

高等学校教材

· 887052

# 应用大地测量学

YINGYONGDADICELIANGXUE

陈健 薄志鹏 主编



测绘出版社

# 应用大地测量学

陈健 薄志鹏 主编

测绘出版社

## 内 容 简 介

本书系统介绍了建立国家大地控制网的理论、方法和仪器，包括国家水平控制网和国家水准网的布设原则、各种常规观测方法及常用仪器（经纬仪、测距仪、水准仪）等，并涉及常规理论、技术和方法的新发展。

本书为高校大地测量专业教材，也可供有关科技人员参考。

### 应用大地测量学

陈 健 薄志鹏 主编

\*

测绘出版社出版

测绘出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

\*

开本 787×1092 1/16 · 印张 24 · 字数 543 千字

1989年6月第一版 · 1989年6月第一次印刷

印数 0.001—1,500 册 · 定价 4.80 元

ISBN 7-5030-0202-6/P·83

## 前 言

大地测量学是大地测量专业的一门主要课程。近二十年来，由于电子学和空间技术的迅速发展，使大地测量学已进入以空间技术为特征的新阶段。显然，在一门课程内要容纳如此众多的内容，在教材组织与教学安排上是有困难的。所以，目前我们把大地测量学的内容分为常规技术和现代新技术两个部分。前者属经典大地测量学，后者包括卫星大地测量学和惯性大地测量学等，并单独开设课程。为适应教学体制改革的需要，便于学分制教学计划的安排，经典大地测量学部分又分为应用大地测量学和椭球大地测量学两门课程。本书就是为大地测量专业本科学生编写的一本应用大地测量学教材。

应用大地测量学主要研究用常规的方法建立测量控制网的理论和方法。近十多年来，常规大地测量的仪器、理论和方法也有许多新的发展。例如，各种电磁波测距仪、精密自动安平水准仪、电子经纬仪、三边测量方法等新仪器、新技术已广泛应用于大地测量实践；大地网强度分析中引进了可靠性理论；大地网的设计理论已建立在精度、经济性和可靠性全面质量标准的基础上，从而获得最佳设计方案。这种理论和方法得到迅速发展并日趋成熟。

考虑到上述情况，我们在编写本教材时，除加强基本理论和方法的叙述外，力求做到理论联系实际，删繁就简，尽量反映近二十年来的新发展。

本书由陈健和薄志鹏两同志主编，参加编写工作的有：卞兴华、史树森、李堃、吴祖仰、张学廉、徐绍铨、晁定波等同志。

本书承徐正扬副教授、沈禹跡教授初审，金国雄教授复审，并经测绘教材委员会审定。在审定过程中提出了许多宝贵意见和建议，在此谨致以衷心的感谢。对书中可能存在的错误和不足之处，我们恳切希望读者予以指正。

编 者

一九八八年元月

史树森 101

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
§ 1.1 大地测量学的定义和任务.....	( 1 )
§ 1.2 大地测量的基本概念和方法.....	( 3 )
§ 1.3 大地测量学发展简史.....	( 8 )
§ 1.4 大地测量新技术.....	( 10 )
<b>第二章 国家水平大地控制网</b> .....	( 17 )
§ 2.1 概述.....	( 17 )
§ 2.2 水平控制网的测量方法.....	( 17 )
§ 2.3 国家水平控制网的布设原则.....	( 19 )
§ 2.4 我国天文大地网的布设.....	( 20 )
§ 2.5 我国天文大地网整体平差.....	( 33 )
§ 2.6 国家水平控制网布设的具体实施.....	( 35 )
§ 2.7 大地控制网的可靠性理论.....	( 40 )
§ 2.8 大地控制网的优化设计.....	( 50 )
<b>第三章 精密经纬仪</b> .....	( 58 )
§ 3.1 概述.....	( 58 )
§ 3.2 望远镜.....	( 59 )
§ 3.3 度盘.....	( 64 )
§ 3.4 水准器.....	( 67 )
§ 3.5 读数设备.....	( 70 )
§ 3.6 轴系.....	( 83 )
§ 3.7 安放设备.....	( 87 )
§ 3.8 垂直度盘及其指标.....	( 90 )
§ 3.9 经纬仪各轴的误差对测量结果的影响.....	( 94 )
§ 3.10 度盘倾斜误差, 照准部偏心差和水平度盘偏心差.....	( 103 )
§ 3.11 电子经纬仪与电子速测仪.....	( 110 )
<b>第四章 水平角观测</b> .....	( 117 )
§ 4.1 光标与司光工作.....	( 117 )
§ 4.2 水平角观测的误差来源及其影响.....	( 119 )
§ 4.3 水平角观测方法概论.....	( 125 )
§ 4.4 方向观测法.....	( 127 )
§ 4.5 全组合测角法.....	( 136 )

§ 4.6	三方向法	(145)
§ 4.7	特殊情况下的水平角观测方法	(151)
§ 4.8	观测成果的分析 and 处理	(153)
§ 4.9	归心改正	(159)
§ 4.10	观测工作的实施	(167)
<b>第五章</b>	<b>精密距离测量</b>	<b>(170)</b>
§ 5.1	概述	(170)
§ 5.2	用因瓦线尺丈量距离	(171)
§ 5.3	电磁波测距方法	(180)
§ 5.4	JCY-2型激光测距仪	(183)
§ 5.5	JCY-2型激光测距仪的使用方法	(201)
§ 5.6	激光测距的误差分析和多载波测距仪	(215)
§ 5.7	AGA-600激光测距仪	(221)
§ 5.8	微波测距仪简介	(231)
§ 5.9	微波测距观测成果的整理	(235)
§ 5.10	微波测距主要误差来源的分析	(236)
§ 5.11	微波测距仪的检验	(240)
§ 5.12	电磁波测距的现状和发展	(241)
<b>第六章</b>	<b>精密导线测量</b>	<b>(243)</b>
§ 6.1	概述	(243)
§ 6.2	导线测量的误差理论	(243)
§ 6.3	精密导线的设计原理	(249)
§ 6.4	精密导线的布设方案	(254)
§ 6.5	精密导线测量的作业方法	(255)
§ 6.6	导线测量成果的验算	(257)
§ 6.7	高精度导线测量概述	(260)
<b>第七章</b>	<b>精密水准测量</b>	<b>(265)</b>
§ 7.1	国家水准网	(265)
§ 7.2	精密水准仪和精密水准尺	(270)
§ 7.3	精密水准仪的检验和校正	(283)
§ 7.4	精密水准尺的检验	(293)
§ 7.5	精密水准测量的误差来源及其影响	(300)
§ 7.6	精密水准测量的作业方法	(316)
§ 7.7	跨河水准测量	(322)
§ 7.8	水准测量的精度估算	(331)
<b>第八章</b>	<b>三角高程测量</b>	<b>(335)</b>
§ 8.1	基本原理	(335)

§ 8.2	野外作业方法	( 338 )
§ 8.3	高差计算的实用公式	( 340 )
§ 8.4	地面大气垂直折光系数的测定	( 344 )
§ 8.5	三角高程测量的精度和应用	( 346 )
§ 8.6	高程起算点的测定	( 351 )
§ 8.7	外业验算	( 353 )
<b>第九章</b>	<b>高程系统</b>	<b>( 356 )</b>
§ 9.1	重力和重力位水准面	( 356 )
§ 9.2	正常重力和正常位水准面	( 359 )
§ 9.3	正高	( 359 )
§ 9.4	近似高	( 361 )
§ 9.5	正常高	( 364 )
§ 9.6	力高	( 367 )
§ 9.7	地球位数	( 368 )
§ 9.8	大地高	( 368 )
§ 9.9	关于高程系统的小结	( 370 )
<b>附录 D1</b>	<b>20 测距仪简要操作说明</b>	<b>( 372 )</b>

# 第一章 绪 论

## § 1.1 大地测量学的定义和任务

大地测量学既是一门应用地球科学，也是一门基础地球科学。从现代大地测量的实践来看，它是地球物理学和工程学的一个分支。大地测量学 (Geodesy) 一词来源于希腊语，意即“我划分地球”。按照赫尔默特 (F.R.Helmert 1880) 的定义，大地测量学是“测定和描绘地球表面的科学”。这一经典定义至今仍然适用。

传统的大地测量学大体上是把地球看作为一个不变的形体而作为自己测绘的对象，实际上不论地球表面和内部的构造都是运动着的，例如地球自转轴在地球体内的位置和自转角速度是随时间变化的；地核、地幔、地壳以至地表也是处于不断运动之中。研究这种变化规律是属于地球动力学的范畴。大地测量学的任务之一是监测这种变化以提供地球动力学信息。除了局部地区的地壳形变外，这种动态现象是全球性或洲际性的，变化的数量级小于或接近于传统大地测量精度的量级。由于传统的地面大地测量方法难以实施精密的全球或洲际的测量，因此限制了其监测地球动态现象的功能。直到近 20 年来空间大地测量方法的迅速发展，这一局限性有所突破。现代大地测量实践已开始把它所要确定的量看作是随时间而变化的量。由此，大地测量学可以认为是“测定和描绘地球表面并监测其变化的学科”，这只是对经典定义略加补充。

根据上述定义，现代大地测量学的基本任务可概括如下：

1. 在地球陆地上建立和保持国家的和全球的三维大地测量控制网，并监测这些网随时间的变化量。
2. 测定并描述地球动力学现象（极移、地球潮汐以及地壳运动）。
3. 确定地球重力场及随时间的变化量。
4. 根据地球表面和外部空间的观测数据确定地球形状和平均地球椭球体。

随着海洋开发日益受到重视，在广大的海洋，特别是在近海区域建立大地测量控制也将是现代大地测量学面临的一项艰巨任务。

上述任务包括大地测量学的科学和技术内容两个方面，二者密切相关。

大地测量按其所研究的地球表面范围大小和所要解决的相应课题，可分为全球大地测量、国家大地控制测量和平面测量。全球大地测量又称为理论大地测量，它是以整个地球形体为研究对象。它的任务是整体地测定地球形状及其外部重力场。它解决大地测量学的基本科学问题。国家大地控制测量是在一个适当选定的参考坐标系中，测定一批足够数量的地面点的坐标，建立国家统一的点位控制网，以满足测绘地形图和工程建设的需要，这些点称为国家大地控制点。较大范围的大地控制测量通常必需顾及地球的曲率。平面测量学又称为测量学，习惯上把它看成一个单独的学科，但根据大地测量学的一般定义，严格



说来也是大地测量学的一个组成部分。它是在一个局部小范围内测定地球表面的细部，通常略去地球曲率，而以水平面作为参考面。

全球大地测量、国家大地控制测量和平面测量之间存在着密切的联系和相互作用。国家大地控制测量需要全球大地测量所确定的地球的几何或物理参数，以便对观测结果进行顾及地球曲率和重力影响的归算。而国家大地控制测量的结果又为全球大地测量提供地球表面的几何和物理（地球重力场）量度信息。平面测量必须与国家大地控制网相连接，以使其成果纳入国家统一的坐标系中。

大地测量学按其研究的地球的空间属性又分为几何大地测量学和物理大地测量学。几何大地测量学是研究如何将地面大地控制网点投影到一个规则的参考曲面（参考椭球面）上，以及所形成的图形的几何性质和点的相对位置关系，在传统大地测量中它构成地面应用大地测量观测数据预处理的数学基础。由于它可归结为研究椭球面上与大地测量有关的数学问题，故又称椭球大地测量学。物理大地测量学则是研究全球或局部范围内的地球外部重力场，即重力位等位面的性质，以及由于地球内部质量异常分布和迁移，地外星体引力引起的异常重力场分量及其变化等。

意大利大地测量学家马鲁西（Marussi, A）于1949年提出将大地测量学所研究的几何空间和物理空间（重力空间）统一起来的意见。对于一个地面点除三个几何空间坐标外，他建议引入三个重力空间坐标，即该点的重力矢量的两个球面坐标（天文经纬度）和重力位值，由此建立重力场的微分几何学，即所谓的内蕴大地测量学（Intrinsic geodesy）。他还考虑引入时间变量，这样就可以在一个全球唯一的时间空间坐标系中来处理大地测量问题。英国大地测量学家霍汀（Hotine）于1967年也提出类似的概念，名为微分大地测量学（Differential geodesy）。这一思想后来又为丹麦大地测量学者克拉鲁普（Krarup）等人发展为整体大地测量学（Integrated geodesy）。其主要特点是将大地测量的一切几何观测量和物理观测量放在一个统一的数学模型中处理。这种观点已经引起各国大地测量学家的重视，并开始进入实用实验阶段，但目前还不能取代传统的几何大地测量和物理大地测量。

大地测量学按实现其基本任务的技术手段，又可分为地面大地测量学（即传统大地测量学）、空间大地测量学和惯性大地测量学。地面大地测量学是直接测定地面点群之间的几何元素来实现地面点的相对定位。空间大地测量学是通过观测地外目标（人造地球卫星、类星体射电源等）来实现地面点的定位（包括相对定位和相对于地球质心坐标系的绝对定位）。惯性大地测量是利用运动物体的惯性力学（牛顿力学）原理进行地面点之间的相对定位。

以上概述了一般定义下大地测量学所研究的各个领域和方面。本书的内容是系统叙述地面大地测量学，讨论建立国家大地控制网的理论、技术和方法。它和国家经济建设和国防建设关系最为密切，属于实用技术，被称为应用大地测量学。至于大地测量的其它研究领域，如椭球大地测量学、物理大地测量学、空间大地测量学和惯性大地测量学等，将分别在其它有关课程中叙述。

## § 1.2 大地测量的基本概念和方法

根据大地测量的定义，它所研究的问题是如何正确地测定和描绘地球。因而科学地认识地球形体，并由此建立适当的用以描绘地球的坐标系就成为大地测量理论和方法的基础。

### 1.2.1 大地体、平均地球椭球和参考椭球

整个地球的自然表面是地球的真实形状，它是由大陆地面和不受干扰的水域表面所围成的形体。地面测量是在地球表面上进行的，测绘地球表面的细部是测量学、航空摄影测量学和地图制图学的任务。确定地球整个形体的尺寸和曲率则是理论大地测量学的任务。

地球的自然形体是很不规则的，有高达 8848m 的珠穆朗玛峰，有深达 11022m 的马里亚纳海沟（位于太平洋西部）。这个表面不能用简单的数学模型来定义和表达。因此需要寻求一个可以用数学方法精确描述的地球模型来逼近它。地球表面 70% 是海洋面，设想把海洋面按一定规则延伸并包围整个地球，这个形体就是地球自然形体的一个很好的近似。由于海洋的潮汐和波浪起伏，它是一个不断变化的表面，要精确描述它同样十分困难。为此引入地球重力位水准面来代替自然海洋面。

地球表面上任一点同时受着地球本身对该点产生的两种主要作用力，一是地球总质量对这一点的引力，二是这一点随地球自转受到的离心力。两者的合力称为这一点的重力。重力方向就是这一点的铅垂方向（见图 1-1）。由于离心力与引力之比约为  $1/300$ ，而月亮和太阳对地球表面一点的引力的影响大约是这点重力的  $10^{-3}$ ，因此除精密重力测量外一般可不顾及太阳和月亮对地面点的引力影响。地球的引力和离心力形成地球重力场。重力场中每一点都具有确定的重力位能，所有重力位等于某一定值的点形成一个重力位等位面，它是一个封闭的曲面。因此地球重力场中有无穷个等位面，它们既不相交也不平行，并处处和其表面上的重力方向正交。一个处于静止状态的水面就是一个重力位等位面。因此重力位等位面又称水准面。把海水看作只受地球重力场作用的自由运动着的物质，整个地球海水水体看作是一均匀质体，当达到重力平衡状态后，其表面就是一个重力位水准面，设想它在大陆下面是连续的（譬如通过一个跨越大陆的连通管系统），由这样一个理想化的海洋面所形成的水准面就称为大地水准面。其所包围的形体称为大地体。这是从物理意义上对地球形状的一个定义。大地体很接近于地球的真实形状，所以大地水准面是用以代表地球形状的物理面。大地水准面可以根据力学原理用重力位  $W = W_0$ 。（常数）的数学方程来表达。当然，这个方程的具体形式是很复杂的。由于地球内部质量分布不均匀，即地球内部密度的不均匀变化，使得大地水准面成为一个复杂曲面，不能用有限个参数精确表达它。显然在这个曲面上也难以进行大地测量的几何解算。所以必须寻找一个数学性

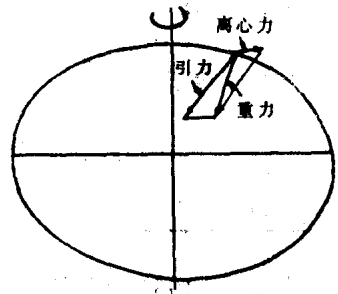


图 1-1

地球海水水体看作是一均匀质体，当达到重力平衡状态后，其表面就是一个重力位水准面，设想它在大陆下面是连续的（譬如通过一个跨越大陆的连通管系统），由这样一个理想化的海洋面所形成的水准面就称为大地水准面。其所包围的形体称为大地体。这是从物理意义上对地球形状的一个定义。大地体很接近于地球的真实形状，所以大地水准面是用以代表地球形状的物理面。大地水准面可以根据力学原理用重力位  $W = W_0$ 。（常数）的数学方程来表达。当然，这个方程的具体形式是很复杂的。由于地球内部质量分布不均匀，即地球内部密度的不均匀变化，使得大地水准面成为一个复杂曲面，不能用有限个参数精确表达它。显然在这个曲面上也难以进行大地测量的几何解算。所以必须寻找一个数学性

质简单的几何形体来逼近它。早在 1687 年牛顿就从理论上证明, 如果地球在其发展过程中曾经处于旋转的炽热液体状态, 则根据他自己所发现的万有引力定律, 地球表面在离心力的作用下应该是一个两极略扁的扁球, 其形体与一个由母椭圆(其长轴为  $a$ , 扁率为  $\alpha$ ) 绕其短轴旋转而形成的旋转椭球极为接近。这一理论的正确性已为以后的多次实测结果所证实。当选择一个旋转椭球体来逼近大地体时, 随逼近条件的不同就得出不同的地球椭球。一般总希望得到一个不论在几何上或物理性质上都与大地体最为接近的地球椭球。例如可以要求椭球的总质量等于地球总质量, 它的中心与地球质心重合, 它的短轴与地球自转轴相合, 两者旋转角速度相等, 椭球表面与大地水准面之间差距(全球的)的平方和最小等。按这些逼近条件所决定的地球椭球称为总地球椭球, 或简称总椭球, 也称平均椭球。

为了推求总椭球元素(长半轴和扁率), 需要整个地球表面(包括海洋面)的测量资料(例如大地测量、天文测量和重力测量的资料), 这在过去是不可能或极为困难的。因而总椭球的推求长期以来是大地测量工作者梦寐以求而又无法实现的一个目标。直到 60 年代以后, 有了人造卫星并建立起卫星测地理论之后, 这个理想才得以基本实现, 且所求得总椭球元素日趋精密。

历史上, 各个国家或地区为了各自大地测量的需要, 都是根据一个国家或几个国家的大地测量资料来推求与一个国家或地区范围内的大地水准面最为接近的椭球体, 称为参考椭球, 作为处理地面大地测量观测数据的计算根据面。一百多年来, 大地测量工作者先后推求了许多参考椭球, 这里将比较著名的几个列于表 1-1, 以供查用。

表 1-1

参考椭球名称	推求年代	使用的国家	元 素	
			长半轴 $a$ (m)	扁率 $\alpha=(a-b)/a$
埃佛瑞斯特	1830	印度	6377276	1/300.80
贝塞耳	1841	日本	6377397	1/299.15
克拉克	1866	北美洲	6378206	1/294.98
海福特	1909	欧洲、南美洲	6378388	1/297.00
克拉索夫斯基	1940	苏联、中国	6378245	1/298.30

我国在 1950 年开始进行全国大地测量工作时, 采用的是克拉索夫斯基椭球。现在已决定改用国际大地测量与地球物理联合会所推荐的“75 年基本大地数据”, 它包括四个量:

地球椭球的长半径  $a = 6378140 \text{ m}$

地球引力场二阶带谐系数  $J_2 = 1082.63 \times 10^{-6}$

(相应的地球扁率  $\alpha = 1:298.257$ )

地球总质量和引力常数的乘积  $GM = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$

地球自转角速度  $\omega = 7.292115 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$

### 1.2.2 天文坐标系、大地坐标系、地心和参心空间直角坐标系

大地测量学的主要任务之一是求定地面点的点位坐标, 为了进一步了解大地测量的有

关概念，需要引入大地测量中常用的几个坐标系。

在图1-2中， $O$ 是地球的质心， $OP$ 为地球自转轴， $P$ 点假定为北极点， $K$ 点为大地水准面上任意一点， $KK'$ 为 $K$ 点的垂线方向，包含 $K$ 点的垂线方向且与地球自转轴 $OP$ 平行的平面称为 $K$ 点的天文子午面， $G$ 点为英国格林尼治平均天文台（某一特殊定义的点），过 $G$ 点包含 $OP$ 的平面称为起始天文子午面，过地球质心且与 $OP$ 正交的平面称为地球赤道面。子午面、赤道面与大地水准面的交线分别称为子午线和赤道。  $K$ 点的垂线方向与赤道面的交角 $\varphi$ 称为 $K$ 点天文纬度， $K$ 点的天文子午面与起始子午面的夹角 $\lambda$ 称为 $K$ 点的天文经度， $\varphi$ 、 $\lambda$ 定义为 $K$ 点的天文坐标。这样建立的坐标系称为天文坐标系，它是一个可以通过天文观测直接测定点的坐标的一种“自然”坐标系。天文坐标给定一点的垂线方向（大地水准面的法线方向），因此它不仅包含了点位信息而且包含了重力场信息，天文坐标在研究大地水准面的形状中起着重要作用。

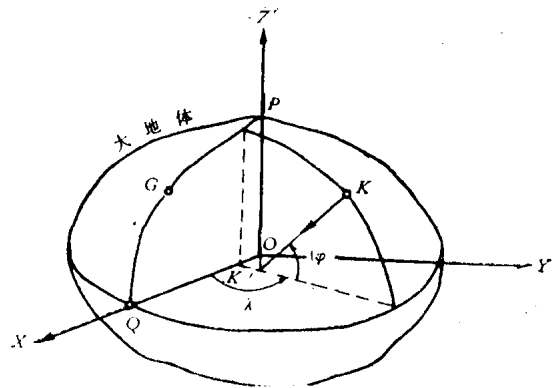


图 1-2

在图1-3中， $o$ 是参考椭球中心， $op$ 为旋转轴， $p$ 点也可看作是参考椭球的北极点， $k_1$ 为一地面点， $k, k'$ 为 $k_1$ 点对参考椭球面的法线，它交椭球面于 $k$ 点，法线 $k, k'$ 与 $op$ 共面，这个平面称为点的大地子午面，其与椭球面的交线称为大地子午线， $G$ 为椭球面上选定的一个点并把这点的子午面规定为起始子午面。过椭球中心 $o$ 与 $op$ 正交的平面称为参考椭球的赤道面，它与椭球面的交线称为参考椭球的赤道。 $k_1$ 点法线与赤道面的交角 $B$ 称为该点的大地纬度， $k_1$ 点的子午面与起始子午面的夹角 $L$ 称为该点的大地经度。 $k_1$ 点沿法线到椭球面的距离 $H$ 称为该点的大地高， $B$ 、 $L$ 、 $H$ 定义为 $k_1$ 点的大地坐标，这样建立的坐标系称为大地坐标系。大地坐标系的建立决定于所选定的参考椭球，它是用来确定地面点几何位置的参考坐标系。

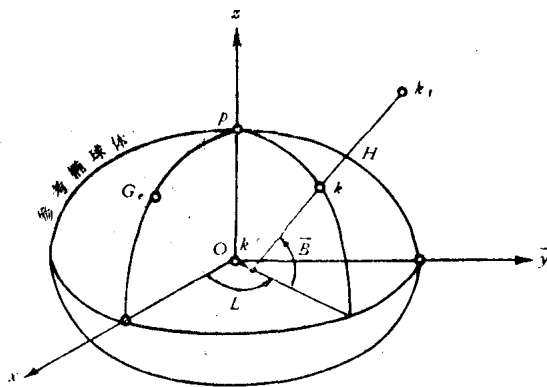


图 1-3

在大地体和参考椭球体内分别建立空间直角坐标系  $O-XYZ$  和  $o-xyz$ ，它们的原点和坐标轴系的配置如图1-2和图1-3所示。前者称为地球质心空间直角坐标系，后者一般称为参心空间直角坐标系，地球质心坐标系是唯一的，因此这一坐标系确定地面点的“绝对”点位。这一坐标系在卫星大地测量中起着十分重要的作用。

在大地体和参考椭球体内分别建立空间直角坐标系  $O-XYZ$  和  $o-xyz$ ，它们的原点和坐标轴系的配置如图1-2和图1-3所示。前者称为地球质心空间直角坐标系，后者一般称为参心空间直角坐标系，地球质心坐标系是唯一的，因此这一坐标系确定地面点的“绝对”点位。这一坐标系在卫星大地测量中起着十分重要的作用。

### 1.2.3 参考椭球定位、垂线偏差和弧度测量

确定一个参考椭球，除了决定它的几何参数 ( $a, \alpha$ ) 外，还要很好地确定它和大地体之间的相对位置，使椭球面同整个大地水准面或有关地区 (一个或几个国家) 的大地水准面符合得最好，这叫做“参考椭球定位”和“弧度测量”。或者称为大地基准的定义。它包括确定大地网所属参考坐标系的原点、轴向和参考椭球的尺度及形状。

椭球定位问题，从几何上讲，也就是在满足椭球面同大地水准面符合得最好的条件下，确定参心坐标系和质心坐标系之间的关系。我们知道，任意两个相异的空间直角坐标系之间的关系都可以用一个坐标系对另一个坐标系的三个坐标平移参数和三个坐标轴的定向角参数来确定。这六个参数称为坐标转换参数，由于它用以表示参考椭球的定位，故也称为在空间直角坐标系中的椭球定位参数。为了简化坐标系的转换关系，在椭球定位中总是要求参心坐标系的三个坐标轴 ( $x, y, z$ ) 对质心坐标系 ( $X, Y, Z$ ) 的三个定向角参数为零，即两坐标系保持轴向平行 (见图 1-4)。这样，参考椭球初始定位所需要决定的

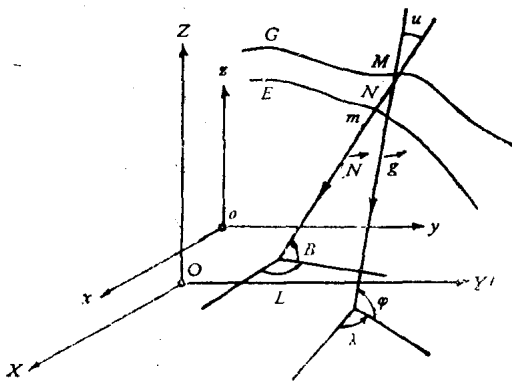


图 1-4

仅仅是三个坐标平移参数，其最简单的方法是：在控制网中央选择一个大地控制点，称为大地基准点，用任何一种方法 (例如卫星大地测量方法) 测定该点的质心空间直角坐标，再按某一方法给定这个点的参心空间直角坐标，这样便给出了参心坐标系对质心坐标系的平移参数从而参考椭球体在大地体内的相对位置随之确定。但由于初始定位是带有任意性的，所以还要根据最佳逼近条件按照下面将要提到的弧度测量方法加以改进。

参考椭球定位的经典方法也是在三轴平行和两面最接近的条件下确定大地坐标系和天文坐标系之间的关系。这两个坐标系的关系是取决于垂线和法线的关系以及沿法线方向的差距。

在图 1-4 中，点  $M$  为大地水准面  $G$  上的一点，点  $m$  是  $M$  点沿该点的椭球法线在椭球面  $E$  上的投影， $g$  是  $M$  点的重力矢量方向， $N$  是该点椭球面法线矢量方向。一点的垂线方向对法线方向的偏离称为该点的垂线偏差，图中  $u$  即为垂线偏差的角值。垂线偏离法线的方位和大小对不同的点一般是不同的。通常将  $g$  分解为两个分矢量，一个是在子午面上的分量，以  $\xi$  表示，另一个是在包含法线并与子午面正交的卯酉面上的分量，以  $\eta$  表示。由于垂线偏差的存在，使得一点的大地坐标与天文坐标不一致，其间的关系为  $B = \varphi - \xi$  和  $L = \lambda - \eta \sec \varphi$  (证明见椭球大地测量学)，这也就是这两个坐标系之间在保持坐标系轴向平行条件下的转换关系。在天文、大地坐标系中，椭球初始定位的传统方法是：在一个选定的大地基准点上测定天文经纬度，并任意给定两个垂线偏差  $\xi_0, \eta_0$  (例如令  $\xi_0 = 0, \eta_0 = 0$ )，由此可以决定该点对椭球面的法线方向，再在法线方向上给定一个差距  $N_0$ 。(见图 1-4)，

在轴向平行条件下就唯一地确定了与该大地坐标系相应的椭球体在大地体内的相对位置。这里给定的定位参数  $\xi_0$ 、 $\eta_0$ 、 $N_0$  等价于前述直角坐标系的平移参数。同样，这种初始定位也带任意性，还要根据最佳逼近条件用弧度测量方法加以改进。

弧度测量一词来源于古代通过测量子午圈  $1^\circ$  的弧长以推求地球椭球的形状和大小。现代弧度测量则是综合一个国家或地区大地控制网的多种观测资料（天文、大地、重力、卫星观测等资料）来推求椭球体（总椭球或参考椭球）的几何参数和定位参数，它已超出原来意义的弧度测量。这里仅利用天文大地观测数据为例来说明它的基本概念和在改进椭球定位中的作用。我们不难理解，由于参考椭球的几何参数和定位参数的不同选择，同一点就会有不同的垂线偏差和大地水准面差距。因此，垂线偏差可以表达为两个几何参数和三个定位参数的函数，即

$$\begin{aligned}\xi &= \varphi - B = \varphi - B(a, \alpha, \xi_0, \eta_0, N_0) \\ \eta \sec \varphi &= \lambda - L = \lambda - L(a, \alpha, \xi_0, \eta_0, N_0)\end{aligned}$$

以及

$$N = -H_{\pm} + H = -H_{\pm} + H(a, \alpha, \xi_0, \eta_0, N_0)$$

其中  $\lambda$ 、 $\varphi$  为直接观测的天文经、纬度， $H_{\pm}$  为由水准测量所得的正高， $L$ 、 $B$  和  $H$  为计算的大地经、纬度及大地高。 $B$ 、 $L$  和  $H$  都是椭球几何参数  $a$ 、 $\alpha$  及定位参数  $\xi_0$ 、 $\eta_0$ 、 $N_0$  的非线性函数。将这些方程式线性化，并在  $\Sigma(\xi^2 + \eta^2)$  或  $\Sigma N^2$  为最小的条件下求解式中 5 个未知数，从而求得最佳椭球的几何参数和定位参数，即相当于选取最适合于所研究地区的大地水准面的参考椭球。根据定位参数可以计算大地基准点的大地坐标  $B_0$ 、 $L_0$ 、 $H_0$ ，称其为大地基准数据或起始数据。

#### 1.2.4 地面大地测量的基本方法

传统的地面大地控制网，都是被分成水平控制网和高程控制网。从历史上看，虽然早在十九世纪，著名大地测量学家布隆斯（Bruns）就提出将控制点水平位置和高程位置统一起来的三维大地测量原理，但在当时的科学技术条件下，还存在难于克服的困难，所以至今还是分别建立水平控制网和高程控制网。这样做不仅可以比较容易而又经济地测定地面点的水平位置和垂直位置，而且也符合实用的目的。

水平大地控制网是以一定形式的图形，把大地控制点构成网状。测定网中角度、边长和方位角，以确定网的几何结构及其定向。为了求定各控制点的水平位置，必须选定一个参考系即前面所述之参考椭球及其定位方式。将水平控制网中所测的全部角度、边长都归算至该参考椭球面，然后进行网的统一平差，算得各控制点大地坐标。为了测制地图的需要，大地控制网还需要投影到平面上，即将大地坐标变换为相应投影面上的平面直角坐标。

高程控制网是由连接各高程控制点的水准测量路线所组成。通过水准测量，可以求得相邻水准点之间的高差。为了传算各水准点的高程，必须选择某一高程基准面，例如大地水准面，作为高程的起始面。在实用上，则是通过长期验潮所得之平均海面作为高程基准面。高程基准点的高程是用精密水准测量从高程基准面通过联测求得的。而后，由高程

基准点通过水准测量求定各水准点的高程。因此通俗地说，高程控制点的高程就是超出平均海水面的高度，或称其为海拔高。但是，由于海水面受到潮汐和各种海洋动力的作用，使其存在复杂的变化(起伏和倾斜)，所以难以求出全球统一的平均海水面，因而各国(或地区)所采用的平均海水面与大地水准面并不一致。同时，由于地外引力对地球的作用，使地球产生固体潮形变及重力方向的变化。这种变化导致水准点的位置处于运动状态。因而从理论上说，地面点的高程应定义为该点固体潮形变平均位置的海拔高度。为了顾及这种影响，在实测的高程中应加入地外引力引起的改正。此外，由于地球并非均质圆球，水准面间存在不平行性，导致水准测量沿不同路线所测两点之间的高差存在多值性。为消除这种矛盾，必须在实测的高差中加入水准面不平行改正。顾及各种改正后，再由高差观测值进行高程控制网的统一平差，求出网中各水准点的最后高程。

水平控制网和高程控制网的观测都与地球重力场相联系，特别是高程控制网与重力位的关系更为密切。所以在建立水平和高程控制网中，重力测量也是重要的组成部份。在全国范围内，由测有重力值的地面点组成国家统一的重力网。它不仅用于研究地球形状或地球外部重力场，同时对于大地控制网测量成果的归算也是不可缺少的资料。此外，在空间技术、地球物理、地质勘探和地震预报等部门也都要用到地球重力场的信息。

### § 1.3 大地测量学发展简史

人类通过生产实践和对天体运行规律的观测，在公元前六世纪就已经知道地球是个圆球体，古希腊学者爱拉托色尼(Eratosthenes)观察到尼罗河上游色尼(Syene)地方(纬度近于 $23^{\circ}27'$ ) 在夏至正午时，日光正好垂直地射入井内；而在它北面的亚历山大利亚(Alexandria)地方当夏至正午时，日光与垂线方向构成 $1/50$ 圆周的角度，爱拉托色尼根据步行日程估计两地相距为5000Stadia(古希腊尺寸，1Stadia $\approx 185\text{m}$ )，并认为这两地在一子午线上(实际上经度相差 $2^{\circ}$ 余)。利用这些数据，他估算出地球的周长为250000Stadia。这是人类应用弧度测量概念对地球大小的第一次估算，所得结果比现代实测结果约大15%。

最早一次对地球形体的实测是在我国。公元713~714年间，唐朝太史监南宫说在天文学家张隧(僧一行)的指导下，于河南平原直接丈量了大约300km左右的一段子午弧段，北起滑洲、南到豫洲，并且在滑洲、开封、扶沟、上蔡四个地方用圭表测定太阳的影子，确定了地面上两点南北向上“影差”与距离的关系。“影差”实际上就代表纬度差，所以这是一次实测的每度子午弧长。

大地测量学的科学体系是从17世纪开始逐渐形成的。1615年荷兰人斯奈洛(Willebrord Snell)首创三角测量法进行弧度测量，此后，望远镜、水准器、游标、测微器相继发明，促进了大地测量学的发展。牛顿在万有引力学说的基础上研究了地球的形体，断定地球是一个两极略扁的扁球体而不是一个圆球。1673年惠更斯(Huygens)发展单摆公式，奠定了重力测量的基础。

我国从1708年开始(清康熙47年)，为了测绘“皇舆全图”，进行了大规模的天文大

地测量，并且发现纬度愈高，每度弧长愈长的事实，证明了牛顿理论的正确，比欧洲许多国家都早。在此之前，我国为了统一尺度，于1702年（康熙41年）测量了由北京至霸州（今河北霸县）的子午圈弧长，利用其结果制定了长度单位，将长度单位与地球经线的每度弧长联系起来；这是一个创举，比1792年法国用同样方法确立目前如世界上所通用的“米”制约早90年（一米为子午圈一象限弧长的千万分之一）。

1743年法国数学家克莱劳（Clairaut）发表名著《地球形体学的理论》，指出用重力测量结果精确求定地球扁率的方法。1806年法国学者勒让德（Legendre）提出最小二乘法理论后，德国学者高斯（Gauss）于1810~1826年陆续发表了五种著作，使最小二乘法用于测量平差的问题大部得到解决。1829年高斯在《关于曲面的一般研究》一文中，探讨了由大地线构成椭球面三角形的理论。1849年英国学者斯托克司（Stokes）发表一个定理，利用大地水准面上的重力异常值即可求定大地水准面对于总地球椭球的高。1884年德国赫尔默特 Helmert 在其著作《大地测量的数学和物理原理》中详述了利用重力测量结果求定地球扁率的问题。1945年苏联莫洛金斯基（Молоденский）发表的理论指出，可以直接利用地球表面观测数据来确定地球表面的真正形状，不涉及任何归算问题。

从18世纪末开始，英、德、法、俄、美、印度和一些非洲国家，先后完成了大量的三角测量，并进行了许多联测，例如从爱尔兰开始，经过英国、比利时、普鲁士直到俄国乌拉尔山脉的 $52^\circ$ 平行圈弧度测量，经差达 $69^\circ$ ，就是在19世纪完成的。苏联在1919年成立国家测绘总局，1928年拟定国家测量控制网的新方案建立了规模较大、精度较高的天文大地网。美国在1927年已完成全国天文大地网的平差，称为1927年北美大地基准（NAD 27），但精度较低。上述各种成果除用于测图控制外，还推算出了许多地球椭球，其中曾经得到广泛应用的有德国贝塞尔（Bessel）1841年椭球，英国克拉克（Clarke）1816年椭球，美国海福特（Hayford）1909年椭球和苏联克拉索夫斯基（Красовский）1940年椭球等。

1948年和1957年世界上先后出现了光电测距仪和微波测距仪，使导线和边角并测控制网的布设方法得到了广泛应用。60年代以来，人造卫星定位系统、甚长基线干涉测量系统、惯性测量系统等新技术相继发展，使全球规模的大地网的建立成为现实，是大地测量技术的一个跃进。

美国从60年代开始，建立高精度横贯大陆的导线，结合人造卫星多普勒测量结果，重新平差和定义北美大地基准，于1983年公布结果，命名为1983年北美大地基准（NAD 83）。欧洲各国的大地测量成果在1947~1951年进行统一平差，这就是1950年欧洲大地基准（ED 50），1954年国际大地测量及地球物理联合会（IUGG）第十届大会决定对于ED 50三角网的薄弱部分增测拉普拉斯方位角和起始边（用电磁波测距仪）重新进行严密平差，命名为1977年欧洲大地基准（ED 77）。

我国在解放前只作了一些零星的大地测量工作，没有完善的作业细则，并且坐标系紊乱，精度很低。因此我国近代的大地测量工作实际上是从新中国成立后才开始的。

1956年我国成立国家测绘总局，随即颁布大地测量法式和有关作业细则，在全国范围内沿经纬线方向布设了纵横交叉的一等三角锁。总长度近八万公里，构成一百多个锁



环,约四百个锁段,并在一等锁环内布设二等全面三角网。全国一、二等三角点(共约五万个)早已在50年代末期基本完成,60年代初期,还在青藏高原实测了一等电磁波测距导线,使我国全部领土上都布设有有一定数量的大地点,以满足各方面的需要。

1955~1957年,在全国范围布设了重力测量控制网,简称57重力网。全网共有基本重力点22个,一等重力点80个。该网属于波茨坦重力系统,含有已被确认的该系统的系统误差约14mGal,而且没有基准点,联测精度较低,点位分布不均匀,整个覆盖面积也偏小,因而不能满足国民经济建设、国防建设和地球科学研究日益增长的需要。为此在80年代初期又建成我国85重力基本网,全网共有57个重力点,其中基准重力点6个,基本重力点46个,引点5个。该网总体技术设计合理、点位分布较广,外业观测精度较好,内业处理比较科学,所以精度比较高,平差后点位的重力值平均中误差为 $\pm 7.8\mu\text{Gal}$ ,最大值 $\pm 13\mu\text{Gal}$ 。从总的来看,85网在今后相当一段时期是可以作为我国重力测量的基准网而发挥其作用。

我国高程控制的基础是一等水准网,它的总长度近十万公里,目前已经完成,并在某些需要研究地壳升降运动的地段进行了重复水准测量。

为了使我国天文大地网的精度得到进一步提高,从60年代起,逐步对已测大地网中精度较差的部分进行改造与重测,到70年代中期基本完成,开始对包括全部一等锁环和二等全面网及部分三等网的全国天文大地网进行整体平差,80年代初期已经提交成果。与此同时,随着近代空间技术的应用,我国已在70年代末布设全国人造卫星多普勒定位网,并完成了南海诸岛的大地联测。

我国天文大地网是按统一的规划要求施测的,由于它采用了当代的新兴技术,集中了世界各国的先进经验,所以科学性很强,精度较高,可以满足各方面的需要。就其规模来说,由于它布设在我国约1000万平方公里的广阔领土上,覆盖面积较大,也居于世界前列。一个具有较高精度的、布满全国的天文大地网已经在我国国防和国民经济建设中起着重要的作用。

## § 1.4 大地测量新技术

近二十年来,由于空间技术、电子学和电子计算机技术等现代科学技术的迅速发展,大大推动了大地测量学理论的发展和技術上的革新,使大地测量发展到了一个新的阶段。这个新阶段的主要标志是空间大地测量日益成为重要的大地测量方法之一。它包括卫星大地测量,类星体射电源甚长基线干涉法,惯性大地测量技术等。

卫星大地测量从其解算原理来说一般分为两类,即几何法和动力法。在卫星大地测量的几何法中,卫星被当作高空飞行目标(在地球广大范围可见)或信号发射源,通过对卫星的观测,给出测站点到卫星的几何元素(方向、距离和距离差),由单站或若干测站的同步观测(或将观测化算到同一时刻)确定地面点位。在解算过程中卫星轨道参数或被消去,或被作为已知参数,或连同测站坐标一道解出。在动力法中,卫星被看作在地球引力场中的一个传感器,通过对卫星的观测,一并解出测站坐标、卫星轨道参数和地球引力场