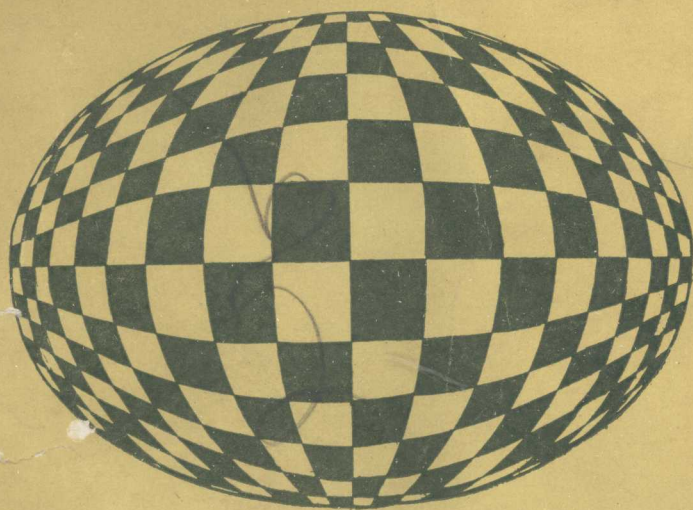


中等专业学校教材

控制测量学

(上册)

高昌洪 王文中 主编



地质出版社

中等专业学校教材

控制测量学

(上册)

高昌洪 王文中 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

地质出版社

内 容 提 要

本书着重介绍控制测量外业工作,内容包括:三、四等三角测量,水准测量,三角高程测量,电磁波测距和精密导线测量的原理、仪器和作业方法。本书可作为中等专业学校地形测量专业教材,亦可供有关技术人员参考。

* * *

本教材由孙文臣主审,经地质矿产部中专测绘类教材编委会于84年4月主持召开的审稿会议审稿,同意作为中等专业学校教材出版。

* * *

中等专业学校教材

控制测量

(上册)

高昌洪 王文中 主编

责任编辑:金光照

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092^{1/16}$ 印张: 27 字数: 615,000
1985年5月北京第一版·1985年5月北京第一次印刷

印数: 1—6,985册 定价: 4.95元

统一书号: 13038·教201

前 言

本书是根据地质矿产部1982年制定的中等地质学校地形测量专业四年制教学计划和《控制测量学》教学大纲编写的。全书分为上、下两册，上册着重介绍控制测量外业工作，下册着重介绍内业计算工作。

本书上册共六章；第一、二章由王文中同志编写，第三、四章由劳永乐同志编写，第五、六章由高昌洪同志编写。高昌洪、王文中同志负责主编。本书插图由颜平同志绘制。

本书内容紧密结合国家现行作业规范，力求理论联系实际、简明扼要、通俗易懂、适当反映我国当前生产作业中的新技术。

编者在编写过程中，曾广泛征求有关测绘单位、兄弟院校的意见。参阅了有关单位的文献资料。原稿经地质矿产部中专校测绘类教材编审委员会审定通过，并由长春地质学校孙文臣同志审校，昆明地质学校金光照同志担任本教材责任编辑，在此谨表感谢。

由于编者业务水平有限，加上时间仓促，难免还存在缺点和错误，诚挚希望使用本教材的同志提出批评指正。

编 者

一九八四年四月

于南京地质学校控制测量教研组

目 录

第一章 控制测量概述	1
第一节 控制测量的任务	1
第二节 建立国家大地控制网的基本方法	2
第三节 国家水平控制网的测量计算基准面	6
第四节 地面点水平位置的确定	10
第五节 高程的基准面和地面点高程的确定	20
第二章 三角测量	27
第一节 国家水平控制网的布网原则和方案	27
第二节 三角测量的作业内容和程序	42
第三节 技术设计	42
第四节 三、四等三角锁(网)最弱边和图形插点点位的精度估算	50
第五节 实地选点	67
第六节 造标和埋石	77
第七节 J_2 型光学经纬仪	92
第八节 经纬仪的误差	108
第九节 J_2 型光学经纬仪的检查校正和检验	119
第十节 水平角观测误差	135
第十一节 方向观测法及其测站平差	143
第十二节 分组观测、联测及其测站平差	156
第十三节 归心改正和归心元素的测定	162
第十四节 三角测量外业验算	170
第三章 水准测量	189
第一节 国家水准网的布网原则和方案	189
第二节 水准测量的技术设计、选点和埋石	191
第三节 精密水准标尺	196
第四节 精密水准仪	198
第五节 精密水准仪的检验和校正	210
第六节 精密水准标尺的检验和校正	220
第七节 水准测量误差及减弱其影响的方法	227
第八节 三、四等水准观测	237
第九节 水准测量外业计算	245
第十节 水准测量的精度估算	254
第十一节 水准测量资料的上交	256
第四章 三角高程测量	257

第一节	垂直角和指标差计算公式	257
第二节	垂直角观测	259
第三节	三角高程测量高差计算公式	264
第四节	大气垂直折光系数 K 的测定	270
第五节	三角高程起算点与水准联络点	272
第六节	三角高程测量高差计算和外业验算	274
第七节	三角高程测量的精度及其应用	279
第五章	电磁波测距	289
第一节	概述	289
第二节	电磁波测距法的基本原理和仪器分类及其应用情况	295
第三节	固频相位式光波测距的实用公式	300
第四节	固频相位式光波测距仪的基本结构及其作用	308
第五节	关于相位式测距仪自动化的几个问题	322
第六节	EOT—2000型短程红外测距仪	327
第七节	中程光波测距仪简介	336
第八节	相位式光波测距误差	342
第九节	相位式光波测距仪的检测	351
第十节	观测成果的改正计算	368
第十一节	充电机和蓄电池的使用	375
第六章	精密导线测量	382
第一节	概述	382
第二节	精密导线的布设方案	384
第三节	导线测量精度估算公式和分析	386
第四节	精密导线测量外业工作	408
主要参考书		426

第一章 控制测量概述

第一节 控制测量的任务

一、控制测量及其任务

在测量的区域内,按测量任务所要求的精度,测定一系列控制点的水平位置和高程,建立起测量控制网,作为地形测量和工程测量的依据,这种测量工作称为控制测量。

在工程建设中,控制测量的任务是建立必要精度的工程控制网,用以控制地形测量和工程测量。具体地说,在工程建设的勘测设计阶段,建立测图控制网,作为各种大比例尺测图的依据;在施工阶段,建立施工控制网,作为施工放样测量的依据;在管理阶段,建立变形观测控制网,作为工程建筑物变形观测的依据。

工程控制网的特点,是控制面积较小,边长较短,绝对误差较小,大多为独立网并采用独立的坐标系。

二、大地测量及其任务

当控制测量的区域遍及全国或地区时,为了建立国家或地区大地控制网,必须进行精密控制测量,这种面积大和精度高的基本控制测量,称为大地测量。它所测定的控制点,称为大地控制点,简称大地点。

国家大地控制网,由国家水平控制网和国家高程控制网两部分组成。建立国家水平控制网,就是精密地测定网中各大地点的大地坐标(大地经度 L 和大地纬度 B),确定它在参考椭球面上的投影位置;或精密地测定各大地点的高斯平面直角坐标(纵坐标 x 和横坐标 y),确定它在高斯投影平面上的位置。建立国家高程控制网,就是精密地测定网中各大地点的高程。

大地测量因测量区域大,测定大地点位置的精度要求高,必须考虑地球曲率的影响。因此,在建立国家水平控制网中,要选择一个合适的参考椭球面,作为处理观测成果和进行测量计算的基准面。这样,在地面上观测的成果,如水平方向(或水平角)和边长等观测值,应归化到这个基准面上,然后在该面上进行计算,求得各大地点的大地坐标。如果要求定各大地点的高斯平面直角坐标,还应将椭球面上的观测成果,归化到高斯平面上,然后在该面上把它们计算出来。

大地测量的任务是:

三 (一) 为地形测图和大型工程测量提供基本控制

大地测量对测绘国家基本地形图的控制作用如下:国家基本地形图是分幅测绘的,它要求测制的各幅地形图,必须能够无漏洞、无重叠和无歪曲地互相拼接成一个整体,并具有相同的精度。这样,就可以将各个测绘部门在不同时期测制的各个区域的地形图,逐步地拼接起来,积累成为整个国家的基本地形图。如果在全国领土上建立了统一的国家水平控制网,精密地测定网中各大地点的大地坐标或高斯平面直角坐标,就可以在实地上准确

找到各个图幅的位置。因而分幅独立测图时,各相邻图幅之间,不会出现漏洞、重叠和歪曲。又因为测定大地点水平位置的精度高,分幅测图时,各幅地形图平面位置的测量误差,受到大地点的限制,不会积累得很大,从而保证各图幅的平面位置具有相同的测图精度。因此,各相邻幅地形图的平面位置,可以在测图精度之内互相接合。

同样的道理,如果在全国领土上建立了统一的国家高程控制网,精密地测定网中各大地点的高程,则分幅独立测图时,各相邻图幅的等高线,可以在测图精度之内互相接合。

(二) 为空间科学技术和军事用途提供资料

大地测量,可提供精确的点位坐标、距离、方位和地球重力场等资料。

布设特级导线,精确测定地面发射场及其有关观测站、跟踪站的相互关系位置,用以保证人造天体、火箭等发射和定轨的精度,就是其中的一例。

(三) 为研究地球形状、大小和其它科学问题提供资料

大地测量工作本身,要研究地球的形状和大小,确定最接近地球真实形体的地球椭球。而上述地球椭球的确定,又要不断地综合全球的地面大地测量、天文定位测量、重力测量和空间大地测量等资料,才能逐渐地完善解决。此外,研究地壳变形、地震预报、各个海水面的高差和地极周期性运动等科学问题,也要大地测量提供资料。

复习思考题

一、什么叫控制测量,它的任务和特点是什么?

二、什么叫大地测量,它的任务和特点是什么?

三、为什么国家大地控制网能够控制测绘国家基本地形图?

第二节 建立国家大地控制网的基本方法

一、建立国家水平控制网的方法

建立国家水平控制网,有常规大地测量、天文定位测量和近代大地测量等三种方法。

(一) 常规大地测量方法

1. 三角测量法 在地面上,按一定的要求选定一系列的点(三角点),每一个点,都设置测量标志,并以三角形的图形把它们连接起来,构成地面上的三角网。精确地观测所有三角形的内角,以及至少一条三角边的长度,用一定的投影计算公式,将这些地面观测成果归化到高斯平面上,使地面上的三角网转化为高斯平面上的三角网,如图(1-1)所示。

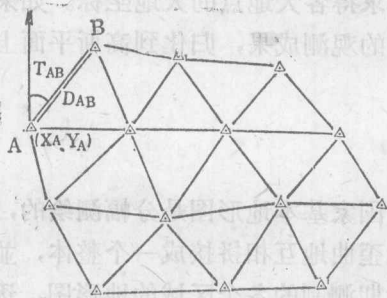


图 1-1

以归化后的平面边长 D_{AB} 为起始边,用平面三角学的正弦定理,依次解算各个三角形,算出各平面边长 D_{ii} 。以已知的 AB 边平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角,用归化后的水平角,依次算出各边的平

面坐标方位角 T_{ij} 。利用三角学公式

$$\Delta X_{ij} = D_{ij} \cos T_{ij}$$

$$\Delta Y_{ij} = D_{ij} \sin T_{ij}$$

算出各相邻点间的坐标增量 ΔX_{ij} 和 ΔY_{ij} 。最后,以已知起始点A的平面直角坐标(x_A 、 y_A)和各个坐标增量 Δx_{ij} 、 Δy_{ij} ,逐一推算出各点的平面直角坐标。以上是三角测量的方法和基本原理。

三角测量的优点,是布设的图形一般呈网形,控制面积大;测角精度高,检核角度观测质量的几何条件多,相邻三角点的相对点位误差较小。缺点是除起始边和起始方位角外,其余各边及其方位角,是用水平角推算出来的,由于测角误差的传播,各边及其方位角的精度就不均匀,并且距起始边和起始方位角越远,它们的精度就越低。但是,只要在网的适当位置上加测起始边和起始方位角,便能较好地控制误差的积累,从而保证所测定的各三角点平面位置,有足够的精度控制测绘各种比例尺地形图。因此,目前一般用三角测量方法建立国家水平控制网。

2. 精密导线测量法 在地面上,按一定的要求,选定一系列的点(导线点),每一个点都设置测量标志,并以单线的形式将它们连接起来,构成地面上的导线。用电磁波测距仪精密测量各导线边的长度,用经纬仪精密测量导线的各个转折角,然后按一定的投影计算公式,将这些地面观测成果归化到高斯平面上,使地面上的导线转化成高斯平面上的导线,如图(1-2)所示。

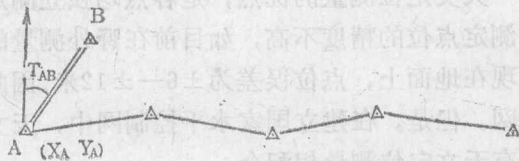


图 1-2

以已知的AB边平面坐标方位角 T_{AB} 为起始方位角,用归化后的折角依次推算出各导线边的平面坐标方位角。根据起始点A的已知平面直角坐标(x_A 、 y_A)和平面上各导线边的长度及坐标方位角,逐一推算出各导线点的平面直角坐标。以上是精密导线测量的方法和基本原理。

精密导线测量的优点,是布设的导线呈单线形式,只需前后两个相邻点通视,布设灵活,容易越过地形和地物障碍;各导线边直接测定,精度均匀,导线的纵向误差小。缺点是控制面积狭小,检核观测成果质量的几何条件少,导线的横向误差大。因此,在不利于开展三角测量的困难地区,如高原、森林和隐蔽的平原地区,一般用精密导线测量方法建立国家水平控制网。

应当指出,随着电磁波测距仪向高精度、轻小型、多功能和自动化发展,导线测量方法将广泛采用。

3. 三边测量法 三边测量方法和基本原理,是用电磁波测距仪精密测量水平控制网(三边网)中各个三角形的三条边长,根据三角学原理计算出各个三角形的三个顶角,进而推算各边的方位角和各点的坐标。

三边测量的优点,是边长均直接测定,锁的纵向误差小;相邻点在地面上通视时,不要建造觇标,可节省造标费用。缺点在于角度是间接推算出来的,因而方位角的推算精度较低,锁的横向误差较大。若要弥补这个缺陷,势必在锁网中施测较密的起始方位角,从而增加天文观测的工作量。但据有关研究资料,当采用大地四边形和中点六边形图形布设一等三边锁,而锁长和边长与一等三角锁大体相同,并在锁的两端施测起始方位角时,它

的横向误差与一等三角锁相当接近。过去,因测边受仪器和精度的限制,在建立国家水平控制网中,三边测量方法实际很少应用。

4. 边角同测法 在水平控制网中,除了测量网的全部角度外,还测量了网的一部分或全部边长,用以计算出各点的坐标,这种方法称为边角同测法。这种水平控制网称为边角网。

若国家水平控制网布设成边、角全测的边角网,它测定各点坐标的精度,较之上述三种方法都要高,但是很不经济,因此一般不宜采用。

从上述可知,建立国家水平控制网,一般在特殊情况下才采用三边测量法和边角同测法。

(二) 天文定位测量方法

宇宙天体的运行都遵循着一定的规律,因而通过对天体的观测,可以确定地面测站点的水平位置。

天文定位测量方法,是在地面测站上,用天文测量仪器观测天体的瞬时位置,并记录相应的时刻,然后按一定的计算公式,算出地面测站点的天文经度 λ 、天文纬度 φ 以及测站点至某照准点方向的天文方位角 α 。施测了天文经、纬度的地面点,称为天文点;既测量天文经、纬度,又测量天文方位角的大地点,称为拉普拉斯点。

天文定位测量的优点,是各点均独立测定,组织工作简单,受地形条件影响小。缺点是测定点位的精度不高,如目前在野外测量的天文经、纬度的中误差为 $\pm 0.2'' - \pm 0.4''$,它表现在地面上,点位误差为 $\pm 6'' - \pm 12''$ 米。因此,不能用天文定位测量方法建立国家水平控制网。但是,在建立国家水平控制网中,天文定位测量起着重要的作用,常规大地测量必须有天文定位测量相配合。

天文定位测量的主要作用是:

1. 进行参考椭球定位,确定统一的国家大地坐标系的大地基准数据,即确定大地原点(大地基准点)的大地经度 L_0 、大地纬度 B_0 和至某相邻大地点方向的大地方位角 A_0 ,作为推算所有国家大地点的大地坐标的起算数据。

2. 比较各大地点的大地坐标和天文坐标,求得它的垂线偏差(大地点的铅垂线与过该点的参考椭球法线之间的角度),用以计算垂线偏差改正,为地面观测的水平角成果归化到参考椭球面上,提供必要的的数据;将天文方位角化算为起始大地方位角,用以控制水平角观测误差的积累,提高国家水平控制网的精度。

天文方位角化算为大地方位角的简化公式是

$$A = \alpha + (L - \lambda) \sin \varphi \quad (1-1)$$

式中: α 为某大地点 K 至其相邻大地点 M 方向的天文方位角, A 为相应的大地方位角; λ 、 φ 为大地点 K 的天文经、纬度, L 为大地点 K 的大地经度。

(1-1) 式称为拉普拉斯方程式。用拉普拉斯方程式算得的起始大地方位角,称为拉普拉斯方位角。

3. 计算各大地点的高程异常,为研究地球形状、大小和将地面上观测的起始边长归化到参考椭球面上,提供必要的的数据。

应当说明,在实际测量工作中,计算各大地点的垂线偏差和高程异常,确定大地基准数据和起始大地方位角,除应用常规大地测量和天文定位测量资料外,还应用了重力测量资料。因此,用常规大地测量方法建立国家水平控制网时,必须有天文定位测量和重力测

量相配合。

(三) 近代大地测量方法

近代大地测量,有卫星大地测量、甚长基线干涉测量和惯性定位测量等。

卫星大地测量方法,分为几何卫星大地测量和动力卫星大地测量两种方法。其中,几何法可用来建立全球卫星大地网,测定测站点的大地坐标;建立卫星大地网,作为国家基本控制网的高一级控制。动力法可用来推求地球引力场参数,确定地球形状和大小、大地水准面差距、重力异常、垂线偏差和地心坐标等。

在几何卫星大地测量方法中,它的观测方法,有光学摄影法、激光测距法和无线电法。目前广泛采用的多普勒定位测量,是无线电法的一种。

多普勒定位测量,目前是利用美国六颗子午导航卫星,发射接近于150兆赫和400兆赫的两个相关频率的电磁波,当地面站的接收机接收到这些电磁波信号后,根据所测卫星相应的星历表(精密星历表或广播星历表),由接收机附有的电子计算机进行处理,然后由电传印刷机打印出地面站(接收天线位置)的绝对地心坐标。实际测量时,一般是以几天若干次卫星通过的观测结果,来确定地面站的最后坐标。

目前,利用子午导航卫星进行多普勒定位的精度,是当使用精密星历表时,可达 ± 0.5 米;当用广播星历表以短弧法平差时,可达 ± 1 米。因此,当多普勒站间的距离较短时,相邻站间的精度便较低。

大家知道,用常规大地测量方法建立国家水平控制网时,其相邻点间的精度是很高的,具体地说,相邻两点的相对点位中误差,可以保证在 $\pm 0.10 \sim \pm 0.20$ 米之内。显然,多普勒定位测量,还不能代替常规大地测量。但是,在常规大地测量中,由于误差的积累,各大地点的水平位置及长距离上的精度比较低,因此,只要将多普勒站间的距离适当增大,就可使以常规方法建立的国家水平控制网的系统误差局部化,从而提高它的内部精度。换句话说,当用分布适当的多普勒站建立卫星大地网时,就能对用常规方法建立的国家水平控制网,进行检核、加强和提高它的精度。

1976年,我国开始把卫星多普勒技术应用于大地测量。1980年,又在全国范围内布设了卫星大地网,它将作为国家水平控制网的更高一级的控制。

综上所述,目前我国建立国家水平控制网,一般采用常规三角测量和精密导线测量方法,但须有天文定位测量和重力测量相配合,还应用近代大地测量来加强和提高它的内部精度。

二、建立国家高程控制网的方法

(一) 几何水准测量方法

几何水准测量的基本原理,是利用水准仪的水平视线,读取垂直放置在地面两点上的水准标尺的分划数,求得该两地面点的高差,进而推算地面点的高程。

几何水准测量的优点,是高程测定精度较高,例如用精密水准测量将高程传算到四、五千公里远的水准点上,它的高程中误差不会超过 ± 1 米;测量得的高程是以大地水准面作为基准面(严格地说,是以似大地水准面作为基准面),它具有物理意义,能够较好地生产服务。因此,几何水准测量,是建立国家高程控制网的主要方法。

(二) 三角高程测量方法

三角高程测量的基本原理,是测定地面上两点间的水平距离和垂直角,用三角学公式计算两点的高差,进而求得地面点的高程。

三角高程测量的优点,是作业简单,布设灵活,不受地形条件的限制。缺点是垂直角加入测站点垂线偏差后,用它推算得的高差或高程,是以参考椭球面作为基准面,没有物理意义;由于大气垂直折光的影响,垂直角观测值有较大的误差,测定的高差或高程精度较低。因此,在建立国家高程控制网中,三角高程测量是辅助方法。它测得的大地点高程,可作为测绘国家基本地形图的高程控制。

应当指出,在建立国家高程控制网中,有所谓光电测距高程导线测量方法,实际上是三角高程测量方法的一种特殊形式。它测定地面上两点间高差的原理,基本上与三角高程测量方法相同,区别是用电磁波测距仪测定导线边两端点的倾斜距离,去计算地面上两点的高差。

根据国外实验的资料,在平原地区,光电测距高程导线测量的精度,可以达到三等水准测量的技术要求。就是说,在建立国家高程控制网中,它可用来代替一定等级的水准测量。

综上所述,建立国家高程控制网,以采用几何水准测量方法为主,三角高程测量方法为辅,光电测距高程导线测量可用来代替一定等级的水准测量。

复 习 思 考 题

- 一、建立国家水平控制网有哪些方法,它们之间的相互关系是什么?
- 二、三角测量方法及基本原理是什么,为什么目前建立国家水平控制网一般采用三角测量方法?
- 三、建立国家高程控制网有哪些方法,它们之间的相互关系是什么?
- 四、几何水准测量方法及基本原理是什么,为什么水准测量是建立国家高程控制网的主要方法?

第三节 国家水平控制网的测量计算基准面

一、铅垂线和水准面

在讨论国家水平控制网的测量计算基准面之前,先说明铅垂线和水准面的概念。

(一) 铅垂线

如图(1-3),地球表面上的每一个质点,主要受到两种力的作用,一是地球巨大

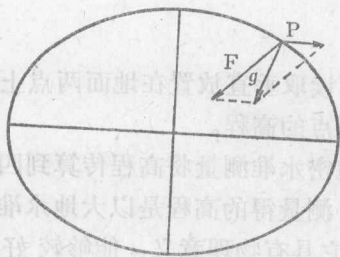


图 1-3

质量的吸引力 F ,二是地球自转而产生的惯性离心力 P ,这两种作用力的合力 g 称为重力。合力 g 作用的方向,称为重力方向,测量上称为铅垂线方向,由于离心力 P 远小于吸引力 F ,因此,它大致指向地球的质心。

地面上的物体,既然受到地球重力的作用,它便沿着铅垂线方向作加速运动,这个加速度就是重力加速度。所谓重力测量,实际上就是测定地面点的重力加速度。

(二) 水准面

静止的液体表面，称为水准面。由于同一水准面上任何一点的重力位能都相等，因此又称为重力等位面。水准面的一个重要特性，是处处与铅垂线相垂直，见图（1—4）。

如果液体的表面不垂直于铅垂线方向，见图（1—5），这时，重力 g 可分解为两个分力，一个是位于液体表面上的分力 N_1 ，一个是与液体表面垂直的分力 N_2 ，在分力 N_1 的作用下，液体就要流动，换句话说，液体表面不是水准面。由此可见，水准面一定是处处和铅垂线垂直。

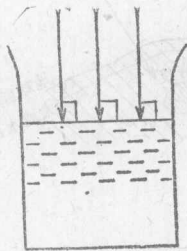


图 1—4

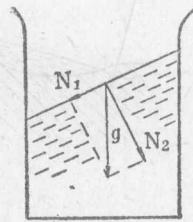


图 1—5

二、测量计算基准面的基本要求

前面说过，大地测量是大面积和精确测定大地点位置的工作，当用常规大地测量方法建立国家水平控制网时，必须考虑地球曲率的影响。为此，需要按某些基本要求来确定一个基准面，作为处理地面观测成果和进行测量计算的依据。具体地说，这个基准面，应当是最接近地球真实形状大小的简单几何形体的表面。这样，既比较符合地球的客观实际，又可使测量计算工作方便。

三、大地水准面和大地体

常规大地测量的野外工作，是在地球自然表面上进行的。地球自然表面起伏不平，高低相差较大，变化也很复杂，它不能作为测量计算的基准面。

大家知道，地球客观存在着比较稳定的海洋面，并且海洋的面积约占地球总面积的71%，因此，静止的海洋面，是地球上最广大的水准面。虽然地球的陆地上有高达8848.13米的珠穆朗玛峰，海洋上有深达11022米的马里亚纳海沟，但这些数值与地球半径6378000米相比较是微不足道的。从总体上看，由静止海洋面所包围的地球形状，比较真实地反映地球的形状和大小。于是，人们设想当海洋面处于静止状态时，把它延伸穿过大陆的下方，并保持着处处和铅垂线相垂直的特性，这样来使它形成一个连续不断的、包围整个地球的闭合曲面，这个曲面称为大地水准面。由大地水准面所包围的地球形体称为大地体，它通常当作地球的真实形状和大小，并成为大地测量研究地球形体的对象。

应当说明，由于潮汐的作用，风浪和海流的影响，海洋面时有波动而不会静止下来，因此实际上无法找到静止的海洋面。但是，大体上说，海洋面和波动，还是比较平缓和稳定的，所以人们就用验潮所确定的平均海水面来代替静止的海洋面，换句话说，大地水准面实际上是指平均海水面。

大地水准面是重力等位面，它与重力相关，是地球的物理表面。由于地面的起伏和地壳物质分布不均匀，引起了重力方向和大小发生不规则的变化，因此，处处和铅垂线相垂直的大地水准面，便成了一个微有起伏的不规则曲面，见图（1—6）。这个曲面，无法用简单的数学公式表示，因而大地水准面也不能作为测量计算的基准面。为此，还需要找出一个最接近大地体的简单几何形体来代替大地体，然后以它的表面作为基准面。

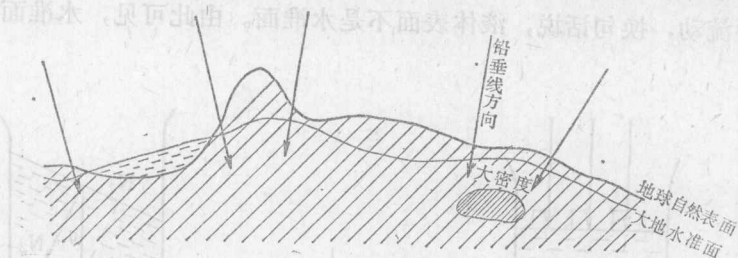


图 1—6

四、总地球椭球

十六世纪，牛顿从力学观点出发，创立了地扁学说。他认为：地球既然绕自转轴旋转产生了离心力，而离心力又垂直于自转轴，并在赤道上数值最大，因此，它使得地球在赤道方向上拉长，成了一个两极略扁和赤道膨胀的扁球。这个扁球，同一个椭圆绕其短轴旋转而形成的旋转椭球十分相近。

牛顿的这一学说，到了十七世纪，经过法国测量队在北极圈附近的拉普兰和赤道附近的基多进行弧度测量，得到了检验和证实。

现在，根据人造卫星观测资料的计算，大地体很接近于一个三轴椭球。大家知道，在三轴椭球面上进行测量计算，要比旋转椭球面复杂得多，考虑到三轴椭球的赤道扁率只有极扁率的百分之一，当它用相应的旋转椭球面代替并作为基准面时，不会影响计算精度，而计算工作大为简便。因此，通常把最接近大地体的旋转椭球，视为大地体的理想形体，并称为总地球椭球（又称为平均地球椭球），见图（1—7）。

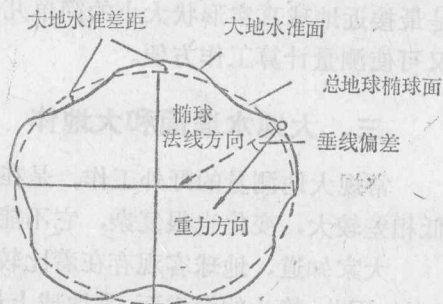


图 1—7

地球椭球一般用四个几何和物理参数定义，它们是地球长半径 a ，地球扁率 α （可用地球动力形状因子 J_2 表示），地球质量 M （可用地球地心引力常数 GM 代替），地球自转角速度 ω 。很明显，作为总地球椭球，它的四个基本参数应与地球相应的参数一致，它的表面与整个大地水准面的关系位置要配合得适当。根据这些要求，总地球椭球应满足下列具体条件：

- （一）总地球椭球的正常位，应与大地水准面上位相等；
- （二）总地球椭球中心，应与地球质量中心重合；
- （三）总地球椭球的赤道平面，应与地球赤道平面重合，即总地球椭球的短轴，应与

地球平自转轴重合；

(四) 总地球椭球的体积，应与大地体的体积相等。

从理论上说，如果在全球上布满了联成整体的天文大地网，并遍施重力测量，总地球椭球是可以测定的。但要想在整个地球表面上获得均匀分布的天文大地和重力测量资料，实践上则难以实现。卫星大地测量出现后，为解决这个问题开辟了新的途径，即通过人造地球卫星的国际联测资料，可以推算出总地球椭球的参数，并已公布过几个推算结果。然而，由于联测站的数量不多，分布又不广泛，这些结果还不很可靠。但是，只要不断地综合利用地面大地、天文、重力测量资料和卫星观测资料，终究可以使推算结果逐渐精确。

五、参考椭球

如上所述，总地球椭球目前尚未精确求得，其次，总地球椭球面虽然与整个大地水准面十分接近，但与一个国家或地区的局部大地水准面不会符合得很好。因此，各个国家为了处理和计算大地测量成果，便先用本国或一个地区的地面天文大地和重力测量资料，推算出一个与总地球椭球形状和大小相近似的地球椭球，并把它安置在适当的位置上，使它的表面与本国或该地区的大地水准面相符合，然后以这个地球椭球面作为测量计算的基准面，去处理本国或地区大地测量成果。这个由地球局部测量资料所确定，并为一国或一个地区所使用的地球椭球，称为参考椭球。

历代测量学者，推算过不少地球椭球的几何参数 (a 、 α)，由于他们所采用的方法不同，资料多寡不同，地区范围不同，所得结果也不一样，其中有代表性的和国际大地测量协会 (IAG) 推荐的椭球几何参数，见表 (1—1)。

表 1—1

椭 球 名 称	年 代	a (米)	$1/\alpha$	备 注
德兰勃	1800	6 375 653	334.0	
埃弗瑞斯特	1830	6 377 276	300.8	
贝塞尔	1841	6 377 377	299.152	
克拉克	1866	6 378 206	294.978	
克拉克	1880	6 378 249	293.459	
赫尔默特	1906	6 378 140	298.3	
海福特	1910	6 378 388	297.0	1942年国际第一个推荐值
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	298.3	
1967年大地坐标系	1967	6 378 160	298.247	1971年国际第二个推荐值
1975年大地坐标系	1975	6 378 140	298.257	1975年国际第三个推荐值
1980年大地坐标系	1979	6 378 137	298.257	1979年国际第四个推荐值

我国解放初期，由于历史的原因，暂采用克拉索夫斯基椭球作为参考椭球；参考椭球的定位，暂依1954年北京坐标系的大地基准数据为准，去推算各大地点的大地坐标。

大家知道，应用一个国家或地区的天文大地和重力测量资料推算出来的参考椭球面，会较多地反映这个国家或地区的大地水准面特征，克拉索夫斯基椭球，主要是用苏联资料及美国、西欧资料推算的，因此，它不会与我国大地水准面实际情况相符。1972年，根据

我国资料的推算,符合我国大地水准面的参考椭球几何参数,是 $a=6378666$ 米, $\alpha=1:292.2$,就是说,克拉索夫斯基椭球的长半径短了400多米。另外,同国际推荐的最新椭球几何参数相比较,克拉索夫斯基椭球的扁率比较准确,长半径则大了100多米。这种差异,虽然对地形测图影响不大,但对理论研究、实际工作和发展空间科学技术,都是不合适的。

很明显,我国废除克拉索夫斯基椭球是势在必行。因此,在天文大地网整体平差中,建立了中国1980年大地坐标系,其参考椭球的几何参数,采用1975年国际推荐值,参考椭球定位的大地原点,是西安原点。

复习思考题

- 一、什么叫铅垂线、水准面、大地水准面、大地体、总地球椭球和参考椭球?
- 二、一个国家进行大地测量,为什么要选用一个合适的参考椭球面作为处理成果和进行测量计算的基准面?
- 三、我国解放初期,暂用什么参考椭球?

第四节 地面点水平位置的确定

一、大地坐标系

(一) 参考椭球的基本线和面

1. 法线 如图(1—8),通过参考椭球面上的点 P_1 ,作参考椭球的切平面,过点 P_1 而垂直于切平面的直线 P_1K ,称为点 P_1 的法线。法线一定与参考椭球的短轴相交,且一般不交于参考椭球中心点 O 。

2. 子午面和子午圈 含参考椭球短轴 NS 的平面,称为子午面(又称大地子午面)。如图(1—8)中的 NP_1RS 平面,是点 P_1 的子午面,它即为短轴 NS 与点 P_1 的法线 P_1K 所构成的平面。

子午面与参考椭球相截得的椭圆,称为子午圈或经圈(又称为子午线或经线)。如图(1—8)中的椭圆 NP_1RS ,是点 P_1 的子午圈。

根据世界各国协议,通过英国格林尼治天文台的子午面,作为大地经度的起始面,这个子午面,称为起始子午面或首子午面。

3. 平行圈 垂直于参考椭球短轴 NS 的平面,与参考椭球相截得的圆,称为平行圈或纬圈(又称纬线)。

4. 赤道面和赤道圈 过参考椭球中心 O 并垂直于短轴 NS 的平面,称为赤道面。赤道面是大地纬度的起始面。

赤道面与参考椭球相截得的大圆,即图(1—8)中过参考椭球中心的平行圈 WRE ,称为赤道圈或赤道。

5. 法截面和法截线 含法线的平面,称为法截面或法面。法截面与参考椭球相截得的线,称为法截线,见图(1—9)。参考椭球面上任意一点的法截线有无穷多个,而子午圈是其中的一个。

6. 卯酉面和卯酉圈 垂直于子午面的法截面, 称为卯酉面。卯酉面与参考椭球相截得的线, 称为卯酉圈, 见图(1-9)。

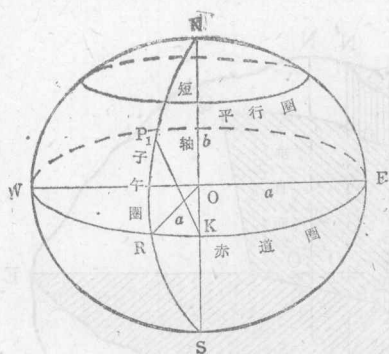


图 1-8

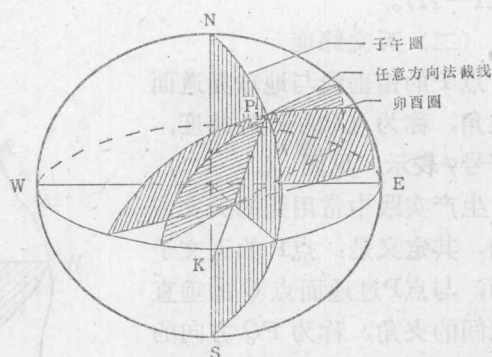


图 1-9

(二) 大地坐标系

用常规大地测量方法测定地面点的水平位置时, 所采用的坐标系是大地坐标系。大地坐标系的坐标是大地经度和大地纬度, 它用来表示地面点 P , 沿着法线方向投影在参考椭球面上的投影点 P_1 的水平位置, 见图(1-10)。

1. 大地经度 如图(1-10), 点 P_1 的大地子午面与起始子午面之间的夹角, 称为点 P_1 的大地经度, 以符号 L 表示。

2. 大地纬度 如图(1-10), 点 P_1 的法线与赤道面的夹角, 称为点 P_1 的大地纬度, 以符号 B 表示。

生产实践中常用到的大地方位角, 它的定义是: 点 P_1 的大地子午面, 与点 P_1 过参考椭球面上点 Q_1 的法截面之间的夹角, 称为 P_1Q_1 方向的大地方位角, 并从点 P_1 的正北方向顺时针计算, 见图(1-10)。大地方位角以符号 A 表示。

从上述可知, 大地经、纬度和大地方位角都与法线相联系, 即以法线为依据, 或者说, 以参考椭球面为依据。

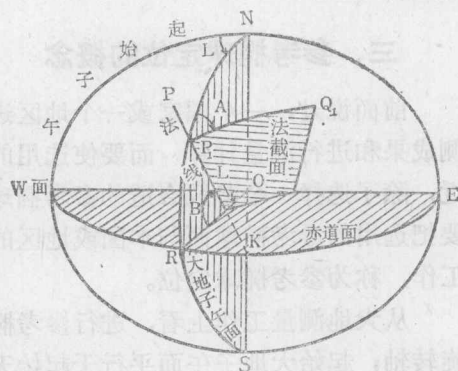


图 1-10

二、天文坐标系

用天文定位测量方法直接测定地面点的水平位置时, 所采用的坐标系是天文坐标系, 测得的坐标是天文坐标, 即天文经度和天文纬度。

在天文坐标系中, 它的基本线和面如下: 图(1-11)中, NS 为地球旋转轴(又称地球自转轴或地轴), P 为地面点, PK' 为点 P 的铅垂线。包含地面点 P 的铅垂线的平面, 称为点 P 的垂直面。在点 P 的垂直面中, 有一个与地球旋转轴 NS 相平行的垂直面 $N'PR'S'$, 称为点 P 的天文子午面。通过地球质量中心 O , 并垂直于地球旋转轴 NS 的平面 $W'R'E'$,