对应用和计算都会带来许多不便。为了限制这种投影变形，将地球椭球面按子午线划分成适当个数的投影带，带宽一般分为 6° 、 3° 和 1.5° 三种。每一投影带采用各自独立的高斯平面坐标系（见图 0-4），并规定 y 坐标加上 500 km，以避免出现负值。

为了表示任一点所在的投影带，又规定 y 坐标值前加上两位数，以表示投影带号。 x 坐标值无论在哪一投影带内都是由赤道起算的实际值。

对中央子午线位置的选取办法是：对于 6° 带，取经度 3° 为第一带的中央子午线，

以下各带便可类推；3°带亦取经度 3° 为第一带的中央子午线，这样第二带的中央子午线便是经度 6°，以下各带可依此类推（图 0-5）。这种规定可使整个地球 3° 带的中央子午线有一半与 6° 带的中央子午线重合，其优点是对两种分带间进行点的坐标相互换算较为方便，即全球内有一半区域的点的坐标不需进行换算。

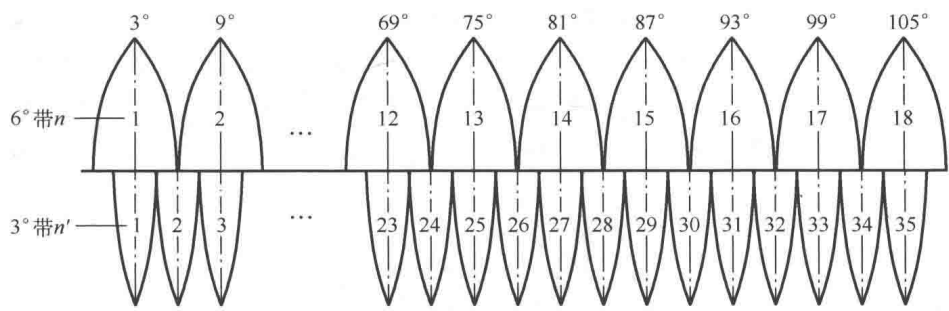


图 0-5 高斯投影分带

任意 6° 带的中央子午线经度 L 与投影带号 N 的关系为

$$L = 6N - 3 \quad (0-1)$$

任意 3° 带的中央子午线经度 l 与投影带号 n 的关系为

$$l = 3n \quad (0-2)$$

我国疆土概略经度范围是东经 72° 至 138° 之间，包含有 11 个 6° 带和 21 个 3° 带，带号范围分别为 13~23 和 25~45。由此可见，在我国 6° 带与 3° 带的投影带号不会重复。

3) 独立平面直角坐标系

《城市测量规范》规定，面积小于 25 km² 的城镇，可不经投影采用假定平面直角坐标系在平面上直接进行计算，如图 0-6 所示。将测区中心点 C 沿铅垂线投影到大地水准面上得 c 点，用过 c 点的切平面来代替大地水准面，在切平面上建立的测区平面直角坐标系称为独立平面直角坐标系或假定平面直角坐标系。坐标系的原点选在测区西南角以使测区内点的坐标均为正值，以过测区中心的子午线为轴方向。将测区内任一点 P 沿铅垂线投影到切平面上得 p 点，通过测量，计算出的 p 点坐标就是 P 点在假定平面直角坐标系中的坐标。

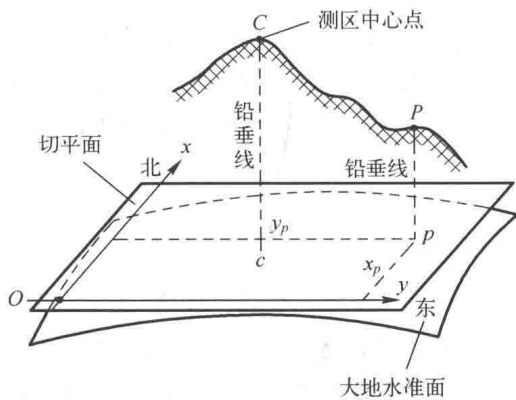


图 0-6 独立平面直角坐标系

2. 高程系统

确定地面点的高低位置是用高程表示的。地面点沿铅垂线方向到大地水准面的距离,称为该点的绝对高程,简称为高程。如图 0-7 所示,用 H_A 、 H_B 表示地面点 A 、 B 的高程。海水面由于受潮汐、风浪的影响,是一个高低不断变化的动态曲面。我国在青岛海边设立验潮站,通过长期观测,取海水面的平均高度作为高程的零点。建国后,我国采用青岛验潮站长期观测资料求得黄海平均海水面作为高程水准面,称为“1956 年黄海高程系”,并在青岛观象山建立水准原点,其高程为 72.289 m。后来又将 1953 年至 1979 年的资料进行归算,确定国家水准原点高程为 72.260 m,称为“1985 年国家高程基准”。

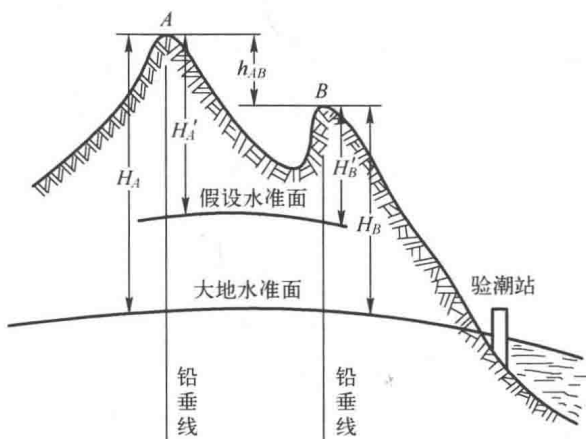


图 0-7 高程和高差

在局部地区,与国家水准点联测困难的特殊情况下,也可假设一个水准面作为高程起算面。地面点沿铅垂线方向到假定水准面的距离,称为该点的假定高程或相对高程。用 H'_A 、 H'_B 分别表示地面点 A 、 B 的相对高程。

地面上两点的高程之差称为高差,以 h 表示, A 、 B 两点的高差为

$$h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A \quad (0-3)$$

任务 0-3 用水平面代替水准面的限度

水准面是个曲面,在普通测量工作中,在一定的精度要求和测区范围不大时,可以不考虑地球曲率的影响,以水平面代替水准面。也就是把小区域地球表面上的点投影到水平面上以确定点位。但是,小区域小到什么程度,必须以其产生的误差不超过测量和制图的误差为标准。

一、对距离的影响

如图 0-8 所示,设球面与水平面相切于 A 点, D 为 A 、 B 两点在球面上的弧长,在水平面上的距离为 D' 。则以水平面距离 D' 代替弧长 D 所产生的误差为

$$\Delta D = D' - D = R \tan \theta - R \theta = R(\tan \theta - \theta) \quad (0-4)$$

将 $\tan \theta$ 按级数展开,并略去高次项,得

$$\tan \theta = \theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \dots$$

因而近似得

$$\Delta D = R \left[\left(\theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \dots \right) - \theta \right] = \frac{R \theta^3}{3} \tag{0-5}$$

以 $\theta = D/R$ 代入上式得

$$\Delta D = \frac{D^3}{3R^2}$$

或

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{3} \left(\frac{D}{R} \right)^2 \tag{0-6}$$

以地球半径 $R=6371 \text{ km}$ ，取不同的 D 值代入上式，得到距离误差 ΔD 和相对误差，见表 0-2。

表 0-2 计算表明，两点距离为 10 km 时，用水平面代替水准面产生的相对误差为 1/125 万，这样小的误差，与在地面上进行最精密的距离测量其相对误差为 1/100 万相比是容许的。因此，在半径为 10 km 的范围内，以水平面代替水准面所产生的距离误差可以忽略不计。

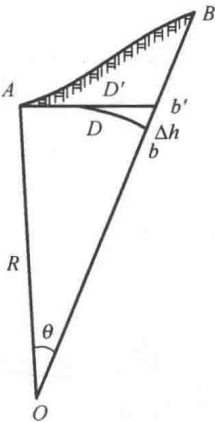


图 0-8 水平面代替水准面

表 0-2 地球曲率对水平距离和高程的影响

距离 d	距离误差 $\Delta d/\text{mm}$	距离相对误差 $\Delta d/d$	高程误差 $\Delta h/\text{mm}$
100 m	0.000008	1/1250000 万	0.8
1 km	0.008	1/12500 万	78.5
10 km	8.2	1/120 万	7850.0
25 km	12.83	1/19 万	49050.0

二、对高程的影响

如图 0-8 所示，地面 B 点投影在水平面上为 b' 点，投影在水准面上为 b ， bb' 即为水平面代替水准面所产生的高程误差，也称为地球曲率的影响。

设 $bb'=\Delta h$ ，则

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + D'^2 \tag{0-7}$$

$$\Delta h = \frac{D'^2}{2R + \Delta h} \tag{0-8}$$

前面已证明 D' 与 D 相差很小，可以用 D 代替 D' ， Δh 与 R 相比可略去不计，则有

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R} \tag{0-9}$$

表 0-2 计算表明，当 $D=0.1 \text{ km}$ 时， $\Delta h=0.0785 \text{ cm}$ ；当 $D=1 \text{ km}$ 时， $\Delta h=7.8 \text{ cm}$ ；当 $D=10 \text{ km}$ 时， $\Delta h=785 \text{ cm}$ 。

上述计算表明，地球曲率对高差影响较大，在进行高程测量时，应考虑地球曲率的影响。