

输电线测量与新技术应用

# 输电线测量与 新技术应用

张中原 王建立 孙建勇 王绍宏 著



黄河水利出版社

# 输电线路测量与 新技术应用

张中原 王建立 孙建勇 王绍宏 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书以河南省电力勘测设计院在多年的架空输电线路工程中总结出来的工作经验及作业模式为参考,依据架空输电线路勘测、设计及施工规范,对各种作业方法进行总结、分析,并对每一种作业方法进行了较为详尽的阐述。

全书共分九章,第1章为概述,介绍了输电线路测量的作用及测量新技术;第2章讲述了输电线路常规测量技术;第3章讲述了输电线路卫星定位测量技术的基本知识及基本原理;第4章介绍了输电线路摄影测量与遥感技术;第5章详细介绍了输电线路的规划设计;第6章介绍了输电线路三维优化测量技术;第7章详细介绍了输电线路施工图设计阶段的测量方法;第8章详细介绍了输电线路施工测量的方法;第9章介绍了输电线路三维地理信息系统及其在工程规划、设计中的应用。

本书可供架空输电线路工程勘测、设计、施工、检测技术人员及科研、教学人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

输电线路测量与新技术应用 / 张中原等著. — 郑州:黄河水利出版社,2012.7

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0307 - 4

I. ①输… II. ①张… III. ①输电线路测量 IV. ①TM75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 161363 号

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:13.25

字数:306 千字

印数:1—1 000

版次:2012 年 7 月第 1 版

印次:2012 年 7 月第 1 次印刷

---

定价:39.00 元

## 前 言

随着国民经济及电力工业的高速发展,大电网的格局已经形成。作为电力工业基础设施之一的电网,由于电压等级逐步升高,输电线路走廊日益狭窄,因此在可研、初设、施工图设计及施工阶段的难度也越来越大,这就对测量的设计工作提出了更加严格的要求。

测量作为工程勘测设计的基础专业,是一门实践性很强的学科,来源于实践,服务于实践。它依靠各门成熟的学科理论,解决工程测量中各种复杂的实践问题。架空输电线路测量是一种集勘测、设计、施工、检测于一体的实践性极强的测量技术手段,利用各种不同的测量方法来解决在工程中所遇到的不同的问题,在现场发现问题并找出最合理、简便快捷的测量方法,以尽量减少野外工作量,降低测量工作的难度。

高密度的电网建设为架空输电线路测量提供了丰富的实践机会。近十几年来,由河南省电力勘测设计院负责完成的架空输电线路工程的电网建设涵盖了河南及周边部分地区,由于每个工程的地理位置、地形地貌、高压走廊的通畅程度都不尽相同,在作业过程中,每位作业人员对作业方法的理解都不尽相同,同样的地形情况在作业方法上都不尽相同,因此从这点上说,各种方法的结合应用更值得研究和学习。更重要的是,它能为读者提供以综合分析为方向的思路,提供丰富且宝贵的工程经验,使工作人员在野外测量过程中,能快速应对各种情况,顺利完成野外的测量工作。

参与本书编撰的各位高级工程师均饱含热忱,希望把多年的忙碌与思考沉淀成珍贵的资料,使之成为可与业内同行共享的财富。在此过程中,我们再次认识到将理论知识与实践相结合的重要性和必要性,也体验到了能对本专业理论的丰富与进步有所贡献而获得的一丝成就感。

本书由张中原、王建立、孙建勇、王绍宏著。在资料收集和整理过程中,得到了河南省电力勘测设计院线路部的大力支持,也得到了河南省电力勘测设计院勘测工程部的积极配合。河南省电力勘测设计院王宇教授级高级工程师对本书编撰工作给予了具体指导和大力支持,在此一并表示感谢。

限于作者水平和经验,不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2012年3月

# 目 录

前 言	
第 1 章 概 述	(1)
§ 1.1 测量工作的任务及其在输电线路工程中的作用	(1)
§ 1.2 输电线路测量新技术发展概况	(2)
第 2 章 输电线路常规测量技术	(4)
§ 2.1 输电线路测量基本知识	(4)
§ 2.2 全站仪角度测量与距离测量	(14)
第 3 章 输电线路卫星定位测量技术	(26)
§ 3.1 GPS 基本知识	(26)
§ 3.2 GPS 测量数据采集	(33)
§ 3.3 数据处理	(41)
第 4 章 输电线路摄影测量与遥感技术	(52)
§ 4.1 摄影测量与遥感概述	(52)
§ 4.2 摄影测量基础	(57)
§ 4.3 遥感基础	(78)
第 5 章 输电线路规划测量技术	(91)
§ 5.1 输电线路可行性研究及初步设计	(91)
§ 5.2 架空输电线路路径方案的选择	(93)
第 6 章 输电线路三维优化测量技术	(100)
§ 6.1 架空输电线路路径方案的优化	(100)
§ 6.2 摄影测量的外业控制测量	(104)
§ 6.3 输电线路三维数字模型的建立	(114)
§ 6.4 利用卫星影像和航空像片进行路径优化的效益分析	(118)
第 7 章 输电线路施工图设计测量技术	(120)
§ 7.1 选线测量	(120)
§ 7.2 定线测量	(130)
§ 7.3 平面及断面测量	(144)
§ 7.4 定位测量	(157)
§ 7.5 线路改造工程常用的一些测量方法	(166)
§ 7.6 输电线路测量成果	(170)
第 8 章 输电线路施工测量技术	(171)
§ 8.1 施工复测和分坑测量	(171)
§ 8.2 基础的操平找正及杆塔检查	(180)

§ 8.3 架空线测量 .....	(187)
第 9 章 输电线路三维地理信息系统 .....	(197)
§ 9.1 地理信息系统概述 .....	(197)
§ 9.2 输电线路三维地理信息系统应用 .....	(199)
参考文献 .....	(204)

# 第1章 概述

## § 1.1 测量工作的任务及其在输电线路工程中的作用

### 1.1.1 测量学的任务和作用

测量学研究的对象主要是地球的形状、大小和地球表面上各种物体的几何形状及其空间位置,主要任务是测定地球表面上各种物体的点位和几何形状,并绘制成图,以及测定和研究地球的形状与大小。

随着科学技术的发展,测量学已发展为多门学科。按照研究对象和研究范围的不同,测量学可划分为以下几门学科:

(1)大地测量学:该学科主要研究在广大区域内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。

(2)地形测量学:该学科主要研究测绘地形图的基本理论、技术与方法。地形测量学的任务就是将地球表面的地物和地貌测绘成按一定比例尺和图式符号表示的地形图。

(3)摄影测量学:该学科主要研究如何利用光学或数码摄影机摄影得到的影像,确定被摄物体的形状、大小、位置、性质和相互关系。

(4)工程测量学:该学科主要研究城市建设、道路、水利枢纽、农田水利、军事、工业与民用建筑等工程建设在勘测设计、施工放样、竣工验收和运营管理等各个阶段的测绘工作。这门学科的主要任务有三方面,即:把地面上的情况描绘到图纸上,把图纸上设计的建筑物放样到地面上,以及观测建筑物施工过程中和竣工后产生的各种变化或变形。

(5)制图学:该学科主要利用测量所得的资料,研究如何投影编绘成地图,以及地图制作的理论、工艺技术和应用等。

以上各门学科,既自成系统,又密切联系、互相配合。

### 1.1.2 测量工作在输电线路工程中的作用

输电线路工程建设离不开测量工作,输电线路测量属于工程测量学的范畴,它的主要任务是:

(1)为输电线路工程的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,从而进行线路路径方案的优化设计。

(2)在工程施工设计阶段,按照设计要求,测量并绘制线路的平断面图,进行杆塔排位设计,测量并绘制塔基断面图及塔基地形图,进行杆塔基础设计。

(3) 在施工过程中及工程建成后的运行管理中,都需要对杆塔位置、基础进行施工放样,对线缆进行观测,确保工程的安全。

## § 1.2 输电线路测量新技术发展概况

近些年来,我国测量技术进步很大,发展很快,取得了显著成绩。在输电线路测量中,我们充分利用了控制测量技术、地形图测绘技术、全站仪数字测图技术、GPS 技术、高分辨率航空摄影测量及遥感技术、机载激光雷达系统、水下测绘系统等,使传统的手工测量向电子化、数字化、自动化方向发展。

在输电线路工程的勘测设计、施工和管理各个阶段,测量工作直接影响着工程的进度与质量,因此测量科学与技术的发展及应用、测绘方式的多样化和集成化、测绘过程的自动化和实时化,以及测绘成果的数字化和可视化,是当今测绘最主要的特点。

### 1.2.1 输电线路全站仪数字测图技术

#### 1.2.1.1 全站仪数字测图

在输电线路工程勘测设计及施工过程中,传统作业方式主要是手工作业,即野外测量人工记录,人工绘制平断面图、塔基断面图、塔位地形图及拆迁分图等;数字测图则是野外测量自动记录,自动解算处理,自动成图、绘图,并向用图者提供可供处理的数字地图,用户可自动提取各种信息,实现测图过程的自动化。

#### 1.2.1.2 测量方法的拓展应用

在输电线路测量过程中,线路的选、定线测量,平断面测量,定位及辅助测量等方面,可以利用全站仪的各种优势,采用新的测量方法,如三角形法、导线法、无定向导线法、交会法等,充分发挥全站仪的作用,提高工作效率,减少外业工作量。

### 1.2.2 GPS 技术

随着科技的进步,测绘科学无论在理论上,还是在生产实践中,都发生了巨大的变化。GPS 技术因其高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等显著特点,已被广泛应用于测量领域的各个方面,具有广泛的发展和前景。

#### 1.2.2.1 利用 GPS 建立平面高程控制网

随着差分 GPS 定位技术的发展与应用,不仅高等级的首级网和加密网,而且航空摄影测量像控点的测定也广泛采用了 GPS。在输电线路测量中,通常利用 GPS 进行控制网的布置及测量工作。

#### 1.2.2.2 RTK GPS 测量技术

RTK GPS 测量技术是一种先进的测量技术手段,能给测量工作带来极大的方便。利用 RTK GPS 进行测量,可以提高效率,降低成本;在精度要求高的情况下,可以结合全站仪(水准仪)进行工作,克服外业的通视条件、测站测定等方面的限制,极大地降低了测绘人员的劳动强度。



### 1.2.2.3 CORS 技术

连续运行卫星定位系统(CORS)具有操作简便、成本低、精度高、实时性强、覆盖广等优点,特别是 CORS 内网络 RTK 测量功能的实现改变了传统测量作业模式,可以极大地提高测量的工作效率。

### 1.2.3 航空摄影测量及遥感技术

航空摄影测量及遥感技术是当今科技发展的一项前沿技术,作为基于影像的空间信息科学,是地球空间信息学(Geospatial Information Science)的核心。地球空间信息学是空间数据的采集、量测、分析、存储、管理、显示和应用的集成科学与技术,属于现代空间信息科学与技术范畴。

近年来,在输电线路工程测量中,充分利用航空摄影测量及遥感技术的发展成果,在输电线路路径的优化、线路平断面图的成图、线路的三维可视化等方面,航空摄影测量及遥感技术都得到了较多的应用和发展。

### 1.2.4 机载激光雷达系统

机载激光雷达系统是近几十年来摄影测量与遥感领域最具革命性的成就之一,是目前最先进的对地摄影测量系统。在 DGPS、IMU 支持下,激光扫描系统通过激光扫描器和距离传感器,经由计算机对测量资料进行内部处理,显示或存储、输出距离和角度等资料,并与距离传感器获取的数据相匹配,经过相应软件进行一系列处理来获取被测目标的表面形态和三维坐标数据,从而进行各种量算或建立立体模型。

### 1.2.5 水下测绘系统

水下测绘系统是一种移动测绘系统,主要由 GPS 接收机、自动测深仪、数据采集软件和通信设备等组成,平面测绘精度取决于 GPS 的作业方式和接收机的性能,高程精度则与测深仪有关。

## 第 2 章 输电线路常规测量技术

### § 2.1 输电线路测量基本知识

#### 2.1.1 地球形状

测绘工作的主要研究对象是地球的自然表面。地球表面形状十分复杂。通过长期的测绘工作和科学调查,了解到地球表面上海洋面积约占 71%,陆地面积约占 29%,世界第一高峰珠穆朗玛峰高达 8 844.43 m,而在太平洋西部的马里亚纳海沟深达 11 034 m。尽管有这样大的高低起伏,但相对地球庞大的体积来说仍可忽略不计。因此,测量中把地球总体形状看做是由静止的海水面向陆地延伸所包围的球体。

地球上的任一点,都同时受到两个作用力,其一是地球自转产生的离心力,其二是地心引力。这两种力的合力称为重力,重力的作用线又称为铅垂线(见图 2-1(a))。

铅垂线是测量工作的基准线。用细绳悬挂一个垂球  $G$ ,其静止时所指示的方向即为悬挂点  $O$  的重力方向,也称为铅垂线方向(见图 2-1(b))。

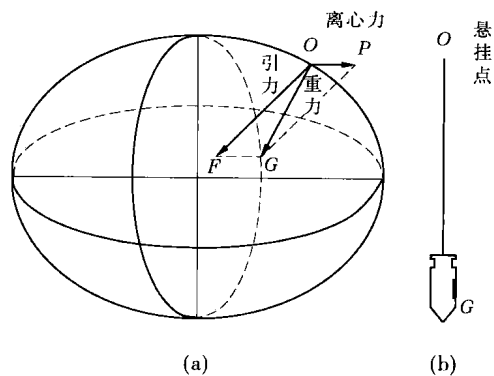


图 2-1 铅垂线及其方向

处于自由静止状态的水面称为水准面。由物理学知识知道,这个面是一个重力

等位面,水准面上各点处处与点的重力方向(铅垂线方向)垂直。在地球表面上、下重力作用的范围内,通过任何高度的点都有一个水准面,因而水准面有无数个。

在测量工作中,把一个假想的、与静止的海水面重合并向陆地延伸且包围整个地球的特定重力等位面称为大地水准面。通常用平均海水面代替静止的海水面。大地水准面所包围的形体称为大地体。

大地水准面和铅垂线是测量外业所依据的基准面和基准线。

由于地心引力的大小与地球内部的质量有关,而地球内部的质量分布又不均匀,因此地面上各点的铅垂线方向产生不规则的变化。大地水准面(见图 2-2)实际上是一个略有起伏的不规则曲面,无法用数学公式精确表达。

长期的测量实践和研究表明,地球形状极近似于一个两极稍扁的旋转椭球(见图 2-3),即一个椭圆绕其短轴旋转而成的形体。而其旋转椭球面是可以较简单的数学公式准确地表达出来的。在测量工作中就是用这样一个规则的曲面代替大地水准面作为测量计算

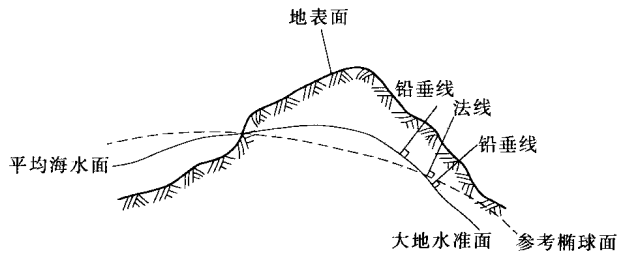


图 2-2 大地水准面

的基准面。

世界各国通常均采用旋转椭球代表地球的形状,并称其为地球椭球。测量中把与大地体最接近的地球椭球称为总地球椭球,把与某个区域如一个国家大地水准面最为密合的椭球称为参考椭球,其椭球面称为参考椭球面。由此可见,参考椭球有许多个,而总地球椭球只有一个。

椭球的形状和大小是由其基本元素决定的。椭球体的基本元素是:长半轴  $a$ 、短半轴  $b$ 、扁率  $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。

我国 1980 年国家大地坐标系采用了 1975 年国际椭球,该椭球的基本元素是: $a = 6\,378\,140\text{ m}$ ,  $b = 6\,356\,755.3\text{ m}$ ,  $\alpha = 1/298.257$ 。

根据一定的条件,确定参考椭球面与大地水准面的相对位置所做的测量工作,称为参考椭球的定位。在一个国家的适当地点选一点  $P$ ,设想大地水准面与参考椭球面相切,切点  $P'$  位于  $P$  点的铅垂线方向上,这样椭球面上  $P'$  点的法线与该点对大地水准面的铅垂线重合,并使椭球的短轴与地球的自转轴平行,且椭球面与这个国家范围内的大地水准面差距尽量地小,从而确定了参考椭球面与大地水准面的相对位置关系,这就是参考椭球的定位(见图 2-4)。

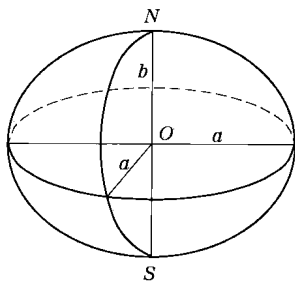


图 2-3 旋转椭球

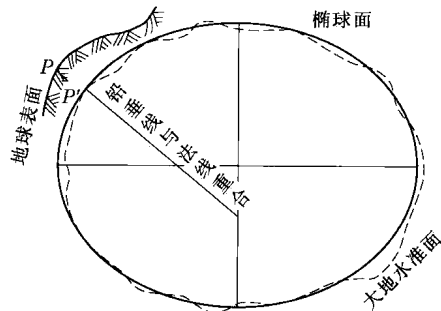


图 2-4 参考椭球的定位

这里, $P$  点称为大地原点。我国大地原点位于陕西省泾阳县永乐镇,在大地原点上进行了精密天文测量和精密水准测量,获得了大地原点的平面起算数据,以此建立的坐标系称为 1980 西安坐标系。

由于参考椭球的扁率很小,在普通测量中可把地球看做圆球体,其平均半径为

$$R = \frac{1}{3}(a + a + b) \approx 6\,371 \text{ km}$$

### 2.1.1.2 用水平面代替水准面的限度

实际测量工作中,在一定的测量精度要求和测区面积不大的情况下,往往以水平面直接代替水准面。因此,应当了解地球曲率对水平距离、水平角、高差的影响,从而决定在多大面积范围内容许用水平面代替水准面。在分析过程中,将大地水准面近似看成圆球,半径  $R=6\,371 \text{ km}$ 。

#### 2.1.1.2.1 水准面曲率对水平距离的影响

在图 2-5 中,  $AB$  为水准面上的一段圆弧,长度为  $S$ ,所对圆心角为  $\theta$ ,地球半径为  $R$ 。自  $A$  点作切线  $AC$ ,长度为  $t$ 。如果将切于  $A$  点的水平面代替水准面,即以切线段  $AC$  代替圆弧  $AB$ ,则在距离上将产生误差  $\Delta S$

$$\Delta S = t - S$$

式中

$$t = R \tan \theta$$

$$S = R \theta$$

则

$$\Delta S = R \left( \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots \right)$$

(注:根据三角函数的级数公式,即  $\tan \theta = \theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots$ )

因角值一般很小,故略去五次方以上各项,并以  $\theta = \frac{S}{R}$  代入,则得

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

当  $S=10 \text{ km}$  时,  $\frac{\Delta S}{S} = \frac{1}{1\,217\,700}$ , 小于目前精密距离测量的容许误差。因此,可得出结论:在半径为  $10 \text{ km}$  的范围内进行距离测量工作时,用水平面代替水准面所产生的距离误差可以忽略不计。

#### 2.1.1.2.2 水准面曲率对水平角的影响

由球面三角学知识知道,同一个空间多边形在球面上投影的各内角之和,较其在平面上投影的各内角之和大一个球面角超  $\varepsilon''$ ,它的大小与图形面积成正比,公式为

$$\varepsilon'' = \rho'' \frac{P}{R^2} \quad (2-2)$$

式中,  $P$  为球面多边形面积;  $R$  为地球半径;  $\rho'' \approx 206\,265''$ 。

当  $P = 100 \text{ km}^2$  时,  $\varepsilon'' = 0.51''$ 。

由上式计算表明,对于面积在  $100 \text{ km}^2$  内的多边形,地球曲率对水平角的影响只有在最精密的测量中才考虑,一般测量工作是不必考虑的。

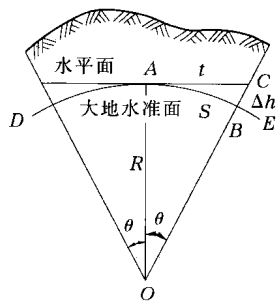


图 2-5 用水平面代替水准面

### 2.1.2.3 水准面曲率对高差的影响

图 2-5 中  $BC$  为水平面代替水准面产生的高差误差。令  $BC = \Delta h$ , 则

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

即 
$$\Delta h = \frac{t^2}{2R + \Delta h}$$

上式中可用  $S$  代替  $t$ ,  $\Delta h$  与  $2R$  相比可略去不计, 故上式可写成

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

式(2-3)表明,  $\Delta h$  的大小与  $S$  的平方成正比。当  $S = 1 \text{ km}$  时,  $\Delta h = 8 \text{ cm}$ 。因此, 地球曲率对高差的影响, 即使在很短的距离内也必须加以考虑。

综上所述, 在面积为  $100 \text{ km}^2$  的范围内, 进行水平距离或水平角测量, 都可以不考虑地球曲率的影响, 在精度要求较低的情况下, 这个范围还可以相应扩大, 但地球曲率对高差的影响是不能忽视的。

### 2.1.3 测量坐标系

为了确定地面点的空间位置, 需要建立测量坐标系。一个点在空间的位置, 需要三个量来表示。

在一般测量工作中, 常用地面点的空间大地经度、纬度(或高斯平面直角坐标)和高程表示, 它们分别从属于大地坐标系(或高斯平面直角坐标系)和指定的高程系统, 即用一个二维坐标系(椭球面或平面)与一个一维坐标系的组合来表示。

#### 2.1.3.1 大地坐标系

地面上的物体大多具有空间形状, 例如丘陵、山地、河谷、洼地等。为了研究空间物体的位置, 数学上采用投影的方法加以处理。如上所述, 一个点在空间的位置, 需要三个量来确定。在测量工作中, 这三个量通常用该点在基准面(参考椭球面)上的投影位置和该点沿投影方向到基准面(一般实际应用中是大地水准面)的距离来表示。

在图 2-6 中,  $NS$  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, 而其中通过格林尼治天文台的子午面称为起始子午面。子午面与椭球面的交线称为子午圈, 也称为子午线。通过椭球中心且与椭球旋转轴正交的平面称为赤道面, 它与椭球面相截所得曲线称为平行圈或纬圈。起始子午面和赤道面, 是在椭球面上确定某一点投影位置的两个基本平面。在测量工作中, 点在椭球面上的位置用大地经度  $L$  和大地纬度  $B$  表示。所谓某点的大地经度, 就是通过该点(如图 2-6 中的  $P$  点)的子午面与起始子午面的夹角; 大地纬度就是在椭球面上的  $P$  点作一与椭球体相切的平面, 过  $P$  点作一垂直于此平面的直线, 这条直线称为  $P$  点的法线(此法线不通过椭球中心点  $O$ ), 它与赤道面的交角就是  $P$  点的大地纬度。大地经度  $L$  和大地纬度  $B$  统称为大地坐标。由此可见, 大地经度与大地纬度是以法线为依据的, 也就是说, 以参考椭球面作为基准面。

为求得  $P$  点的位置, 可在该点上安置仪器, 用天文测量的方法来测定。这时, 仪器的竖轴必然与铅垂线相吻合, 即仪器的竖轴与该处的大地水准面相垂直。因此, 用天文观测所得的数据是以铅垂线为准的, 也就是说, 以大地水准面为依据。由天文测量求得的某点

位置,可用天文经度  $\lambda$  和天文纬度  $\varphi$  表示。由于铅垂线与法线并不重合,所以  $\lambda \neq L, \varphi \neq B$ 。依据铅垂线相对于法线的关系(称为垂线偏差),可以将  $\lambda, \varphi$  改算为  $L, B$ 。

用经度、纬度表示  $P$  点位置的坐标是在球面上建立的,故称为球面坐标,亦称为地理坐标。

不论大地经度  $L$  还是天文经度  $\lambda$ ,都要从一个起始子午面算起。在原格林尼治以东的点从起始子午面向东计,由  $0^\circ$  到  $180^\circ$ ,称为东经。同样,在原格林尼治以西的点从起始子午面向西计,由  $0^\circ$  到  $180^\circ$ ,称为西经。实地上东经  $180^\circ$  与西经  $180^\circ$  是同一个子午面。我国各地的经度都是东经。不论大地纬度  $B$  还是天文纬度  $\varphi$ ,都从赤道面起算。在赤道以北的点的纬度由赤道面向北计,由  $0^\circ$  到  $90^\circ$ ,称为北纬;在赤道以南的点,其纬度由赤道面向南计,也是由  $0^\circ$  到  $90^\circ$ ,称为南纬。我国疆域全部在赤道以北,各地的纬度都是北纬。

在测量工作中,某点的投影位置一般用大地坐标  $L$  及  $B$  来表示。但实际进行观测时,如量距或测角都是以铅垂线为准,因而所测得的数据若要求精确地换算成大地坐标则必须经过改化。在普通测量工作中,由于要求的精确程度不必很高,所以可不考虑改化。

### 2.1.3.2 空间直角坐标系

空间直角坐标系以椭球体中心  $O$  为原点,起始子午面与赤道面交线为  $X$  轴,赤道面上与  $X$  轴正交的方向为  $Y$  轴,椭球体的旋转轴为  $Z$  轴,指向符合右手规则。在该坐标系中, $P$  点的点位用  $OP$  在这三个坐标轴上的投影  $x, y, z$  表示(见图 2-7)。由于空间直角坐标系的  $X$  轴通过起始子午面, $Z$  轴为椭球旋转轴,故也称地心坐标系,它与大地坐标系有一定的换算关系。

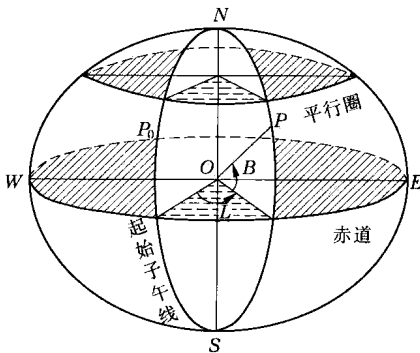


图 2-6 大地坐标系

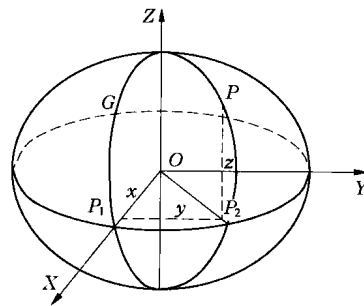


图 2-7 空间直角坐标系

### 2.1.3.3 独立平面直角坐标系

在小区域内进行测量工作,若采用大地坐标来表示地面上点的位置是不方便的,通常采用平面直角坐标。某点用大地坐标表示的位置,是该点在球面上的投影位置。研究大范围地面形状和大小时必须把投影面作为球面才符合实际。但研究小范围地面形状和大小时,常把球面的投影面当做平面看待,这就可以采用平面直角坐标来表示地面上的点在投影面上的位置。测量工作中所用的平面直角坐标与解析几何中所介绍的基本相同,只是测量工作以  $X$  轴为纵轴,表示南北方向,以  $Y$  轴为横轴,表示东西方向。这是由于在测量工作中以极坐标表示点位时其以北方向为准按顺时针方向计算夹角,而数学中则是从

横轴按逆时针计算。把  $X$  轴与  $Y$  轴纵横互换后,全部平面三角学公式都能在测量计算中应用。

测量工作中采用的平面直角坐标系规定:南北方向为纵轴  $X$  轴,向北为正;东西方向为横轴  $Y$  轴,向东为正。坐标原点有时是假设的,假设的原点位置应使测区内各点的  $x, y$  值为正。测量平面直角坐标系与数学平面直角坐标系的区别如图 2-8 所示。

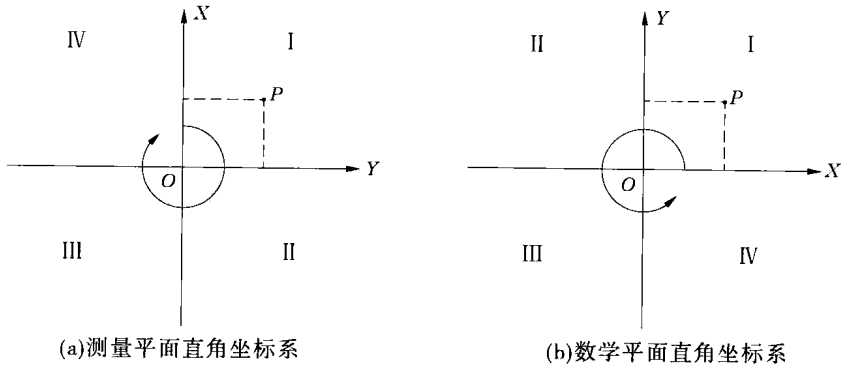


图 2-8 两种平面直角坐标系的比较

#### 2.1.3.4 高斯平面直角坐标系

##### 1. 高斯投影

高斯平面直角坐标系采用高斯投影方法建立。高斯投影是由德国测量学家高斯于 1825 年至 1830 年首先提出,到 1912 年由德国测量学家克吕格推导出实用的坐标投影公式,所以又称高斯-克吕格投影。

如图 2-9 所示,设想有一个椭圆柱面横套在地球椭球体外面,使它与椭球上某一子午线(该子午线称为中央子午线)相切,椭圆柱的中心轴通过椭球体中心,然后用一定的投影方法,将中央子午线两侧各一定经差范围内的地区投影到椭圆柱面上,再将此柱面展开即成为投影面。所以,高斯投影又称为横轴椭圆柱投影。

##### 2. 高斯平面直角坐标系

在投影面上,中央子午线和赤道的投影都是直线,以中央子午线和赤道的交点  $O$  作为坐标原点,以中央子午线的投影为纵轴  $X$  轴, $X$  轴向北为正,以赤道的投影为横轴  $Y$  轴, $Y$  轴向东为正,这样便形成了高斯平面直角坐标系(见图 2-10)。

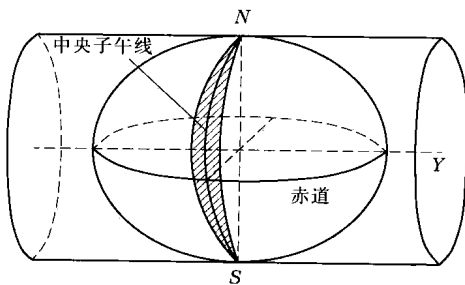


图 2-9 高斯投影

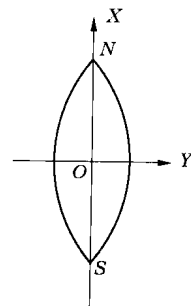


图 2-10 高斯平面直角坐标系

### 3. 投影带

高斯投影中,除中央子午线外,各点均存在长度变形,且距中央子午线愈远,长度变形愈大。为了控制长度变形,将地球椭球面按一定的经度差分成若干范围不大的带,称为投影带。带宽一般分为经差 6°、3°,分别称为 6°带、3°带(见图 2-11)。

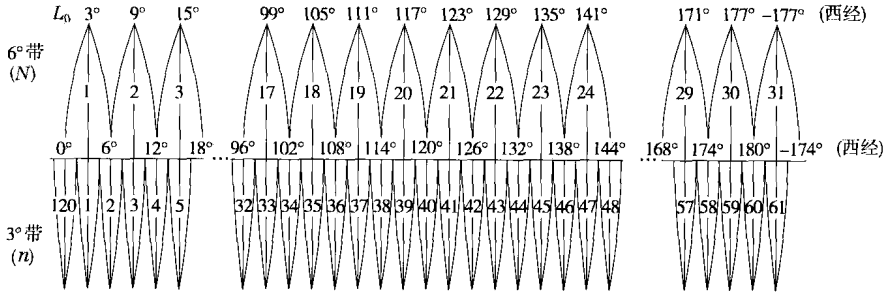


图 2-11 6°带与 3°带

6°带:从 0°子午线起,每隔经差 6°自西向东分带,依次编号 1,2,3,⋯,60,各带相邻子午线称为分界子午线。带号  $N$  与相应的中央子午线经度  $L_0$  的关系是

$$L_0 = 6N - 3^\circ \tag{2-4}$$

3°带:以 6°带的中央子午线和分界子午线为其中央子午线。即自东经 1.5°子午线起,每隔经差 3°自西向东分带,依次编号 1,2,3,⋯,120,带号  $n$  与相应的中央子午线经度  $l_0$  的关系是

$$l_0 = 3n \tag{2-5}$$

### 4. 国家统一坐标

我国位于北半球,在高斯平面直角坐标系内, $X$  坐标均为正,而  $Y$  坐标有正有负。为避免  $Y$  坐标出现负值,规定将  $X$  坐标轴向西平移 500 km,即所有点的  $Y$  坐标值均加上 500 km(见图 2-12)。此外,为便于区别某点位于哪一个投影带内,还应在横坐标值前冠以投影带带号,这种坐标称为国家统一坐标。

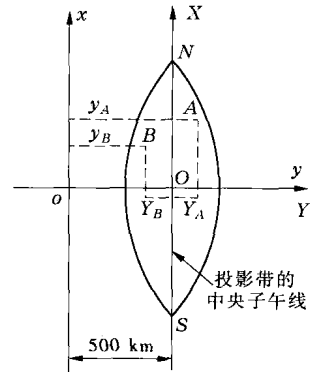


图 2-12 国家统一坐标

例如, $P$  点的高斯平面直角坐标  $X_p = 3\ 275\ 611.188\ \text{m}$ ,  $Y_p = -376\ 543.211\ \text{m}$ ,若该点位于第 19 带内,则  $P$  点的国家统一坐标表示为  $x_p = 3\ 275\ 611.188\ \text{m}$ ,  $y_p = 19\ 123\ 456.789\ \text{m}$ 。

### 5. 高斯投影变形

将球面上的图形投影到平面上,将会出现差异,这种差异称为投影变形。投影变形一般分为距离变形、角度变形和面积变形三种。在制作地图时,可根据需要来控制使某一种变形为零,如等角投影(又称正形投影)、等距投影以及等积投影等。

高斯投影是正形投影的一种,正形投影在一个小范围内地图上的图形同椭球面上的原形保持相似,即投影前后的角度相等,除此以外,高斯投影还具有如下特点:

(1) 中央子午线投影后为直线,且长度不变。距中央子午线愈远的子午线,投影后变



曲程度愈大,长度变形也愈大。

(2) 椭球面上除中央子午线外,其他子午线投影后,均向中央子午线弯曲,并向两极收敛,同时还对称于中央子午线和赤道。

(3) 在椭球面上对称于赤道的纬圈,投影后仍成为对称的曲线,同时与子午线的投影曲线互相垂直,且凹向两极。

### 6. 距离改化

根据球面上的长度,将其拉长改化为投影面上的距离,叫做距离改化。

设球面上两点间长度为  $S$ , 其在投影面上的长度为  $\sigma$ , 则

$$\sigma = S + \frac{y^2}{2R^2}S \quad (2-6)$$

由式(2-6)可知,只要知道球面上两点间的长度  $S$  及其在球面上离开轴子午线的近似距离  $y$  (可取两点横坐标的平均值), 便可求出其在高斯投影面上的距离  $\sigma$ , 并且  $\sigma$  总比  $S$  大, 其改化数值为

$$\Delta S = \sigma - S = \frac{y^2}{2R^2}S \quad (2-7)$$

由式(2-7)可知,离开轴子午线的距离愈远,长度变形愈大。

为了减少长度变形的影响,在采用 1:5 000 或更大比例尺测量地图时,应采用 3°带或 1.5°带的投影,有时也用任意带(即选择测区中央的子午线为轴子午线)投影计算。

### 7. 方向改化

图 2-13(a) 表示了球面上  $AB$  线的方向,由  $Q$  经  $A$ 、 $B$  两点的大圆与轴子午线围成球面四边形  $ABB_1A_1$ 。由球面三角学知识得知: 四边形  $ABB_1A_1$  的内角之和等于  $360^\circ$  加其球面角超。球面角超  $\varepsilon''$  为

$$\varepsilon'' = \rho'' \frac{P}{R^2} \quad (2-8)$$

式中,  $P$  为球面四边形面积;  $R$  为地球半径。

由于正形投影是等角投影,要想保持球面上的角度转移到投影面上时没有变形,由图 2-13(b) 可知,要用曲线而不是用直线连接图形顶点  $a$  和  $b$ , 只有这样,才能达到等角的目的。所以,球面上  $AB$  方向线,应以曲线表示在投影面上,且该曲线对轴子午线来说是凸出来的。

在投影面上,为了利用平面三角学公式进行计算,须将  $a$ 、 $b$  两点之间的曲线以  $a$ 、 $b$  两

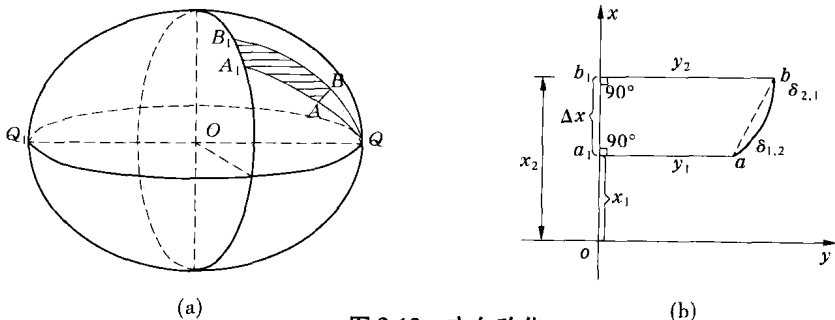


图 2-13 方向改化