

中国水利教育协会 组织



全国水利行业“十三五”规划教材（职工培训）

水利工程测量技术

主 编 杜玉柱
主 审 王卫东 周建郑



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水利教育协会 组织



全国水利行业“十三五”规划教材（职工培训）

水利工程测量技术

主 编 杜玉柱

主 审 王卫东 周建郑

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是全国水利行业“十三五”规划教材（职工培训），是按照国家对职工培训的规格要求及教学特点编写完成的。全书共分十章，主要内容包括水利工程测量基础、测量仪器及其使用、三项基本测量工作、方向测量和坐标正反算、小区域控制测量、地形图的测绘与应用、施工放样的基本工作、渠道测量、土石坝施工测量、水闸施工测量等。

本书主要供水利行业的职工大学、函授大学、成人教育学院进行职工培训使用，也可供从事水利水电工程、农业水利技术、水文水资源、给水排水和水文地质等专业的高职高专教师教学参考。

图书在版编目（C I P）数据

水利工程测量技术 / 杜玉柱主编. — 北京：中国水利水电出版社，2017.5
全国水利行业“十三五”规划教材. 职工培训
ISBN 978-7-5170-5498-6

I. ①水… II. ①杜… III. ①水利工程测量—职工培训—教材 IV. ①TV221

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第135404号

| | |
|------|--|
| 书 名 | 全国水利行业“十三五”规划教材（职工培训） 水利工程测量技术 SHUILI GONGCHENG CELIANG JISHU |
| 作 者 | 主编 杜玉柱 主审 王卫东 周建邦 |
| 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、68545874 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 | 北京瑞斯通印务发展有限公司 |
| 规 格 | 184mm×260mm 16开本 14.75印张 350千字 |
| 版 次 | 2017年5月第1版 2017年5月第1次印刷 |
| 印 数 | 0001—2000册 |
| 定 价 | 38.00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

本书为全国水利行业“十三五”规划教材（职工培训），是为适应全国水利行业职工培训改革与发展的需要，结合水利水电工程建筑专业的人才培养方案及该门课程的教学大纲编写的。

本书是作者在总结多年教学经验的基础上，结合研究内容编写而成的。重点介绍了三项基本测量工作所用的仪器及其使用、观测方法等，结合工程实例阐述了地形图测绘和渠道、土坝、水闸等水利工程施工测量。在内容上力求实用性和通用性，做到理论知识适度够用、通俗易懂；在构思上加强实践性和技能操作，突出知识的应用能力。

本书的编写人员具有丰富的测绘实践经验和多年的教学经验。参加编写的人员及分工如下：山西水利职业技术学院杜玉柱编写第一章，江西水利职业技术学院魏跃华编写第二章，湖南水利水电职业技术学院彭文编写第三章，广西水利电力职业技术学院蒋喆编写第四章，山东水利职业学院甄红锋编写第五章，长江工程职业技术学院陈文玲编写第六章，广东水利电力职业技术学院王庆光编写第七章；山西水利职业技术学院崔茜和四川水利职业技术学院韩沙鸥编写第八章，杨凌职业技术学院杨波编写第九章，四川水利职业技术学院张元军编写第十章，山西省运城市晨昊工程项目管理有限公司柴荣参与了本书的编写工作并提供了真实的案例。本书由山西水利职业技术学院杜玉柱任主编，并完成全书统稿，由黄河水利职业技术学院王卫东、周建郑任主审。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中难免有错误和不妥之处，热忱希望广大读者给予批评指正。

编者

2016年8月

目 录

前言

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第一章 水利工程测量基础 | 1 |
| 第一节 水利工程测量概述 | 1 |
| 第二节 地面点位置的表示方法 | 2 |
| 第三节 用水平面代替水准面的限度 | 8 |
| 第四节 测量工作概述 | 10 |
| 第五节 测量误差概述 | 12 |
| 第六节 测量上常用的度量单位 | 16 |
| 第七节 测绘仪器的使用、保养 | 17 |
| 第八节 水利工程测量的要求 | 19 |
| 技能训练题 | 23 |
| 第二章 测量仪器及其使用 | 25 |
| 第一节 水准仪及其使用 | 25 |
| 第二节 经纬仪及其使用 | 34 |
| 第三节 全站仪及其使用 | 43 |
| 第四节 GNSS-RTK 及其使用 | 48 |
| 技能训练题 | 59 |
| 第三章 三项基本测量工作 | 61 |
| 第一节 水准测量 | 61 |
| 第二节 角度测量 | 70 |
| 第三节 距离测量 | 79 |
| 技能训练题 | 85 |
| 第四章 方向测量和坐标正反算 | 88 |
| 第一节 方向测量 | 88 |
| 第二节 坐标正反算 | 93 |
| 技能训练题 | 95 |
| 第五章 小区域控制测量 | 96 |
| 第一节 控制测量概述 | 96 |
| 第二节 平面控制测量 | 98 |
| 第三节 高程控制测量 | 110 |

| | | |
|-------------------|------------------------|-----|
| 第四节 | GNSS 静态测量 | 115 |
| 技能训练题 | | 123 |
| 第六章 | 地形图的测绘与应用 | 125 |
| 第一节 | 地形图的基本知识 | 125 |
| 第二节 | 碎部点的选择及其测量方法 | 133 |
| 第三节 | 经纬仪大比例尺地形图的测绘 | 135 |
| 第四节 | 大比例尺数字测图 | 143 |
| 第五节 | 纸质地形图的应用 | 154 |
| 第六节 | 数字地形图的应用 | 162 |
| 技能训练题 | | 169 |
| 第七章 | 施工放样的基本工作 | 172 |
| 第一节 | 概述 | 172 |
| 第二节 | 已知水平角的放样 | 174 |
| 第三节 | 已知水平距离的放样 | 175 |
| 第四节 | 已知高程的放样 | 177 |
| 第五节 | 平面点位的放样 | 179 |
| 技能训练题 | | 183 |
| 第八章 | 渠道测量 | 185 |
| 第一节 | 渠道测量概述 | 185 |
| 第二节 | 渠道中线测量 | 185 |
| 第三节 | 渠道纵横断面图测绘 | 187 |
| 第四节 | 土方计算 | 192 |
| 第五节 | 渠道边坡放样 | 194 |
| 技能训练题 | | 195 |
| 第九章 | 土石坝施工测量 | 196 |
| 第一节 | 土石坝施工测量概述 | 196 |
| 第二节 | 土石坝施工控制测量 | 197 |
| 第三节 | 土石坝施工放样 | 206 |
| 技能训练题 | | 214 |
| 第十章 | 水闸施工测量 | 216 |
| 第一节 | 水闸施工测量概述 | 216 |
| 第二节 | 水闸施工控制测量 | 217 |
| 第三节 | 水闸施工放样 | 222 |
| 第四节 | 闸门安装测量 | 225 |
| 技能训练题 | | 226 |
| 参考文献 | | 227 |

第一章 水利工程测量基础

【学习目标】

1. 了解水利工程测量的概念、任务及作用。
2. 理解确定地面点位置的测量坐标系，用水平面代替水准面的限度。
3. 掌握测量上常用的度量单位，测量作业的内容和基本原则，测绘仪器的使用、保养及测量资料的整理。

第一节 水利工程测量概述

一、测量学的研究对象

测量学是研究地球的形状、大小和确定地球表面点位的一门学科。其研究的对象主要是地球和地球表面上的各种物体，包括它们的几何形状、空间位置关系以及其他信息。测量学的主要任务有三个方面：①研究确定地球的形状和大小，为地球科学提供必要的数据和资料；②将地球表面的地物、地貌测绘成图；③将图纸上的设计成果测设到现场。

随着科学的发展以及测量工具和数据处理方法的改进，测量的研究范围已远远超过地球表面这一范畴。20世纪60年代人类已经对太阳系的行星及其所属卫星的形状、大小进行了制图方面的研究，测量学的服务范围也从单纯的工程建设扩大到地壳的变化、高大建筑物的监测、交通事故的分析、大型粒子加速器的安装等各个领域。

二、测量学的学科分类

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、工程测量学以及地图制图学等学科。

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。

地形测量学是研究如何将地球表面局部区域内的地物、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测图和数字化测图。

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。其基本任务是通过拍摄影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。

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。

其中,工程测量学又包括建筑工程测量学、道路工程测量学、水利工程测量学等分支,各分支学科之间互相渗透、相互补充、相辅相成。本课程主要讲述地形测量与水利工程测量的部分内容。主要介绍水利工程中常用的测量仪器的构造与使用方法,小区域大比例尺地形图的测绘及应用,水利工程的施工测量以及测量新技术在这些方面的应用等。

三、水利工程各阶段的测量任务及作用

测量学的任务包括测定和测设两部分:测定是指通过测量得到一系列数据,或将地球表面的地物和地貌缩绘成各种比例尺的地形图;测设是指将设计图纸上规划设计好的建筑物位置在实地标定出来,作为施工的依据。

水利工程测量是运用测量学的基本原理和方法为水利工程服务的一门学科。具体说就是研究水利工程在勘测设计、施工建设和运营管理阶段所进行的各种测量工作的理论、技术和方法的学科。

一项工程一般都要经过勘测设计、工程施工、运营和管理等几个阶段。

进行勘测设计必须要有设计底图。该阶段测量工作的任务就是为勘测设计提供地形图。例如,在河道上要修建水库、大坝,在设计阶段要收集该河道一切相关的地形资料,以及其他方面的地质、经济、水文等情况,设计人员根据测得的现状地形图选择最佳坝址以及在图上进行初步的设计。

在工程施工建设之前,测量人员要根据设计和施工技术的要求把水工建筑物的空间位置关系在施工现场标定出来,作为施工建设的依据,这一步即为测设工作,也就是我们所说的施工放样。施工放样是联系设计和施工的重要桥梁,一般来讲,精度要求也比较高。

工程在运营管理阶段的测量工作主要指的是工程建筑物的变形观测。为了监测建筑物的安全和运营情况,验证设计理论的正确性,需要定期地对工程建筑物进行位移、沉陷、倾斜等方面的监测,通常以年为单位。反过来,变形监测的数据也可以作为以后工程设计的依据。

可见,测量工作贯穿于工程建设的整个过程,测量工作直接关系到工程建设的速度和质量。所以,每一位从事工程建设的人员,都必须掌握必要的测量知识和技能。

第二节 地面点位置的表示方法

一、地球的形状和大小

人们对地球的认识是一个漫长的过程。古代人们由于受到生产力水平的限制,视野比



较狭窄，所以认为天是圆的地是方的，即所谓的“天圆地方”。

公元前，古希腊有人提出地球是一个圆球。1522年，麦哲伦及其伙伴完成绕地球一周以后，才确立了地球为球体。17世纪末，牛顿研究了地球自转对地球形态的影响，从理论上推测地球不是一个很圆的球形，而是一个赤道处略为隆起，两极略为扁平的椭球体。

测量工作是在地球表面进行的，然而这个表面是起伏不平的，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20000m。尽管高差很大，但相对于半径为6371km的地球来说还是很小的。就整个地球而言，71%是被海洋所覆盖的，因此人们把地球总的形状看成是被海水包围的球体。如果把球面设想成一个静止的海水面向陆地延伸而形成的一个封闭的曲面，那么这个处于静止状态的海水面就称为水准面，它所包围的形体称为大地体。由于海水有潮汐，所以取其平均的海水面作为地球形状和大小的标准。如图1-1所示，测量上把这个平均海水水面称为大地水准面，即测量工作的基准面，我们的测量工作就是在这个面上进行的。

静止的水准面要受到重力的作用，所以水准面的特性就是处处与铅垂线正交。由于地球内部不同密度物质的分布不均匀，铅垂线的方向是不规则的，因此，大地水准面是一个不规则的曲面。测量工作获得铅垂线方向通常是用悬挂垂球的方法，而这个垂线方向即为测量工作的基准线。大地水准面是一个不规则的曲面，在这个面上是不便于建立坐标系和进行计算的。所以我们要寻求一个规则的曲面来代替大地水准面。长期的测量实践证明，大地体与一个以椭圆的短轴为旋转轴的旋转椭球的形状十分相似，而旋转椭球是可以用公式来表达的。这个旋转椭球可作为地球的参考形状和大小，故称为参考椭球，如图1-2所示。

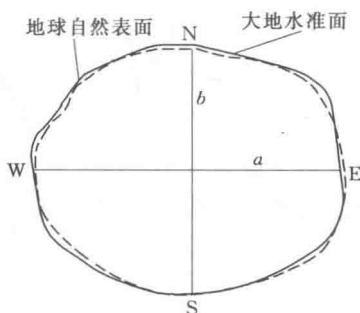


图1-1 地球自然表面与大地水准面

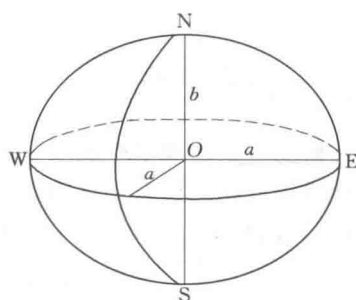


图1-2 地球椭球体

我国目前所采用的参考椭球体为1980国家大地坐标系，其坐标原点在陕西省泾阳县永乐镇，称为国家大地原点。其基本元素是：

长半轴 $a=6378140\text{m}$ ，短半轴 $b=6356755\text{m}$ ，扁率 $\alpha=(a-b):a=1:298.257$ 。

几个世纪以来，许多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。我国的1954北京坐标系采用的是克拉索夫斯基椭球，1980国家大地坐标系采用的是1975年国际椭球，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



$R=6371\text{km}$ 。

2008年3月,由国土资源部正式上报国务院《关于中国采用2000国家大地坐标系的请示》,并于2008年4月获得国务院批准。自2008年7月1日起,中国将全面启用2000国家大地坐标系,英文名称为China Geodetic Coordinate System 2000,英文缩写为CGCS 2000。国务院要求用8~10年的时间,完成现行国家大地坐标系向2000国家大地坐标系的过渡和转换。现有各类测绘成果,在过渡期内可沿用现行国家大地坐标系;2008年7月1日后新生产的各类测绘成果应采用2000国家大地坐标系。

2000国家大地坐标系,是我国当前最新的国家大地坐标系,属于地心大地坐标系统,该系统以ITRF 97参考框架为基准,参考框架历元为2000.0。

2000国家大地坐标系采用的地球椭球参数如下:长半轴 $a=6378137\text{m}$,扁率 $f=1/298.257222101$,地心引力常数 $GM=3.986004418 \times 10^{14}\text{m}^3/\text{s}^2$,自转角速度 $\omega=7.292115 \times 10^{-5}\text{rad/s}$ 。

表 1-1 常用的几种椭球体

| 椭球名称 | 长半轴 a /m | 短半轴 b /m | 扁率 α | 计算年份和国家 | 备注 |
|-----------|---------------|---------------|-------------|----------------|-----------------------|
| 白塞尔 | 6377397 | 6356079 | 1 : 299.152 | 1841年,德国 | |
| 海福特 | 6378388 | 6356912 | 1 : 297.0 | 1909年,美国 | 1942年国际第一个推荐值 |
| 克拉索夫斯基 | 6378245 | 6356863 | 1 : 298.3 | 1940年,苏联 | 中国1954北京坐标系采用 |
| 1975年国际椭球 | 6378140 | 6356755 | 1 : 298.257 | 1975年,国际第三个推荐值 | 中国1980国家大地坐标系采用 |
| WGS-84 | 6378137 | 6356752 | 1 : 298.257 | 1979年,国际第四个推荐值 | 中国2000国家大地坐标系、美国GPS采用 |

二、确定地面点位的方法

测量学的研究对象是地球,实质上是确定地面点的位置。地面上任一点的位置通常由该点投影到地球椭球面的位置和该点到大地水准面的铅垂距来确定,即坐标和高程。

(一) 地面点的坐标

坐标系的种类有很多,但与测量相关的有地理坐标系和平面直角坐标系。

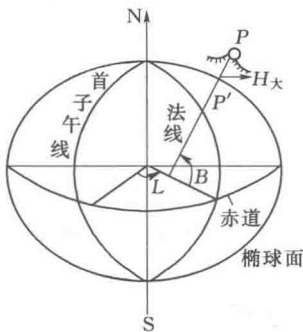


图 1-3 地理坐标

1. 地理坐标

如图1-3所示,NS为椭球的旋转轴,N表示北极,S表示南极。通过椭球旋转轴的平面称为子午面,子午面与椭球面的交线称为子午线,也称经线。其中通过原英国格林尼治天文台的子午面(线)称为首子午面(线)。通过椭球中心且与椭球旋转轴正交的平面称为赤道面。其他平面与椭球旋转轴正交,但不通过球心,这些平面与椭球面相截所得的曲线称为纬线。

在测量工作中,点在椭球面上的位置用大地经度和大地



纬度表示。所谓大地经度，就是通过某点的子午面与起始子午面的夹角；大地纬度是指过某点的法线与赤道面的交角。以大地经度和大地纬度表示某点位置的坐标系称为大地坐标系，也叫地理坐标系，地理坐标系是全球统一的坐标系。

在图 1-3 中， P 点子午面与起始子午面的夹角 L 就是 P 点的经度，过 P 点的铅垂线与赤道面的夹角 B 称为 P 点的纬度。

地面上任何一点都对应着一对地理坐标，比如北京的地理坐标可表示为东经 $116^{\circ}28'$ 、北纬 $39^{\circ}54'$ 。

2. 平面直角坐标

(1) 独立平面直角坐标。在小区域内进行测量工作若采用大地坐标来表示地面点的位置很不方便，并且精度不高，所以通常采用平面直角坐标。

当测区范围较小时，可近似把球面的投影面看成平面。这样把地面点直接沿铅垂线方向投影到水平面上，用平面直角坐标系确定地面点的位置十分方便。如图 1-4 所示，平面直角坐标系规定南北方向为坐标纵轴 X 轴（向北为正），东西方向为坐标横轴 Y 轴（向东为正），坐标原点一般选在测区西南角以外，以使测区内各点坐标均为正值。

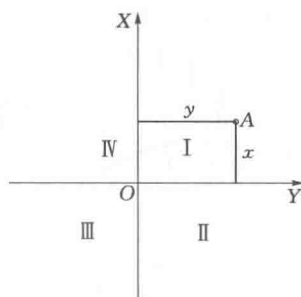


图 1-4 平面直角坐标

与数学上的平面直角坐标系不同，为了定向方便，测量上平面直角坐标系的象限是按顺时针方向编号的，其 X 轴与 Y 轴互换，目的是将数学中的公式直接用到测量计算中。

(2) 高斯平面直角坐标。当测区范围较大时，不能把球面的投影面看成平面，必须采用投影的方法来解决这个问题。投影的方法有很多种，测量上常采用的是高斯投影。如图 1-5 (a) 所示，高斯投影是假想一个椭圆柱横套在地球椭球体上，使其与某一条经线相切，用解析法将椭球面上的经纬线投影到椭圆柱面上，然后将椭圆柱展开成平面，即获得投影后的图形，如图 1-5 (b) 所示。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。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。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。

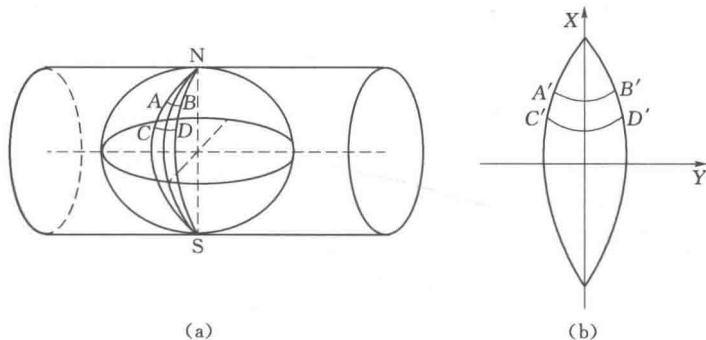


图 1-5 高斯平面直角坐标系



1) 高斯平面直角坐标系的建立。中央子午线投影到椭圆柱上是一条直线, 把这条直线作为平面直角坐标系的纵坐标轴, X 轴, 表示南北方向。赤道投影后是与中央子午线正交的一条直线, 作为横轴, 即 Y 轴, 表示东西方向。这两条相交的直线相当于平面直角坐标系的坐标轴, 构成高斯平面直角坐标系, 如图 1-5 (b) 所示。

2) 高斯投影的分带。高斯投影将地球分成很多带, 然后将每一带投影到平面上, 目的是为了限制变形。带的宽度一般分为 6° 、 3° 和 1.5° 等几种, 简称 6° 带、 3° 带、 1.5° 带, 如图 1-6 所示。

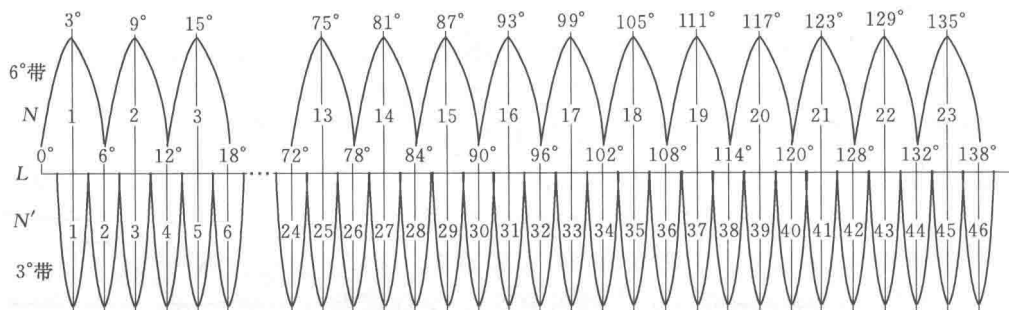


图 1-6 高斯投影分带

6° 带投影是从零度子午线起, 由西向东, 每 6° 为一带, 全球共分 60 带, 分别用阿拉伯数字 1, 2, 3, ..., 60 编号表示。位于各带中央的子午线称为该带的中央子午线。每带的中央子午线的经度与带号有如下关系:

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

因高斯投影的最大变形在赤道上, 并随经度的增大而增大。 6° 带的投影只能满足 1: 2.5 万比例尺的地图, 要得到更大比例尺的地图, 必须限制投影带的经度范围。

3° 带投影是从 $1^\circ 30'$ 子午线起, 由西向东, 每 3° 为一带, 全球共分 120 带, 分别用阿拉伯数字 1, 2, 3, ..., 120 编号表示。 3° 带的中央子午线的经度与带号有以下关系:

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

反过来, 根据某点的经度也可以计算其所在的 6° 带和 3° 带的带号, 公式为:

$$N = [L/6 + 1] \quad (1-3)$$

$$N' = [L/3 + 0.5] \quad (1-4)$$

式中 N 、 N' —— 6° 和 3° 带的带号;

[]——取整, 即把小数点后的数值去掉, 只保留整数部分。

【例 1-1】 某地经度为东经 $116^\circ 28'$, 求该地的高斯投影 6° 带和 3° 带的带号以及中央子午线的经度。

解: 该地 6° 带的带号和中央子午线的经度分别是

$$N = [116^\circ 28' / 6 + 1] = 20$$

$$L = 6 \times 20 - 3 = 117^\circ$$

该地 3° 带的带号和中央子午线的经度

$$N' = [116^\circ 28' / 3 + 0.5] = 39$$



$$L = 3 \times 39 = 117^\circ$$

我国位于北半球，高斯平面直角坐标系中 X 值全为正值，而 Y 坐标有正有负，这就是全国统一的高斯-克吕格平面直角坐标系，也称为自然坐标。为避免 Y 坐标值出现负值，我国规定把纵坐标轴向西平移 500km，这样全部横坐标值均为正值。此时中央子午线的 Y 值不是 0，而是 500km。为了不引起各带内点位置的混淆，明确点的具体位置，即点所处的投影带，规定在 Y 坐标的前面再冠以该点所在投影带的带号。我们把加上 500km 并冠以带号的坐标值称为通用坐标值。

例如，第 20 投影带中的某点，横坐标为 -148478.6m 。横坐标轴向西平移 500km 后，则 Y 值为 $-148478.6 + 500000 = 351521.4$ (m)。由于不同投影带内相同位置的点的投影坐标值相同，因此，规定在横坐标值前加上带号，以表示该点所在的带。如上面的点的 Y 坐标实际中写为 20351521.4，前面的 20 即代表带号。该值即为 Y 的通用坐标。

3. 地心坐标系

卫星大地测量是利用空中卫星的位置来确定地面点的位置。由于卫星围绕地球质心运动，所以卫星大地测量中需采用地心坐标系。该系统一般有两种表达式，如图 1-7 所示。

(1) 地心空间直角坐标系。坐标系原点 O 与地球质心重合， Z 轴指向地球北极， 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 平面构成右手坐标系。

(2) 地心大地坐标系。椭球体中心与地球质心重合，椭球短轴与地球自转轴重合，大地经度 L 为过地面点的椭球子午面与格林尼治子午面的夹角，大地纬度 B 为过地面点的法线与椭球赤道面的夹角，大地高 H 为地面点沿法线至椭球面的距离。

于是，任一地面点 P 在地心坐标系中的坐标，可表示为 (X, Y, Z) 或 (L, B, H) 。

两者之间有一定的换算关系。我国的 2000 国家大地坐标系和美国的全球定位系统 (GPS) 用的 WGS-84 坐标就属于这类坐标。

(二) 地面点的高程

1. 绝对高程

地面点到大地水准面的铅垂距离称为绝对高程，简称高程或海拔，亦称为正常高，通常用符号 H 表示。如图 1-8 中 H_A 、 H_B 分别为 A 点和 B 点的高程。

1949 年之前，我国没有统一的高程起算基准面，大地水准面有很多种标准，致使高程不统一，相互使用困难。新中国成立后，测绘事业蓬勃发展，继建立 1954 北京坐标系后，又建立了国家统一的高程系统起算点，即水准原点。我国的绝对高程是由黄海平均海面起算的，该面上各点的高程为 0。水准原点建立在青岛市观象山上。根据青岛验潮站连续 7 年，即 1950—1956 年的潮汐水位观测资料，确定了我国大地水准面的位置，并由此推算大地水准原点高程为 72.289m，以此为基准建立的高程系统称为“1956 年黄海高程”。

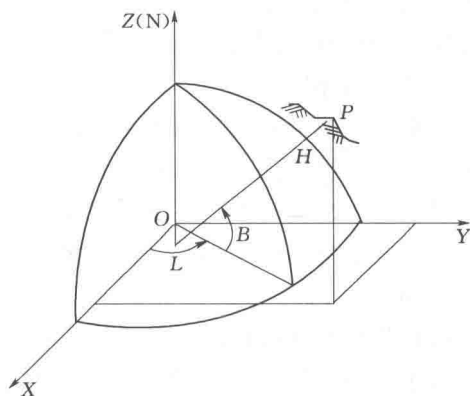


图 1-7 空间直角坐标系

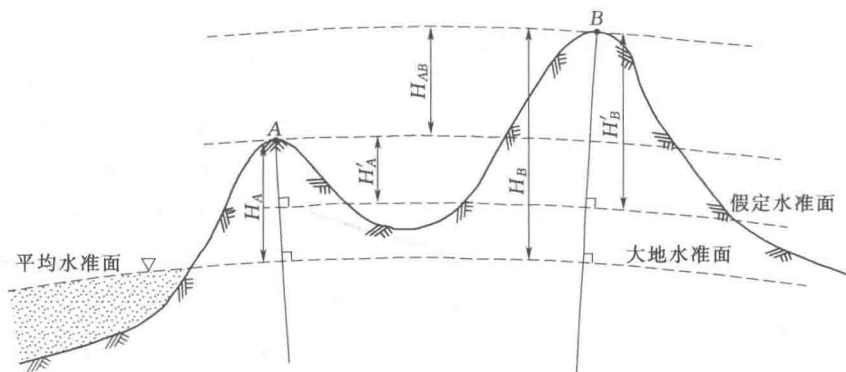


图 1-8 地面点的高程

系”。然而，验潮站的工作并没有结束，后来根据验潮站 1952—1979 年的水位观测资料，重新确定了黄海平均海水面的位置，由此推算大地水准原点的高程为 72.260m。此高程基准称为 1985 国家高程基准。1985 国家高程基准已于 1987 年 5 月开始启用，1956 年黄海高程系同时废止。在水准原点，1985 国家高程基准使用的大地水准面比 1956 年黄海高程系使用的大地水准面高出 0.029m。

2. 相对高程

在全国范围内利用水准测量的方法布设一些高程控制点称为水准点，以保证尽可能多的地方高程能得到统一。尽管如此，仍有某些建设工程远离已知高程的国家控制点。这时可以以假定水准面为准，在测区范围内指定一固定点并假设其高程。像这种点的高程是地面点到假定水准面的铅垂距，称为相对高程。例如 A 点的相对高程通常用 H'_A 来表示。

3. 地面点间的高差

高差是指地面两点之间高程或相对高程的差值，用 h 来表示。例如 AB 两点间的高差通常表示为 H_{AB} 。

从图 1-8 可知，
$$H_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A$$

可见，地面两点之间的高差与高程的起算面无关，只与两点的位置有关。

第三节 用水平面代替水准面的限度

根据第二节内容可知，在普通测量工作中是将大地水准面近似地当成圆球看待的。一般的测绘产品是以平面图纸为介质的。因此就需要先把地面点投影到圆球面上，然后再投影到平面图纸上，需要进行两次投影。在实际测量时，若测区范围面积不大，往往以水平面直接代替水准面，就是把球面上的点直接投影到平面上，不考虑地球曲率。但是到底多大面积范围内容许以平面投影代替球面，本节主要讨论这个问题。

一、对距离的影响

如图 1-9 所示，地面两点 A、B，投影到水平面上分别为 a 、 b' ，在大地水准面上的投影为 a 、 b ，则 D 、 D' 分别为地面两点在大地水准面上与水平面上的投影距离。研究水



平面代替水准面对距离的影响，即用 D' 代替 D 所产生的误差用 ΔS 表示。则

$$\Delta S = D' - D \quad (1-5)$$

因 $D = R \cdot \theta$ ，在 $\triangle aOb'$ 中， $D' = R \cdot \tan\theta$ ，则

$$\Delta S = D' - D = R \cdot \tan\theta - R \cdot \theta = R(\tan\theta - \theta)$$

将 $\tan\theta$ 按级数展开为：

$$\tan\theta = \theta + \frac{1}{3}\theta^3 + \frac{2}{15}\theta^5 + \dots$$

因为面积不大，所以 D' 不会太长。且 θ 角很小，故略去 θ 五次方以上各项，并代入上式得

$$\Delta S = \frac{1}{3}R \cdot \theta^3 \quad (1-6)$$

因为 $\theta = \frac{D}{R}$ ，代入上式得

$$\Delta S = \frac{D^3}{3R^2} \quad (1-7)$$

以 $R = 6371\text{km}$ 和不同的 D 值代入上式，算得相应的 ΔS 及 $\Delta S/S$ 值，见表 1-2。

表 1-2 地球曲率对水平距离和高程的影响

| 距离/m | 距离误差/mm | 距离相对误差 | 高程误差/mm |
|-------|----------|-------------|---------|
| 100 | 0.000008 | 1/1250000 万 | 0.8 |
| 1000 | 0.008 | 1/12500 万 | 78.5 |
| 10000 | 8.2 | 1/122 万 | 7850.0 |
| 25000 | 128.3 | 1/19.5 万 | 49050.0 |

从表中可以看出，当地面距离为 10km 时，用水平面代替水准面所产生的距离误差仅为 8.2mm，其相对误差为 1/1220000。而实际测量距离时，大地测量中使用的精密电磁波测距仪的测距精度为 1/1000000（相对误差），地形测量中普通钢尺的量距精度约为 1/2000。所以，只有在大范围内进行精密测距时，才考虑地球曲率的影响。而在一般地形测量中测量距离时，可不必考虑这种误差的影响。

二、对高程的影响

我们知道，高程的起算面是大地水准面，如果以水平面代替水准面进行高程测量，则所测得的高程必然含有因地球弯曲而产生的高程误差的影响。如图 1-9 中， a 点和 b' 点是在同一水准面上，其高程应当是相等的。当以水平面代替水准面时， b 点升到 b' 点， bb' 即 Δh 就是产生的高程误差。由于地球半径很大，距离 D 和 θ 角一般很小。所以 Δh 可以近似地用半径为 D 、圆心角为 $\theta/2$ 所对应的弧长来表示。即

$$\Delta h = \frac{\theta}{2} D \quad (1-8)$$

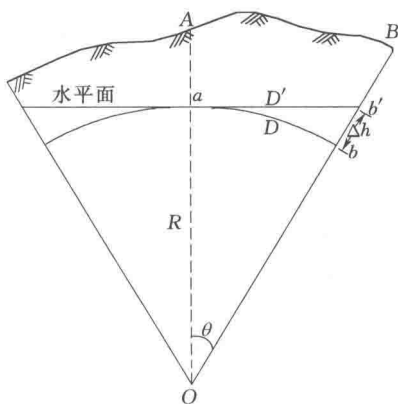


图 1-9 水平面与水准面的关系



因 $\theta = \frac{D}{R}$, 代入式 (1-8) 得

$$\Delta h = \frac{D^2}{2R} \quad (1-9)$$

用不同的距离代入上式, 便得表 1-2 所列的结果。从表中可以看出, 用水平面代替水准面对高程的影响是很大的。距离为 1km 时, 就有 78.5mm 的高程误差, 这在高程测量中是不允许的。因此, 进行高程测量, 即使距离很短, 也应用水准面作为测量的基准面, 即应顾及地球曲率对高程的影响。

三、对水平角的影响

从球面三角学可知, 同一空间多边形在球面上投影的各内角和, 比在平面上投影的各内角和 大一个球面角超值 ϵ 。

$$\epsilon = \frac{P}{R^2} \rho \quad (1-10)$$

式中 ϵ ——球面角超值, ($''$);

P ——球面多边形的面积, km^2 ;

R ——地球半径, km ;

ρ ——弧度的秒值, $\rho = 206265''$ 。

以不同的面积 P 代入式 (1-10) 中, 可求出球面角超值 ϵ , 见表 1-3。

表 1-3 用水平面代替水准面的水平角误差

| 面积 P/km^2 | 10 | 50 | 100 | 300 |
|-----------------------|------|------|------|------|
| 球面角超值 $\epsilon/('')$ | 0.05 | 0.25 | 0.51 | 1.52 |

结论: 当球面多边形的面积 P 为 100km^2 , 进行水平角测量时, 可以用水平面代替水准面, 而不必考虑地球曲率对水平角的影响。

第四节 测量工作概述

一、测量的任务及基本工作

测量工作的根本任务是要确定地面点的几何位置。确定地面点的几何位置就需要进行一些测量的基本工作, 为了保证测量成果的精度及质量还需遵循一定的测量原则。

(一) 地面点平面位置的确定

确定地面点的平面位置即确定地面点的平面坐标, 测量上一般不是直接测定, 而是通过测量水平角和水平距离然后计算而求得的。如图 1-10 所示, 在平面直角坐标系中, 若要测定原点 o 附近 1

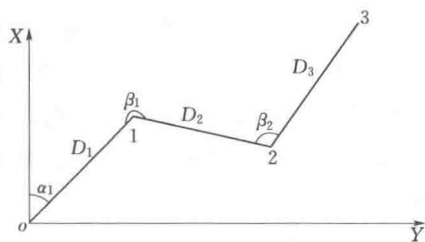


图 1-10 确定地面点位的测量工作



点的位置, 只需测得角度 α_1 (称为方位角) 以及距离 D_1 , 用三角公式即可算出点 1 的坐标: $x_1 = D_1 \cos \alpha_1$, $y_1 = D_1 \sin \alpha_1$ 。

若能测得角度 $\alpha_1, \beta_1, \beta_2, \dots$ 并测得距离 D_1, D_2, D_3, \dots 则利用数学中极坐标和直角坐标的互换公式, 可以推算 2, 3, \dots 点的坐标值。由此可见, 测定地面点平面位置的基本原理是: 由坐标原点开始, 逐点测得方位角和水平距离, 逐点递推算出坐标。

(二) 地面点高程的确定

地面点高程测定的基本原理是从高程原点开始, 逐点测得两点之间的高差, 进而推算出点的高程。

综上所述, 距离、角度和高差是确定地面点位置的三个基本要素, 而距离测量、角度测量、高差测量是测量的三项基本工作。

二、测量工作的基本原则

测量工作中将地球表面的形态分为地物和地貌两类: 地面上的河流、道路、房屋等称为地物; 地面高低起伏的山峰、沟、谷等称为地貌。地物和地貌总称为地形。测量学的主要任务是测绘地形图和施工放样。

将测区的范围按一定比例尺缩小成地形图时, 通常不能在一张图纸上表示出来。测图时, 要求在一个测站点 (安置测量仪器测绘地物、地貌的点) 上将该测区的所有重要地物、地貌测绘出来也是不可能的。因此, 在进行地形测图时, 只能连续地逐个测站施测, 然后拼接出一幅完整的地形图。当一幅图不能包括该地区面积时, 必须先在该地区建立一系列的测站点, 再利用这些点将测区分成若干幅图, 并分别施测, 最后拼接该测区的整个地形图。

这种先在测区范围建立一系列测站点, 然后分别施测地物、地貌的方法, 就是先整体后局部的原则。这些测站点的位置必须先进行整体布置; 反之, 若一开始就从测区某一点起连续进行测量, 则前面测站的误差必将传递给后面的测站, 如此逐站积累, 最后测站的本身位置以及根据它测绘的地物、地貌的位置误差积累越大, 这样将得不到一张合格的地形图。一幅图如此, 就整个测区而言就更难保证精度。因此, 必须先整体布置测站点。测站点起着控制地物、地貌的作用, 所以又称为“从控制到碎部”。

为此, 在地形测图中, 先选择一些具有控制意义的点 (称为控制点), 用较精密的仪器和控制测量方法把它们的位置测定出来, 这些点就是上述的测站点, 在地形测量中称为地形控制点, 或称为图根控制点。然后再根据它们测定道路、房屋、草地、水系的轮廓点, 这些轮廓点称为碎部点。这样从精度上来讲就是从高级到低级。

遵循“由整体到局部”“先控制后碎部”“从高级到低级”的原则, 就可以使测量误差的分布比较均匀, 保证测图精度, 而且可以分幅测绘, 加快测图速度, 从而使整个测区连成一体, 获得整个地区的地形图。

在测设工作中, 同样必须遵循这样的工作原则。如图 1-11 所示, 欲把图纸上设计好的建筑物 P 、 R 、 G 在实地放样出来作为施工的依据, 就必须先进行高精度的控制测量, 然后安置仪器于控制点 A , 进行建筑物的放样。