

目 录

前 言

第一章	绪论	1
§1-1	地面点位置的确定.....	1
§1-2	用水平面代替水准面的限度.....	9
§1-3	测量的基本原则.....	11
第二章	水准仪和水准测量	13
§2-1	水准测量的基本原理.....	13
§2-2	水准测量的仪器和工具.....	14
§2-3	水准仪的使用方法.....	20
§2-4	普通水准测量.....	22
§2-5	三、四等水准测量.....	30
§2-6	跨河水准测量.....	34
§2-7	微倾式水准仪的检验与校正.....	36
§2-8	水准测量误差.....	42
§2-9	自动安平水准仪.....	46
第三章	经纬仪及角度测量	50
§3-1	测角原理.....	50
§3-2	J ₆ 级光学经纬仪.....	51
§3-3	J ₂ 级光学经纬仪.....	56
§3-4	水平角观测.....	60
§3-5	竖直角观测.....	69
§3-6	经纬仪的检验与校正.....	74
§3-7	角度测量误差及注意事项.....	79
第四章	距离丈量与直线定向	83
§4-1	地面点标志与直线定线.....	83

§4-2	丈量工具及方法	85
§4-3	钢尺量距的精密方法	90
§4-4	丈量误差	96
§4-5	红外光电测距仪	97
§4-6	直线定向	106
第五章	测量误差理论的基本知识	113
§5-1	测量误差的分类	113
§5-2	评定精度的标准	115
§5-3	误差传播定律	118
§5-4	算术平均值及其中误差	123
§5-5	同精度观测值的中误差	124
§5-6	权及加权平均值	126
§5-7	加权平均值的中误差	129
第六章	小地区控制测量	131
§6-1	控制测量概述	131
§6-2	导线测量	133
§6-3	小三角测量	144
§6-4	控制点交会法	168
§6-5	三角高程测量	179
第七章	大比例尺地形图的测绘	182
§7-1	成图原理和比例尺	182
§7-2	地形图的分幅和编号	184
§7-3	地物、地貌的表示方法	189
§7-4	测前准备	199
§7-5	视距测量	202
§7-6	平板仪的构造和使用	205
§7-7	碎部测量	209
§7-8	地形图的绘制	214
§7-9	地形图的应用	217
第八章	水深测量	226

§8-1	测深工具及其使用	226
§8-2	前方交会测深定位	232
§8-3	后方交会测深定位	236
§8-4	无线电定位概述	247
§8-5	测深线布设和导标放样	253
§8-6	水位观测	260
§8-7	水位改正及等深线勾绘	263
§8-8	辐射线格网的绘制	278
§8-9	等角格网的绘制	289
第九章	施工测量基本工作	304
§9-1	概述	304
§9-2	施工控制网的建立	305
§9-3	测设的基本工作	307
§9-4	点位测设	311
§9-5	激光技术在施工放样中的应用	314
§9-6	圆曲线放样	317
§9-7	高程放样	322
第十章	码头施工测量	325
§10-1	码头施工基线布设	325
§10-2	直桩定位测量	327
§10-3	斜桩定位测量	329
§10-4	前方交会打桩定位	341
§10-5	圆形断面桩定位测量	347
§10-6	桩顶标高定位测量	356
§10-7	前方交会打桩定位测量的精度分析	360
§10-8	重力式码头的基床测量	365
§10-9	方块吊装和防波堤施工放样	370
参考文献		373
附录	微型计算器在测量中的应用	374

第一章 绪 论

测量学是研究地球表面的形状和大小以及确定地面点之间相对位置的科学。它的任务包括两个方面：

1. 使用各种测量仪器和工具，通过实地测量和计算，把地球表面缩绘成地形图，供科学研究、国防建设和规划设计使用。

2. 将图纸上设计好的建筑物位置，在地面上确定下来作为施工的依据。

§1-1 地面点位置的确定

一、地球的形状和大小

测量工作是在地球表面上进行的，所以必须了解地球的形状和大小。地球自然表面上有高山、深谷、丘陵、平原及海洋等起伏变化，测量上所指的地球形状是指它的总体形状。由于海洋占整个地球表面的71%，因此，地球总体形状可以认为是被海水面所包围的球体。

自由静止时海洋或湖泊的水面，称为水准面。水准面上任一点的铅垂线，在该点与水准面正交。水准面有无数多个，其中与静止状态的平均海水面吻合的水准面，称为大地水准面。我国在青岛沿海设立了验潮站，长期观测水位标尺，每隔一定时间读取海水面的高度，并取其平均值作为大地水准面的位置，它就是1956年黄海高程系统的高程零点，作为我国起算高程的基准面。

设想将大地水准面延伸，穿过大陆和岛屿，其所包围的形体，作为地球的形体，那么，这个球体就称为大地球体。用大地球体代替地球似乎恰当，但由于地球内部质量分布不均匀，引起

铅垂线方向的变动，致使大地水准面成为一个复杂的曲面。如果将地球表面上的图形投影到这个复杂的曲面上，制图和计算都非常困难。为了解决这个问题，可选用一个非常接近大地水准面、并且可以用数学式表示的几何体来代替地球的形状，这个几何体称为参考椭圆柱体。参考椭圆柱体是一椭圆绕其短轴旋转而成。如图1-1所示，其形状由长半径 a 及短半径 b （或偏率 α ）所决定。

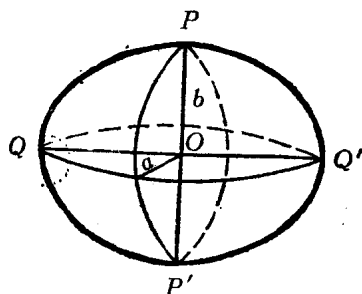


图 1-1

国内外测量工作者多次测定了这两个元素的数值。1975年，国际大地测量与地球物理联合会确定的基本数据为：

$$a = 6378140 \quad (\text{m})$$

$$b = 6356743 \quad (\text{m})$$

$$\alpha = 1 : 298.26$$

当测区面积不大时，可以把参考椭圆柱体当作一个圆球体来看待，其半径为6371公里。

二、确定地面点位的方法

从数学中知道，一点在空间的位置需要三个量来确定。在测量中，这三个量通常用该点在参考椭圆面或高斯平面上的投影位置 and 该点沿投影方向到大地水准面的距离来表示。

1. 地面点的坐标

1) 地理坐标

当研究解决整个地球形状或大区域的测量工作，可以采用天文测量的方法，以球面坐标系来确定地面点的位置，通常用经纬度表示，这样确定的坐标叫做地理坐标。

如图1-2所示，确定地面点的地理坐标，以赤道面和通过英国格林威治天文台的子午面（起始子午面亦称首子午面）作为基

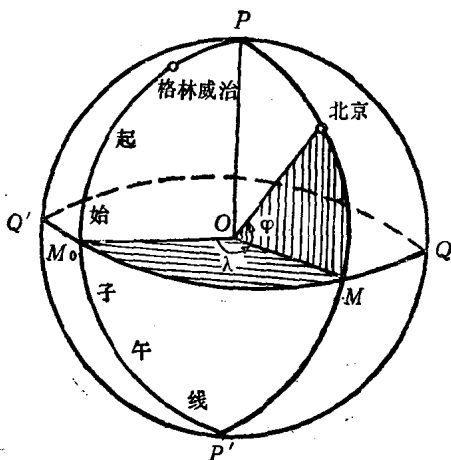


图 1-2

准面。地面上任意一点的经度，即通过该点的子午面与起始子午面的夹角，用 λ 表示。以起始子午面为基准，向东 $0^\circ \sim 180^\circ$ 为东经，向西 $0^\circ \sim 180^\circ$ 为西经。地面上任意一点的纬度，即通过该点的铅垂线与赤道面的交角，用 φ 表示。以赤道为基准，向北 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为北纬，向南 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为南纬。例如，北京的经度为东经 $116^\circ 28'$ ，纬度为北纬 $39^\circ 54'$ 。

2) 高斯平面直角坐标

当进行地形测量时，如果与国家控制点相连接，这样所测得的地形图就纳入了国家坐标系。我国采用高斯平面直角坐标作为国家坐标系，它是用高斯投影的方法，将椭球（或球体）上的图形或点的位置描写到高斯平面上。

(1) 高斯投影的概念

高斯投影又称为横圆柱等角投影。如图1-3，设想将平面卷成一个圆柱面，横套在地球（圆球体）的外面，使圆柱面与圆球体面上的某一条子午线相切，这条子午线称为中央子午线，横圆柱面和圆球面有了这样的相对关系之后，就可以将圆球面上的图形按一定的数学关系投影到横圆柱面上，然后将横圆柱面沿通过

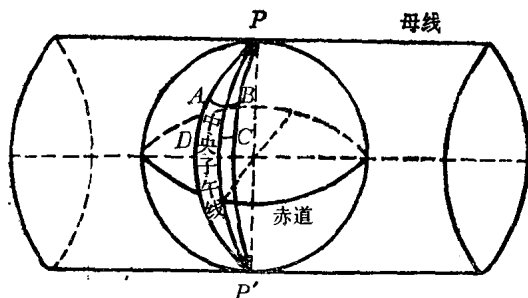


图 1-3

极 PP_1 的母线切开，展成平面，就得到投影平面上的相应图形。
图1-4是中央子午线附近的经纬线在投影平面上的图形。

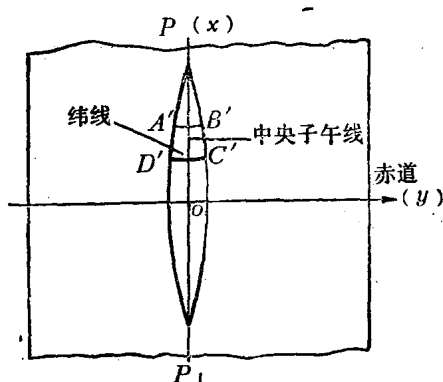


图 1-4

这种投影具有以下规律：

- ① 中央子午线 POP_1 的投影是一条直线，且投影前后长度无变化，离中央子午线愈远的经线，其长度变化愈大。
- ② 赤道的投影为一条直线，且与中央子午线的投影互相垂直，成为经纬线投影的对称轴。
- ③ 经纬线投影仍保持互相垂直。

(2) 高斯投影的方法

高斯投影的方法如图1-5所示。从格林威治子午线（起始子午线）起，依次向东每隔经度 6° 分为一带（称六度带），把整个地球分为60带，用数字1~60顺序编号，每带中央子午线的经度顺序为 3° 、 9° 、 15° 、……任意带的中央子午线经度 λ_0 可按下式计算：

$$\lambda_0 = 6N - 3 \quad (1-1)$$

式中 N 为投影带的号数。

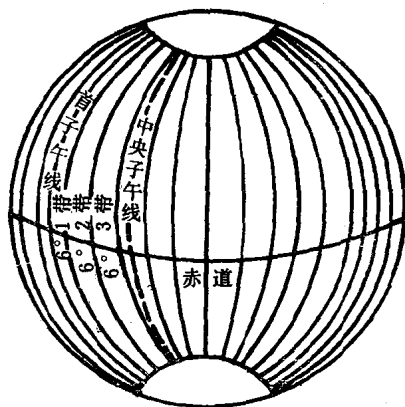


图 1-5

将每个 6° 带沿边界切开，展成平面，以中央子午线为 x 轴，赤道为 y 轴，两轴的交点作为坐标原点，就组成了高斯平面直角坐标系。

我国位于北半球， x 坐标值为正， y 坐标值则有正有负。为了避免横坐标出现负值，故将每带的坐标原点向西移动500公里，如图1-6(a)、(b)，使得每一带中所有各点的横坐标值均为正值。

例1-1 在图1-6(a)中，设 $y_A = +24730.5(\text{m})$ ， $y_B = -13592.2(\text{m})$ ，移动原点后则 $y_A = 500000 + 24730.5 = 524730.5(\text{m})$ ， $y_B = 500000 - 13592.2 = 486407.8(\text{m})$ ，如图1-6(b)所示。在使用时，为了表明点位于那一带内，应在横坐标前面加上带号，例如A点位于中央子午线 117° 的20带内，则 $y_A = 20 \ 524730.5(\text{m})$ 。

根据高斯投影的性质，中央子午线的长度保持不变，离开中央子午线愈远，长度变化愈大。例如，离中央子午线的长度（ y 坐标值）分别为100(km)、200(km)、300(km)时，其投影变形的相对误差为 $1/8000$ 、 $1/2000$ 、 $1/900$ 。当投影变形的相对误差

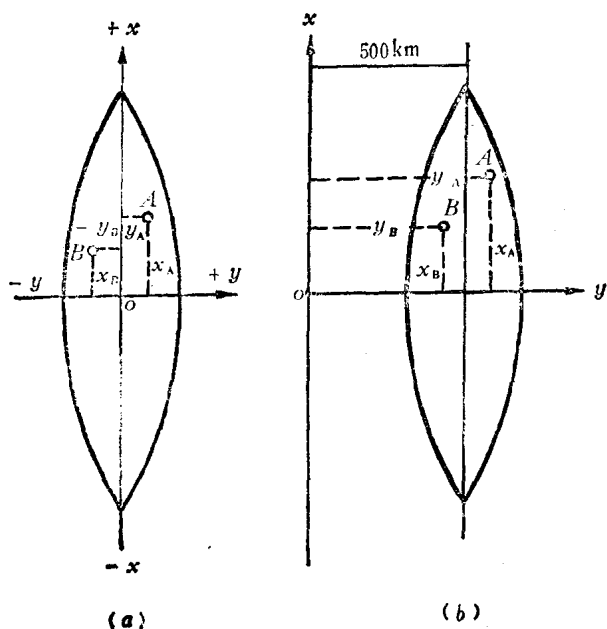


图 1-6

为1/900时，对1:10000及更大比例尺测图时，就不能采用6°带，而应采用3°带。

3°带是在6°带的基础上划分的，它的宽度为6°带的一半，6°带的中央子午线及其两边缘子午线都是3°带的中央子午线。3°带中央子午线的经度 λ'_0 顺序为3°、6°、9°、……，则

$$\lambda'_0 = 3N' \quad (1-2)$$

式中 N' 为3°带的号数。

如图1-7表示6°带和3°带两种投影的分带情况，3°带分带投影是以东经1°30'起，每隔经度3°划分一带，将整个地球划分成120个带。同样，为了避免横坐标出现负值，3°带的坐标原点同6°带一样向西移500公里，但 y 值前面的带号不同。例1-1中6°带的中央子午线为117°，它在3°带中的带号为 $N' = \frac{117}{3} = 39$ ，因

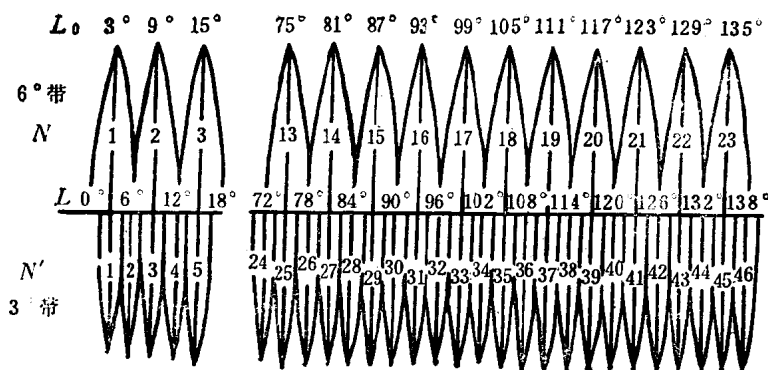


图 1-7

此， y 坐标值前面要加“39”。

在高斯平面直角坐标系内，规定 x 轴向北为正， y 轴向东为正，其象限按顺时针方向编号，如图 1-8 所示。这样规定与数学上的规定不同，其目的是便于将数学上的公式直接应用到测量计算中。

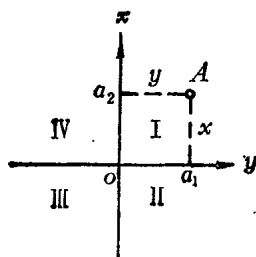


图 1-8

3) 假定平面直角坐标

大地水准面是一个曲面，当测量区域很小时，即用在在大比例尺成图时，可以用测区中心的切平面来代替大地水准面，这时，可利用假定平面直角坐标，以该地区的子午线为 x 轴，向北为正，为了避免坐标出现负值，将坐标原点选在测区西南角。这种方法适用于附近没有国家控制点的工矿、港口与民用建筑等地区。

2. 地面点的高程

从地面上一点沿铅垂线方向到大地水准面的距离，称为绝对高程或海拔，简称高程。

在图1-9中, H_a 及 H_b 是 A 点和 B 点的高程。我国规定采用1956年黄海高程系统。如果个别地区引用绝对高程有困难, 或为了施工方便, 也可采用假定高程系统。地面点到某一任意水准面的铅垂距离, 称为假定高程或相对高程。图1-9中 H'_a 及 H'_b 即为 A 点和 B 点的假定高程。

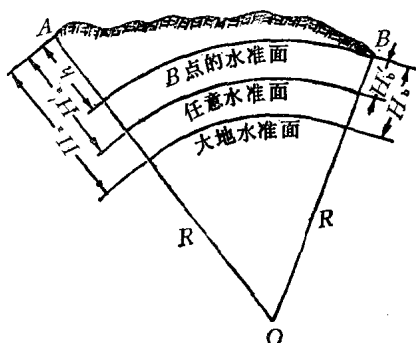


图 1-9

两个地面点之间的高程差称为高差。在图1-9中地面点 A 与 B 之间的高差为: $H_b - H_a = h_{ab}$ 。

三、确定地面点位的三个基本要素

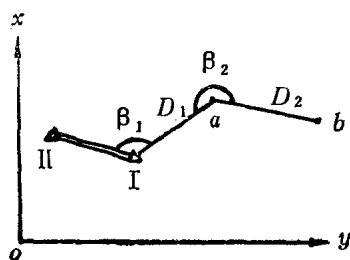


图 1-10

如图1-10所示, 设地面上两点在水平面上的投影是 a 和 b , 在实际工作中, 并不是直接测出它们的坐标和高程, 而是通过仪器观测得到水平角 β_1 、 β_2 和距离 D_1 、 D_2 以及两点之间的高差, 再根据已知点 I 、 II 的坐标、方位和高程, 推算出 a 和 b 两点的

坐标和高程, 以确定它们的点位。

由此可见, 地面点间的位置关系是以高程、水平角和距离来确定的, 它们是确定地面点位的三个基本要素。所以高程测量、水平角测量和距离测量是测量学的基本内容。

§1-2 用水平面代替水准面的限度

上节谈到在地形测量范围内是将大地水准面近似地当成圆球，将地面点投影到圆球面上，然后投影到图纸平面上，但这个过程仍然很复杂。在实际的测量工作中，在一定的测量精度要求和测区面积不大的情况下，往往以水平面代替水准面，那么在多大范围内能容许用平面投影代替球面投影呢？这就是本节所要讨论的问题。

一、水准面的曲率对水平距离的影响

在图1-11中，设 DAE 为水准面， AB 为其上的一段圆弧，长度为 s ，所对的圆心角为 θ ，地球的半径为 R 。从 A 点作切线 AC ，其长度为 t ， t 与 s 之差即为水平面代替水准面所产生的距离误差，设为 Δs ，则

$$\Delta s = AC - \widehat{AB} = t - s$$

其中

$$AC = t = R \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad \widehat{AB} = s = R \cdot \theta$$

$$\Delta s = R(\operatorname{tg} \theta - \theta)$$

将 $\operatorname{tg} \theta$ 展开为级数

$$\operatorname{tg} \theta = \theta + \frac{1}{3} \theta^3 + \frac{2}{15} \theta^5 + \dots$$

取前面两项，得

$$\Delta s = R \left\{ \left(\theta + \frac{1}{3} \theta^3 \right) - \theta \right\} = \frac{1}{3} R \theta^3$$

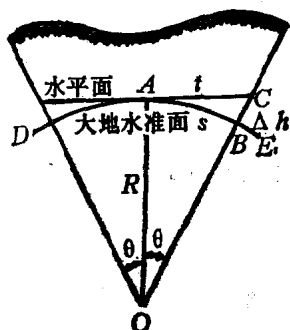


图 1-11

以 $\theta = \frac{s}{R}$ 代入, 则得

$$\Delta s = \frac{1}{3} \frac{s^3}{R^2} \quad (1-3)$$

据(1-3)式, R 用6371公里代入, 由不同的 s 值可以计算出相应的 Δs :

$$s_1 = 10(\text{km}), \Delta s_1 = 1(\text{cm}), \Delta s_1/s_1 \approx 1 : 1000000;$$

$$s_2 = 25(\text{km}), \Delta s_2 = 13(\text{cm}), \Delta s_2/s_2 \approx 1 : 200000;$$

$$s_3 = 100(\text{km}), \Delta s_3 = 820(\text{cm}), \Delta s_3/s_3 \approx 1 : 12000.$$

由上述计算可知, 当水平距离为10公里时, 以水平面代替水准面所产生的误差约为1厘米, 现在最精密丈量的容许误差为其长度的1/1000000。因此可以得出结论: 在半径为10公里的小区域内, 可以不考虑地球曲率的影响, 也就是可以把水准面当作水平面看待, 即实际沿圆弧丈量所得的距离, 作为水平距离, 其误差可忽略不计。

二、地球曲率对高差的影响

由图1-11看出

$$(R + \Delta h)^2 = R^2 + t^2$$

$$2R \times \Delta h + (\Delta h)^2 = t^2$$

即

$$\Delta h = \frac{t^2}{2R + \Delta h}$$

上面已证明, 两点间投影的水平距离和在大地水准面上的弧长相差很小, 可用 s 代替 t , 同时 Δh 比地球半径 R 小得多, 亦可略去不计, 则上式可写成

$$\Delta h = \frac{s^2}{2R} \quad (1-4)$$

由(1-4)式, 取不同的 s 值, 可以计算出相应的 Δh 值:

$$s = 100(\text{m}), \Delta h = 0.078(\text{cm})$$

$$s = 1000(\text{m}), \Delta h = 7.8(\text{cm})$$

$$s = 10000(\text{m}), \Delta h = 780(\text{cm})$$

可见，因地球曲率而产生的高程误差，是随着距离的平方而增加的，并且很快就达到了不可允许的数值。因此，当测量地面点的高程时，即使距离不长，也必须顾及地球曲率对高程的影响。

§1-3 测量的基本原则

在进行港口及航道工程测量时，需要测定很多点的平面位置和高程，由于测量工作中都会产生误差，所以每次测量时必须采取一定的程序和方法。若从一个点开始逐点进行施测，前一点的量测误差将会传递到下一点，这样积累起来，最后可能会达到不可容许的程度。在实际测量工作中一般采用“从整体到局部”，“先控制后碎部”的原则，也就是在测区内先选择一些有控制意义的点子，首先把它们平面位置和高程精确地测定出来，然后再根据它们测定其它点的位置。这些有控制意义的点子组成了测区的测量骨干，所以称这类点为控制点。

例如在图1-12所示的测区中，先选择 *A*、*B*、*C*、*D*、*E*、*F* 等各点作为控制点，然后根据它们来施测附近的特征点（碎部点）。

整个测量工作分为建立控制网的控制测量和以控制网为基础的碎部测量。碎部测量的精度比控制测量的精度低，但由于碎部点的位置都是以控制点测定的，所以误差就不会从一个碎部点传递到另外一个碎部点去，在一定的观测条件下，使各个碎部点都能保证其应有的精度。

对于全国性的测量工作，采取分等级布设控制网的方法，按精度高低，一般分为一、二、三、四等，由高级向低级逐步建立。平面控制网可用三角测量，导线测量等方法建立；高程控制网则用水准测量的方法建立。

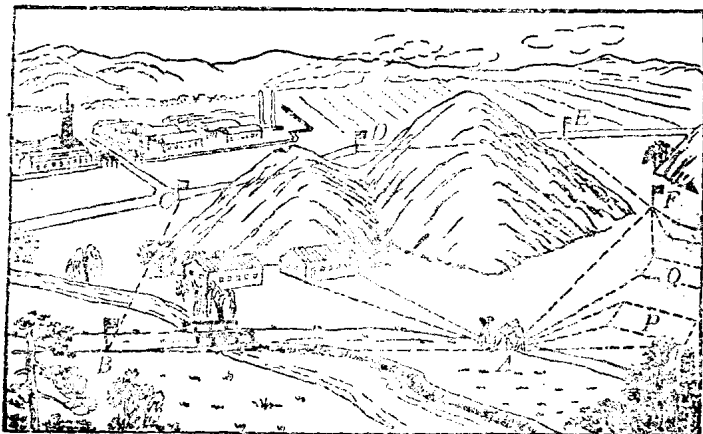


图 1-12

当国家基本平面控制点和高程控制点的密度不能满足测量要求时，可根据需要用不同的方法在高级控制点间进行加密，直至满足测量要求。这种为测图而加密的控制点称为地形控制点（亦称图根控制点）。

测量工作可分为外业和内业，前者在野外进行，后者则在室内进行。外业工作用仪器量边、测角、测量水深等，获得必要的实测数据，内业工作主要是计算与绘图。无论是外业或内业，都必须小心谨慎，随时检查，绝不容许错误存在。这样，才能保证测量成果的质量，提高工作效率。

第二章 水准仪和水准测量

为了确定地面的高低起伏形态，就需要测定地面点的高程。水准测量是测定地面点高程的主要方法，它用于国家控制网的建立、图根控制点和工程施工中的高程测定。

§2-1 水准测量的基本原理

水准测量的基本方法是：先测出地面点之间的高差，然后根据高差和一个点的已知高程来推算其它点的高程。

如图2-1所示，若要测定 N 点对 M 点的高差 h_{MN} ，可在 M 、 N 两点上分别竖立尺子（水准尺），并在两点的中间安置一架能提供水平视线的仪器（水准仪），根据水准仪提供的水平视线，分别截得 M 点尺上的读数 a 和 N 点尺上的读数 b ，则 N 点对 M 点的高差为

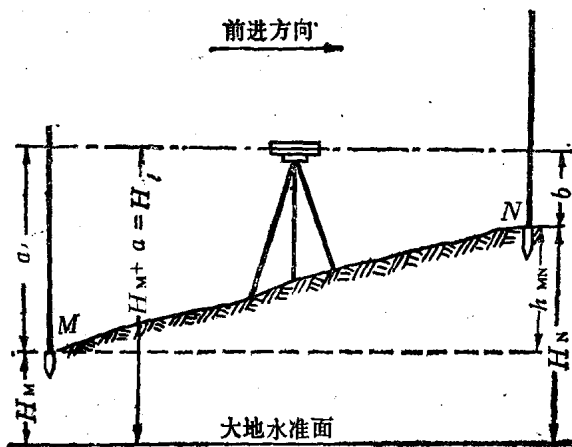


图 2-1

$$h_{MN} = a - b \quad (2-1)$$

如果水准测量是由 M 点到 N 点之间进行的, 如图2-1中所指的前进方向, 则后面尺上的读数 a 称为后视读数 (简称后视), 前面尺上的读数 b 称为前视读数 (简称前视), 所以

$$h_{MN} = a \text{ (后视读数)} - b \text{ (前视读数)}$$

高差 h_{MN} 本身可正可负。由式(2-1)可知, 当 a 大于 b 时 h_{MN} 为正值, 表明前视点 N 高于后视点 M ; 反之, 当 a 小于 b 时 h_{MN} 为负值, 表明前视点 N 低于后视点 M 。无论 h_{MN} 值为正或负, 式(2-1)始终成立。为避免发生正负符号上的错误, 在书写高差 h_{MN} 时必须注意 h 右下角码小字的注记, 如 h_{MN} 表示由 M 点测至 N 点的高差。

由图2-1可知, 当 M 点的高程 H_M 已知时, 则 N 点的高程为

$$H_N = H_M + h_{MN} = H_M + (a - b) \quad (2-2)$$

同时, N 点的高程还可通过仪器的视线高程 H_i 来计算, 即

$$\left. \begin{aligned} H_i &= H_M + a \\ H_N &= H_i - b \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

综上所述, 水准测量的基本原理就是利用水准仪所提供的水平视线测得高差而计算高程。计算高程的方法有两种: 式(2-2)是直接利用高差计算高程, 称为高差法, 这种方法主要用于线路测量; 式(2-3)是利用仪器视线高程来计算 N 点的高程的, 称为仪高法。当安置一次仪器需要测出多个点的高程时, 仪高法比较方便。

§2-2 水准测量的仪器和工具

水准测量所使用的仪器为水准仪, 工具有水准尺和尺垫。下面分别予以介绍。