

# 第一章 绪 论

## § 1-1 控制测量的任务和作用

在一定的区域内,按测量任务所要求的精度,测定一系列地面标志点(控制点)的水平位置和高程,建立起控制网,这种测量工作称为控制测量。测定控制点水平位置的工作叫平面控制测量;测定控制点高程的工作叫高程控制测量。所以,控制测量是由平面控制测量和高程控制测量组成的。

广义的控制测量包括大地控制测量和工程控制测量。在全国广大的区域内,按照国家统一颁发的法式、规范进行的控制测量称为大地控制测量,这样建立起的控制网叫国家大地控制网。大地控制网中的点,叫大地控制点。为了某项工程建设或施测局部大比例尺地形图的需要,在较小的地区范围内,在大地控制网的基础上独立建立的控制网,叫工程控制网,这种控制测量称为工程控制测量。狭义的控制测量即指工程控制测量。

研究建立国家大地控制网的理论、方法的科学称为大地测量学。研究建立工程控制网的理论、方法的科学称为控制测量学。

### 一、大地测量的任务和作用

大地测量直接、基本的任务是在广大区域上精密测定一系列地面标志点的位置(点的水平坐标和高程),建立精密的大地控制网。精密的大地控制网可以为地形测图提供控制基础;为研究地球形状和大小提供资料。一般认为,前者是它的主要技术任务,后者是它的主要科学任务。

#### 1. 为地形测图和大型工程测量提供基本控制

大地控制网从以下三个方面体现控制地形测图:

第一,控制测图误差,保证地形测图的精度。测图中每描绘一条方向线、量一段距离,都会产生误差。这种误差在大面积测图中将逐渐传递积累,使地形、地物在图上的位置产生大的误差,并使相邻图幅不能接合。如果以大地控制点控制测图,可以把误差限制在各大地控制点和图根点之间。这就保证了地形、地物在地图上的位置足够精确,即保证了地图的精度,并且相邻图幅自然可以接合。

第二,把地球表面(球面)上的地形、地物测绘成平面图,并控制由此产生的误差。地球接近于旋转椭球体,其表面是不可展曲面。若硬性展平就会出现变形和裂口等现象,即用一般方法不能把球面上的地形测绘在平面图上。但是,大地控制点在一定旋转椭球面上的位置(坐标)是可以精密确定的,并且可以按一定的数学方法把它换算为投影平面上的点位,而后就可以把地球表面地形测绘在平面图上并控制测图误差,使地图能够拼接而不产生明显

的变形和裂口。

第三,使各地的测图工作可以同时开展,并保证所测各图幅可以互相拼接。由于大地控制点的坐标系统是全国统一的,这样,不管在任何地区同时或先后开展测图工作,都不会出现相互重叠或不能拼接的现象。

### 2. 为研究地球形状、大小和其他科学问题提供资料

地球形体接近于旋转椭球,因此研究地球的形状、大小,就是要确定旋转椭球的长半径  $a$  和短半径  $b$ ,或长半径  $a$  与扁率  $\alpha = \frac{a-b}{a}$ 。要确定  $a, \alpha$ , 必须综合利用大地测量、天文测量和重力测量的资料才能实现。所以,为研究地球形状、大小提供资料是大地测量的主要科学任务。应该指出,大地测量为确定地球的  $a, \alpha$  提供资料,而  $a, \alpha$  又反过来作为大地测量成果计算的必要数据,这是个相辅相成的问题。此外,地震预报、研究地壳变形、各个海水面的高差和地极周期性运动等科学问题,也要求大地测量提供资料。

### 3. 为空间科学技术和军事需要提供保障

大地测量可以提供精确的点位坐标、点间距离与方位、地球重力场资料或确定基本控制点相对于地球质量中心的空间坐标,以便为人造天体、远程武器的发射及其轨道的确定提供必要的资料。

## 二、工程控制测量的任务和作用

工程控制测量的服务对象是各种工程建设、城镇建设和土地规划与管理的工作,另外还有各种变形监测工作。工程控制测量的任务和作用主要表现在以下三个方面。

### 1. 建立用于测绘大比例尺地形图的测图控制网

城镇建设、土地规划与管理等需要有较大比例尺的地形图、地籍图;另外,在工程建设的设计阶段,工程人员也需要在大比例尺地形图上进行区域规划和建筑物的设计,并在地形图上获得设计所依据的各项数据。为此需要先建立工程所涉及区域的区域控制网,以保证大比例尺地形、地籍测图的需要。

### 2. 建立服务于施工放样的施工控制网

在工程建筑施工时,工程人员要将图纸上设计的建筑物,例如水库大坝、隧道桥梁、房屋建筑等放样到实地上去。放样过程中,仪器所安置的方向、距离都是依据控制网计算出来的。因而在施工放样之前,需要建立必要精度的施工控制网。

### 3. 建立服务于变形监测的变形控制网

大型水库、桥梁、高大建筑物在建成之后,由于各种应力的变化可能引发地层基础和建筑物本身的变形、倾斜等变化。若这种变形变化过大,会影响工程建筑物的正常运转使用,甚至危及建筑物和人民生命财产的安全。因此,一些重要工程建筑物竣工后需布设变形控制网,用以长期监测工程建筑物及其地基地层的变形。另外,大城市的地面沉降、地质断层的位置都需布设变形控制网进行监测。变形监测网一般需具有较高的精度。

以上所述的施工控制网和变形监测网统称为专用控制网。

控制测量学的主要内容是研究建立控制网的理论和方法。它和大地测量学的主要区别

是:控制测量学研究的对象是工程控制网,而大地测量学研究的对象为国家控制网。工程控制网与国家控制网又有相同和不可分割的地方,如国家控制网中的三、四等控制点,它本身就是为工程建设及测量地形图服务的;控制测量中的二、三、四等控制测量又基本上是按大地测量的理论、方法和精度施测的。因此,控制测量学和大地测量学所讨论的内容在很多方面是相同的。当然二者又是有区别的,大地测量学重点研究一、二等控制问题;控制测量学着重研究专用控制网和工程控制网的建立问题。

## § 1-2 建立控制网的基本方法

控制测量是由平面控制测量和高程控制测量组成的。平面控制测量是通过建立平面控制网,以确定地面点在地球椭球面上或某一投影平面上的位置;高程控制测量是通过建立高程控制网,以确定地面点的高程——地面点至某一基准面的距离。控制测量的方法可以归纳为两类:常规地面测量和卫星定位测量。

### 一、建立平面控制网的常规地面测量方法

#### (一) 三角测量

在地面上,按一定的要求选定一系列的点(三角点),以三角形的图形把它们连接起来,构成地面上的三角网或锁。每一个点设置测量标志,精确地观测所有三角形的内角,并至少测定三角网或锁中一条边的长度和天文方位角,用一定的投影计算公式,将这些观测成果化算到某一投影面上,使地面上的三角锁或网转化为投影平面上的三角锁或网,如图 1-1 所示。以化算后的平面边长  $D$  为起始边,用平面三角形的正弦定理,依次解算各个三角形,算出所有的边长  $D_{ij}$ ;以化算后的平面坐标方位角  $T_{AB}$  为起始坐标方位角,用化算后的平面角,依次推算出各边的平面坐标方位角  $T_{ij}$ 。

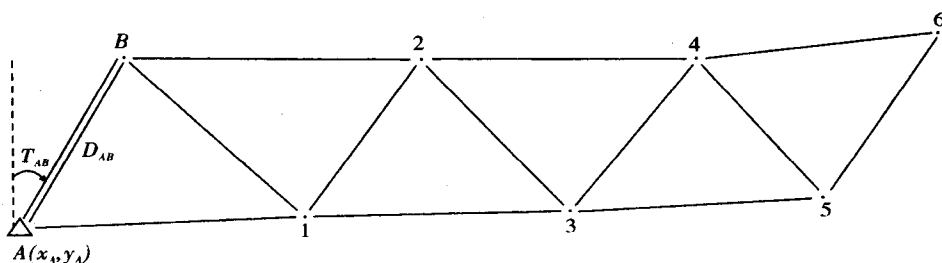


图 1-1 三角测量示意图

利用公式

$$\begin{cases} \Delta x_{ij} = D_{ij} \cos T_{ij} \\ \Delta y_{ij} = D_{ij} \sin T_{ij} \end{cases} \quad (1-2-1)$$

算出各相邻点间的坐标增量  $\Delta x_{ij}$ 、 $\Delta y_{ij}$ 。以已知点  $A$  的平面直角坐标  $x_A$ 、 $y_A$  和坐标增量

$\Delta x_{ij}$ 、 $\Delta y_{ij}$ ，逐点算出各点的平面直角坐标  $x_i$ 、 $y_i$ 。以上是三角测量的基本原理。

在电磁波测距仪和卫星定位测量方法被广泛使用以前，三角测量是主要的平面控制网建网方法。我国 1984 年完成平差的国家天文大地网的主体形式就是三角锁或网。但三角网由于需多方向通视，并常常需建立高标，且耗时、费力，成本高，现已基本不再采用三角测量法布设新网。代之的是卫星定位网和导线网。

## (二) 导线测量

在地面上，按一定的要求，选定一系列的点(导线点)，以折线的形式将它们连接起来，构成导线。每个点都设置测量标志，用测距仪器测量各个导线边的长度，用经纬仪在各导线点上测量相邻导线边的水平夹角，并至少在导线一端测定出一条导线边的天文方位角(或已知其平面直角坐标方位角)。然后按一定的投影公式，将地面观测结果化归到投影平面上，使地面上的导线转化成投影平面上的导线。如图 1-2 所示。

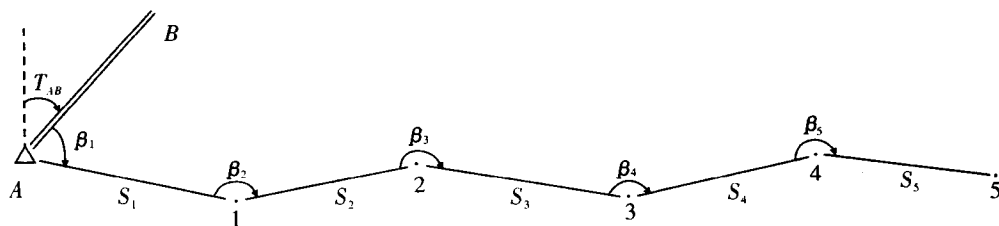


图 1-2 导线测量示意图

以已知的  $AB$  边的平面坐标方位角  $T_{AB}$  为起始方位角，用化归后的各转折角的平面角值依次推算出各导线边的平面坐标方位角  $T_{ij}$ ，用化归后的导线平面边长  $D_{ij}$  和算得的平面坐标方位角  $T_{ij}$ ，依公式(1-2-1)算出各相邻导线点间的坐标增量  $\Delta x_{ij}$ 、 $\Delta y_{ij}$ 。然后根据起始点  $A$  的已知平面坐标  $x_A$ 、 $y_A$  和坐标增量  $\Delta x_{ij}$ 、 $\Delta y_{ij}$  逐一推算出各个导线点的平面直角坐标  $x_i$ 、 $y_i$ 。以上是导线测量的基本原理。

导线测量的优点是，呈单线布设，坐标传递迅速；且只需前后两个相邻导线点通视，易于越过地形、地物障碍，布设灵活；各导线边均直接测定，精度均匀；导线纵向误差较小。缺点是，控制面积小；检核观测成果质量的几何条件少；横向误差较大。因此，在不易进行三角测量的地区和隐蔽地区，一般用导线测量方法建立平面控制网。我国的传统天文大地网就是以三角测量为主、以导线测量为辅的方法建立的。

随着电磁波测距仪的普及应用，导线测量已成为常规地面测量建网的主要方法。

## (三) 三边测量

三边测量与三角测量的不同之处，仅在于三角测量需要观测所有三角形的各个内角；而三边测量法需要测定所有三角形的全部边长，根据三角学的原理由测定的三角形边长计算出各个三角形的三个内角，其他与三角测量法完全相同。

三边测量的缺点，也是要求多方向同时通视；而且检核条件太少，例如一个中点多边形只有一个检核条件。由于这些原因，纯三边网在实践中应用不多。

#### (四) 边角同测法

在三角网或锁中,除了按三角测量的方法用经纬仪观测所有三角形的全部内角外,还用测距仪器测定网或锁中的全部三角形的边长,用以计算出各个三角点的坐标,这种布设控制网的方法称为边角同测法。

边角同测法一般应用于高精度专用控制网,例如高精度变形监测网。

## 二、建立高程控制网的常规地面测量方法

### (一) 几何水准测量

几何水准测量是建立国家高程控制网的主要方法。它的基本原理是:利用水准仪的水平视线读取垂直放置在水准仪前后两地面点上的水准标尺之分划线,求得两地面点间的高差,进而逐点推算出地面点的高程。

几何水准测量的优点是精度较高,如一等水准测量的每公里偶然中误差不大于  $\pm 0.45$  mm;测得的高程以大地水准面(严格地说是似大地水准面)为基准面,具有物理意义,能够较好地为建设服务。因此,几何水准测量被广泛采用。

### (二) 三角高程测量

三角高程测量的基本原理是:测定地面上两点间的距离和垂直角,依三角公式计算出两点间的高差,进而求得地面点的高程。三角高程测量作业简单,布设灵活,不受地形条件的限制。其缺点是:由于大气垂直折光的影响,垂直角观测值含有较大的误差,使得测定的高差或高程精度较低。因此,三角高程测量虽然在高程控制中得到大量应用,但必须有足够数量的直接高程点(即用几何水准测量法测定其高程的点)作为其高程起算点,以满足测绘国家基本比例尺地形图对高程控制的精度要求。

近年来,随着电磁波测距仪的完善与普及,电磁波测距三角高程测量和电磁波测距高程导线已经引起测量界的重视,并得到了初步的应用。电磁波测距三角高程导线的精度可以达到四等水准的精度。

国家水平大地控制网和高程控制网虽是各自单独建立的,建立方法也不相同,但它们之间存在密切的联系。首先,对于决定地面点的位置来说,两控制网缺一不可,在计划布设平面控制网的同时,就要考虑布设高程控制网问题。其次,水准网虽是单独建立的,但在平原地区,一些平面控制点则直接与水准点重合。三角高程网则直接与平面控制网重叠在一起,而且它需要平面控制网的边长数据。

## 三、卫星定位测量

卫星定位测量是利用卫星定位接收机接收定位卫星发射的无线电信号,并通过一定的数据处理而获得测站位置的测量方法。目前正在运行的卫星定位系统有美国的 GPS 定位系统和俄罗斯的 GLONASS 定位系统。下面以应用广泛的 GPS 系统为例简介卫星定位方法。

全球定位系统(GPS)是美国军方开发的全球性、全天候、连续的无线电卫星导航定位系统,原为美国军方服务,后部分功能向民用用户开放。经过多年的研究开发,GPS应用于民用

定位测量的技术不断发展完善。在控制测量方面, GPS定位测量因其具有精度高、速度快、成本低的显著优点, 已经迅速成为控制测量、特别是平面控制测量的主要方法。而相应地传统控制测量方法则主要在 GPS无法施展的地方和领域, 以及作为 GPS网的进一步加密, 发挥着不可替代的作用。

GPS定位系统由空间卫星星座、地面监控系统和用户接收设备三大部分构成。

GPS定位系统的空间卫星星座, 由24颗卫星组成, 其中包括3颗备用卫星。卫星高度约为20 200 km。24颗卫星分布在6个等间隔的轨道面上, 轨道面相对赤道面的夹角为 $55^\circ$ , 每个轨道面上有4颗卫星, 相邻轨道面的邻近卫星的相位相差 $30^\circ$ 。卫星轨道为近圆形, 运行周期约11 h 58 min。卫星分布如图1-3所示。这样的卫星分布, 除个别地区的不长时间外, 可以保证全球任何地区、任何时刻都有不少于4颗卫星可供观测。这就提供了在时间上连续的全局导航能力。

卫星发播两个频率的载波无线电信号,  $L_1 = 1\ 575.42\ \text{MHz}$ ,  $L_2 = 1\ 227.6\ \text{MHz}$ 。在 $L_1$ 载波上调制有1.023 MHz的伪随机噪声码(称粗捕获码, 或称C/A码)和10.23 MHz的伪随机噪声码(称精码, 或称P码), 以及每秒50 bit的导航电文。在 $L_2$ 载波上只调制有精码和导航电文。粗捕获码可用于低精度测距过渡到捕获精码。精码用于精密测距。

地面监控部分包括5个监控站、3个注入站和1个主控站。监控站的主要任务是取得卫星观测数据并将这些数据传送到主控站。主控站的主要任务是收集监控站对GPS卫星的全部观测数据; 利用这些数据计算每颗GPS卫星的轨道和卫星钟改正值; 依此外推1天以上的卫星星历及钟差, 并按一定格式转化为导航电文以便由注入站注入卫星的存储器。注入站的主要任务是在每颗卫星运行至上空时把这类导航数据及主控站的指令注入卫星。

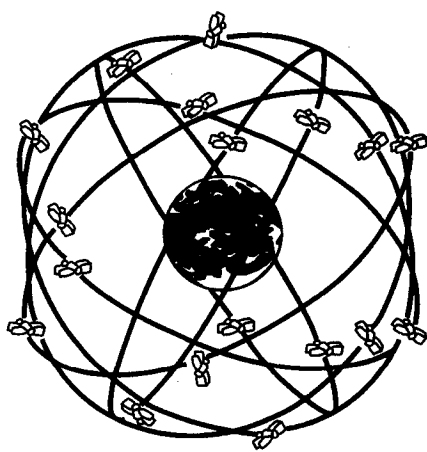


图1-3 GPS卫星分布示意图

用户接收机的主要功能是接收卫星发播的信号, 并利用本机产生的伪随机噪声码取得距离观测量和导航电文; 根据导航电文提供的卫星位置和钟差改正信息, 就可计算接收机的位置——即测站点坐标。

GPS卫星定位测量的几何原理是距离交会。观测时刻的卫星坐标可通过导航信息获得, 即卫星相当于已知坐标点, 因而接收机观测到至少3颗卫星的距离 $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ (见图1-4), 就可以用距离交会法获得测站点的坐标。当然, 实际测量时考虑到接收机时钟有偏差, 要同时观测4颗以上卫星, 以便解出测站的三维直角坐标 $x, y, z$ 和接收机钟差 $\delta t$ 四个未知数。

用户接收机还可进行载波相位观测。利用两个测站同步观测的相位观测值进行相对定位, 即求测站间的空间坐标差 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , 可以达到高于传统地面控制网一个以上数量级的定位精度。

除美国的GPS系统和俄罗斯的LGONASS系统之外, 尚有正在开发的欧洲空间局的伽

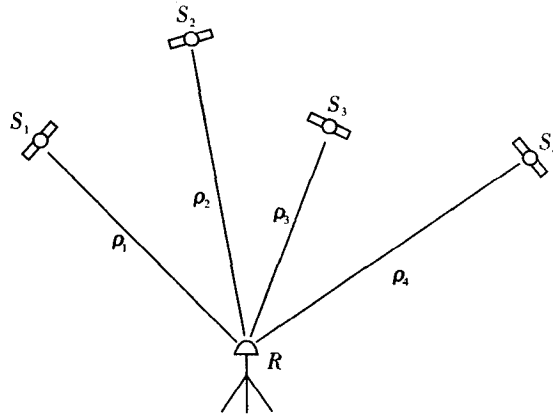


图 1-4 GPS 定位的几何原理

利略系统。我国也参加该系统的投资与开发。另外,作为一种起步,我国自己开发的局部卫星定位系统“北斗双星定位系统”现已投入应用。相信在不久的将来,我国的卫星定位事业将会达到更高的水平。

## 第二章 平面控制网的布设

本章讲述平面控制网的布设,至于高程控制网的布设则在第八章叙述。本章内容涉及平面控制网的布设原则、布设方案;平面控制网的技术设计、精度估算;平面控制网的选点、造标埋石。鉴于高等级的平面控制已被卫星定位测量代替,三角网已基本不再布设,本章的实用平面控制网布设部分,主要讲述导线网的布设。导线网的观测、计算则在以后的章节讲述。

### § 2-1 国家平面控制网的布设原则和布设方案

如前所述,平面控制网分为国家平面控制网和工程平面控制网。本节先介绍国家平面控制网的布设原则和布设方案。

#### 一、国家平面控制网布设原则

在一个国家范围内,按照国家统一颁布的法式、规范建立的统一坐标系统的平面控制网称为国家平面控制网。用三角测量方法建立的国家平面控制网,称为国家三角网。我国的国家平面控制网采取以三角网为主,以导线网为辅(在个别特殊困难地区无法用三角网布设时,采用导线网)的方法布设。国家三角网和国家导线网统称为国家平面控制网。国家平面控制网中的三角点和导线点统称为大地点。传统的国家高等级平面控制网虽然不会再做了,但那是我国 1980 坐标系的物质载体,是正在使用着的国家控制网,因而我们必须熟练掌握国家平面控制网的布设情况。

建立我国的国家平面控制网必须全面考虑我国的实际情况,充分应用已有技术、装备、理论和实际经验,正确处理质量、数量、时间和经费之间的辩证关系,拟定具体的原则。国家平面控制网的最主要的技术任务是控制测图。现以控制测图为出发点,讨论国家平面控制网的布设原则。

##### (一) 分级布设,逐级控制

我国的具体情况是幅员广大,自然地理状况复杂,如果以最高的精度、最大的密度,用一个等级的三角网或导线网布满全国,不但需要很久的时间和造成极大的困难与浪费,甚至是难以做到的,从而根本不可能保证各个地区的建设需要。因此,我国的国家平面控制网采取分级布网,逐级控制的原则。即控制点的密度是先疏后密,逐级加大;精度是先高后低,逐级递降。国家三角网和导线网分为一、二、三、四等 4 个等级。首先以高精度的稀疏的一等三角锁或一等导线网,尽量沿经纬线方向纵横交叉的迅速布满全国,形成统一坐标系统的骨干网。然后,根据各个地区控制测图的实际需要,分区、分期地在一等三角锁和一等导线环内,布设精度稍低、密度较大的二等三角网或二等导线网,成为继续加密控制的全面基础。最后,



在二等三角网或二等导线网的基础上,视测图需要,加密精度更低一些,密度更大的三等和四等三角网或导线网,直接控制 1:2 000 比例尺地形图测图。这样既可简化国家平面控制网的布设工作,又可以比较及时的提供大地控制测量成果,以满足各地区的测图需要。

## (二) 具有足够的精度

国家平面控制网是控制测图的基础,它的精度必须保证测图的实际需要。各种比例尺测图规范规定:以国家大地点包括三角点和导线点为基础加密的解析图根点,相对于起算的大地点的点位中误差,表现在图上时,应不超过  $\pm 0.1 \text{ mm}$ ,表现在实地上,应不超过  $\pm 0.1 N \text{ mm}$  ( $N$  为测图比例尺分母)。

必须指出,图根点的这种误差不但取决于解析图根点测量本身的技术规格,而且和起算的大地点的点位中误差有关。因此,通常规定相邻大地点的点位中误差应小于图根点相对于起算大地点的点位中误差的  $1/3$ ,即应小于  $0.1 N \times 1/3 = 0.03 N (\text{mm})$ 。这样大地点的点位中误差对测图来说可以忽略。

因此,若图根点的精度按  $0.1 N (\text{mm})$ ,大地点的精度必须不大于  $0.03 N (\text{mm})$ ,不同比例尺测图对图根点和大地点的精度要求见表 2-1。

表 2-1 不同比例尺测图对图根点和大地点的精度要求

测图比例尺	1:50 000	1:25 000	1:10 000	1:5 000	1:2 000
图根点相对于大地点的点位中误差(m)	$\pm 5.0$	$\pm 2.5$	$\pm 1.0$	$\pm 0.5$	$\pm 0.2$
相邻大地点的点位中误差(m)	$\pm 1.7$	$\pm 0.83$	$\pm 0.33$	$\pm 0.17$	$\pm 0.07$

按我国现行的《国家三角测量和精密导线测量规范》(下称《规范》),三、四等三角点、导线点和采用插网法或插点法布设的三、四等三角点,其精度可以满足控制 1:2 000 比例尺测图的要求。

## (三) 保证必要的密度

为了满足控制测图需要,国家大地点(三角点或导线点)必须有足够的密度。国家大地点的密度,按不同的成图方法,依据测图比例尺确定。大地点的密度用平均每个大地点控制的面积或三角网中三角形的平均边长表示。

按平板仪测图,不同比例尺地图对大地点的合理密度要求如表 2-2。

表 2-2 不同比例尺地图对大地点的合理密度要求

测图比例尺	1:50 000	1:25 000	1:10 000	1:5 000
平均每幅图面积( $\text{km}^2$ )	350 ~ 500	100 ~ 125	15 ~ 20	4 ~ 5
平均每幅图大地点个数	3 ~ 4	2 ~ 3	0.5 ~ 1	约每 4 幅 1 点
平均每个大地点控制的面积	约 $150 \text{ km}^2$	约 $50 \text{ km}^2$		约 $20 \text{ km}^2$
三角网平均边长(km)	13	8		2 ~ 6

当按航测法成图时,根据成图方法的不同(如综合法、微分法等),控制点的布设形式和数量都有一些变化。

为保证测图精度所需要的控制点,一部分是国家大地点,一部分是解析图根点和进一步加密的图解图根点。因为国家大地点的作业过程严密,费用较大,所以,在保证测图精度的前提下,可以加密图根点,而国家大地点只要达到必要的精度即可。

#### (四) 应有统一的布网方案、精度指标和作业规格

国家大地网规模巨大,为加快建网速度,满足各方面的需要,除了国家测绘部门外,水利、地质、地震、工矿、交通、林业等单位都要承担一部分国家大地网的施测工作。如果没有统一的布网方案、精度指标和作业规格,就很难建成合乎要求的国家大地网,而且容易造成重复和浪费。为此,国家测绘主管部门专门制定出《国家三角测量和精密导线测量规范》,作为布设国家平面控制网的技术依据。

应当指出,《国家三角测量和精密导线测量规范》是1974年6月由国家测绘总局颁布执行的。在此以前,即1958年10月以前,根据我国的具体情况,布设国家平面控制网时,执行的是编译苏联的《一、二、三、四等三角测量细则》;1958年10月至1974年6月,执行的是国家测绘总局和总参测绘局颁布的《一、二、三、四等三角测量细则》,以上三个“规范”或“细则”的布设方案、精度指标和某些技术规定略有不同。因此,在使用大地测量成果时,应加以区别。

## 二、国家平面控制网布设方案

为了在全国范围内布设统一的高精度国家大地控制网(包括国家三角网和精密导线网),必须在布网原则指导下,制订统一的布网方案和精度指标,作为各地区、各单位作业的依据。我国的国家平面控制网主要布网形式为三角网,只是在青藏高原等特殊困难的地区布设了一些电磁波测距导线。现将国家三角网的布设方案介绍如下。

### (一) 一等三角锁的布设方案

按照建网的第一条原则,国家第一级三角网是一等三角锁。它是在全国领土上迅速建立的统一坐标系统的精密骨干网。其主要作用是,控制二等以下大地点的加密和为研究地球形状、大小提供资料。控制测图不是其主要作用。因此,一等三角锁着重考虑的是精度问题而不是密度问题。

一等三角锁尽量沿经纬线方向布设,纵横锁系互相交叉构成格形锁网,如图2-1。锁系交叉点间的部分称为锁段,锁段长度规定为200 km左右,锁段内三角形个数一般为16~17个,并在交叉处加测起始边(精度不低于1:35万);锁段主要由单三角形构成。必要时可包括部分大地四边形或中点多边形,但锁段交叉处要用中点多边形连接;单三角形中任一角度不小于 $40^\circ$ ,大地四边形、中点多边形中传算距离的角度不小于 $30^\circ$ ;图形的边长,在山区一般应在25 km左右,平原地区应在20 km左右;按三角形闭合差计算的测角中误差不大于 $\pm 0.7''$ 。

在一等锁交叉处,起始边两端点按一等天文测量的精度测定天文经纬度和方位角,并在锁段中央的一个点上测定天文经纬度。起始方位角(也叫拉普拉斯方位角)是通过点上测定

的天文经纬度、方位角,并结合三角锁成果推算的,所以,国家一等三角锁系也称为国家天文大地网。

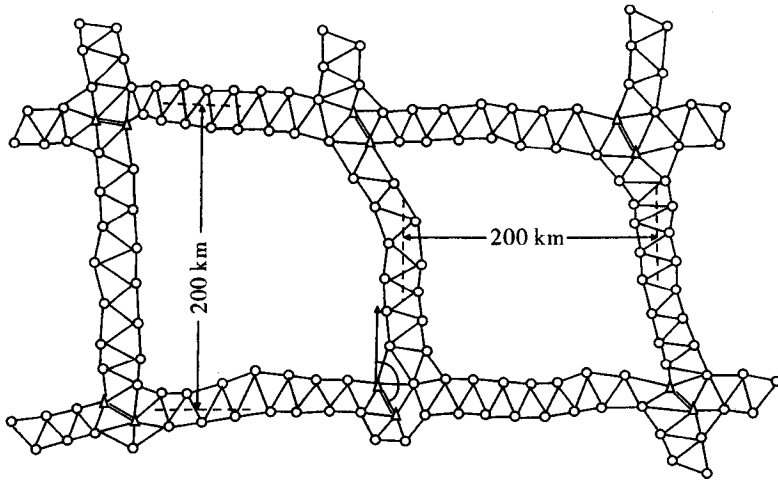


图 2-1 一等三角锁

## (二) 二等三角网布设方案

二等三角网(如图 2-2)以连续三角网的形式布设在一等锁环围绕的区域内,它是加密三、四等三角点的基础,与一等锁同属于国家高级网。二等网的平均边长 13 km,根据地形条件,可在 10~18 km 范围内变通。就点的密度而论,基本满足 1:50 000 测图要求。由此可知,二等网应主要考虑精度问题,同时也要适当顾及密度,这是它的一个特点。

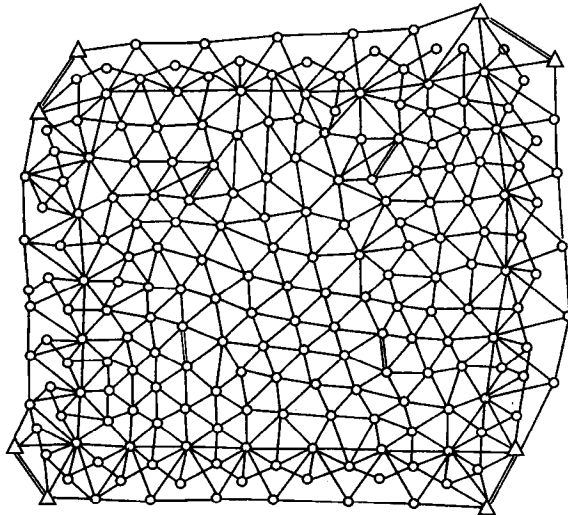


图 2-2 二等三角网

二等网中央处要测定一条起始边,并在两端点测定天文经度、纬度和天文方位角。对于较大一等锁环内的二等网,要在适当位置加测起始边,使任意一条二等边距最近的一等或二等起始边不超过 12 个三角形,或距最近的一等锁边不多于 7 个三角形。网中最小角不得小

于 $30^\circ$ ，测角中误差不得超过 $\pm 1.0''$ 。一等锁两侧的二等网应尽可能连接成连续的三角网，并注意和一等锁起始边的有效联结。

### (三) 三、四等三角点的布设

国家三、四等三角点是在二等三角网的基础上进一步加密，作为图根点测量的基础。它的密度必须与测图比例尺相适应，这是三、四等三角点布设的特点。三等三角网的平均边长为 $8\text{ km}$ ，四等为 $2\sim 6\text{ km}$ 。当以 $7\sim 8\text{ km}$ 边长加密到三等三角点时，每个三角点控制面积约为 $50\text{ km}^2$ ，可基本满足 $1:2.5$ 万或者 $1:1$ 万测图控制。如果再以平均边长 $4\text{ km}$ 加密到四等三角点时，每点控制面积为 $15\sim 20\text{ km}^2$ ，可满足 $1:5\ 000$ 或者 $1:2\ 000$ 比例尺测图控制的需要。

三、四等三角点每点都要设站观测。由三角形闭合差计算的测角中误差，三等应不超过 $\pm 1.8''$ ，四等不应超过 $\pm 2.5''$ 。三、四等三角点可采用插网法或插点法布设。

插网图形有两种形式：第一种如图 2-3 所示，是在高级三角网中插入三、四等点，相邻三、四等三角点与高等三角点尽可能都连接起来构成图形。第二种如图 2-4 所示，在稀疏的高等三角点间插入很多三、四等点，用短边布设成连续的三角网，这种网只与高等网接点而不接边。三、四等三角网中三角形的角度应不小于 $30^\circ$ ，受地形限制，个别角允许小至 $25^\circ$ 。

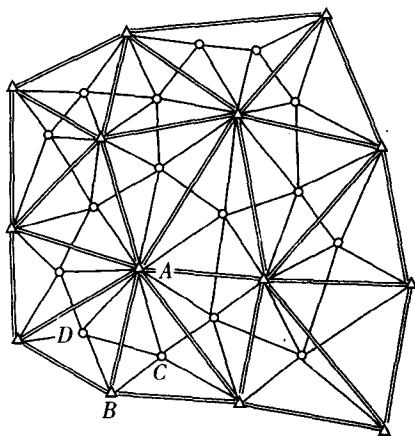


图 2-3 插网图形

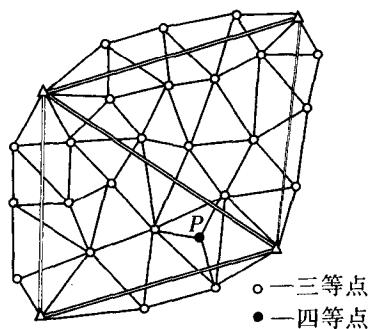


图 2-4 插网图形

用插点形式加密三、四等三角点，其图形结构如图 2-5 所示。其中，A 点的插法叫三角形内插一点；B、C 两点的插法叫三角形内外各插一点。插点的形式多种多样，可根据实际情况确定，这里不作更多的举例。

用插点加密三角点时，每一插点至少应由三个方向测定，且各方向均双向观测。同时要注意待定点的点位，因为点位对精度影响很大。规定插点点位应在高级三角形的内切圆心附近（见图 2-6）；而以角顶为圆心，以角顶至内切圆圆心距离的一半为半径所画的圆弧内为禁止插点区。

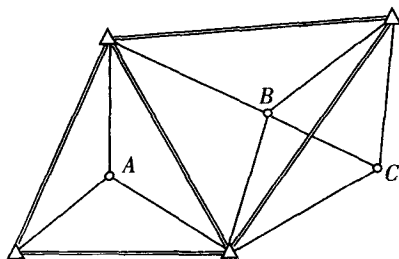


图 2-5 插点图形

布设三、四等三角点时,一般应尽量采用插网法,如受地形限制,也可采用插点法。

当测图或工程需要的大地点密度相当于四等三角点的密度时,可以在二等三角网内直接插入四等三角网,而不经三等加密。

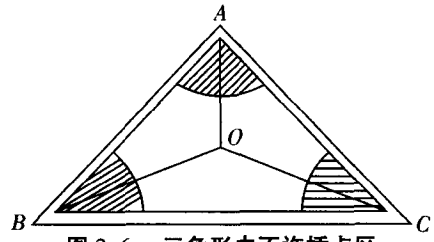


图 2-6 三角形内不许插点区

#### (四) 我国各级三角网的布设规格和精度

我国各级三角网的布设方案,是在理论和实践相结合的基础上,根据布网原则产生的,基本符合我国的实际情况。现将我国各级三角网的主要规格和达到的精度综合如下:

##### 1. 我国各级三角网的布设规格

按我国现行《规范》,我国的国家三角网的布设规格如表 2-3。

表 2-3 我国国家三角网布设规格

等级	平均边长 (km)	测角中误差 (按三角形闭合差计算)	三角形最大闭合差	起始元素精度		最弱边边长相对中误差
				起始边长	天文观测	
一等锁	20 ~ 25	$\pm 0.7''$	$\pm 2.5''$	1 : 350 000	$m_a = \pm 0.5''$ $m_\lambda = \pm 0.02 s$ $m_\varphi = \pm 0.3''$	1 : 150 000
二等网	13	$\pm 1.0''$	$\pm 3.5''$	1 : 350 000	同一等	1 : 150 000
三等网	8	$\pm 1.8''$	$\pm 7.0''$	-	-	1 : 80 000
四等网	2 ~ 6	$\pm 2.5''$	$\pm 9.0''$	-	-	1 : 40 000

##### 2. 我国各级三角网中推算元素的精度

我国各级三角网中推算元素的精度见表 2-4。表中所列推算元素的精度,是在最不利的情况下三角网达到的最低精度。其中二等网是取其靠近一等锁的边,按一等最弱边精度计算的。三、四等点的精度是按三角形外插一点的不利情况计算的。同时,已粗略地加入了起算边长、方位角的误差影响。

表 2-4 我国国家三角网中推算元素的精度

等级	平均边长 (km)	边长相对误差	边长绝对中误差	方位角中误差	相对点位中误差
一等锁	25	1 : 164 000	$\pm 0.15 m$	$\pm 0.87''$	$\pm 0.18 m$
二等网	13	1 : 164 000	$\pm 0.08 m$	$\pm 0.87''$	$\pm 0.10 m$
三等点	7.5	1 : 70 000	$\pm 0.11 m$	$\pm 1.80''$	$\pm 0.13 m$
四等点	4	1 : 51 000	$\pm 0.08 m$	$\pm 5.5''$	$\pm 0.09 m$

#### (五) 1958 年以前的布网方案

1958 年以前,我国的国家三角网以保证 1 : 1 万测图为目的,是根据苏联 1939 年大地测

量法式制订的布网方案(以下简称旧方案)。由于我国已建成的三角网中部分是按“旧方案”完成的,今后我们有可能接触或使用其成果,因此简单介绍如下。

按“旧方案”布设的三角网与现行方案布设的三角网主要不同点是:测角精度不同;二等网的布设形式、精度不同。“旧方案”把二等网分成两级布设,即先在一等锁环内布设“+”或“++”形的交叉锁,称为二等基本锁(又称之为“旧二锁”)。然后在一等锁、二等基本锁围成的区域内布设“二等补充网”(又称之为“旧二网”),如图 2-7。

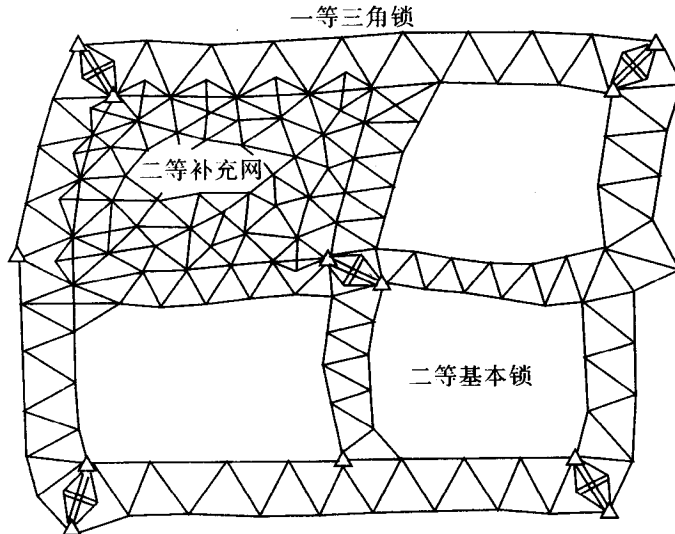


图 2-7 旧布网方案

按“旧方案”布设的三角网布设规格见表 2-5。

表 2-5 1958 年以前国家三角网布设规格

等 级	平均边长 (km)	测角中误差	三角形最大 闭合差	起始元素精度		最弱边边长 相对中误差
				起 始 边	天文观测	
一等锁	20 ~ 25	$\pm 0.7''$	$\pm 2.5''$	1 : 350 000	$m_\alpha = \pm 0.5''$ $m_\lambda = \pm 0.45''$ $m_\varphi = \pm 0.3''$	1 : 100 000
二 等 基本锁	18	$\pm 1.5''$	$\pm 5.0''$	1 : 200 000	$m_\alpha = \pm 1.0''$ $m_\lambda = \pm 0.75''$ $m_\varphi = \pm 0.4''$	1 : 70 000
二 等 补充网	13	$\pm 2.5''$	$\pm 9.0''$			1 : 15 000
三等网	8	$\pm 5.0''$	$\pm 15.0''$			
四等网	4 ~ 5	(约 $\pm 10''$ )				

到 1984 年为止,我国的天文大地网已完成布设和整体平差计算工作。基本情况是:一等三角锁沿经纬线方向布满全国,形成 120 个锁环,总长 7 万余 km,5 300 个点;每个锁环内布

设二、三、四等网(含二等基本锁),共 340 个测区,12 万个点;青藏高原地区以导线为主,共 120 个导线节,1 600 个点。除西部高原以外,平均每  $54 \text{ km}^2$  有一个大地点(不包括军控制点、图根点、工程控制点)。无控制区约占总面积的 3%(均为雪山、沙漠等无居民区)。起始边长 200~400 km 间隔布设在锁系交叉处或三角网中部,在起始边上测定拉普拉斯方位角、基线(扩大边)或电磁波测距边。共测定各级天文点 2 120 个,拉普拉斯方位角 680 个,基线(扩大边)460 个,电磁波测距边 195 条。全网的实际精度达到:测角中误差,一等为  $\pm 0.6''$ ,二等为  $\pm 0.8''$ ,三等为  $\pm 1.5''$ ,旧二等补充网为  $\pm 1.8''$ ;起始边长相对中误差平均小于 1:35 万;拉普拉斯方位角中误差平均约  $\pm 1.0''$ ,电磁波导线边相对中误差在 1:40 万~1:17 万之间。

## § 2-2 工程平面控制网的布设原则和方案

### 一、工程平面控制网的布设原则

如 § 1-1 所述,工程控制网可分为两种:一种是在各项工程建设的规划设计阶段,为测绘大比例尺地形图和房地产管理测量而建立的控制网,叫做测图控制网;另一种是为工程建筑物的施工放样或变形观测等专门用途而建立的控制网,我们称其为专用控制网。建立这两种控制网时亦应遵守下列布网原则。

#### 1. 分级布网、逐级控制

对于工程控制网,通常先布设精度要求最高的首级控制网,随后根据测图需要,测区面积的大小再加密若干级较低精度的控制网。用于工程建筑物放样的专用控制网,往往分二级布设。第一级作总体控制,第二级直接为建筑物放样而布设;用于变形观测或其他专门用途的控制网,通常无须分级。

#### 2. 要有足够的精度

以工程控制网为例,一般要求最低一级控制网(四等网)的点位中误差能满足大比例尺 1:500 的测图要求。按图上 0.1 mm 的绘制精度计算,这相当于地面上的点位精度为  $0.1 \times 500 = 5 \text{ cm}$ 。对于国家控制网而言,尽管观测精度很高,但由于边长比工程控制网长得多,待定点与起始点相距较远,因而点位中误差远大于工测控制网。

#### 3. 要有足够的密度

不论是工程控制网或专用控制网,都要求在测区内有足够多的控制点。如前所述,控制点的密度通常是用边长来表示的。《城市测量规范》中对于城市三角网平均边长的规定列于表 2-6 中。

#### 4. 要有统一的规格

为了使不同的工测部门施测的控制网能够互相利用,互相协调,也应制定统一的规范,如现行的《城市测量规范》和《工程测量规范》。

### 二、工程平面控制网的布设方案

现以《城市测量规范》为例,将其中三角网的主要技术要求列于表 2-6,电磁波测距导线

的主要技术要求列于表 2-7。从这些表中可以看出,工程三角网具有如下特点:① 各等级三角网平均边长较相应等级的国家网边长显著地缩短;② 三角网的等级较多;③ 各等级控制网均可作为测区的首级控制。这是因为工程测量服务对象非常广泛,测区面积大的可达几千平方公里(例如大城市的控制网),小的只有几公顷(例如工厂的建厂测量),根据测区面积的大小,各个等级控制网均可作为测区的首级控制;④ 三、四等三角网起算边相对中误差,按首级网和加密网分别对待。对独立的首级三角网而言,起算边由电磁波测距求得,因此起算边的精度以电磁波测距所能达到的精度来考虑。对加密网而言,则要求上一级网最弱边的精度应能作为下一级网的起算边,这样有利于分级布网、逐级控制,而且也有利于采用测区内已有的国家网或其他单位已建成的控制网作为起算数据。以上这些特点主要是考虑到工测控制网应满足最大比例尺 1:500 测图的要求而提出的。

表 2-6 三角网的主要技术要求(城测规范)

等级	平均边长(km)	测角中误差(")	起算边相对中误差	最弱边相对中误差
二等	9	± 1.0	1/300 000	1/120 000
三等	5	± 1.8	1/200 000(首级) 1/120 000(加密)	1/80 000
四等	2	± 2.5	1/120 000(首级) 1/80 000(加密)	1/45 000
一级小三角	1	± 5	1/40 000	1/20 000
二级小三角	0.5	± 10	1/20 000	1/10 000

表 2-7 电磁波测距导线的主要技术要求(城测规范)

等级	附和导线长度(km)	平均边长(m)	每边测距中误差(mm)	测角中误差(")	导线全长相对闭合差
三等	15	3 000	± 18	± 1.5	1/60 000
四等	10	1 600	± 18	± 2.5	1/40 000
一级	3.6	300	± 15	± 5	1/14 000
二级	2.4	200	± 15	± 8	1/10 000
三级	1.5	120	± 15	± 12	1/6 000

此外,在我国目前测距仪使用较普遍的情况下,电磁波测距导线已上升为比较重要的地位。表 2-7 中电磁波测距导线共分 5 个等级,其中的三、四等导线与三、四等三角网属于同一个等级。这 5 个等级的导线均可作为某个测区的首级控制。

### 三、专用控制网的布设特点

专用控制网是为了工程建筑物的施工放样或变形观测等专门用途而建立的。由于专用控制网的用途非常明确,因此建网时应根据特定的要求进行控制网的技术设计。例如:桥梁三角网对于桥轴线方向的精度要求应高于其他方向的精度,以利于提高桥墩放样的精度;隧道三角网则对垂直于直线隧道轴线方向的横向精度的要求高于其他方向的精度,以利于提高隧道贯通的精度;用于建设环形粒子加速器的专用控制网,其径向精度应高于其他方向的精度,以利于精确安装位于环形轨道上的磁块。以上这些问题在工程测量书中会有更多的介绍,读者可参阅。



## § 2-3 平面控制网的技术设计

因为我国的国家大地控制网已完成整体平差,为此,本书着重介绍工程平面控制网的技术设计。

### 一、技术设计的意义及其主要内容

工程控制测量的服务对象非常广泛,各种工程建设对控制网提出的要求各不相同。工程测量工作者应根据工程建设对控制网的精度要求,结合测区的具体情况进行技术设计——选择最佳方案、适当的仪器、编制作业计划、解决作业生产的组织和测量成果验收等一系列生产管理和技术管理问题。

技术设计是控制测量的第一道工序,是一个决定性的环节,技术设计的优劣,将对测量工作的全过程造成重大影响。

技术设计就是要编制出技术设计书。它是制定作业计划、指导生产的重要技术文件之一。技术设计书一般包括下列主要内容:

- (1) 作业的目的和任务范围;
- (2) 测区的自然地理条件;
- (3) 测区已有的测量成果及其精度分析;
- (4) 测区实地调查和踏勘的结果——一般应写出测区调查报告;
- (5) 最佳布网方案的论证;
- (6) 图上设计结果及其有关图表;
- (7) 技术补充规定;
- (8) 业务技术领导部门的批示及审核意见。

### 二、技术设计的程序和方法

#### (一) 对点位的要求

在技术设计和选点时,平面控制点的位置应满足以下要求:

- (1) 不论三角点还是导线点,其位置都应尽量选在展望良好,易于扩展的制高点上。
- (2) 点与点之间构成的边长、角度、图形结构等都应完全满足《规范》的要求。
- (3) 点的位置要保证所埋中心标石能长期保存,以及造标、观测工作时的安全。
- (4) 确定点位时,应使观测视线避开产生水平折光的地形或地物,并使视线超越及旁离障碍物一定的距离。

#### (二) 收集、分析研究资料

为了全面了解测区情况,掌握测区特点,使技术设计切实可行,在技术设计前,应全面收集测区的各种有关资料,进行认真的分析研究。

应收集的资料有: