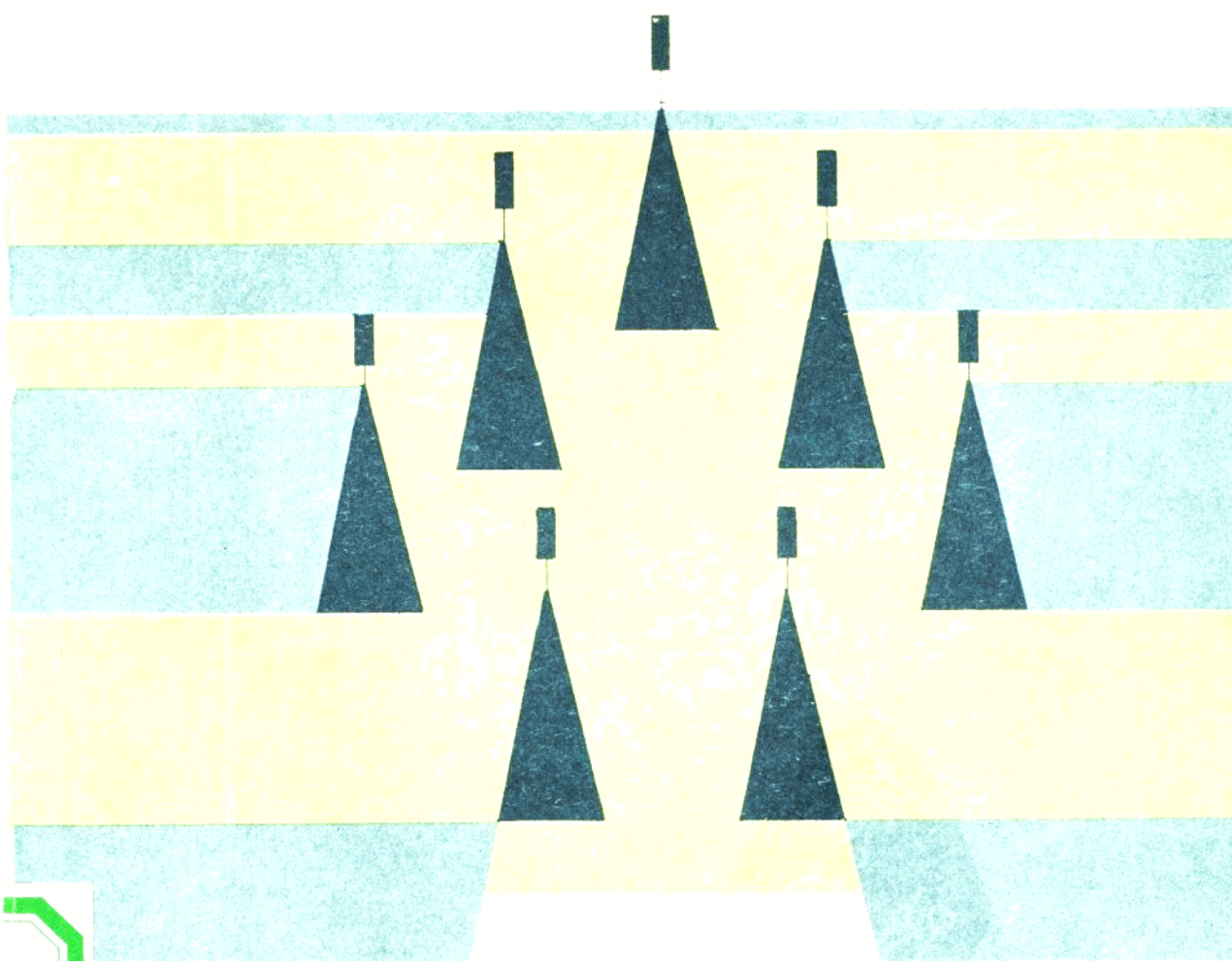


大地控制测量学

徐正扬 刘振华 吴国良 编 著



解 放 军 出 版 社

前 言

近几十年来,由于电子、计算技术的普遍使用和空间技术的迅速发展,大地测量向测量自动化和空间方向的发展取得了很大进展。目前大地测量学分为常规、卫星和惯性大地测量学,后两部分另有专门教材,本教材主要对常规大地测量学进行叙述。随着工程控制网精度要求的提高,它与大地控制网的差别已愈来愈小。为此,编写时顾及了两方面的需要,所以,这本教材可供大地测量和工程测量专业使用。

本教材是依据大地测量的发展现状和多年来的教学实践而编写的。内容力求做到理论联系实际,适当照顾发展。例如:在三角网精度分析基础上充实了测边网、边角网和导线网的精度分析;在大地网设计中增加了优化设计和可靠性理论;在仪器方面介绍了T2000系列电子经纬仪、Ni002系列自动安平水准仪和DI系列测距仪;在作业方法方面介绍了边长比率法和短边测距三角高程等。

全书共十一章。其中第一、二、七、八、十一章由徐正扬教授编写,第三、四、六、九、十章由刘振华副教授编写,第五章由吴国良副教授编写。全书经朱华统教授、易传良副教授、杨述魁、王志良、林广元等讲师审阅,并提出了不少宝贵意见,谨此表示感谢。对书中存在的缺点和错误,恳请读者批评指正。

编著者

1991年元月

内 容 提 要

本书系统地讲述了建立国家大地控制网和工程控制网的理论和技术,包括水平控制网和高程控制网的设计原理、精度估计、布设方案和测量方法。对经纬仪、测距仪、水准仪作了较详细的讨论,并对近年来测量方法和仪器的发展动向进行了简要介绍。

本书可作为高等院校大地测量和工程测量专业本、专科的教材,也可供军事、地质、煤炭、石油、水利、冶金、建筑、地震等测量部门的有关人员参考。

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1-1 大地测量学的任务和内容	(1)
§ 1-2 大地水准面和参考椭球面	(3)
§ 1-3 大地测量学发展简史	(8)
§ 1-4 现代大地测量的展望	(10)
第二章 国家水平大地控制网的布设	(13)
§ 2-1 建立水平大地控制网的方法	(13)
§ 2-2 国家控制网布设的基本原则	(16)
§ 2-3 国家水平控制网的布设方案	(18)
§ 2-4 水平控制网的布设	(22)
§ 2-5 我国天文大地网的加强和改进	(33)
* § 2-6 可靠性理论在大地网中的应用	(36)
* § 2-7 大地网优化设计	(45)
第三章 光学经纬仪及其检验	(56)
§ 3-1 经纬仪的基本结构	(56)
§ 3-2 望远镜和水准器	(60)
§ 3-3 水平度盘及光学系统	(65)
§ 3-4 测微器及读数方法	(69)
§ 3-5 垂直度盘及垂直角计算	(75)
§ 3-6 垂直度盘指标自动归零光学补偿器	(79)
§ 3-7 度盘分划误差	(84)
§ 3-8 光学测微器行差	(85)
§ 3-9 视准轴误差	(90)
§ 3-10 水平轴倾斜误差	(93)
§ 3-11 垂直轴倾斜误差	(97)
* § 3-12 测定水准器格值的垂直轴倾斜法	(101)
§ 3-13 偏心差及照准部旋转正确性的检验	(105)
§ 3-14 基座位移和垂直微动螺旋使用正确性及其检验	(110)
§ 3-15 经纬仪的几项调校	(112)
第四章 水平角观测	(117)
§ 4-1 外界条件对水平角观测精度的影响	(117)
§ 4-2 水平角观测的基本规则	(124)
§ 4-3 方向法和全圆方向法	(124)
§ 4-4 分组的方向观测	(130)
§ 4-5 全组合测角法	(134)
§ 4-6 三方向法	(145)
* § 4-7 间接测角的边长比率法	(147)

§ 4-8 水平角观测作业限差的制定	(151)
§ 4-9 成果超限的分析和处理	(153)
§ 4-10 归心改正和归心元素的测定	(156)
§ 4-11 观测作业的组织实施	(162)
第五章 精密测距	(165)
§ 5-1 概述	(165)
§ 5-2 因瓦基线尺量距	(168)
§ 5-3 电磁波测距的基本原理	(174)
§ 5-4 微波测距仪	(177)
§ 5-5 激光测距仪	(196)
§ 5-6 红外测距仪	(214)
§ 5-7 斜距的归算	(248)
第六章 三角测量概算	(251)
§ 6-1 高斯平面方向值的计算	(251)
§ 6-2 依控制网几何条件检查观测成果的质量	(267)
§ 6-3 几何条件闭合差超限时的误差分析	(277)
§ 6-4 资用坐标计算	(278)
第七章 边角锁网元素精度估算	(283)
§ 7-1 边角锁网元素精度估算的目的和方法	(283)
§ 7-2 三角形单锁主要元素中误差估算公式	(285)
* § 7-3 几种复杂结构三角锁元素误差估算公式	(300)
§ 7-4 三角网元素精度估算	(302)
§ 7-5 测边网和边角网的精度概述	(308)
* § 7-6 边角插点和插网的精度估算	(315)
§ 7-7 边角锁网元素精度估算公式的应用	(327)
第八章 导线测量	(333)
§ 8-1 导线测量概述	(333)
§ 8-2 单导线的精度估算	(337)
§ 8-3 导线网精度估算概述	(351)
§ 8-4 精密导线的设计	(361)
§ 8-5 导线测量作业	(367)
§ 8-6 导线测量验算	(370)
* § 8-7 高精度导线测量概述	(376)
第九章 精密水准仪和水准标尺	(380)
§ 9-1 概述	(380)
§ 9-2 精密水准器水准仪	(382)
§ 9-3 自动安平水准仪	(387)
§ 9-4 精密水准仪的检验	(397)
§ 9-5 精密水准标尺的检验	(410)
第十章 精密水准测量	(419)
§ 10-1 国家水准网综述	(419)
§ 10-2 精密水准测量的误差来源及其影响	(424)
§ 10-3 精密水准测量作业方法	(436)

§ 10-4 高程系统.....	(440)
§ 10-5 水准测量外业计算.....	(450)
§ 10-6 水准测量精度估算.....	(455)
§ 10-7 跨河水准测量.....	(461)
第十一章 三角高程测量	(469)
§ 11-1 概述.....	(469)
§ 11-2 高差计算公式.....	(472)
§ 11-3 地面大气垂直折光系数的测定.....	(476)
§ 11-4 三角高程测量的精度和应用.....	(478)
§ 11-5 三角高程起算点的测定.....	(482)
§ 11-6 三角高程测量验算.....	(483)
§ 11-7 用三角高程计算正常高高差.....	(485)
§ 11-8 精密短边三角高程测量.....	(487)

第一章 绪 论

§ 1-1 大地测量学的任务和内容

一、大地测量学的任务

大地测量学的任务是：(1)在广大面积上建立由一系列地面点构成的大地控制网，以精密确定地面点的位置及其随时间的变化规律，为测制地图、工程设计和地球动力学等科研工作提供控制基础，也为人造卫星、导弹和各种航天器提供地面站的精确坐标；(2)研究和测定地球形状、大小及其随时间的变化规律，为大地控制网和地球科学提供计算基准面和基本数据；(3)研究和测定地球重力场及其变化情况，为大地控制网的归算、宇宙飞船和人造卫星的发射及定轨、远程武器的发射和地质探矿等提供必要的资料。

总的来说，大地测量的主要工作是建立大地控制网，其中包括水平控制网、高程控制网。大地控制网的作用可概括为下列四个方面。

(1) 控制地形测图

地球的形状近似一个椭球，在小范围内测绘地形图可不考虑地球的曲率。而在全中国范围内测绘和编制各种比例尺地形图时，必须把地球看成是个曲面。但椭球面是个不可展平的曲面，对这个问题的解决方法，是在测图前先进行大地测量。在全国范围内布设大地控制网，精确测定网中各大地点的平面坐标和高程，按一定的数学方法将这些点投影到平面上，构成一个完整的、精确的测图控制系统。根据这些控制点进行测图，就能使地球表面上的地貌、地物测绘在平面图上。而且保证各地区同时开展测制的地图能够拼接而不产生明显的变形和裂口。还能有效地控制测图时产生的误差积累，把误差限制在控制点之间，确保地图的精度。

(2) 为经济建设和国防建设提供控制基础

开发矿山资源，建设工业基地、兴修水利工程、发展交通运输和土地综合利用等各项经济建设，不仅需要各种比例尺的地图进行规划和设计，还要直接利用大地测量成果。例如：在长江的综合利用规划设计中，就测了两万多个三角点和十几万公里的水准；正在规划的南水北调工程，需要沿东、中、西三条线路的附近有更多更精确的大地资料；城市中的地下铁道掘进是根据地面上大地点所指示的方向，以保证地下隧道的贯通。日本由北海道到本洲的地下隧道高速铁路，全长为53.9公里，水下部分达23.3公里，就是根据精密测量来满足隧道的直线性和贯通精度的；全国正在开展的地籍测量，必须在大地测量供给的统一坐标系统的前提下进行界址测量。

在军事上，常规火炮和远程导弹的发射，要能命中几十公里、几百公里，甚至上万公里以外的目标，必须知道发射点至目标的距离和方位，以及标定火炮和导弹发射场至方位标的方位，这是大地测量所要解决的一项重要任务。在国防工程建设上，如军事基地、机场、军港、地下设施、边疆和海疆的标定等，都需要大地测量保障工作。试验洲际导弹的命中精度，要在导弹运行的沿线地面上设立许多跟踪站，以观测导弹运行轨道。并要知道发射场周

围的重力场情况,以计算轨道的重力修正。这些跟踪站间距离达上千公里,站间位置的相对精度要高于 0.5×10^{-6} ,都是通过大地控制测量和重力测量来保证的。

(3) 为研究地球形状、大小提供资料

大地测量中所测定的地球大小是指测定地球椭球的大小,研究地球的形状是指研究大地水准面的形状。椭球的大小以长半径 a 和短半径 b 来表示,也可用 a 和扁率 $\alpha = (a - b)/a$ 来表示。要精确确定 a 、 b 或 a 、 α ,就必须综合利用大地控制测量、天文测量、重力测量和卫星测量等资料。下面介绍一种最简单的方法,若把地球近似看作一个球体,那么半径就表示其大小。在球的同一子午线上选择 A、B 两地,见图 (1-1),按同一时刻测得太阳(或某一天体)的高度角(或天顶距),就可算得纬度差 $\Delta\varphi = \varphi_b - \varphi_a$,再量得 A、B 间的大圆弧 S,根据下式即可求得球的半径 R

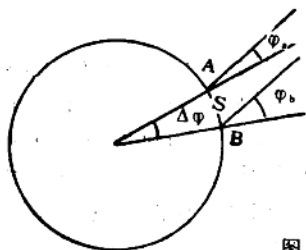


图 (1-1)

$$R = \frac{S}{\Delta\varphi} \quad (1-1)$$

这种方法是测量一段弧长及其所对的圆心角,称为弧度测量。人类第一次测定地球大小,就是把它当作球形按上述原理进行的。现在习惯上把弧度测量理解为研究地球形状、大小。

大地测量是在地球表面上进行的,为了正确处理大地测量成果,必须知道表示地球大小的数据 a 和 α 。大地测量为确定地球大小提供资料,而所确定的地球椭球面又反过来作为大地测量成果计算的基准面,这是个相辅相成、逐步趋近的过程。

必须指出,由于测量手段、方法和精度的不断改进和提高,对地球形状、大小的认识也在不断地深化, a 和 α 的数值也逐渐精确。要获得一个与地球形状非常接近的地球椭球(称为总地球椭球),需要全球资料并经多次反复转化,所以,这是大地测量学的一个长期而艰巨的任务。

(4) 为研究地球物理学、地球动力学、地震学和海洋学等科学任务提供测量数据。

地球和其它物质一样,是在不断地运动和变化,如地壳的水平移动和垂直升降、大陆漂移,海洋面高度变化、地球两极的周期性运动等等。这些运动都影响着大地测量结果,反过来通过长期重复测量某地区的大地控制网,综合分析比较新、旧大地测量资料,就可以发现该地区地壳变化情况。板块运动使大西洋平均每年以2.5厘米的速度扩大,地球表面温度的升高致使海水面平均每年以2.1毫米的速度上升,这些都是通过比较重复大地测量资料所获得的结论。

二、大地测量学研究的内容

大地测量是研究布设大地网的理论和方法的,其主要工作是设计和布设较合理的国家大地控制网,并对网中控制点间的角度、距离、高差等进行精密测量,经过严密的成果处理,以尽可能高的精度得到大地点的三维坐标。控制网的设计和布设,测量仪器的原理、检验和使用,测量方法的探讨以及成果质量的检核等,称为应用大地测量学或大地控制测量学。

计算大地网中各控制点位置时,必须选用一个计算基准面。地球近似一个旋转椭球,显

然采用与地球接近的椭球面作为基准面,可以使点位有较高的精度。地形图是以平面表示的,控制点位还要按一定方法从椭球面投影到所选用的平面上。有关椭球面上计算、椭球面与其它曲面关系的理论探讨和公式推导,称为椭球大地测量学。

在大地网的某些点上需要观测天体的位置来确定其天文经纬度和至某一方向的天文方位角,从而提供大地网归算资料和提高网的精度。而研究天文测量的基础理论、使用仪器、测量方法以及成果计算处理等内容,称为大地天文学。

在地面上布设重力控制网为研究地球重力场提供直接观测资料,这也是研究地球形状的传统方法。综合天文测量结果,可为大地网的归算提供精确的数据。当重力资料足够多时,可以推算地球椭球的扁率 and 大地水准面相对于地球椭球的起伏。讨论地球形状的理论基础,重力测量的原理和方法,以及重力在大地测量中的应用等问题称为大地重力学,也叫物理大地测量学。

测量必然有误差,为了保证大地控制网的质量,增加了剩余观测,以检核大地网的精度,控制测量误差的积累。为消除剩余观测而引起的矛盾,需要根据最小二乘法的原理,进行网的平差,以获得点位坐标和高程的数学期望值。运用上述原理进行观测误差的分析和观测数据的处理,称为测量平差法。

大地控制测量只限于在大陆范围内开展,无法跨越海洋,各洲之间不能联系。每个国家只能采用与本国领土比较接近的椭球面来计算大地网,从而产生了许多独立的大地坐标系,也无法推求与地球最吻合的总地球椭球。重力测量在海洋、高山和丘陵地区也只有少量资料,推算地球形状和地球重力场都得不到满意的结果。1957年第一颗人造地球卫星发射成功后,逐步形成了卫星大地测量学,继而发展成利用其它天体或河外射电源进行测量的空间大地测量。

20世纪70年代中期,在惯性导航基础上发展起来的惯性测量,它可以同时测量控制点的几何参数和物理参数。能实时提供测量数据,机动灵活,不需要外部信号,不受天候限制,在军事上首先得到应用。继而在大地测量、工程测量、矿山测量、隧道测量和海洋测量中的应用也日益广阔,是大地测量学的一个新分支。研究惯性测量的原理和方法、数学模型、误差分析和成果处理等内容称为惯性大地测量学。

综上所述,大地测量学由大地控制测量学、椭球大地测量学、大地天文学、物理大地测量学、测量平差、卫星大地测量学和惯性大地测量学等组成。它与其它学科的联系越来越广,其内容也日益丰富,分支也逐渐增加。本书将主要论述大地控制测量部分。

§ 1-2 大地水准面和参考椭球面

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,有高山、深谷、平原、丘陵、江湖和海洋。世界上最高的山峰珠穆朗玛峰,海拔8848.13米,在我国和尼泊尔交界处。海洋最深的地方在太平洋西部马里亚纳海沟斐查兹海渊,深达11022米。两者高差近二万米,约为地球半径的千分之三。全球陆地面积占29%,平均高度约840米,海洋面积占71%,平均深度约为3800米。显然在地球自然表面上无法处理测量成果,这就需要选择与地球体形极为接近的、可用简单数学公式表示的、且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

地球上任何一个质点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 $\overrightarrow{OP}$ ，一个是地心引力 $\overrightarrow{OF}$ ，这两个力的合力 $\overrightarrow{OG}$ 称为重力，见图(1-2)。离心力与引力之比约为 1:300，所以重力中起主导作用的还是地心引力。重力的作用线称为铅垂线，重力线方向就是铅垂线方向。

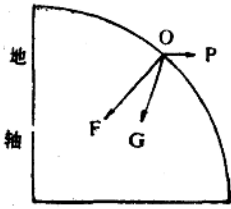


图 (1-2)

当液体处在静止状态时，其表面必处处与重力方向正交，否则液体就要流动。这个液体静止的表面就称为水准面。水准面是一个客观存在的、处处与铅垂线正交的面。通过不同高度的点，都有一个水准面，所以，水准面有无穷多个。

野外测量是通过水准器使仪器整平的，当水准器气泡居中，气泡中央的切线就是一条水平线，当测量仪器各部件相互关系正确时，仪器垂直轴方向就与铅垂线方向一致，水平度盘就是和水准面相切的水平面。所以，实际测得的水平角是在高低不同的水准面上的角度；三角网中的起始边长，是在不同高度的水准面上量得的长度；按几何水准法测定的高差是水准面间铅垂线长。因此，水准面、铅垂线就是大地测量野外作业的基准面和线。

为了使测量成果有一个共同的基准面，可以选择一个十分接近地球表面又能代表地球形状和大小的水准面作为共同标准。设想海洋处于静止平衡状态时，并将它延伸到大陆内部且保持处处与铅垂线正交的水准面，来表示地球的形状是最理想的，这个面称为大地水准面。它是一个光滑的闭合曲面，又称为地球的物理表面。由它包围的形体是地球的真实形体，称为大地体。

地球自然表面的起伏不平、地壳内部物质密度分布的不均，使得引力方向产生不规则的变化。例如：在山岳附近，引力方向将偏向山岳；湖泊附近就会偏离湖泊；在大密度矿藏附近，则要偏向矿藏。因而引力方向除总的变化趋势外，还会出现局部变化，这就引起铅垂线方向发生不规则的变化，见图(1-3)。由于大地水准面处处与铅垂线正交，所以，它是一个略有起伏不规则的表面。这个表面无法用数学公式来表示，大地测量获得的数据也不可能在这个面上进行计算。

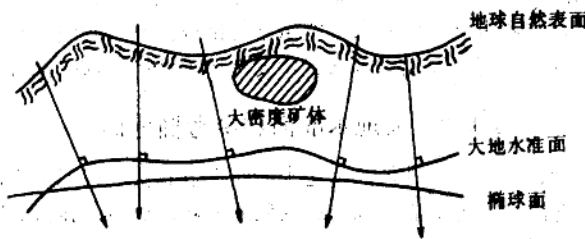


图 (1-3)

二、总地球椭球和参考椭球

大地体表面存在不规则的起伏，但这种起伏并不大。因为这种起伏主要是由地壳层的物质分布不均匀所引起的，而地壳的质量占地球总质量的1/65。从整体上看，大地体接近于一

个具有微小扁率的旋转椭球。

与大地体吻合得最好的旋转椭球称为总地球椭球，也叫总椭球或平均椭球，它应满足下列几个条件：

- (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，椭球短轴与地球自转轴重合，大地起始子午面与天文起始子午面平行。

要确定总椭球，必须在整个地球表面上布设联成一体的天文大地网和进行全球性的重力测量，这在过去是无法实现的。卫星大地测量理论建立后，这个任务才有完成的可能。

为了大地测量工作的实际需要，各个国家和地区只有根据局部的天文、大地和重力测量资料，研究局部大地水准面的情况，确定一个与总椭球接近的椭球，以表示地球的大小，作为处理大地测量成果的依据。这样的椭球只能较好地接近局部地区的大地水准面，不能反映整个大地体的情况，所以叫做参考椭球，它代表地球的数学表面。

十七世纪以来，许多科学工作者根据不同地区、不同年代的测量资料，按不同的处理方法推算出不同的椭球元素，现将比较重要和常用的列于表(1-1)。表中前六个元素都是根据天文、大地和重力测量资料推得的，曾用于或正用于不同国家的大地测量和地图制图中，后六个元素在推算时还应用了卫星观测资料。

1954年以前我国采用过美国海福特椭球元素。中华人民共和国成立后很长一段时间中采用1954年北京坐标系，用的是苏联克拉索夫斯基元素。根据该坐标系建成了全国天文大地网，完成了大量的测图和制图工作，这个系统在今后仍将使用一段时间。全国天文大地网平差建立了1980年西安大地坐标系，其选用的是1975年国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)第十六届大会上推荐的数值。为了使1/5万以下比例尺地形图的方里线基本上不变，提出了1954年北京坐标系(整体平差转换值)，它是在1980年西安大地坐标系基础上，将IUGG 1975年椭球改为克氏椭球，通过在空间三个坐标轴上进行平移转换而来的。

表(1-1)

参 考 椭 球 名 称	推 求 年 代	长 半 径 a	扁 率 α
德兰布尔	1800	6 375 653	1:334.0
埃弗端斯	1830	6 377 276	1:330.8
贝塞尔	1841	6 377 397	1:299.15
克拉克	1866	6 378 206	1:294.98
海福特	1910	6 378 388	1:297.0
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	1:296.3
凡 氏	1965	6 378 169	1:298.25
1967年大地坐标系	1967	6 378 160	1:298.247
史密松天文台SAO-III	1973	6 378 140	1:298.256
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

把大地控制网归算到椭球面上, 仅仅知道椭球大小是不够的, 还需要确定它同大地体的相关位置, 这就是椭球的定位和定向。关于定位和定向的方法, 详见椭球大地测量学。一个大小和定位都已确定的地球椭球才叫做参考椭球。参考椭球和相应的法线是大地测量的计算面和线。

三、大地坐标系和天文坐标系

表示地面点在地球自然表面上位置的球面坐标称为地理坐标。地理坐标又按所依据的基准线、面的不同, 分为大地坐标和天文坐标两种。

1. 大地坐标系

地面点 P 在参考椭球面上的位置用大地经度 L 和大地纬度 B 来表示, 如果点不在椭球面上, 还要用到大地高 H_x 。大地经、纬度称为大地坐标。图(1-4)表示参考椭球, NS 为椭球短轴。包含短轴的平面称为大地子午面, 子午面与椭球相截的椭圆叫做子午圈, NP_0S 为过 P 点的子午圈。垂直于短轴的平面与椭球面的截线称为平行圈, 通过椭球中心并与短轴垂直的平面叫赤道面, 其相应的平行圈称为赤道。

P 点的法线 PK 与赤道面的夹角 B 就是 P 点的大地纬度。由赤道起算从 0° 到 90° , 向北为正, 称为北纬; 向南为负, 叫做南纬。 P 点的大地子午面 NP_0S 与起始大地子午面 NGS 的夹角 L , 叫做 P 点的大地经度。由起始子午面起算, 向东为正叫东经, 向西为负称为西经。 P 点沿法线至参考椭球面的距离 PP_0 称为 P 点的大地高 H_x 。过 P 点法线与椭球面上另一点 Q 构成的法截面, 它与 P 点大地子午面的夹角 A , 叫做 PQ 方向的大地方位角。由 P 点的正北方向起从 0° 到 360° 顺时针方向计算。

2. 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 来表示, 天文经纬度称为天文坐标。若 P 点不在大地水准面上, 它沿铅垂线方向到大地水准面的距离 PP_1 称为正高 H_x 。图(1-5)为大地体, ZZ_1 为地球的旋转轴。 PP_2 为过 P 点的铅垂线, 一般不与地球旋转轴相交, 包含 P 点的垂线且与地轴 ZZ_1 平行的平面 $Z'PZ_1'$ 叫做过 P 点的天文子午面。 $Z'GZ_1'$ 是通过英国格林尼治平均天文台的起始天文子午面, 也叫本初子午面。通过地心 O 并与地轴垂直的面是地球赤道面, 其与大地水准面的交线称为地球赤道。

P 点的垂线与地球赤道面的交角为天文纬度 φ , 过 P 点的天文子午面与本初子午面的夹

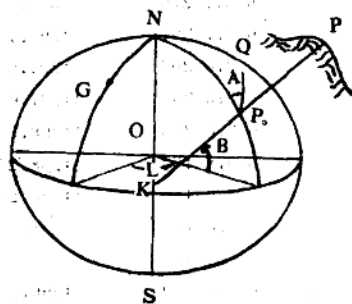


图 (1-4)

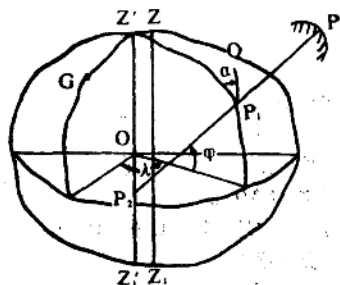


图 (1-5)

角 λ ,叫做天文经度,其度量方法与大地坐标的相同。P点沿铅垂线至大地水准面的距离称为正高 $H_{正}$ 。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。

大地坐标系和天文坐标系的简单比较见表(1-2)。

表(1-2)

项 目		大 地 坐 标 系	天 文 坐 标 系
基本、面、线		参考椭球面、法线	大地水准面、铅垂线
坐标面		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
地理坐标	经 度	L 起始大地子午面与测站大地子午面间夹角	λ 起始天文子午面与测站天文子午面间夹角
	纬 度	B 法线与椭球赤道面交角	φ 垂线与地球赤道面交角
高 程		H_A 沿法线至参考椭球的距离	$H_{正}$ 沿垂线至大地水准面的距离
方位角		A 大地子午面与包含照准点的法截面间夹角	α 天文子午面与包含照准点的垂直面间夹角
取得地理坐标的方法		1.在椭球面上推算求得 2.不能通过观测获得	1.通过天文观测方法直接测得 2.不能经过推算求得
地理坐标的特点		1.依附于椭球面法线 2.各点大地坐标相关 3.计算求得,定位精度较高	1.依附于铅垂线 2.各点天文坐标独立 3.观测求得,定位精度较低

3. 垂线偏差概念及两种坐标的关系

地球椭球与大地体间的相关位置确定后,由于大地水准面的不规则性,致使参考椭球与大地水准面一般是不一致的。过同一点的法线和铅垂线一般也不重合,两者之间有一微小角度,称为垂线偏差 u 。由于垂线偏差的存在,同一点的两种坐标值是不一致的。

若上述椭球是总椭球,相应的垂线偏差称为绝对垂线偏差。如果是参考椭球,就叫相对垂线偏差。目前总椭球元素还在不断精化,所以一般指的都是相对垂线偏差。垂线偏差在子午面上的分量以 ξ 来表示,在卯酉面上的分量以 η 来表示。卯酉面是指过地面点P的法线且与子午面垂直的平面。由椭球大地测量学得知,大地坐标与天文坐标及大地方位角与天文方位角之间的差异用下式表示

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \varphi - B \\ \eta &= (\lambda - L) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

$$\begin{aligned} A &= \alpha - (\lambda - L) \sin \varphi \\ &= \alpha - \eta \operatorname{tg} \varphi \end{aligned} \quad (1-3)$$

(1-2)式为垂线偏差方程式,(1-3)式为拉普拉斯方程式。比较同一点的天文坐标与大地坐标所得的垂线偏差称为天文大地垂线偏差。

§ 1-3 大地测量学发展简史

两千多年前,为了兴修水利和研究地球形状大小,大地测量就处于萌芽状态。埃及在尼罗河泛滥后利用测量方法来解决大地的区划。我国夏禹治水就使用了测量高低和距离的器械准绳规矩。公元前三世纪,希腊学者埃拉托斯特尼(Eratosthenes)观察到尼罗河上游色尼(今阿斯旺,纬度近于 $23^{\circ}27'$)在夏至正午时,日光正好直射井底,但在同一时刻北面的亚历山大地方日光向南偏出一个角度,与垂线方向构成 $1/50$ 圆周角,即 $\Delta\varphi\approx 7.2^{\circ}$ 。根据骆驼商队行走的时间估计两地相距5000 stadia(古希腊长度单位,1 stadia ≈ 185 米),并认为两地在同一子午线上(实际经度相差约 2°),按式(1-1)估算了地球半径约为40000stadia。尽管1 stadia等于多少米的看法不一致,但这是人类应用弧度测量概念对地球大小的第一次估算。

公元724年我国唐代的南官说等人在张遂(一行)的指导下,在今河南省滑县至上蔡实测了一条约300公里的子午弧长。并在滑州、开封、扶沟、上蔡等四个地方,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实际上代表了纬度差。所以,这是世界上第一次弧度测量的实践。

1615年荷兰人斯涅耳(Snell)首创三角测量法进行弧度测量,克服了直接丈量距离的困难。继而望远镜、水准器、测微器等发明,使测量精度大幅度的提高。十七世纪末,牛顿(Newton)和荷兰的惠更斯(Huygens)用力学的观点研究地球的形状,并推论地球是南北略扁的椭球。1683~1716年法国卡西尼(Cassini)父子用三角测量方法,测量了弧幅达 $8^{\circ}20'$ 的弧长。由其中两段弧长和各段弧长两端点的天文纬度,推算地球椭球的长半径和扁率,由于纬度测量误差较大,得出了地球为两极伸长的椭球的结论,与牛顿、惠更斯的推断正好相反。为了解决扁球与长球的疑问,法国科学院于1734年派遣两个测量分队,一队到赤道附近的秘鲁,一队到北极圈附近的拉普兰(在瑞典和芬兰的边境上),进行弧度测量,于1739年完成了测量任务。两次测量结果证实了同样 1° 的子午弧长,北弧大于南弧,即地球形状是两极略扁的椭球。这次弧度测量有力地支持了地球形状的物理学论断。由于地球形状的争论,测量仪器和弧度测量方法的改进,使大地测量有很大进展。因此,可以说大地测量的科学体系是十七世纪末叶开始逐渐形成的。

1708~1718年我国清代康熙年间,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比低纬度河北地区的要长,这个发现比法国科学院为早。当时还规定,以1度子午弧长为200市里来确定长度计量。把长度单位与地球子午线长度联系起来,这是世界上第一次。

1792~1798年由法国人德兰布尔(Delambre)领导的从法国到西班牙的弧度测量,弧幅达 $9^{\circ}40'$ 。综合法国和秘鲁的测量结果,第一次在近地地球形状理论基础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,命名为1米,这是世界上通用米制的起源。从18世纪起,继法国之后,英、法、俄、美、印度、北非等国家先后开展了弧度测量。并把沿子午线方向布设的扩展成纵横交叉的三角锁、网,这种弧度测量就改称为天文大地测量。一方面用来推求地球形状大小,更重要的方面是为了精密测图的控制需要。

18世纪到20世纪初,大地测量的理论方法和仪器又有巨大的进展。在理论方面主要有:1743年法国克莱劳(Clairaut)发表《地球形状理论》,指出用重力测量精确确定地球扁率的方法。

法；1806年法国勒让德(Legendre)提出最小二乘法理论，事实上，德国高斯(Gauss)早在1794年已经应用了这一理论推算小行星轨道，此后，他应用这一原理来处理天文大地测量成果，产生了测量平差法，至今仍应用于大地测量中；1822年高斯发表了椭球面投影到平面的正形投影法，该法目前还广泛应用；1828年他在《曲面通论》中，探讨了由大地线构成椭球面三角形的理论，提出了椭球面三角形的解法；1849年英国斯托克斯(Stokes)提出利用地面重力测量结果研究大地水准面形状的定理；1884年德国赫尔默特(Helmert)在《大地测量的数学和物理原理》中提出了在天文大地网中，使天文点的垂线偏差平方和为最小的前提下，进行参考椭球定位和解算与测区大地水准面最密合的椭球参数；1945年苏联莫洛坚斯基(Молодеский)指出，不需要任何归算，可以直接利用地球表面观测资料，严格地求定地面点至参考椭球面的大地高，直接确定地球表面的形状，这个理论已被许多国家采用。在测量仪器方面有：1858年意大利波尔勒(Porro)发明了内对光望远镜；1880年瑞典耶德林(Jaderin)提出了悬链线状基线尺测量方法，1897年法国国际度量衡局用一种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明显提高；十九世纪重力测量也有很大进展，重力摆的改进、相对重力仪的出现，使重力点数量大为增加，1900年赫尔默特推算正常重力公式时，就用了1400多点的重力测量数据；1920年威特(Wild)等人制成了第一台光学经纬仪。这个时期几乎世界上所有国家都开展了天文大地测量工作。

近几十年来，电磁波测距仪的发展，克服了量距的困难，使导线测量、边角同测方法得到广泛应用。在德国和澳大利亚等国家新布设了测边网和导线网，美国建立了横贯大陆的超高精度导线。自动安平水准仪的出现，加快了高程测定的速度并提高了精度。荷兰曼尼兹(Meinesz)提出了利用虚摆原理测定重力的方法，发展了海洋重力测量。采用石英钟记时和自动跟踪光电装置，大大提高了天文观测精度。本世纪60年代以来，人造卫星观测、甚长基线干涉测量等技术的发展，为建立全球大地网提供了条件。70年代中期，惯性测量技术的进展，可以同时求得点的几何参数和物理参数。边角同时测量的全站仪出现，它与微计算机结合能自动提供点间的高差和坐标差，与自动绘图仪联结通过野外采样能自动绘制地形图，使测量工作自动化向前迈进了一步。上述各项新技术的发展使大地测量进入了崭新的阶段。

我国自18世纪初为了编制《皇舆全图》而进行大地测量工作后，很长一段时间几乎没有开展工作，直到清末1895年才设立测绘学堂。1930年开始正规的大地测量，直到1949年布设了约2000公里的一等大地控制网，精度较低。中华人民共和国成立后不久，设立了军委测绘局，1956年成立了国家测绘总局，颁发了大地测量法式和相应的细则规范。在全国范围内布设了近8万公里包括120多个锁环的一等三角锁，在锁环中间填设二等全面三角网，在青藏高原大部地区布设了电磁波测距导线。一、二等三角点约有5万个，包括15万个方程式的全国天文大地网平差工作已经完成，建立了1980年西安大地坐标系。9万多公里的一等水准已经测完并作了平差，建立了1985年高程基准，13.7万公里的二等水准将近完成。重力点布设密度基本上达到了 $15' \times 15'$ 范围内有一点，并建立了由57个点组成的1985重力基准网。70年代中期开始，布设了特级导线5000多公里，全国37个点组成的卫星多普勒网和由39个点组成的西北卫星多普勒网等，用卫星测量方法完成了西沙、南沙群岛的大地联测。我国天文大地网是按统一规划施测的，吸取了世界各国的经验，其精度达到世界同类网的先进水平。这些基本测量网，为测制全国1/5万基本比例尺地形图和区域性的大比例尺图提供了控制基础，为经济建设、国防建设和科学研究提供了大量资料，为我国疆域版图和海域范围提供可靠的依

据。在今后的各项建设中还将起到更大的作用。

§ 1-4 现代大地测量的展望

大地测量发展已有300多年历史,在确定地面点位、研究地球形状大小和重力场等方面取得了相当可观的进展。随着现代科学技术的发展,出现了诸如卫星测量、惯性测量、全站仪等新的测量手段。航天技术、国防科技和地球动力学等方面的需要,对大地测量提出越来越高的要求。下面从几个方面对大地测量作一展望。

一、布设超高精度的零级网

导弹发射的主动段地区和卫星的定轨系统需要设置相隔几百公里甚至上千公里的跟踪站,要求站间相对点位精度小于 $(0.5 \sim 1) \cdot 10^{-6}$;地壳形变的年变率为 $2 \cdot 10^{-7}$;海平面年上升率约2.1毫米;固体潮的振幅为1~4毫米;板块运动每年运动约几厘米。综上所述,近代科学要求地面点点位相对精度小于 10^{-7} ,而目前天文大地网的边长精度为 $(0.3 \sim 1) \cdot 10^{-5}$,满足不了发展需要。所以,有必要用卫星测量及甚长基线干涉测量等手段布设超高精度控制网(或叫零级网,其相对精度为 $10^{-6} \sim 10^{-7}$,作为空间技术、战略武器发展的地面基准、测量地球自转参数和地球引力场、以及地球动力学等科学研究的监测网。

二、发展空间大地测量技术

1957年第一颗人造地球卫星发射成功之后,相继出现了卫星大地测量学。目前发展为第二代的全球定位系统(GPS),具有全天候观测、精度高、点间不要通视、不用建造觇标和直接测定三维坐标等优点,相对定位精度可达 10^{-6} 。1967年出现的甚长基线干涉测量(VLBI)技术,它是利用两端射电望远镜同步观测来自河外类星体射电源的信号,根据干涉原理测量距离和方位,测距精度达厘米级,定向误差小于 $0.005''$ 。若距离为几千公里长时,相对精度为 10^{-8} 。但类星体射电源的信号非常微弱,需要几十米直径的天线才能接收到。目前正在研究利用人造卫星作为射电源,结合少数VLBI固定站,用来测定地面上相距几十公里的相对点位,这将给测定地面点几何位置带来巨大变革。

三、惯性坐标系和动态大地测量的研究

惯性坐标系是指坐标原点在惯性空间保持不动或作匀速直线运动,而坐标轴在惯性空间保持不变的坐标系。严格地讲,由于物体都在运动,惯性坐标系是找不到的。在某些应用学科上,当所确定的坐标系其变化远小于观测所能达到的精度时,就可看作是惯性坐标系(实际上是准惯性坐标系)。随着科学技术的发展,对坐标的精度要求越来越高,对地球自转参数要求愈来愈精确。过去采用以恒星为参照方向用亮星表来定义的恒星参照系将被以河外类星体为参照方向的射电参考系所代替。由地球动力学得知,随着地壳形变、板块运动、固体潮和地球自转等影响,地表面上的点位是随时间的变迁而发生微小变化的。相反地对点位进行重复不断地精密测量,求出点位间的差异,参照惯性坐标系,就可以发现地壳形变、固体潮随时间变化的规律,提供发生地震的预兆,推算地球自转参数,并供给某一时刻的精确点位。研究点位和重力场随时间变化的规律属动态大地测量范畴。水坝、隧道和特殊建筑的形变测量,属于局部地区的动态大地测量。要研究把水平和高程系统合并起来的三维大地测量,还需探讨顾及时间因素的四维大地测量。

四、开展海洋大地测量工作

人们曾预言,21世纪将是开发海洋的时代。随着世界人口的不断增长,陆上资源日益减

少。据估计,大陆已探明的石油、煤炭等能源,只能开采近百年,这就迫使人类向占地球面积71%的海洋索取资源和食物。划定海界是大地测量的新课题。目前海洋大地测量尚处在初级发展阶段。卫星技术、惯性技术的出现,提高了海上和海底定位的能力,为海面及水下定位、海洋重力测量、海面和海底地形测量提供了条件。

五、整体大地测量学的研究

测量中的物理参数和几何参数有一定的相关性,显然,两类数据一并进行处理是严密的。卫星大地测量已能全面且分布较均匀地求得地球重力场的总貌,由于卫星高出地面200公里以上,不能求出重力场的精细结构。要研究其全面而精细的结构,必须综合利用和统一处理卫星、物理和几何大地测量的各种信息。这就构成了大地测量新的分支——整体大地测量,也是研究地球重力场的发展趋势。

六、惯性测量系统的研究

惯性测量系统(IPS)是70年代中期用于定位的一项新技术,在短短的十余年时间内,仪器发展到第三代,测量精度提高了一、二个数量级。其优点是:完全自主式,测量过程中不需要外界任何信号,不要求点间通视;全天候,只要汽车或直升飞机能运行即能测量;全能快速、机动灵活,同时测定六个大地元素;每小时可测量边长为2~5公里的点8~10个。定位相对精度为 $(1\sim2)\cdot10^{-5}$,重力异常和垂线偏差精度分别为 ±0.5 毫伽和 $0.5''$ 。缺点是价格昂贵,出故障不易检修。该系统在军事上应用尤为适宜,英、美等国已将IPS装备炮兵和导弹部队,世界上目前有近30个国家使用这种仪器。在海底定位中,IPS将发挥其独特的优点,使用起来方便易行。国外已将此系统推广到工程测量、地籍测量和石油地质勘探中。若采取一些措施,如使用静电陀螺、激光陀螺、超导加速度计、空间稳定系统和捷联式惯导系统,可望降低系统价格和提高定位精度。利用成对的超导加速度计建立重力梯度模型,把惯性力与地球引力区分开来,将使高差和重力异常的精度有明显提高,是一种作加密控制很有前途的测量系统,为测量自动化提供重要手段。GPS/IPS结合是一种有效的快速布网方案。

七、大地控制测量的研究和改革

大气折射场理论。不论是测角、测边、水准测量,还是GPS、SLR(卫星激光测距)、VLBI测量,都将受到大气折射场的影响。此种影响一方面使光线发生弯曲,另一方面使光速(或电磁波传播速度)发生变化而影响传播时间,是测量中一项受外界条件影响较大的误差。由于影响大气折射的因素颇多,且气象情况千变万化,给问题带来了复杂性。这个问题是关系到大地控制测量精度能否突破和空间大地测量精度能否向更高发展的重要课题。目前利用大气色散原理采用多波段测量方法,以减弱折射影响的测角、测边仪器正在研制和改进。测定气象元素按数学模型对折射影响加以改正等方法也在深入探讨。

水准测量的新理论和新方法。为了研究地壳垂直运动,确定地面沉降、海平面上升率、固体潮振幅等数据,为地震预报提供资料,世界上许多国家都进行周期性的水准复测工作。欲使测量精度不断提高,有关测量中的各项改正以及各类标准检定场的设置需要深入研究和具体试验。动态测角原理在经纬仪中的应用,大大提高了垂直角测定精度,使三角高程导线在某些地区有代替二等及二等以下水准测量的趋势。

自动记录、自动数据处理及数据库的建立。电子记簿大大减轻野外劳动强度,提高工效,确保计算和检核无误,必将普遍推广使用。野外采集的数据通过接口直接输入计算机作平差计算,平差成果按同样方法或经过快速处理以形成大地测量数据库,这不仅可以减轻内