



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

应用大地测量学

张华海 王宝山 赵长胜 韩晓冬 杨永崇 张恒璟 编著

YINGYONG DADI CELIANGXUE

China University of Mining and Technology Press



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

应用大地测量学

张华海 王宝山 赵长胜
韩晓冬 杨永崇 张恒璟 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了大地测量学的基本概念、基本理论和测量技术与方法。主要内容包括:大地测量基础知识、国家大地测量控制网的建立、大地测量观测技术、地球椭球面上的计算、高斯投影计算、大地测量坐标系统及其转换、大地控制网的数据处理等。针对工程测量人员和学生学习的实际需要,本书最后编入了大地测量控制网设计与综合实习指导书。

全书紧密结合我国现行测量规范和大地测量新技术,理论联系实际,内容系统性较强,具有广泛的适用性。

本书严格按照教育部批准的“十一五”国家级规划教材立项要求进行编写,是高等工科院校测绘工程专业教学用书,亦可作为工程测量人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

应用大地测量学/张华海等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-81107-702-5

I. 应… II. 张… III. 大地测量学 IV. P22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 136875 号

书 名 应用大地测量学

编 著 张华海等

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 21 字数 524 千字

版次印次 2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

大地测量学历来是高等工科院校测绘工程专业的一门主要专业课程。为了适应教学与实际工作的需要,我们在总结大地测量学多年教学经验、分析以往所编教材使用情况的基础上,侧重于实际应用,按照教育部“十一五”国家级规划教材的立项要求编写了本书。

编写工作中我们力求做到:①内容的系统完整性。遵循大地测量的基础知识、大地控制网的建立、观测技术、数据处理的实际工作程序进行编写。使初学者经过学习后,有完整的、系统的概念。②内容的先进性。编写中突出当前先进实用的 GPS 定位技术在大地测量中的应用,与 GPS 有关的内容几乎渗透到每一章之中,考虑到 GPS 定位技术的特点,将大地测量坐标系统的转换列为单独一章。③内容的实用性。考虑到 GPS 测量与经典的导线测量、水准测量密切配合是当前大地控制测量的主要方法,编写中紧密结合现行规范,做到有的放矢,学以致用,使内容具有更大的实用性。④层次结构严谨合理,文字叙述简明扼要,做到通俗易懂,便于自学,提高本书的可读性。

全书共分八章。第一章绪论,叙述大地测量学的基本概念、任务,应用大地测量学研究的内容以及大地测量学的发展概况与未来展望等。第二章、第五章、第六章、第七章侧重于大地测量的基本理论与实际应用。主要内容包括大地测量基础知识、大地测量坐标系统、时间系统、高程系统、地球重力场基本理论、椭球面上的计算、椭球面到投影平面的基本理论、大地测量坐标系统的转换等。第三章大地控制网的建立,首先介绍国家大地控制网的建立原理与方法,然后重点论述工程控制网技术设计与精度估算的原理与方法。第四章大地测量基本技术与方法,重点叙述实际应用中的精密角度测量、精密距离测量、精密水准测量与 GPS 测量等。第八章大地控制网平差计算,重点论述各种控制网的数据处理原理与方法,包括概算与平差计算以及控制网精度估算等内容。针对工程测量人员和学生学习的实际需要,本书最后的附录编入了大地测量控制网技术设计与综合实习指导书等内容。

本书由中国矿业大学张华海、河南理工大学王宝山、徐州师范大学赵长胜、山东科技大学韩晓冬、西安科技大学杨永崇、辽宁工程技术大学张恒璟合作编写。初稿完成后,由张华海进行统稿,并对初稿做了大量修改,个别章节再次重写,最后修整定稿。

本书稿承蒙中国矿业大学张书毕教授,徐州市勘察测绘研究院王军高级工程师认真审阅,并提出了宝贵意见。中国矿业大学李景芝副教授参加了书稿的校对。在此谨向给予本书帮助和关照的同志和单位表示衷心感谢。

随着测绘科学技术的不断发展和测绘工程专业教学改革的不断深入,大地测量的课程教学体系和教学内容将不断发生变化,加之我们的水平所限,书中难免有错误和不妥之处,希望专家和读者批评指正。

编著者

2007年8月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 大地测量基础知识	6
第一节 大地测量的基准面和基准线	6
第二节 常用大地测量坐标系统	8
第三节 时间系统	13
第四节 地球重力场基本理论	15
第五节 高程系统	24
第六节 测定垂线偏差和大地水准面差距的基本方法	30
第七节 关于确定地球形状的基本方法	33
第八节 空间大地测量简介	35
第三章 大地测量控制网的建立	37
第一节 国家平面控制网与高程控制网的建立	37
第二节 国家 GPS 网简介	49
第三节 国家重力网简介	53
第四节 工程平面控制网的建立	55
第五节 工程高程控制网的建立	63
第六节 用 GPS 定位技术建立工程控制网	67
第四章 大地测量观测技术	70
第一节 精密角度测量仪器	70
第二节 角度观测误差分析	82
第三节 方向观测法	89
第四节 垂直角测量	93
第五节 精密距离测量	97
第六节 精密水准测量仪器及其检验	111
第七节 水准测量观测与概算	121
第八节 GPS 测量	129
第九节 天文测量简介	131
第十节 重力测量简介	134

第五章 地球椭球与测量计算	138
第一节 地球椭球及其定位	138
第二节 椭球面上法截线曲率半径	144
第三节 椭球面上弧长计算	150
第四节 地面观测值归算至椭球面	151
第五节 椭球面上大地问题解算	160
第六章 高斯投影及其计算	172
第一节 地图投影的概念和正形投影性质	172
第二节 高斯投影与国家平面直角坐标系	178
第三节 高斯投影坐标计算	183
第四节 椭球面上的方向和长度归算至高斯投影平面	190
第五节 高斯投影坐标换带计算	195
第六节 通用横轴墨卡托投影和兰勃脱投影简介	197
第七章 大地测量坐标系统的转换	205
第一节 我国的大地坐标系统简介	205
第二节 大地坐标与三维直角坐标的换算关系	210
第三节 不同大地坐标系统之间的转换	211
第四节 平面坐标系统之间的转换	218
第五节 局部坐标系统的选择与坐标转换	220
第六节 天球坐标系与地球坐标系的转换	223
第七节 GPS 水准高程与局部地区大地水准面精化问题	225
第八章 大地控制网数据处理	228
第一节 大地控制网概算	228
第二节 控制网平差原理	237
第三节 平面控制网平差	241
第四节 高程控制网平差	261
第五节 GPS 基线向量网平差	270
第六节 控制网精度与可靠性估算	278
附录 1 大地测量控制网设计	286
附录 2 大地测量综合实习指导书	301
附录 3 精密光学经纬仪的检验和光电测距仪的检验	309
附录 4 水平方向观测、距离观测、GPS 观测中的归心改正	320
参考文献	326

第一章 绪 论

高等院校测绘工程专业教育中,大地测量学是一门重要的专业课程。这是因为大地测量学在测绘科学和测绘技术中有着重要的地位和作用。

学习大地测量学首先应对它的定义、任务、内容以及发展状况有一个概括的了解。

一、大地测量学的定义

作为地球科学的一个分支学科——大地测量学,既是一门地学基础性学科,又是一门应用地学学科。作为基础性学科,它的任务是研究地球形状、大小及其地球重力场;作为应用学科,它的任务是确立地球参考坐标系并建立大地控制网,为地形测图和工程测量提供基础控制。为此,可以给出大地测量学如下的定义:

大地测量学是通过在广大的地面上建立大地控制网,精确测定大地控制网点的坐标,研究测定地球形状、大小和地球重力场的理论、技术与方法的学科。其理论、技术与方法包括天文测量、三角测量、导线测量、卫星大地测量、水准测量、重力测量以及椭球大地测量、地球形状理论和测量平差等。

测量学(又称普通测量学或测量学基础)是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。它的基本目的是以测绘工作为手段,确定地面点的空间位置,并把它表示成数据形式或描绘在图面上,供经济建设和工程设计施工所使用。它的主要内容包括图根控制测量、地形图测绘及一般工程的施工测量。

大地测量学与普通测量学的区别在于:

(1) 大地测量学测量的精度等级高。大范围、高等级的大地控制测量对局部的测量工作起到控制作用。为此,大地测量学要研究更加精密的测量仪器、测量方法和数据处理方法。

(2) 大地测量学测量的范围广。此时就不能将地球表面视作平面,必须研究地球曲率等多种因素对测量成果的影响。地球形状接近于旋转椭球,其表面是一个不可展平的曲面。大地控制测量既要保证很高的测量精度,又要提供局部测图所需的控制成果,必须妥善解决地面观测成果到椭球面、再到平面上的转化问题,即投影的方法和投影的计算问题。

(3) 普通测量学侧重于如何测绘地形图以及进行一般工程的施工测量。大地测量学侧重于如何建立大地坐标系、建立大地控制网并精确测定控制网点的坐标。大地测量除为测图提供基本控制外,也为研究地球形状、大小,为空间科学,为工程建设服务。

近几十年来,随着科学技术的突飞猛进,大地测量学的研究内容也日益丰富。先后形成了实用大地测量学、椭球大地测量学、物理大地测量学、卫星大地测量学、空间大地测量学、海洋大地测量学、测量平差等不同分支。随着大地测量技术的发展和实际应用,应用大地测量学成为上述各分支学科之间的一个实用性很强的交叉学科,它的研究对象和研究内容以实用大地测量学为基础,涵盖了其他分支学科。

二、应用大地测量学的任务和作用

1. 任务

在广大的区域范围内设置一系列能够长期保存、便于应用的固定点位,称之为大地控制点。这些点位按不同的测量方式彼此联接构成统一的整体网形,称之为大地控制网。通过实地观测和数据处理,精密地确定出控制点在全区域统一坐标系统中的空间位置和重力场参数,并且监测这些控制网点随时间的变化量,这是应用大地测量学的基本任务。为完成这项任务,应用大地测量学还要研究有关的理论和方法。

2. 作用

建立地面控制网,精确测定大地控制点的空间三维位置及其重力场参数,具有重要的作用,具体表现为以下几个方面。

(1) 为地形测图提供控制基础

地形测图是在控制测量所建立的控制网基础上,再进一步加密图根控制点,随后测绘地形、地物点,最终绘制成地形图。控制测量是通过以下途径发挥其控制作用的:

控制测图误差,保证地形图的应有精度。地形测图工作如果自一点开始,由近及远、由此及彼逐步展开和延伸,由于测量有误差,这样做的结果则必然导致测图误差的迅速积累和急剧增大,以至于达到不能容许的程度。因此,地形测图必须依据高精度的大地控制点作为基础,使测量误差仅限定在控制点与周围的地形、地物点之间。这样一方面可以保证地形、地物在图面上的应有精度,另一方面,也能使各图幅的精度一致。

可以在不同地方同时开展测图工作,相邻的测绘成果能够衔接在一起,彼此利用。控制网的坐标系统在广大区域内都是统一的。这样就可以在不同地点、不同时间安排测图工作,所测的地形图又不会出现重叠和遗漏,均能相互拼接彼此利用。

控制测量成功地解决了自地球表面投影到平面上的问题。地球表面是一个不可展平的曲面,而地形测图又必须在平面上实施。用一般方法是不能将球面上的地形、地物展绘到平面上的。利用控制测量所提供的控制点的平面坐标,可以方便地将地形、地物测绘到平面图上,而不产生明显误差。

(2) 为城乡建设和矿山工程测量提供起始数据

城乡规划建设、矿产资源开发、水利兴修、交通建设等各项国民经济建设,不仅需要各种比例尺地形图进行规划设计,还必须直接利用控制测量成果进行多种工程测量工作。

在我国长江综合利用规划设计中,测设了2万多个平面和高程控制点,进行了十几万公里的水准测量;制定南水北调工程方案时,充分利用了东、中、西三条路线附近的控制测量成果;在兴修的铁路干线中,一个个隧道,一座座桥梁,它们的相继贯通、合拢,每项工程都需要优质的控制测量成果作保障;在矿产资源开发中,常常是通过不同立井的井下巷道相向掘进,在设计地点准确贯通,或者由地面向井下指定地点标定钻孔。这些都是依据控制测量成果进行计算完成标设工作的。

(3) 为地球科学的研究提供信息

传统的大地测量学是将地球视为固定不变的形体作为测绘对象的。实际上,地球从表面到内部都处在不断运动之中,地球自转轴在地球体内的方向、位置和自转角速度都在随时间而变化,地核、地幔、地壳至地表也处于不断运动之中。研究这些变化规律属于地球动力学的范畴。对于某一地区的地壳变化,可以定期重复测量该地区的大地控制网点,综合分

析、比较不同时期的控制测量资料,便可发现该地区的地壳变化情况。所谓地球板块运动的测量就是利用高精度的大地测量进行的。

(4) 在防灾、减灾和救灾中的作用

地壳变形的监测对地震学的研究具有重要的意义。例如,在地震区通过监测可以研究区域内的应变积累和能量释放、应变分析和主断层运动速率,判断其变化是均匀的还是间歇的,为中长期和临震预报提供依据。

对于大型水利工程、铁路公路建设、大型采矿场等也都需要地壳变形的准确数据,以提高地质分析和评价的可靠性。

在预防山体滑坡、城市和矿区地面沉降等地质灾害中,大地测量提供带时间维的多期或动态精密信息,通过分析及时提供灾害预报。

(5) 发展空间技术和国防建设的重要保障

空间技术与航天工程的发展水平是评估一个国家综合科技水平和综合国力的重要指标,也是评估一个国家国防能力的重要标志。卫星、导弹、航天飞行器的发射、制导、跟踪、遥控以至返回,都需要有基本的大地测量保障。大地测量提供了一个精确的地球参考框架和地面点的精确点位,同时也提供了一个精密的全球重力场模型和地面点的准确重力场参数。

未来战争是高科技战争,军事测绘保障是综合战斗力的重要组成部分。精确定位定向、准确识别地形地物要素和确定全球重力场参数是实现现代战争的基本大地测量保障,是高科技战争对军事测绘保障的基本要求。

此外,大地测量在气象预报、地球温室效应和海洋与大气污染等环境监测中也发挥着重要的作用。

三、应用大地测量学研究的内容

确定地面点位置的测量方法分为经典的测量方法与现代的测量方法两种。

传统的测量方法通常将地面控制网分为平面控制网和高程控制网。平面控制网以一定形式的图形将控制点相互联接构成网状,观测控制网中的角度、边长等要素,并将观测值归算到统一选定的计算基准面上,根据必要的起算数据,对全网进行平差计算,得到各控制点的平面位置。计算基准面的选取包括选取一个大小形状与地球形体接近的旋转椭球面以及测图投影平面。需要解决观测元素自地面向椭球面、再由椭球面向投影平面的化算问题。高程控制网由联接各控制点的水准测量路线组成,通过水准测量测得相邻水准点之间的高差,推算出各水准点的高程。为了推算各水准点的高程,必须选择一个高程基准面作为高程起算面。实际上是通过长期验潮所得的平均海水面作为高程基准面,所以控制点的高程就是超出平均海水面的高度,称其为海拔高。高程起始点(原点)的高程则是从高程基准面通过精密水准联测求得的。在所测定的高差中,还应该考虑地球外部引力、地球自身的非均质性等有关因素的影响,对观测高差进行改正,经过统一平差,确定出各水准点的高程。

现代大地测量方法(如 GPS 卫星定位等)往往同时测定控制点的空间三维位置。通过观测与数据处理,得到控制点在某一地球参考坐标系中的大地坐标(大地经度 L 、大地纬度 B 、大地高 H)或三维直角坐标 (X, Y, Z) 。实际应用中,将三维坐标转换为测图与工程测量需要的坐标系统。因此,大地坐标系的选取及其坐标系统之间的转换成为应用大地测量必须要研究的内容。

测定地面点的空间位置一般属于几何大地测量。而测定地面或空中一点的重力加速

度,或由重力测量得到地球重力场参数,并用于研究地球形状,这是纯物理或力学观点,又称为物理大地测量。应用大地测量应顾及到这一部分内容。

具体地说,应用大地测量学将着重阐述以下问题:

(1) 大地测量基本知识。着重介绍大地测量的基准面和基准线、大地测量常用坐标系和时间系统、地球重力场基本理论等内容。这是大地测量学的理论基础。

(2) 大地坐标系统的建立与坐标系统的转换是学习大地测量学的基本理论。大地坐标系统的建立主要研究地球椭球的选择及其定位、椭球的数学性质和椭球面上的计算、高斯正形投影的性质、高斯投影计算、高斯投影坐标换带计算等。坐标系统的转换包括三维坐标转换、平面坐标转换等,本书将分章介绍。

(3) 大地测量基本技术与方法。建立大地控制网所必须的观测仪器和观测方法,如精密角度测量、精密距离测量、精密高程测量、GPS 测量、重力测量等,这些都是应用大地测量学的基本内容,本书将重点介绍。

(4) 地面控制网的建立。区域、城市控制网或工程控制网依附于国家大地控制网,并以其作为起算依据。所以首先介绍国家大地控制网的建立原理、建网方法和施测过程。然后分别介绍平面控制网(三角网、三边网、导线网)、高程网、GPS 网、重力网等各种布网方式。并就布网方案、精度预计、观测作业、成果验算等内容详细论述,给出控制网设计实例。

(5) 数据处理。数据处理主要工作是平差计算,包括间接平差和按条件平差进行平面控制网、高程控制网、GPS 网等的平差计算。本书给出平差计算数学模型及其计算方法,并给出平差计算实例。

(6) 从实际应用的角度考虑,本书最后作为附件给出工程控制网设计、教学与生产实习指导书,供读者参考。

四、大地测量学的发展概况

随着科学技术的发展,人们的认识不断深化,测绘科学技术也不断丰富和发展,导致学科内容的不断扩大和新的学科的形成。

大地测量的起源可以追溯到两千多年以前。埃及在尼罗河泛滥后用测量方法解决大地区划;我国夏禹治水使用了测量距离和高低的器械准绳规矩;希腊学者根据南北不同两地的太阳方向估算地球半径,证实了地圆说。因为受社会条件、生产和科学技术水平的限制,测量仪器和测量方法都比较原始,测量精度较低。

直到 17 世纪望远镜出现,18 世纪大工业的发展,生产和技术水平得到提高,测量仪器和测量方法不断改进,人们开始用三角测量法进行大地测量。法国等一些国家用布设三角锁的方法进行弧度测量,第一次在近代地球形状理论上导出了地球椭球模型,并取其子午圈一象限弧长的千万分之一作为长度单位,计为 1 m,这是世界上通用米制的起源。从 18 世纪末开始,英、德、法、俄、美、印度和一些北非国家,先后完成了大量的三角测量,并进行了许多联测。

19 世纪和 20 世纪,是测绘理论和技术空前发展的时期。1806 年法国学者勒让德(A. M. Legendre)提出最小二乘法理论后,德国学者高斯(C. F. Gauss)应用这一原理处理天文大地测量成果,产生了测量平差法,一直应用至今。1822 年高斯还提出了椭球面投影到平面的正形投影法,这种方法目前仍在广泛应用。1846 年德国创建了卡尔·蔡司光学仪器厂,逐渐开始了光学经纬仪、水准仪等测量仪器的大规模生产。1897 年法国国际度量衡局

用膨胀系数极小的镍铁合金制成因瓦基线尺,使丈量距离的精度和速度大为提高。1920年威特(Wild)等人研制了第一台光学经纬仪,1936年威特又发明了对径重合读数法,开始生产现今仍在广泛使用的精密光学经纬仪。1948年和1957年世界上先后出现了光电测距仪和微波测距仪,从根本上改变了精密距离测定方法。

随着电磁波测距技术、电子测角技术、计算机技术的迅速发展,经典的测量技术向着自动化、智能化的方向迅速发展。数据采集、数据传输、数据处理与存储正在实现全流程的自动化,其精度愈来愈高,功能愈来愈强,适用性愈来愈广。

人造地球卫星的上天,空间技术的发展,为大地测量的根本性变革创造了条件。全球定位系统(GPS)从开始应用于大地测量,就以其特有的自动化、全天候、高效益的显著优势显示出了强大的生命力。目前,GPS定位网正在全面取代传统的三角网。

五、我国大地测量概况

公元724年,唐代的南宫说等人在张遂(一行)的指导下,在今河南省滑县至上蔡实测了一条约300 km的子午弧长,并在滑沟、开封、扶沟、上蔡四个地方,测量了同一时刻的日影长和北极星高度,日影长之差或北极星高度之差代表了纬度差。这是世界上第一次弧度测量的实践。

1708~1718年清代康熙年间,为编制《皇舆全图》进行了大规模的天文大地测量,就已发现了高纬度东北地区每度子午弧长比低纬度河北地区的要长。

1930~1949年开始正规的大地测量,共布测了930个一等三角点的大地控制网,73个一等天文点,约5 000 km的一等水准测量。

1956年我国成立了国家测绘总局,随即颁布了大地测量法式和相应的细则规范。在全国范围内布测了总长度近8万 km包括120多个锁环的一等三角锁。在锁环中间又布测了二等全面三角网,青藏高原地区布测电磁波测距导线。20世纪70年代末期,对我国全部一等锁环和二等全面网以及部分三等网(约5万个三角点)进行了整体平差,建立了1980年西安大地坐标系。1985年,完成了对9万多千米的一等水准网的平差计算,建立了1985年国家高程基准。

20世纪70年代中期开始,我国布设了37个点组成的卫星多普勒网,用卫星测量方法完成了西沙群岛、南沙群岛的大地联测。

1981~1987年建立了1985国家重力基本网。该网由57个基本重力点和100多个一等重力点组成,重力点的布设密度基本上达到了 $15' \times 15'$ 范围内一点的要求。

20世纪90年代开始,全国布测了A级GPS网点33个,B级GPS网点730个,进行了9万多千米的一等水准网的复测。各省市分别布测了C级GPS网。

2000年完成了2000国家似大地水准面的计算,格网分辨率为 $5' \times 5'$,内部和外部检核精度达到 $\pm(30 \sim 60)$ cm;2002年完成了2000国家重力基本网的施测和计算,包括259个重力点,精度为 $\pm(7 \sim 8) \times 10^{-8}$ m/s²;2003年完成了2000国家GPS网的计算,包括A、B级GPS网,中国地壳监测网络工程中的GPS基准网、基本网和区域网,共有28个GPS连续运行站、2 518个GPS网点,相对精度为 10^{-7} 。

目前,GPS与卫星激光测距(SLR)、甚长基线干涉测量(VLBI)结合的现代空间大地测量技术正向扩大应用面的方向发展。建立了大地测量地心坐标系,测定地球重力场,用于地球动力学现象的监测。建立了各类地图的控制网,用于各种工程测量和海洋大地测量。

第二章 大地测量基础知识

本章介绍大地测量的基准面、基准线,大地测量坐标系统、时间系统,地球重力场基本理论,研究地球形状的基本概念等基础知识,了解大地测量的工作基准和计算基准,为以后各章的学习奠定理论基础。

第一节 大地测量的基准面和基准线

大地测量是在地球自然表面上进行的,这个表面高低起伏、很不规则。在地球自然表面上无法计算和处理测量成果,需要选择与地球形体极为接近的、可用数学公式表示的、能确定其与地球相关位置的表面作为基准面,以计算测量成果。

一、水准面和大地水准面

如图 2-1 所示,地球上任何一个质点 K ,都同时受到两个力的作用,一个是由于地球自转产生的离心力 P ,一个是地心引力 F ,这两个力的合力称为重力 G 。重力的方向即为铅垂线方向。

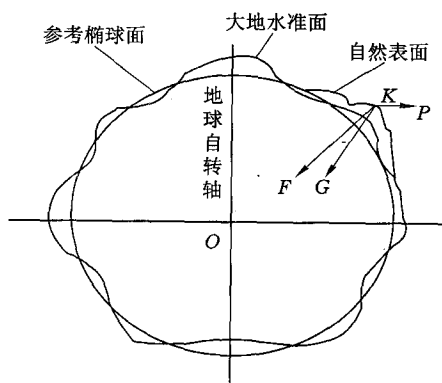


图 2-1 大地水准面与铅垂线

在野外测量时,常常要整置仪器,使仪器垂直轴与通过地面点的铅垂线一致。由此可见,铅垂线就是野外测量工作的基准线。处于静止状态的液体表面处处与重力方向正交,否则液体就要流动。静止的液体表面称为水准面。通过不同高度的点,都有一个水准面,所以,水准面有无数多个。

在不同测站上观测的水平角就是在高低不同的水准面上的角度,水准测量所测得的两点间的高差,是过这两点的不同水准面间的铅垂线长度;对于距离的观测值,也存在换算到哪个高程面的问题。所以,水准面就是野外测量工作的基准面。

上述三类观测值,特别是水准测量的结果,直接取决于水准面的选择。为了使测量成果

有一个共同的基准面,可以选择十分接近地球表面又能代表地球形状和大小水准面作为共同的统一的基准面。

设想海洋处于静止平衡状态时,将它延伸到大陆下面且保持处处与铅垂线正交的包围整个地球的封闭的水准面,我们称它为大地水准面。它所包围的形体称为大地体。我们选取大地水准面作为野外测量的统一基准面,而与其相垂直的铅垂线则是野外测量的基准线。

二、地球椭球

虽然大地水准面最适合于作为测量外业的基准面,但大地水准面是一略有起伏的不规则曲面,如图 2-2 所示。由于地表起伏不平、地壳内部物质密度分布不均匀,使得重力方向产生不规则变化。由于大地水准面处处与铅垂线正交,所以大地水准面是一个无法用数学公式表示的不规则曲面。故大地水准面不能作为大地测量计算的基准面。

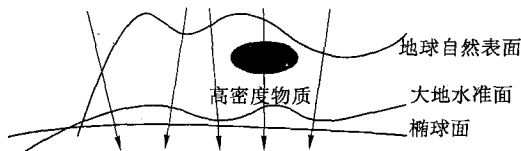


图 2-2 地球表面与大地水准面

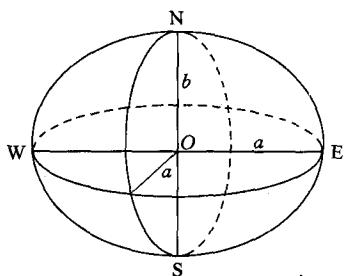


图 2-3 地球椭球体

大地体表面的不规则起伏并不大。从整体上看,大地体接近于一个具有极小扁率的旋转椭球。对于这样一个规则的几何形体表面,可以用数学公式将它准确地表达出来,因而世界各国都采用旋转椭球代表地球。它的形状和大小与椭球的长、短半径 a 和 b 有关。如图 2-3 所示, O 为椭球中心, WE 为长轴, NS 为短轴,椭球体就是椭圆绕其短轴 NS 旋转而成的几何形体。椭球的大小和形状取决于它的长半径 a 和短半径 b 。习惯上常常用长半径 a 和扁率 α 表示椭球的形状和大小。

a, b 或 a, α 一般称为地球椭球的几何参数。它们之间的关系有:

$$\alpha = (a - b) / a \tag{2-1}$$

椭球面是一个规则的数学曲面。选择一定形状和大小的椭球后,应该将以大地水准面为基准面的野外观测成果换算到这个椭球面上,在它上面计算点位坐标。要做到这一点,还必须将它与大地水准面的相关位置确定下来,这项工作称为椭球定位。

我们把形状和大小与大地体相近,且两者之间相对位置确定的旋转椭球称为参考椭球。参考椭球面是测量计算的基准面,椭球面法线则是测量计算的基准线。

世界各国总是根据本国的地面测量成果选择一个适合本国情况的参考椭球,因而参考椭球有许多个。表 2-1 给出了有代表性的几个参考椭球元素。

表 2-1 部分参考椭球元素

参考椭球名称	推求年代	长半径 a /m	扁率 α
贝塞尔	1841	6 377 397.155	1 : 299.152 812 8
克拉克	1866	6 378 206.4	1 : 294.978 698 2

续表 2-1

参考椭球名称	推求年代	长半径 a /m	扁率 α
赫尔墨特	1906	6 378 140	1 : 298.3
海福特	1909	6 378 388	1 : 297.0
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	1 : 298.3
1967 年大地坐标系	1971	6 378 160	1 : 298.247 167 427
国际大地测量与地球物理联合会 IUGG 十六届大会推荐值	1975	6 378 140	1 : 298.257
IUGG 十七届大会推荐值	1979	6 378 137	1 : 298.257
IUGG 十八届大会推荐值	1983	6 378 136	1 : 298.257
WGS-84	1984	6 378 137	1 : 298.257 223 563

如果将各国的测量成果联系起来进行国际间合作测量,参考椭球的不同会给联合测量带来很多不便。因此,从全球着眼,必须寻求一个和整个大地体最为接近、密合最好的椭球,这个椭球又称为总地球椭球或平均椭球。总地球椭球满足以下条件:

- (1) 椭球质量等于地球质量,两者的旋转角速度相等。
- (2) 椭球体积与大地体体积相等,它的表面与大地水准面之间的差距平方和为最小。
- (3) 椭球中心与地心重合,椭球短轴与地球平自转轴重合,大地起始子午面与天文起始子午面平行。

确定总地球椭球必须在整个地球表面上布测联成一体的天文大地网并进行全球性的重力测量,这在过去是无法实现的。近年来,由于卫星大地测量技术的发展,根据卫星和陆地大地测量的成果才有可能求出总地球椭球的参数。

三、垂线偏差

由于大地水准面与椭球面不可能处处重合,因而在同一测站点上铅垂线与椭球面法线也不会重合(图 2-4)。两者之间的夹角 u 称为垂线偏差。由于地球内部质量分布不均匀以及椭球大小、形状和定位情况的不同,垂线偏差的大小和方向随点位不同发生不规则的变化。垂线偏差 u 通常用南北方向上的投影分量 ξ 和东西方向上的投影分量 η 来表示。

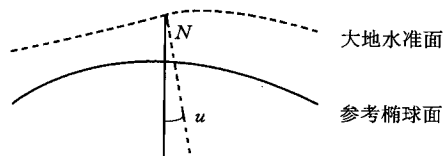


图 2-4 垂线偏差与大地水准面差距

大地水准面与椭球面在某一点上的高差称为大地水准面差距,用 N 表示。

垂线偏差和大地水准面差距对确定天文坐标与大地坐标的关系、地球椭球的定位以及研究地球的形状和大小等问题有着重要的意义。

第二节 常用大地测量坐标系统

地面或空中一点在空间的位置可以用不同的坐标系统来表示。下面介绍大地测量常用的坐标系统。

一、天球与天球坐标系

天球是以地球空间任意一点为中心,半径为无穷大的理想球体。当然,地球质心也可作为天球中心,地球自转轴延伸成为天轴,天轴与天球交点为天极,地球赤道面与天球交线称为天球赤道。地球绕太阳公转的轨道平面与天球交线为黄道,通过天球中心且垂直于黄道平面的直线与天球交点叫黄极。太阳由南半球向北半球运动所经过的天球黄道与天球赤道的交点叫“春分点”。春分点对定义天球坐标系有着重要的意义。

图 2-5 表示天球直角坐标系与球面坐标系。天球直角坐标系的原点 O 一般定义为地心, Z 轴与地球自转轴重合, XY 平面与赤道面重合, X 轴指向赤道上的春分点 γ 。天球球面坐标系基准面是天球赤道面,基准点是春分点。由于地球自转轴以及春分点基本不动,所以天球坐标系在空间是一个固定的坐标系。

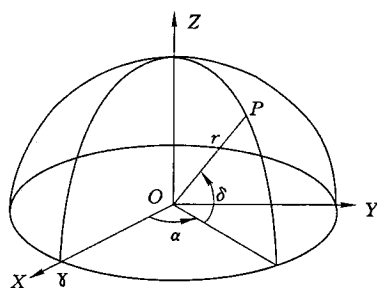


图 2-5 天球坐标系

在天球坐标系中,空中一点 P 的天球坐标可表示为球面坐标 (r, α, δ) 和直角坐标 (X, Y, Z) 。

r 为坐标原点至 P 点的距离(r 设为有限距离), δ 为赤纬, α 为赤经, X, Y, Z 则分别表示 P 点的三个直角坐标分量,不难得出球面坐标与直角坐标之间的关系:

$$\left. \begin{aligned} X &= r \cos \alpha \cos \delta \\ Y &= r \sin \alpha \cos \delta \\ Z &= r \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \alpha &= \arctan(Y/X) \\ \delta &= \arctan(Z/\sqrt{X^2 + Y^2}) \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

描述人造卫星的位置采用天球坐标系是很方便的,而描述天空中的恒星在天球坐标系中的坐标则用 (α, δ) 表示,因为恒星至地球的距离为无穷远。

针对地球自转轴不同的指向,可以定义不同的天球坐标系,如瞬时极天球坐标系与平天球坐标系,它们之间有一定的转换关系(详见第七章)。

二、地球坐标系

1. 天文坐标系

地面点 P 在大地水准面上的位置用天文经度 λ 和天文纬度 φ 表示。若地面点 P 不在大地水准面上,它沿铅垂线到大地水准面的距离 PP' 称为正高 $H_{正}$,如图 2-6 所示。

在图 2-6 中, O 为地球质心, ON 为地球自转轴, N 为北极点, P 点为地面或空中任意一点, PP' 为 P 点的垂线方向。包含 P 点垂线方向并与地球自转轴 ON 平行的平面称为 P 点的天文子午面。 G 点为英国格林尼治平均天文台位置。过 G 点包含 ON 的平面称为起始天文子午面。过地球质心并与 ON 正交的平面称为地球赤道面。天文子午面、地球赤道面分别与大地水准面的交线称为天文子

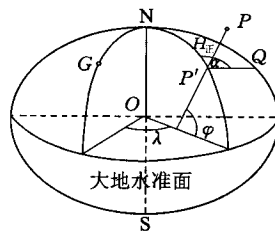


图 2-6 天文坐标系

午线和地球赤道。 P 点的垂线方向与赤道面交角 φ 称为 P 点的天文纬度,由赤道起算,从 0° 到 90° ,向北为正,称为北纬;向南为负,称为南纬。 P 点的天文子午面与起始子午面的夹角 λ 称为 P 点的天文经度,由起始子午面起算,向东为正,叫东经,向西为负,叫西经。 φ 、 λ 定义为 P 点的天文坐标。天文坐标方位角 α 的定义是:过 P 点铅垂线和另一地面点 Q 所作的垂直面与过 P 点的天文子午面的夹角 α 称为 PQ 方向的天文方位角,从 P 点的正北方向起始由 0° 到 360° 顺时针方向量取。

以上定义仅为一般概念上的天文坐标系,未讨论地轴的指向问题(详见第七章)。

2. 大地坐标系

大地坐标系规定以椭球的赤道为基圈,以起始子午线(过格林尼治的子午线)为主圈。对于任意一点 P ,其大地坐标为 (L, B, H) 。

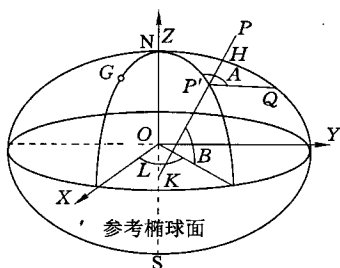


图 2-7 大地坐标系与空间大地直角坐标系

在图 2-7 中, O 为椭球中心, NS 为椭球的旋转轴(与地球自转轴平行), N 为北极, S 为南极, P 点为地面或空中任意一点, PP' 为 P 点的法线方向。包含 P 点法线方向与旋转轴 NS 的平面称为过 P 点的大地子午面。 G 点为英国格林尼治平均天文台位置,过 G 点与 NS 的平面称为起始大地子午面。子午面与椭球面的交线称为子午圈或子午线。垂直于旋转轴 NS 的平面与椭球面的交线称为平行

圈,过椭球中心的平行圈称为赤道。

大地经度 L ——过 P 点的椭球子午面与格林尼治的起始子午面之间的夹角。由起始子午面起算,向东为正,向西为负。

大地纬度 B ——过 P 点的椭球面法线与椭球赤道面的夹角。由赤道起算,从 0° 到 90° ,向北为正,向南为负。

大地高 H ——由 P 点沿椭球面法线至椭球面的距离。

大地方位角 A 的定义是:过 P 点和另一地面点 Q 点的大地方位角 A 就是 P 点的子午面与过 P 点法线及 Q 点的平面所成的角度,由子午面顺时针方向量起。

以上定义仅为一般概念上的大地坐标系,未讨论具体的参考椭球形状和大小以及旋转轴的指向问题。大地坐标系又叫参心(参考椭球中心)坐标系。选取的参考椭球不同或椭球定位不同,会产生不同的参心坐标系。参心坐标系对于地形图的测绘是较好的坐标系。

大地坐标系与天文坐标系通常称为地理坐标系,它们之间的区别见表 2-2。

表 2-2 大地坐标系与天文坐标系

项 目	大地坐标系	天文坐标系
基准面、线	参考椭球面、法线	大地水准面、铅垂线
坐标起算面	起始大地子午面、椭球赤道面、参考椭球面	起始天文子午面、地球赤道面、大地水准面
地理经度	L 为起始大地子午面与测站大地子午面间夹角	λ 为起始天文子午面与测站天文子午面间夹角
地理纬度	B 为椭球面法线与椭球赤道面夹角	φ 为铅垂线与地球赤道面夹角

续表 2-2

项 目	大地坐标系	天文坐标系
高 程	H 为沿法线至参考椭球面的距离	$H_{\text{正}}$ 为沿铅垂线至大地水准面的距离
方位角	A 为大地子午面与包含照准点的法截面间的夹角	α 为天文子午面与包含照准点的垂直面间的夹角
取得地理坐标的方法	地面上测角、边在椭球面上推算求得	通过天文观测直接测得
地理坐标的特点	依附于椭球面法线,各点大地坐标相关,计算求得,精度高	依附于铅垂线,各点天文坐标独立,观测求得,精度较低

3. 空间大地直角坐标系

空间大地直角坐标系是与大地坐标系相应的三维大地直角坐标系。如图 2-7 所示,空间大地直角坐标系的原点 O 为椭球中心, Z 轴与椭球旋转轴一致,指向地球北极, X 轴与椭球赤道面和格林尼治平均子午面的交线重合, Y 轴与 XZ 平面正交,指向东方, X 、 Y 、 Z 构成右手坐标系, P 点的空间大地直角坐标用 (X, Y, Z) 表示。

对于用同一个旋转椭球定义的地面或空间某一点的大地坐标 (B, L, H) 与空间大地直角坐标 (X, Y, Z) 之间有如下的关系:

$$\left. \begin{aligned} X &= (N + H) \cos B \cos L \\ Y &= (N + H) \cos B \sin L \\ Z &= [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

4. 地心坐标系

定义大地坐标系时,如果选择的旋转椭球为总地球椭球,椭球中心就是地球质心,再定义坐标轴的指向,此时建立的大地坐标系叫做地心坐标系。

地心坐标系分为地心空间大地直角坐标系和地心大地坐标系两种。

地心空间大地直角坐标系的原点位于地球的质心,其坐标轴的指向,不同国家又有所不同。国际上习惯的坐标轴的指向是 OZ 轴指向国际协议(习用)原点 CIO , OX 轴与 OZ 轴垂直,位于格林尼治平均天文台子午面上, OY 轴和 OZ 轴、 OX 轴构成右手坐标系。

和大地坐标系的定义一样,地心大地坐标系则是对应于其中心与地球质心重合的、与全球大地水准面最为密合的椭球,其短轴的指向与上述地心空间大地直角坐标系一样,通常指向 CIO 。

地心坐标系统在空间技术和卫星大地测量中获得广泛应用。

三、站心坐标系

站心地平直角坐标系的定义是:原点位于地面测站点 P , z 轴指向测站点的椭球面法线方向(又称大地天顶方向), x 轴是过原点的大地子午面和包含原点且和法线垂直的平面的交线,指向北点方向, y 轴与 x 、 z 轴构成左手坐标系。

类似于球面坐标系和直角坐标系,测站 P 至另一点(如卫星) S 的距离为 r 、方位角为 A 、高度角为 h ,构成站心地平极坐标系。

如图 2-8 所示,原点在测站 P 点的站心地平直角坐标系 $P-xyz$ 与站心地平极坐标系 $P-rAh$ 。 P 点的地心大地坐标为 (B, L, H) , P 点的地心空间大地直角坐标为 (X, Y, Z) 。

$P-xyz$ 与其相等价的 $(P-rAh)$ 之间有下列关系: