

362347

成都工学院图书馆
基本馆藏

高等学校教材

大地测量学

上册

(修订本)

武汉测绘学院大地测量教研组编



中国工业出版社

前 言

在1958年我国工农业生产大跃进与文化革命、技术革命广泛开展的形势下,我組通过教育革命,在认真学习和贯彻党的教育方针的基础上,决定重新編写适合于天文大地測量专业的大地測量教科书。本书的編写是在党的领导下贯彻三結合的方针而完成的,既充分发挥了教研組全体教师的力量,又吸取了学生的意見。在內容方面,力求理論与实际密切結合,尽量做到:使学生按照本书的內容学习并参加一定的专业生产实习后,既能掌握大地測量的基本理論,又能順利地参加实际生产作业。

本书分上、中、下三冊出版,上冊內容主要是叙述大地測量野外工作的理論和方法;中冊讲述大地測量的計算和平差問題;下冊是大地測量的理論部分,即有关天文大地网平差和弧度測量的理論。

由于我組同志水平有限,特别是生产經驗不足,而且編写時間又比較短促,深入討論不够,因此本书內容疏漏錯誤之处在所难免。在編排次序、內容选择等方面也不見得完全恰当。尙望讀者提出宝贵的意見。

武汉測繪学院大地測量教研組

1959年7月

修訂版序

在本书的修訂版里，除对第一版中許多印刷錯誤和实例中的一些不妥之处，作了改正外，主要作了以下一些修改：

在第二章的建立平面控制网的各种测量方法中，加述了边角同测的三角网，此外又增加了国家平面控制网布設的改进方向一节。

第三章中关于选点的作业組織与方法，作了适当的改写；对基綫网扩大边权倒数的計算理論，略加补充；在觇标建造的操作过程方面，作了适当的精簡和概括。

第四章度盘分划綫誤差及其檢驗一节中，对耶利謝也夫方法全部作了改写。

第五章中观测工作的实施及成果整理一节，大部經過重新組織和改写。

第六章中关于标准长度問題，介紹了1960年国际权度會議的有关決議；对基綫尺的膨胀系数和尺长方程式部分，也作了改写。

第七章精密导綫測量，根据物理測距的发展情况，全部作了改写。

第八章关于水准測量的精度鉴定公式，作了适当的补充。

由于我們教学工作很重，还没有能够对本书进行全面的改写。即使在現在的修改部分，也还可能有些錯誤和不妥之处，希望讀者指正，以便今后作全面改写时的参考。

武汉測繪学院大地測量教研組

1963年1月

目 录

前 言

修訂版序

第一章 緒 論	1
§ 1-1 大地測量學的任务及其对社会主义建設的意义	1
§ 1-2 地球的体形——大地水准面和参考橢圓体	2
§ 1-3 大地測量发展簡史	5
第二章 国家平面控制网的布网方案和原理	7
§ 2-1 建立平面控制网的各种測量方法	7
§ 2-2 国家三角网的布网原則	10
§ 2-3 一等三角鎖系(天文大地网)的布設方法与精度	12
§ 2-4 二等三角网的布設方法与精度	25
§ 2-5 三、四等三角网的布設方法	28
§ 2-6 基綫网的图形	32
§ 2-7 独立控制网的布設原則	36
§ 2-8 平面控制网布設方法的改进方向	37
第三章 三角測量的选点和造标埋石	40
§ 3-1 三角网布設計划的拟訂	40
§ 3-2 选点的作业組織和三角点位置的选择	41
§ 3-3 选点方法概述	42
§ 3-4 觇标高度的計算	43
§ 3-5 基綫与基綫网的选定	46
§ 3-6 三角測量中的造标工作	53
§ 3-7 中心标石的类型及埋設	59
第四章 精密測角仪器	62
§ 4-1 精密測角仪器构造的特点	62
§ 4-2 精密光学經緯仪	64
§ 4-3 大地經緯仪	66
§ 4-4 显微鏡測微器	67
§ 4-5 光学測微器	77
§ 4-6 經緯仪中各軸的誤差	86
§ 4-7 水准器的檢驗与校正及仪器的置平	91
§ 4-8 照准部与水平度盘的偏心差及其檢驗	96
§ 4-9 望远鏡的目鏡測微器及其周值的測定	107
§ 4-10 度盘分划綫誤差及其檢驗	111
§ 4-11 垂直度盘和天頂距讀数	131
§ 4-12 精密測角仪器的維護	133

第五章 三角点上的观测工作	136
§ 5-1 精密测角的各种误差	136
§ 5-2 精密测角的一般原则	139
§ 5-3 供光设备和司光工作	140
§ 5-4 方向法、全圆方向法及其测站平差	143
§ 5-5 史颇伯全组合测角法及其测站平差	150
§ 5-6 三方向法(不完全方向法)及其测站平差	161
§ 5-7 变形组合测角法(对称测角法)及其测站平差	166
§ 5-8 特殊情况下水平角观测结果的处理	169
§ 5-9 基线网观测及其测站平差	176
§ 5-10 归心改正和归心元素的测定	185
§ 5-11 天顶距观测	192
§ 5-12 观测工作的实施及成果整理	196
第六章 基线测量	204
§ 6-1 概论	204
§ 6-2 悬链线丈量法中所用的主要工具	205
§ 6-3 殷钢基线尺长度的检定	208
§ 6-4 基线丈量的野外工作	221
§ 6-5 悬链线的基本公式及悬链线丈量法中的几项改正	230
§ 6-6 基线测量成果的整理及长度计算	238
§ 6-7 基线丈量的误差来源及最后长度的精度鉴定	247
§ 6-8 殷钢基线尺的维护	250
第七章 精密导线测量	252
§ 7-1 概论	252
§ 7-2 物理测距导线的布设	252
§ 7-3 有关物理测距的精度问题	254
§ 7-4 物理测距导线的误差理论	255
§ 7-5 物理测距导线的設計	259
§ 7-6 倾斜距离的化算	268
§ 7-7 精密导线测量的野外工作	270
第八章 精密水准测量	273
§ 8-1 国家高程控制网的布设	273
§ 8-2 一、二等水准路线的选择和水准标石的埋设	277
§ 8-3 精密水准仪及精密水准尺	281
§ 8-4 精密水准仪的检验和校正	289
§ 8-5 精密水准尺的检验	298
§ 8-6 精密水准测量的误差来源及其影响	301
§ 8-7 精密水准测量的一般规定和作业程序	303
§ 8-8 跨河精密水准测量	308
§ 8-9 水准面的不平行性和高程系统	319
§ 8-10 水准测量精度的鉴定	323

§ 8-11 水准测量的外业计算.....	331
§ 8-12 水准测量的概算和平差.....	333
第九章 三角高程测量	337
§ 9-1 三角高程测量的基本公式.....	337
§ 9-2 双向观测的计算公式.....	339
§ 9-3 地面大气折光系数的选择.....	340
§ 9-4 三角高程测量所得高差的性质.....	342
§ 9-5 三角高程测量的精度及其应用.....	344
§ 9-6 三角高程测量的计算和平差.....	346

第一章 緒 論

§1-1 大地測量学的任务及其对社会主义建設的意义

大地測量学的基本任务是：

1. 研究如何建立国家大地控制网，作为測制各种比例尺地形图的基础，并为国防、各項經濟建設和科学技术問題提供有关地面点精确位置和高程的資料；

2. 研究地球的体形和大小，确定最适宜于本国領土的参考橢圓体和它的定位，作为大地測量計算的基础，并为研究地壳构造、地壳运动等科学問題提供必要的天文、大地、重力資料。

为了測繪和編制全国各种比例尺的地形图，首先必須要求在各个地区所測制的地形图能够互相拼接，成为一个整体。其次还要要求無論在那一地区所測制的地图都能达到一致的精度。要达到上述两个目的，就必須在全国領土上布設整体的、具有均匀密度和精密的国家大地控制网——包括平面控制网和高程控制网。大地測量工作的主要内容就是按照最科学的方案，并用最合理的方法，布設这样的国家大地控制网。

在科学技术飞跃发展的今天，当人类已經进入征服宇宙的新紀元的时候，精密測定地面上許多点的位置和高程，将具有愈来愈重要的意义。因此国家大地控制网的布置不仅要滿足測图的需要，而且还必須为解决更复杂的科学技术問題准备必要的条件。

大地測量工作在地球表面广大的面积上进行。为了将大地測量的觀測結果加以正确的处理，以便得到精确的平面位置和高程，就不得不研究地球的体形和大小，首先是研究本国領土范围内的地球体形，确定最适宜的参考橢圓体，用以代替不規律的地球表面，作为大地測量計算的基础。为此必須在进行大地測量的同时，还进行天文和重力測量。只有綜合利用大地、天文、重力的資料，才能正确地解决这个問題。

此外，有关地球的其他一系列科学問題，例如，地壳的升降运动，大陆的移动現象，地极的周期性运动等，也需要大地測量学来协助解决。这些現象都影响到天文大地測量的成果，換句話說，也只有根据不同时期，不同地点的天文大地測量成果，才能驗證和研究这些运动。

由此可見，大地測量工作在我国社会主义建設事业中具有非常重要的意义。無論是国民經濟建設或国防建設都和大地測量有着密切的联系。如开发祖国的丰富宝藏，兴修水利，建設工业基地和城市，发展农林和交通运输等各項經濟建設，都需要不同比例尺的地形图作为规划、設計和施工之依据。由于各項建設的規模极大，范围极广，要求在短時間內測制全国基本地形图，并逐步施測各种比例尺地形图，将成为我們測量工作者的艰巨任务。为此，首先就需要在最短的時間內完成基本大地网的工作，然后随着測图的需要，逐步加密。

在經濟建設的同時，還必須加強國防建設。地圖是軍事統帥和指揮員的眼睛，沒有它就無法指揮作戰。尤其是現代的炮兵作戰和防禦工事就更需要詳細和正確的地圖。

我們大地測量工作者應該認識到我們的工作是與祖國的經濟建設和國防建設都有着直接的關係。國家基本建設首先需要地圖，而大地測量又是測圖的基礎，我們必須在黨的領導下，努力掌握大地測量學的知識，有信心地按多快好省的要求來完成祖國交給我們的任務——建立全國天文大地控制網，為全面測圖和其他測量工作以及科學研究工作打好基礎。

§1-2 地球的體形——大地水準面和參考橢圓體

大地測量工作是在地球的自然表面上進行的，這個表面上有山、谷、江、湖、海洋等等的起伏。為了計算控制點的位置和測繪地形圖，就有必要把直接觀測的結果歸化到一個參考面上，這個參考面必須尽可能地與地球總體形的表面相符合。為此就必須先要認識地球的體形和大小。

1. 大地水準面的概念

根據力學我們知道，轉動着的地球體上任何一個質點都同時受到兩個力的作用：一個是地球對它的引力，另一個是由於地球自轉而產生的離心力（圖1-1）。這兩個力的合力，就是作用於該質點的重力。重力的方向就是鉛垂線方向。在測量學中已講過，處處和鉛垂線方向成正交的麵叫水準面。地球體上和體內存在着無數個這樣的水準面，大地測量學就要找出一個最接近於地球表面的水準面來代表地球的形狀。

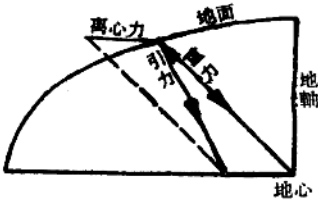


圖 1-1

設想當海洋面處於靜止平衡狀態的時候，並把它延伸到大陸的內部，使它形成一個連續不斷的、閉合的水準面，這個水準面稱為大地水準面。大地水準面所包圍的體形叫做大地體。大地水準面和大地體就是大地測量學上研究地球體形的對象。

2. 參考橢圓體

由於地球外層物質分布不均勻和表面地形起伏的緣故，使得各個地點的重力方向發生局部的變化，而處處與重力方向正交的大地水準面顯然也就有不規則的變化，因此這個僅僅具有上述物理性質的表面，無法用簡單的、可以計算的數學公式來表示。所以大地測量的成果也就不可能在大地水準面上進行計算。

為了大地測量計算的需要，應當選擇一個能用數學方法簡單表示的、在形狀和大小方面與大地體相接近的體形來代替大地體。選擇適當大小和扁率的旋轉橢圓體就可以滿足上述的要求，所以通常用它來代替大地體，並稱它為地球橢圓體。

與大地體外形符合最好的地球橢圓體稱為總地球橢圓體。總地球橢圓體必須滿足下列三個條件：

- (1) 总地球椭圆体的中心与大地体的重心相合，二者的赤道平面也相合；
- (2) 总地球椭圆体的体积与大地体的体积相等；
- (3) 总地球椭圆体面与大地水准面之间高差的平方和为最小。

事实上，只有当全地球上都布满了天文大地网，并进行了重力测量之后，才能求得满足以上三个条件的总地球椭圆体。在没有求得总地球椭圆体之前，每一个国家，为了进行测量成果的处理，都采用一个不完全满足以上条件的椭圆体，与本国领土比较相合的地球椭圆体，用以作为处理成果的依据，我们把它称为参考椭圆体。

参考椭圆体的形状和大小用它的长半轴 a 和短半轴 b 来表示，为了计算工作方便，通常用扁率 α 来代替短半轴 b 。所谓扁率，是地球椭圆体的长、短半轴之差和长半轴之比。即

$$\alpha = \frac{a - b}{a}$$

长半轴 a 和扁率 α 称为参考椭圆体的元素。

求定地球椭圆体的形状和大小要依据广大地区内天文大地测量和重力测量的资料。到目前为止，世界各国已有许多测量学者推算出地球椭圆体的数值。由于他们所用资料的多寡不同，地区范围不同，因此所得地球椭圆体的数值亦不尽相同。

苏联中央测绘科学研究所 $\Phi. H.$ 克拉索夫斯基教授领导下所推算得的地球椭圆体元素的数值为：

$$a = 6378,245 \text{ 米} \quad \alpha = 1:298.3$$

具有这个数值的椭圆体称为克拉索夫斯基椭圆体。

在这个椭圆体的推算中，不仅采用了苏联本国的大地测量数据，同时也应用了西欧和美国的资料，应用资料的范围包括地球上 20,000,000 平方公里的面积，并引用了苏联大地科学家研究出的最新理论，因而得出结果与地球的真正体形比较最为接近。

现在我国的大地测量工作采用了克拉索夫斯基椭圆体作为参考椭圆体。

3. 参考椭圆体的定位

既然把参考椭圆体面作为某一区域或某一国家大地测量计算的参考面，就应当把它与地球体的相互位置确定下来，才能把地面上的点按照这样确定的关系转移到参考椭圆体面上。确定参考椭圆体与地球体之间相互位置的工作叫做参考椭圆体的定位。

为了说明定位的方法，必须首先说明表示地球椭圆体面上一点位置的坐标系。确定椭圆体面上一点 P 的坐标，要根据两个基本平面：

一个是椭圆体的赤道平面，它是通过椭圆体的中心且与旋转轴 NS 正交的平面；另一个是点 P 的大地子午面，它是通过点 P 且包含旋转轴 NS 的平面。这个平面在椭圆体面上截出的曲线称为点 P 的子午椭圆（图 1-2）。

点 P 的大地子午面与格林尼治天文台大地子午面（起始子午面）间的夹角 L ，称为大地经度；点 P

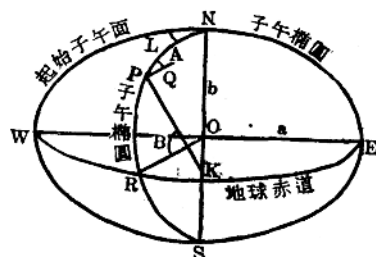


图 1-2

的法线 PK 与赤道平面的夹角 B 称为大地纬度。大地经、纬度就是点 P 的大地坐标。通过点 P 的法线 PK 和椭圆体面上一点 Q 的平面与点 P 的大地子午面所成的夹角 A 称为点 P 至 Q 法面的大地方位角，自点 P 的正北方向顺时针计算。

由此可见，大地经、纬度和大地方位角都是以法线为依据，也就是说，以椭圆体面为依据。

此外，点 P 的位置可以在点 P 上安置仪器用天文测量的方法来确定，但这时仪器的纵轴是与点 P 的铅垂线的方向相合，因而所得的位置是以垂线为依据，将与大地坐标的数值有所不同。包含点 P 的垂线且与地球旋转轴相平行的平面，称为点 P 的天文子午面。这个平面与起始子午面所成的夹角 λ 称为点 P 的天文经度；点 P 的垂线与地球赤道平面所成的夹角 φ 称为点 P 的天文纬度。天文经度和天文纬度是点 P 的天文坐标。包含点 P 的垂线且通过地面上一点 Q 的平面与点 P 的天文子午面所成的夹角 α 称为点 P 至点 Q 垂面的天文方位角，也是从点 P 的正北方向顺时针计算。

由此可见，天文经、纬度和天文方位角都是以垂线为依据，也就是说，以大地水准面为依据。

参考椭圆体初步定位的方法是：在大地控制网的主干三角系中选择一个三角点 P'_0 作为起始点(图1-3)，在这个起始点上，用天文测量的方法精确地测定该点的天文坐标 λ_0 、

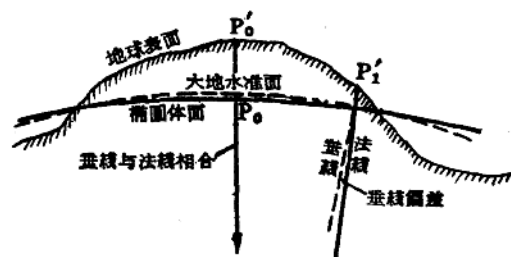


图 1-3

φ_0 和至另一三角点的天文方位角 α_0 ，并假定 λ_0 、 φ_0 和 α_0 就是参考椭圆体面上起始点 P_0 的大地坐标 L_0 、 B_0 和大地方位角 A_0 ，即 $\lambda_0 = L_0$ ， $\varphi_0 = B_0$ 和 $\alpha_0 = A_0$ 。我们称这一起始点 P'_0 为大地基准点，它的大地坐标 L_0 、 B_0 及大地方位角 A_0 为大地基准数据。其他三角点的大地坐标都根据大地基准数据来推算。

此外还假定点 P'_0 高出椭圆体面的高程恰好等于点 P'_0 高出平均海面(大地水准面)的高程，以使在点 P_0 上大地水准面与参考椭圆体面相切。这就是初步定位的方法。当具有大量的大地测量资料之后，还可以用更完善的方法来改进这个初步定位。

4. 垂线偏差的概念

参考椭圆体经过定位以后，就确定了它和大地体之间的位置关系。但由于这两个体形的大小和形状都不完全相同，因而尽管定位非常恰当，也无法使参考椭圆体面与大地水准面处处相合。这表现在两方面：其一，地面点对大地水准面的垂线和它对参考椭圆体的法线一般并不相合，二者所成的夹角称为垂线偏差；其二，大地水准面和参考椭圆体面不会处处相合，它们之间的高差，称为大地水准面对参考椭圆体面的差距(简称大地水准面的差距)。

垂线偏差和大地水准面差距数值的大小，不仅与地壳物质分布不均匀有关，而且与参考椭圆体的大小及其定位有关。选取不同的参考椭圆体，就会有不同的垂线偏差，所以也

称为**相对垂线偏差**。如果是总地球椭球体，这时的垂线偏差称为**绝对垂线偏差**。

如上所述，由于垂线偏差的影响，就使得根据大地基准点在参考椭球体面上算得一点的大地坐标，与在该点上直接用天文观测所得的天文坐标有所不同。因而反过来也可以利用许多点的大地坐标与天文坐标的差异来推求各点上的垂线偏差。为此须在大地控制网中布设一定数量的天文点，进行天文坐标的测定。有了适当布置的天文点的垂线偏差值，再配合重力测量，就可以进一步研究大地水准面的起伏，这是目前研究地球体形和大小的主要方法之一。从天文大地网中所求得的许多点的相对垂线偏差又可以进一步研究如何改进所选用的参考椭球体和它的定位。

如果参考椭球体的大小和定位选择得适当，垂线偏差一般是个非常微小的角度，平均在 $3'' \sim 4''$ 左右，但在地壳构造异常的地区，最大可能达到 $30''$ 左右；大地水准面的差距最大可达 ± 100 米至 ± 150 米。

§1-3 大地测量发展简史

人类通过生产实践和对天体运行规律的观察，在公元前六世纪就已经知道地球是个圆球体。此后人们又设法推算这个圆球体的大小。公元前三世纪，古希腊学者埃拉托色尼观察到尼罗河上游色尼地方在夏至正午时，日光正好垂直地射入井内；而在它北面的亚历山大利亚地方在夏至正午时，日光与垂线方向构成 $1/50$ 圆周的角度，按今日圆周分为 360° 来说，相当于 $7^\circ.2$ （图1-4）。埃拉托色尼认为这两地同一子午线上（实际经度相差 2° 余），

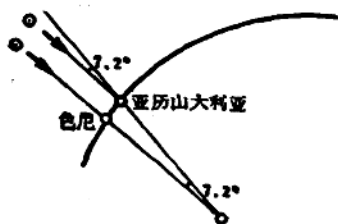


图 1-4

并根据步行日程估计二地相距约 5000 希腊古里（1 希腊古里约等于 185 米）。根据这些数据，他估算出地球的周长为 250,000 希腊古里。这是人类对地球大小的第一次估算，所得结果比现代最精确的结果约大 15%。

我国古代劳动人民很早就观察到天体运行与四季气候之间的密切关系，并利用观察天象指导农业生产，因此天文学在我国发展很早。在观察天象时人们发现了在同一季节，南北不同的地方天体的位置也不同，有“地

差千里影差一寸”之说。为了准确地测定“影差”与地面南北距离的关系，公元 725 年（唐开元 12 年）在河南平原上进行了长达 300 公里一段子午弧长的直接丈量。“影差”实际上就代表纬度差，所以这次测量实际上就是一种弧度测量。这样大规模的丈量工作，在人类历史上还是第一次。

十七世纪初，荷兰人斯奈洛第一次应用三角测量方法测定弧度。同时由于生产技术的发展，望远镜、测微器、游标、水准器等相继发明，测量仪器的制造日趋完善，基本上奠定了近代大地测量工作方法和观测技术的基础。

生产力的发展也促进了科学的发展。牛顿在他的万有引力学说的基础上研究了地球的体形，断定地球并不是一个完全的圆球，而是两极略扁的扁球体。

由于生产力的发展，人们不仅关心地球的体形和大小，更需要测量地球表面的形状，并且用地形图把它表示出来。为了这种目的，在十七世纪后半期法国开始进行了三角测

量。

我国在1702年，为了測繪“皇輿全图”，曾进行了大規模的天文大地測量。这次天文大地測量工作不仅在当时規模最大，而且还发现了緯度愈高每度弧长愈长的事实，証明了牛頓理論的正确。欧洲为了解决这个問題曾派遣两个远征測量队去拉普兰和秘魯进行弧度測量，但这项工作是在我国已經証实之后进行的。

在十七世紀，人类就发现在不同緯度上摆钟行走的速度不相同，說明了重力随緯度而变化。根据这种事实和牛頓万有引力学說，1743年克萊饒发表他的名著“地球体形学的理論”，奠定了用重力測量求定地球体形的方法。

十八世紀的欧洲社会，資本主义的发展推动了生产力的提高，对于測量制图的需要日益增长，同时仪器制造技术也有了很大的改进，观测精度也大为提高。从十八世紀后半叶起各資本主义国家都相继展开了大地測量，到了十九世紀大地測量工作就愈来愈广泛了。

由于大地測量和重力測量資料积累愈来愈多，推算地球体形和大小的精度也愈来愈高。

二十世紀二十年代，在世界上出現了第一个社会主义国家——苏联。社会主义制度使生产力获得迅速发展，各項經濟和国防建設都迫切需要地图，因此在偉大的十月社会主义革命胜利之后不久（1919年），就成立了測量总局，开始有系統的进行大地測量工作。四十多年以来，苏联建立了世界上規模最大、精度最高、科学价值最大的天文大地网，并从而推算出了目前最可靠的地球橢圓体的元素。

通过大規模大地測量工作的实践，苏联測量工作对大地測量的理論和技术也作出了很多有价值的貢獻。例如，Φ.Н.克拉斯夫斯基和許多大地測量工作者对于大地測量很多方面理論和实际問題的研究，以及M.C.莫洛金斯基通訊院士对于天文大地重力水准的研究，都有力地推动了大地測量的发展。

我国在解放以前，由于帝国主义的侵略和国民党反动統治的腐敗无能，測繪事业长期未得到发展，大地測量工作也进行得很少。由于沒有建立国家統一的大地控制网，北洋軍閥和国民党統治时期所編测的1:100,000和1:50,000比例尺的地形图，其质量很差，而且各省建立自己的坐标系統，互不联系。这些地图对于今天來說，沒有多大实用价值。

解放以后，随着社会主义建設的需要，祖国的測繪事业获得飞跃发展。建立了全国統一的坐标系統和高程系統，編訂出統一的作业規範。十多年来已完成了大量的大地測量成果和地形图，在数量上远远超过旧中国半世紀的測繪工作的总和，而且在质量上也已达到或接近世界先进水平。这是党的社会主义建設总路綫在測繪战綫上的偉大胜利，也是每一个測繪工作者积极努力的結果。

應該指出，我国幅員广闊，測繪任务非常繁重。并且由于科学技术的日新月异，大地測量的理論和方法也必然朝着新的方向发展。为此作为一个大地測量工作者，不仅要掌握現行的大地測量方法和理論，并应密切注意一切新的科学成就，研究改进現行的方法和創造新的方法，为祖国測繪事业作出更大的贡献。

第二章 国家平面控制网的布网方案和原理

§2-1 建立平面控制网的各种测量方法

在緒論中已經指出，大地测量的主要任务是在国家的全部領土上建立平面控制网和高程控制网，作为一切測图工作的基本控制。在本节中我們討論建立平面控制网的各种方法、它的基本内容和各种方法的适用范围。

現代可能应用于建立平面控制网的测量方法有四种：天文測量，三角測量，精密導綫測量，雷達測距网。現分別討論如下：

1. 天文測量

人类很早就发现一切天体（包括太阳、行星、恆星等）在空中运行都遵循着一定的規律，而且在地面上不同地点所看到的同一天体的位置也不相同。利用这种自然界的規律，人們很早就会从观测天体的位置来推算地面观测点在地球上的位置（天文經、緯度）以及确定地面目标的方位（天文方位角）。这门科学称为实用天文学。

人类最早編繪的地图就是利用这种天文測定的点位作为控制点，因此可以說，天文点的測定是建立平面控制网的最古老方法。

天文測量方法的优点在于：各个点位的測定是个別进行的，天文点之間不需要任何地面的联系，因此組織工作最为簡單，完全不受地面自然地理条件的影响。但天文測量方法的缺点：首先，天文測定的点位精度不高，用現代最精密的仪器和最完善的方法观测，緯度測定的中誤差可达 $\pm 0''.2$ ，經度測定的中誤差可达 $\pm 0''.4$ （在地面上表現点位的中誤差約为 $\pm 6 \sim \pm 12$ 米）。不仅如此，天文測定以鉛垂綫为依据，在§1-2中我們已經指出，由于地壳物质分布不均匀，地面一点的垂綫偏差平均达 $\pm 3'' \sim 4''$ ，有些地方可能达 $\pm 10''$ 以上，且地面上相距不远的两点，其垂綫偏差可能有很大的变化。如果两点間的垂綫偏差之差达 $5''$ ，則根据两点的天文經、緯度推算出两点間的水平距离就要与实际的距离相差达150米，由此可见，直接利用天文点作为平面位置控制是不适宜的。

如果測区内已有足够的重力資料，根据它們就有可能推算天文点的垂綫偏差概值，用以改正天文測定的結果。这样求得的垂綫偏差概值只能达到 $\pm 1''.0 \sim 1''.5$ 的精度，在地面上表現为 $30 \sim 50$ 米，还不足作为一般測量工作的平面控制。但是在边远荒僻，人烟稀少的地区，很难用其它方法布設控制网时，如果急于測繪小比例尺地形图，例如1:100,000或更小的比例尺，此时利用相隔較远的天文点作为測图的平面控制仍有其实用价值。

在現代的大地測量工作中，虽然很少用天文点作为直接控制，但是在布設大地网时，都不能沒有天文点。这时天文点的作用在于推算大地方位角，称为拉普拉斯方位角，用以控制水平角观测誤差的累积。所以我們常把基本平面控制网称为天文大地网。关于这个問

題我們將在§2-3中討論。这里仅仅指出，天文測定虽然不是布設平面控制网的直接方法，但布設平面控制网时仍必須作天文測定，所以实用天文学是与大地測量密切相关的。

2. 三角測量

在測量学中我們已經知道，为了測定地面上許多点之間的相对平面位置，我們可以測量各点連綫的水平距离和連綫之間的水平角。在地面上直接丈量水平距离，受地面起伏的限制，而且不易达到高精度；水平角观测則只要求各点之間能够互相通視，工作組織也比较簡單，而且也易于达到很高的精度。如果我們把控制点布成三角网，相邻点之間要求互相通視(如图 2-1 所示)，那末只要測定网中一条边的水平距离(例如 AB)，再測量所有三角形的角度，就可以通过三角形的解算逐一推算网中所有各边的边长。如果 AB 的方位角(或坐标方位角)和点 A 或点 B 的坐标(大地坐标或平面直角坐标)为已知，我們又可以推算网中所有各边的方位角和网中所有各点的坐标。用这种方法作平面控制就称为三角測量。

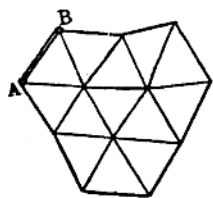


图 2-1

在一个三角网里至少要測定一条起始边的边长和方位角，还要知道一个起始点的坐标，这些数据称为三角网的起算数据。

对国家三角測量而言，起始点的坐标是由大地基准数据确定。

起始边的边长是用基綫測量的方法丈量求得：或者直接丈量起始边；或者丈量一条基綫，然后通过基綫网推算起始边的边长。应用現代物理測距的方法(光速測距或微波測距)，可以不受地形的限制，直接測定起始边的边长，达到足够的精度。

起始边的方位角由天文观测来决定。但是天文方位角受垂綫偏差的影响，不能直接用作大地測量的起算数据。根据拉普拉斯方程式：

$$A = \alpha + (L - \lambda) \sin \varphi \quad (2-1-1)$$

可以由天文方位角推算大地方位角，式中 A 表示大地方位角， L 表示大地經度， α 表示天文方位角， λ 表示天文經度， φ 表示天文緯度。

由此可見，为了决定起始边的大地方位角，不仅須在起始边的端点上測定天文方位角，而且还要測定它的天文經、緯度。至于大地經度 L 则是根据三角測量的結果在橢圓体面上推算求得。

这种在点上測定了天文經、緯度和天文方位角的三角点称为拉普拉斯点。按公式 (2-1-1) 推算出来的大地方位角称为拉普拉斯方位角。

三角測量的主要观测工作是水平角观测。根据水平角观测的結果推算出的各三角形的边长和方位角，必然受到水平角观测誤差的影响，因此距起始边愈远，推算出来的边长和方位角的精度愈低。为了减少这种推算誤差的积累，在規模較大的三角网里就必须每隔若干三角形測定一条边的边长和方位角。

从以上介紹的三角測量工作概况可以看出，三角測量的主要观测工作是水平角观测。用現代精密測角仪器可以使水平角观测的中誤差保証在 $\pm 0''.5 \sim \pm 0''.7$ 以下。用这样精度的角值所推算的边长和方位角已經可以保持很高的精度，而且我們还可以增加基綫和拉普拉斯方位角控制来限制推算誤差的积累。由于这些优点，三角測量是目前布設平面控制网

最适宜的方法，也是最广泛应用的方法。

3. 三边测量及边角同测的三角测量

由于光速测距和微波测距技术的发展，直接测量地面两点间的距离，已经大大简易，因而在三角网的观测方法上，已形成逐渐变化的趋势。一种极端的情况，是三角网中只测边长，不测角度，这种测法称为三边测量。在这种网中，各边的方位角要通过边长来推算，其精度较低。为了保持较高的精度，必须在网中布设具有相当密度的拉普拉斯点，这将使天文测定的工作量大大增加，所以三边测量不宜作为正规的平面控制网的布设方法，只有在测绘难以到达地区的小比例尺图时，获得应用，例如下面将谈到的雷达测距网。

另一种可能是在测角网中加测所有的边，称为边角全测的网，这种测法精度最高，但工作量则增加甚大，在目前来说，也不宜作为平面控制网布设的普遍方法。

再一种可能是在测角网中加测某些边，这样的网称为边角同测的三角网。这种测法可以提高三角网的精度，或保持与测角网相同的精度，而降低对于三角点位置选择的苛刻要求，从而增加选点的便利和降低造标的费用。所以这种测法宜于采用，也是今后改进三角网测设方法的一个方向。

4. 精密导线测量

由于物理测距技术的发展，使得过去由于直接丈量不便，而在国家平面控制网测设中不常采用的精密导线测量，日益占有重要的地位。在地势平坦和森林隐蔽地区，布设三角网时，为了获得多方面的通视，往往要建造很多的高标，不但选点困难，费用也极浩大。其次，在高山地区，不得不把控制点选在高山的顶峰，攀登艰难，运输不便，并且由于空气稀薄的关系，观测工作也有困难。在这些情况下，布设精密导线都比较有利，因为在导线测量中，要求通视的方向，一般较少，选点比较容易，善用地形，也可以减低觇标的高度，从而节省费用；在高山地区，导线可以沿着河谷和交通线敷设，不必攀登高山。此外，根据具体设计比较的经验，即使在半开阔和丘陵地区，用精密导线代替三角网，在经济上往往也是有利的。

精密导线网也需要一个起始点的坐标和至少一边的方位角作为起算数据，此外，为了控制方位角推算误差的累积，也要每隔若干导线边测定拉普拉斯方位角。

5. 雷达测距网

用现代的雷达测距方法，利用载在飞机上的空中雷达站测定地面上两个雷达接收站之间的距离，一次直接测定的距离可以长达数百公里。用这样的边长布设测距控制网，可以用很少几个点控制面积很大的地区，这种控制网称为雷达测距网。

雷达测距的精度与其他物理测距方法相比，是比较粗略的，数百公里边长的测定中误差大约可以达到 ± 5 米（与所测距离的长短无关），比同样距离用三角测量推算所能达到的精度为低，因此它还不能用于布设国家基本控制网。但是这种精度已经使雷达测距网有可能控制比例尺1:100,000和1:50,000的地形测图。因此用雷达航测方法时（用雷达测距方法决定空中摄影点的位置），边长100~200公里的极为稀疏的雷达测距网就可以满足航测制

图对于控制点的需要，而不必进行其他的野外补点工作。由此可见，雷达测距网对于在荒僻地区迅速测绘小比例尺地形图有其特殊的价值。

综合以上所述几种测量方法，可以得出结论：三角测量是目前布设平面控制网的主要方法，边角同测的方法可以改进三角网的布设或提高三角网的精度，而精密导线测量是正在发展，日益占有重要地位的一种方法。

下面我们先讨论三角测量布网的原理和具体方法。

§2-2 国家三角网的布网原则

在计划国家三角测量时必须考虑以下几个原则。

1. 国家三角网必须有足够的密度

国家三角网是国家测图的基本控制，所以国家三角点（简称大地点）的密度要能满足测图的要求。一般要求在一个图幅的面积内有3~4个大地点，比例尺愈大则每个图幅的面积愈小，因而需要三角点的密度也就愈大。

中小比例尺测图可以采用航空摄影测量法。应用这种方法时可以在室内加密控制点，因而所需的大地点的密度可以较稀。对于比例尺1:100,000和1:50,000测图，一般要求每隔10~15公里须有一个大地点；对于比例尺1:25,000和1:10,000测图每隔7~9公里须有一个大地点。

对于大比例尺测图，由于每个图幅的面积很小，这时就可以联合几个图幅的测区根据其中已有的大地点共同加密控制点，并不需要图幅中的3~4个基本控制点都是大地点。一般要求，对于比例尺1:5000测图，平均每15~20平方公里须有一个大地点，也就是大地点的平均距离为4~5公里；对于比例尺1:2000测图，平均每3~6平方公里须有一个大地点，相当平均距离1.5~2.5公里。

此外，为了国防上的需要，要求某些地区的大地点密度与大比例尺测图所需的密度相同。

2. 国家三角网必须有足够的精度

考虑国家三角网的精度问题也就是考虑它能保证多大比例尺测图的问题。根据测图的需要，一般要求相邻两点点位的相对中误差，表现在图上时不超过 ± 0.1 毫米。对于比例尺1:50,000测图，这相当地面上 ± 5 米，如大地点间的平均距离为13公里，则大地网边长的相对中误差达到1/2600即可。如国家三角网必须保证比例尺1:2000测图，两点间的点位相对中误差就必须小于 ± 0.2 米，当平均边长为2公里时，大地网边长的相对中误差就不应超过1:10000，可见测图的比例尺愈大，所需的精度就愈高。

考虑国家三角网的精度只满足中、小比例尺测图的要求，虽然在时间、人力和物力方面都较经济，但当建设事业发展很快时，处处将愈益迫切地需要大比例尺地形图，如果国家三角网对此不能满足，各有关部门就必须自己进行大地网的测量工作。这样将增加各有关部门的工作负担，推迟建设的速度。如果到广泛进行大比例尺测图时，才考虑提高大地

网的精度，則勢必要改建已成的大地网，將造成各方面的巨大浪費。

合理的方案是国家三角网的精度至少应能保證1:2000大比例尺測圖的需要。考虑到現代科學技術的發展對精密測定地面點位提出愈來愈高的要求，国家三角网的精度最好還能保留一定的潛力，以便在需要的地區可以測定更精密的點位。另外一方面，在地理條件特殊困難的地區，可以例外地先布設精度較低的控制网，以便進行供規劃用的小比例尺測圖的工作。

3. 从大到小逐級控制的原則

建立国家三角网的目的是为了在全国的領土上建立一个統一的平面坐标系統，以使各个地區可以互不相关地同時進行測圖工作，而測得的地形圖可以互相拼接。如果進行全面的布网，則即使只为滿足比例尺1:100,000測圖的要求，以边长10~15公里的三角形布满

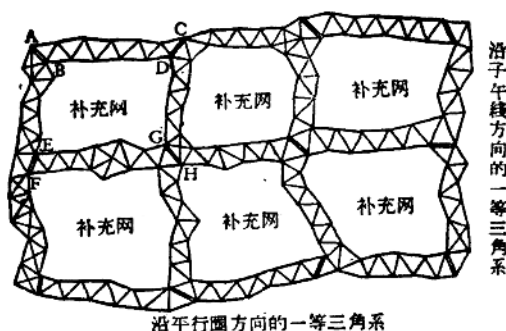


图 2-2

全国領域，一方面由于按次擴展，將需要極長的時間，另一方面由于觀測誤差的累积，將使所得成果不能滿足要求的精度，这样，就不能达到上述的目的。

最合理的办法是先在国家領土上布設一个骨干性的大地网，然后視測圖先后的需要在有关区域内以骨干网为基础再布設补充网，如图2-2所示。骨干性的大地网一般由許多纵横的鎖段所构成，由于它起着基本控制的

作用，所以称为一等三角測量。

在一等三角鎖段所构成的鎖环中布設补充网时，先布設边长較大的全面网，称为二等三角測量，然后再在二等三角网的基础上視需要逐步加密大地点，这就是三、四等三角測量。

各等三角測量的边长逐漸縮短，这就是从大到小的原則，也就是从整体到局部的原則。

高等級的三角測量既然是次一等級三角測量的基础，对后者起着控制作用，因此就要求高等級三角測量具有較高的精度，所以三角測量的精度是逐等遞降的。

根据国家建設需圖的情況，一般也是先需要小比例尺圖，然后要大比例尺圖，所以上述的从大到小的原則也是符合实际需要的。至于某些高等控制尚未布設而急需大比例尺測圖的地區，可以先根据自己的需要布設边长較短的独立网，将来再与国家三角网相連結成为其中的一个組成部分。

4. 各等級三角測量必須有統一的方案和細則

在領土廣闊的国家建立国家三角网是一件极其繁重的工作，需要相当长的时期才能完成。国防和經濟建設所需要的各种測圖工作，不可能等待国家三角网完成之后再進行，而