

第一章 绪论

§ 1-1 土木工程测量的任务

一、测量学的分类

测量学是一门研究地球形状、大小和确定地面、空中、地下、海洋物体位置以及对这些位置信息进行研究、处理、存储、管理和应用的科学。根据研究对象、采用技术手段和应用的不同，分为以下几个学科。

(1) 大地测量学 研究地球形状、大小、地球重力场以及广阔地面上建立国家大地控制网的理论、技术和方法的科学，是整个测量学的基础理论学科。在计算与制图过程中都要考虑地球曲率的影响。大地测量学又可分为常规大地测量学和卫星大地测量学。

(2) 普通测量学 研究地球表面较小区域内测量与制图的理论、技术和方法的科学。在测绘过程中不考虑地球曲率的影响，用平面代替地球曲面，根据需要建立小地区的控制网，并测绘各种比例尺地形图，及进行一般的施工测量。

(3) 摄影测量学 研究利用摄影或遥感技术获取被摄物体的信息，以确定物体的形状、大小、性质及空间位置的理论、技术和方法的科学。由于摄影方式的不同，又分为航空摄影测量、地面摄影测量、航天摄影测量及水下摄影测量等。遥感技术正高速发展，摄影方式和研究对象日益多样化。

(4) 工程测量学 研究工程建设在勘测、设计、施工、竣工验收和运行管理中进行各种测量的理论、技术和方法的科学。由于对象不同，分为建筑工程测量、线路工程测量、桥隧测量和矿山测量等。

(5) 海洋测量学 研究地球表面水体（江、湖和海洋）、港口、航道及水下地貌等测量的理论、技术和方法的科学。

(6) 地图制图学 研究利用测量成果制作各种地图的理论、工艺和方法的科学。其研究内容包括地图编制、地图投影、地图整饰及电子地图的制作与应用。

在国民经济建设中，例如铁路和公路线路的选线与修建、城市居民点以及工业企业的布置与建设、水利灌溉工程的建设、各种资源的勘察开发、农业基本建设等，都需要利用测量提供的资料和图纸进行规划设计，选定经济合理的方案，并通过测量配合各项工程的施工，保证设计意图正确执行。竣工后还要编绘竣工图，以满足工程的使用、管理、维修以至扩建的需要。在国防建设上，国界的划定、国防工程的修建、战略战术的部署和具体军事行动的指挥等，都需要详细、准确的地形图和测量数据作为依据。在科学研究方面，一些以地球为研究对象或与地球有密切关系的学科，如地球形状和大小的研究、地壳升降、海陆变迁、地震预报，以及近代航天技术的发展，都需要测量提供资料或作为研究手段。

二、土木工程测量的任务

土木工程测量属于普通测量学和工程测量学的范畴，其主要任务是：

(1) 研究局部区域的控制测量和平差计算的理论及方法 控制测量及误差知识是所有测量的基础,这里将具体研究讨论平面控制和高程控制的布设、施测、平差计算、数据处理,还要讨论角度、距离、高差、坐标等测量的仪器和方法。

(2) 研究局部区域测绘地形图的理论和方法 地形图是土木工程勘测、规划、设计的依据,研究局部地区投影理论以及将测量资料按需要制作成地形图或电子地图的原理和方法。

(3) 研究讨论在地形图上进行规划和设计的方法 研究线路工程例如铁路和公路利用地形图选线、房屋设计和区域规划利用地形图定位、利用地形图进行土地平整和土方计算等。

(4) 研究建筑物施工放样及建筑物质量检验技术 施工放样测量是工程施工的依据,土木工程测量是研究和讨论将设计好的图纸以规定精度把建筑物、构筑物标定在实地上的测设工作的理论和方法;还要研究施工安装中的监测技术,以保证施工质量。

(5) 研究讨论大型建筑物施工和运行过程中的变形观测技术和观测方法 建筑物、构筑物在施工和运行阶段,由于受自重和外力的影响,很可能发生水平和垂直位移,变形观测理论和方法是土木工程测量的重要内容。

土木工程测量在土木建筑工程、交通工程、市政工程、水利工程、环境工程、桥隧工程、工程管理及农林建设中有着广泛的应用,学习本课程的目的要求掌握土木工程测量的基本知识、基本理论和基本操作技能,并灵活应用于有关专业工作中。

§ 1-2 地面点位的确定

一、基准线和基准面

在测量学中,某点的基准线就是通过该点的铅垂线。所谓铅垂线,就是地面上一点的重力方向线。如果悬挂一垂球,当它静止时所指的方向就是重力方向。

测量主要是以地球为工作对象,地球表面起伏不平,有高山、深谷、平原、海洋等,称之为地球的自然表面。由于地球表面 71% 是海洋,可以假想把静止不动的海平面延伸穿过陆地,包围了整个地球,形成一个闭合的曲面,这个曲面称为水准面;水准面的特点是面上任意一点的铅垂线都垂直于该点的曲面。位于不同高度的水准面可以有无数个,而以通过平均海水面的那个称为大地水准面,它就是点位投影和计算高程的基准面,由这个面所围成的几何形状称为大地球体,可以把它看作是地球的实际形状。

由于地球内部质量分布不均匀,引起铅垂线方向变化,以致大地水准面的形状相当复杂,为便于计算及制图,测量学上就选用一个和大地水准面总的形状非常接近的数学形体来代表

地球形体。如图 1-1 所示,这个数学形体是椭圆 PQP_1E 绕其短轴 PP_1 旋转而成的旋转椭球体,又称地球椭球体。数个世纪以来,许多学者曾分别测算出确定地球椭球体形状和大小的元素值 即长半径 a 、短半径 b 及扁率 α 。目前,中国采用了 1979 年第 17 届国际大地测量与地球物理联合会的推荐值:

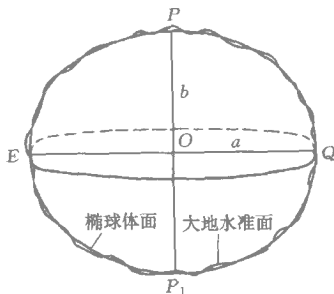


图 1-1

$$a = 6378.137\text{km}$$

$$\alpha = \frac{a - b}{a} \approx \frac{1}{298.257}$$

为了在精度许可下便于计算,可把地球近似地看成圆球,取其半径 $R = (2a + b) / 3 \approx 6371\text{km}$, 此值已能满足一般工程测量的精度要求。

二、确定点位的坐标系

测量工作的基本任务是确定地面点位,通常是求出地面点相对于某基准面、基准线的三维坐标。下面介绍几种确定点位的坐标系,它们之间可以通过相应的关系式进行换算。

(一) 天文地理坐标系

地理坐标系是以经度和纬度表示点在大地水准面上投影的球面位置,它把整个地球置于一个坐标系中,所以又称为绝对位置。

如图 1-2 所示,地面上一点 D 的经度,即通过该点的子午面与通过格林威治天文台的首子午面所夹的二面角,一般用 λ 表示;自首子午线以东 $0^\circ \sim 180^\circ$ 为东经,以西 $0^\circ \sim 180^\circ$ 为西经。通过 D 点的铅垂线和赤道平面所组成的角度称为 D 点的纬度,一般用 φ 表示;自赤道向北 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为北纬,向南 $0^\circ \sim 90^\circ$ 为南纬。一点的经纬度确定后,它的绝对位置也就确定了。例如北京某点的地理坐标为东经 $116^\circ 28'$, 北纬 $39^\circ 54'$ 。天文地理坐标系在地面上用天文观测方法测定出来。

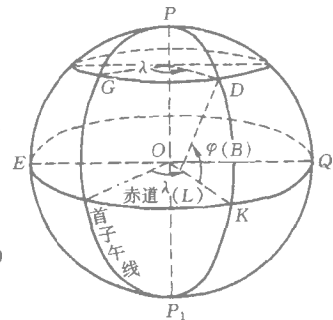


图 1-2

(二) 大地地理坐标系

大地地理坐标是用大地经度 L 和大地纬度 B 表示地面点投影在地球椭球面的位置。确定球面经度和纬度的基准线是椭球面的法线,基本面是包括法线及南北极的大地子午面,如图 1-2 所示某点的大地经度 L 是该点的大地子午面与首子午面的夹角,某点的大地纬度 B 是过该点椭球面法线与赤道平面的夹角。大地经纬度是根据一个起始的大地原点(该点的大地经纬度与天文经纬度一致)的大地坐标,根据大地测量所得数据推算而得到的。

中国已在陕西省泾阳县永乐镇建立了大地原点,据此建立起的全国统一坐标系称“1980 国家大地坐标系”。

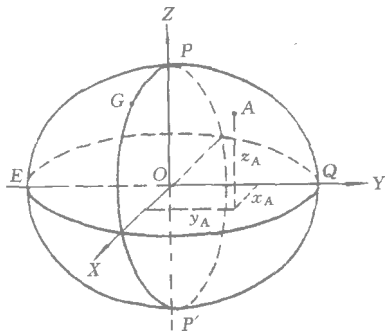


图 1-3

(三) 地心坐标系

地心坐标系是空间三维直角坐标系,用于卫星大地测量。由于人造地球卫星围绕地球旋转,则这种坐标系采用地球的质量中心为坐标原点, X 轴、 Y 轴在地球赤道平面内,首子午面与赤道平面的交线为 X 轴, Z 轴与地球自转轴相重合,如图 1-3 所示,地面点 A 的空间位置用三维直角坐标 x_A 、 y_A 、 z_A 表示。

(四) 高斯直角坐标系

高斯直角坐标系是采用高斯横圆柱投影的方法建立的平面直角坐标系,是一种球面坐标与平面坐标相关联的坐标系统。

高斯投影方法是将地球划分为若干带,如图 1-4 (a) 所示。从首子午线起,每隔经差 6° 为一带,将地球自西向东等分为 60 带,带号 N 依次为 1, 2, ..., 60。位于各带边缘的子

午线称为分带子午线，位于各带中央的子午线称为中央子午线，设其经度为 λ ，则在东半球第 N 带中央子午线的经度为

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

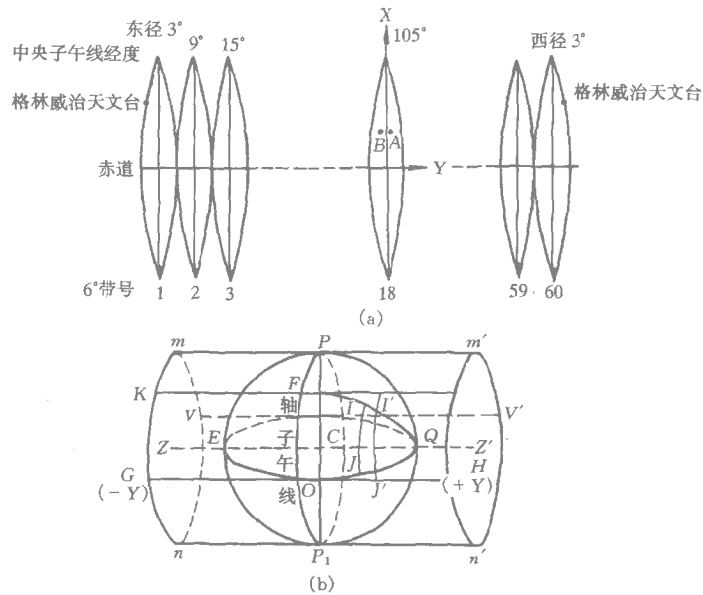


图 1-4

每带独立进行投影，如图 1-4 (b) 所示。投影时使地球椭球上某 6° 带的中央子午线与横椭圆柱面相切，在椭球面上的图形与椭圆柱面上的图形保持等角的条件下，将整个 6° 带投影到椭圆柱面上，然后将椭圆柱沿通过南北极的母线 (mm' 及 nn') 切开并展成平面，即得到 6° 带在平面上的形象。中央子午线和赤道为互相垂直的直线，分别为 X 轴和 Y 轴，交点为原点，即组成高斯平面直角坐标系。投影中，离中央子午线越远处变形越大，为减小变形也可采用 3° 带。

中国位于北半球，纵坐标均为正值，而横坐标则有正有负，为避免横坐标出现负值，规定把纵轴向西平移 500km，并在横坐标值上冠以带号，以区别不同带的坐标。例如图 1-4 (a)， A 、 B 点位于第 18 带，其纵坐标值 $x_A = x_B = 3\,236\,107.860\text{m}$ ，横坐标 $y_A = -y_B = 056\,103.445\text{m}$ ，则横坐标应写为 $y_A = 18\,556\,103.445\text{m}$ ， $y_B = 18\,443\,896.555\text{m}$ ，此坐标称为通用坐标。

(五) 独立直角坐标系

当测区面积较小时，可不考虑地球曲率的影响，就不必进行复杂投影计算，可以直接将地面点沿铅垂线投影到水平面上，由平面直角坐标表示其投影位置。

独立平面直角坐标系如图 1-5 所示。规定以南北方向为纵轴，记为 X 轴，原点以北为正，原点以南为负；以东西方向为横轴，记为 Y 轴，原点以东为正，原点以西为负。原点 O 一般设定在测区的西南角，以使测区内各点的 x 、 y 坐标均为正值。坐标系的象限按顺时针方向编号。直线的方向按 X 轴的正向起顺时针量取夹角。虽然 X 轴与 Y 轴的位置、象限顺序和直线方向的量取均与数学中不同，而数学中的公式却可直接应用到测量计算中，不需

作任何变更。

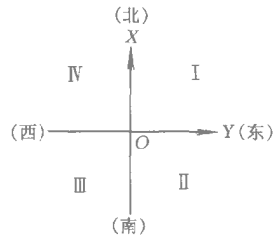


图 1-5

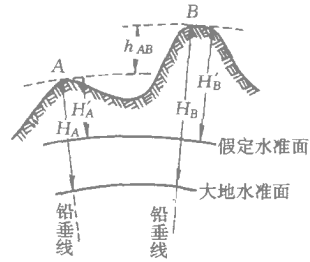


图 1-6

三、点的高程

地面上任一点到水准面的铅垂距离就是该点的高程。地面点到大地水准面的铅垂距离称为绝对高程，又称为海拔。例如珠穆朗玛峰海拔 8848.13m，就是按 1956 年黄海高程系统，它高出大地水准面 8848.13m。目前中国采用的是“1985 国家高程基准”，这个大地水准面是以青岛验潮站 1952 年至 1979 年所测定的黄海平均海面作为全国高程的统一起标面，并推得青岛水准原点高程为 72.260m，全国各地的高程则以它为基准进行测算。原施行的 1956 年黄海高程系（青岛水准原点高程为 72.289m）已废止。

在局部地区，也可以假定一个水准面作为高程起算面，地面上一点到假定水准面的铅垂距离称为相对高程。两点高程之差称为高差。如图 1-6 所示，A、B 两点的绝对高程为 H_A 、 H_B ，两点的相对高程分别为 H'_A 、 H'_B 。A、B 两点高差为 $h_{AB} = H_B - H_A = H'_B - H'_A$ 。

§ 1-3 测量工作的基本概念

一、测量工作的基本原则

当进行测量工作时，测量成果都将不可避免地带有误差，而测量成果的使用都有一定精度要求，因此，就要有一系列的操作规定和校核方法来保证成果的质量。精度不够将不能满足工程设计需要，甚至发生质量事故；另一方面，如果不顾工程实际需要而盲目追求高精度，则将给测量工作中的人力、物力和时间带来损失和浪费。

为了防止测量误差的逐渐传递、累积增大到不能容许的程度，首先要用较严密的方法、较精密的仪器和较严格的计算，施测一些“骨干”点子，以保证整体的精度，再从这些点施测另外的点子。也就是：在测量布局上“由整体到局部”，在精度上“由高级到低级”，在程序上要“先控制后碎部”，这是测量工作应遵守的一个很重要的原则。

二、控制测量、碎部测量、施工放样

(一) 控制测量

控制测量分为平面控制测量和高程控制测量。平面控制测量是将前面所说的“骨干”点子组成连续的三角形，称为三角网；或组成相互连接的折线形，称为导线。用精密的仪器和较精确的方法测量它们的相对位置，并推算其坐标，这项工作称为平面控制测量，这些“骨

干”点子即是平面控制点。高程控制测量是由一系列水准点或三角高程点构成，亦可将三角网、导线等平面控制点兼作高程控制点位，一般用水准测量或三角高程测量的方法测定它们的高程。这项工作称为高程控制测量。控制测量是带有全局性的工作，在比较大的测区，应根据需要按照不同的精度要求分成各种等级，逐层加密直至满足应用要求。

(二) 碎部测量

地表的外形是很复杂的，各种物体类别多种多样，地势高低起伏千差万别，在测量中将它们分为地物和地貌两种。地物是指人工构筑物和自然形成的有明显轮廓的物体，如房屋、道路、沟渠、电杆、河流和湖泊等；地貌是指地面高低起伏的形态，如平原、丘陵、山岭、河谷和洼地等。地物和地貌统称为地形。碎部测量是以控制点为依据测定碎部点（地物和地貌的特征点）对控制点的关系。如果测量的目的只为获得地物水平投影的位置，则这种测量称为地物测量。如果既要获得地物的水平投影位置，又要获得地面的高低起伏情况，则这种测量称为地形测量。碎部测量最后成果是将测得的地物、地貌缩绘到图纸上。地物测量所取得的图称为平面图，地形测量取得的图称为地形图。

(三) 施工放样

在配合工程施工的施工测量中以控制点为依据，把图上设计的建筑位置测设到实地上称为施工放样。由于控制网是一个整体，因此，不论建筑物的范围有多大，形状有多么复杂，由各控制点测设出来的建筑物位置必能联系成为一个整体。在放样过程中，仍然要遵循从整体到局部的测量工作原则，先放样建筑物的主要轴线，再进行细部放样。

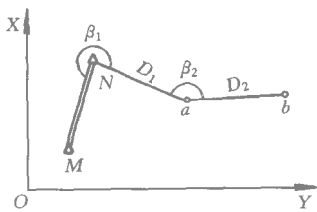


图 1-7

三、传统测量工作的三个基本观测量

测量工作的任务是确定地面点的位置，而点与点之间的相对位置关系可用距离、角度和高差来确定。如图 1-7 所示，地面点 A、B 在投影面上的位置是 a 和 b，传统的测量仪器和方法，并不能直接测出它们的坐标和高程，而是观测水平角 β_1 、 β_2 和丈量水平距离 D_1 、 D_2 ，以及施测各点之间的高差，再根据已知点 N 的坐标及高程，推算各点的点位。由此

可见，角度、距离和高差是传统测量工作的基本观测量，也是确定地面点位的基本要素，称为测量三要素。

应该指出，由于全站仪和电子水准仪的应用，它们都可通过仪器内部的计算机自动计算出结果，对我们来说，则可以直接观测到待定点的坐标和高程。

§ 1-4 用水平面代替水准面的范围

如果将一个曲面铺开成平面，曲面上的图形必然产生变形。当把大地水准面上的图形测绘到平面图纸上时，只有当图形的变形不超过测量与制图误差才是许可的，因此，要研究在多大范围内才许可用水平面代替水准面。

在图 1-8 中，A、B 和 C 为地球自然表面上的点，把它们投影到大地水准面上，得到 a、b 和 c 点，此三点再投影到区域中心点 A 的大地水准面的切平面上，得到 a'、b' 和 c' 点。

一、距离的变化及许可范围

用水平面上的长度 D' 代替大地水准面（近似地认为它是圆球面，半径 $R=6371\text{km}$ ）上的弧长 D 所产生的误差为

$$\begin{aligned}\Delta D &= D' - D = R \operatorname{tg} \theta - R \theta \\ &= R (\operatorname{tg} \theta - \theta)\end{aligned}\quad (1-2)$$

因为 $\operatorname{tg} \theta \approx \theta + \frac{\theta^3}{3}$ （此为 $\operatorname{tg} \theta$ 的级数展开式，因 θ 角很小，已略去其高次项），

$$\Delta D \approx R \left(\theta + \frac{\theta^3}{3} - \theta \right)$$

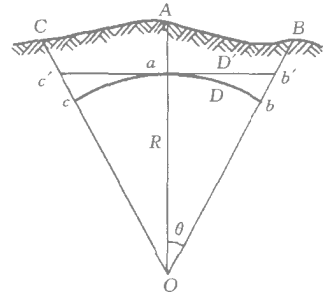
以 $\theta = D/R$ 代入上式，则

$$\Delta D \approx \frac{D^3}{3R^2}\quad (1-3)$$

或

$$\frac{\Delta D}{D} \approx \frac{D^2}{3R^2}\quad (1-4)$$

以 R 值和不同的 D 值代入上式右边，即可得到各对应的距离误差与该距离之比值 $\Delta D/D$ ，称为相对误差，相对误差通常化为分子为 1 的分式表示。当 $D=10\text{km}$ 时，距离误差为 8.2mm 相对误差为 $1/1\ 220\ 000$ ，这在最精密的距离丈量中也是允许的，因而在半径 10km 的范围内用水平面代替水准面产生的距离误差可以忽略不计，即不考虑地球曲率对距离的影响。



二、高程的变化及许可范围

如图 1-8 所示， B 点对水平面的高程为 Bb' ，对水准面的高程为 Bb ，则用水平面代替水准面产生的高程误差为 $\Delta h = b'b$ ，于是

$$\begin{aligned}(\Delta h + R)^2 &= R^2 + D'^2 \\ \Delta h &= \frac{D'^2}{2R + \Delta h}\end{aligned}$$

上式分母中， Δh 与 $2R$ 相比可以忽略不计，再以 D 代替分子中的 D' ，则

$$\Delta h \approx \frac{D^2}{2R}\quad (1-5)$$

当 D 分别为 0.2km 、 1km 和 2km 时，代入式 (1-5)，求得相应的 Δh 分别为 3mm 、 8cm 和 31cm 。因此，用水平面代替水准面对高程的影响在较小范围内也不能忽略，而要采取一定的操作措施或加曲率改正。

三、平面角的变化及许可范围

由于球面三角形内角和与平面三角形内角和之差为球面角超

$$\epsilon'' = \frac{S}{R^2} \cdot \rho''\quad (1-6)$$

式中 S ——三角形面积。

当 $S=100\text{km}^2$ 时， $\epsilon \approx 0.5''$ 。这在一般工程测量中可忽略不计。因此，在 100km^2 的范

围内，用水平面代替水准面，测水平角可不顾及地球曲率的影响。

练习题

1. 土木工程测量的任务是什么？
2. 确定地面点位常采用哪几种坐标系，它们是如何定义的？
3. 什么是大地水准面？它有什么特性？其作用为何？
4. 什么是绝对高程？什么是相对高程？
5. 今测得地面两点 A 、 B 相对高程分别为 $H'_A = 85.324\text{m}$ ， $H'_B = 47.223\text{m}$ ，其作为水准面的假定水准面的绝对高程为 58.721m 。问 A 、 B 两点的绝对高程 H_A 、 H_B 各为多少？试绘图说明。
6. 什么是“1985 国家高程基准”？
7. 设地面点 B 为东经 $121^\circ 48' 18''$ ，问该点位于 6° 投影带的第几带？其中央子午线的经度是多少？
8. A 点高斯平面直角坐标值 $X = 345\ 243.91\text{m}$ ， $Y = 20\ 231\ 108.83\text{m}$ ，问该点是在 6° 带的第几带？该带中央子午线经度是多少？绘图表示 A 点在该带的位置，并指出 A 点与中央子午线和赤道的距离各是多少？ A 点与该带坐标原点的距离是多少？
9. 水准面与水平面有什么区别？在什么范围内可将水准面看作为水平面？
10. 怎样理解测量工作要遵循“从整体到局部”、“由高级到低级”、“先控制后碎部”的原则？
11. 为确定地面点的位置，传统的测量工作有哪几项基本观测量？
12. 测量学在国民经济中有何作用？与你所学的专业有什么关系？

第二章 水准测量

§2-1 水准测量原理

一、水准测量原理

水准测量是利用水准仪提供的水平视线对竖立在两点的水准尺进行观测，以测定两点间的高差，如果其中一点高程为已知，另一点高程即可算出，这个方法又称为几何水准测量。

如图 2-1 所示，若要测定 M 、 N 两点高差可在两点间安置水准仪，在 M 、 N 两点分别铅直竖立水准尺，利用水准仪的水平视线读出 M 点水准尺上读数 a 和 N 点水准尺上读数 b 则得到高差公式：

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

h_{MN} 即为 N 点对 M 点的高差。如果 M 点高程 H_M 为已知，则 N 点的高程为

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

式中 a ——已知高程点的水准尺读数，称为后视读数；

b ——欲求高程点的水准尺读数，称为前视读数。

计算高差时，恒为后视读数减前视读数，因此，高差有正负之分。当 $a > b$ 时， h_{MN} 为正，表示前视点比后视点高；当 $a < b$ 时， h_{MN} 为负，表示前视点比后视点低。

在实际工作中，常常需要安置一次仪器测算很多点的高程，可先求出水准仪的视线高程，然后再分别计算各点高程，这种方法称为视线高法。从图 2-1 中可以得出视线高法公式：

$$\text{视线高} \quad H_i = H_M + a \quad (2-3)$$

$$N \text{ 点高程} \quad H_N = H_i - b \quad (2-4)$$

二、连续水准测量（路线水准测量）

如图 2-2 所示，当要测的 M 、 N 两点距离较远或高差较大，或遇有障碍，安置一次仪器不能通视时，须在水准路线中加设若干个临时立尺点，依次按基本方法测定相邻两点间的高差，然后取各高差的代数和，即得起、终两点的高差。这种方法称为连续水准测量，其公式为

$$h_i = a_i - b_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (2-5)$$

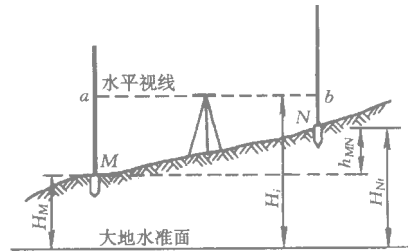


图 2-1

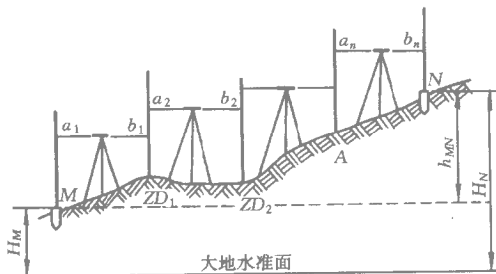


图 2-2

M、N 两点高差计算的一般公式为

$$h_{MN} = \sum_{i=1}^n h_i = \sum_{i=1}^n a_i - \sum_{i=1}^n b_i \quad (2-6)$$

水准测量是测量地面点高差的精确方法，也是工程测量中最常用的方法。中间立尺点称为转点（ZD），起传递高程的作用。为保证高程传递正确无误，观测中转点在一个测站是作为前视，而在下一测站作为后视，在这过程中必须保持立尺位置稳定不动。在水准测量中，为削弱水准管轴与视准轴不平行的仪器误差、地球曲率和大气折光的影响，以及对光透镜运行误差的影响，应尽可能使各测站前、后视线长度大致相等，称为“中间法”施测高差。

§ 2-2 水准仪及其使用

水准仪是提供水平视线来测定高差的仪器，按其精度分为：DS_{0.5}、DS₁、DS₃、DS₁₀、DS₂₀多种型号，“D”和“S”分别为“大地测量”和“水准仪”汉语拼音第一个字母，数字0.5、1、3、10、20 是表示仪器的精度，即每公里往返测量高差中数的中误差（以毫米计），数字越小，仪器精度越高。

水准仪主要由望远镜、水准器和基座组成，各部件名称见图 2-3。

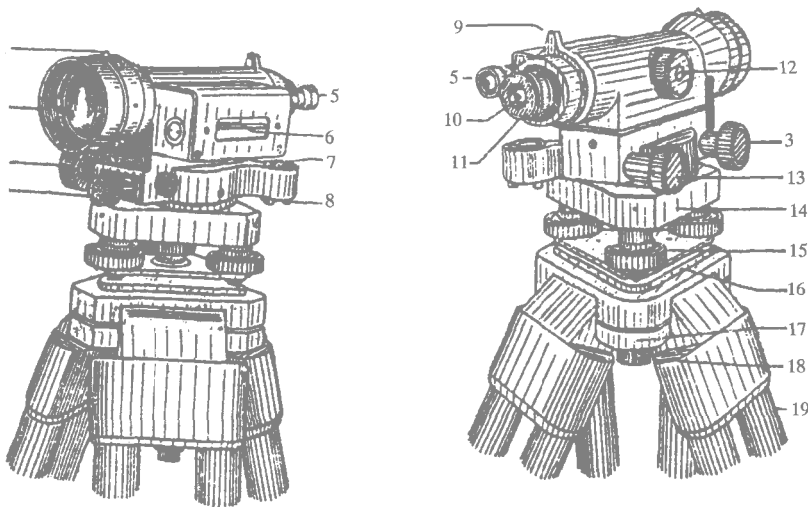


图 2-3

- 1—准星；2—物镜；3—微动螺旋；4—制动螺旋；5—符合水准器观测镜；6—水准管；
7—水准盒；8—校正螺丝；9—照门；10—目镜；11—目镜对光螺旋；12—物镜对光螺旋；
13—微倾螺旋；14—基座；15—脚螺旋；16—连接板；17—架头；18—连接螺旋；19—三脚架

一、望远镜组成及其成像原理

望远镜由物镜、目镜和十字丝三个主要部分组成。它的主要作用是能使我们看清远处的目标，并提供一条照准读数用的视线。

图 2-4 是 DS₃ 型微倾水准仪望远镜构造略图，它是内对光式倒像望远镜。图 2-5 是其成

像原理图。目标经过物镜和对光凹透镜的作用，在镜筒内造成倒立、缩小的实像，通过调节对光凹透镜，可以使像清晰地成像在十字丝平面上。目镜的作用是放大，人眼经过目镜，可以看到目标的小实像与十字丝一起放大的虚像。十字丝的作用是提供照准目标的标准。

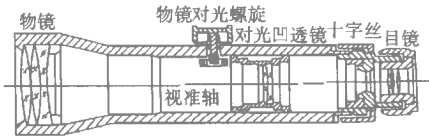


图 2-4

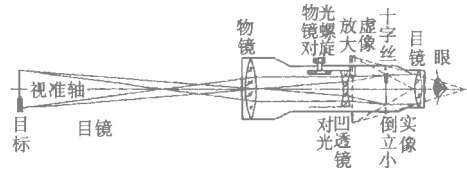


图 2-5

为了提高望远镜成像的质量，物镜、对光透镜和目镜都是由多块透镜组合而成。物镜与对光透镜组合后的等效焦距与目镜等效焦距之比称为望远镜放大率。DS₃水准仪望远镜的放大率一般为 28 倍。

十字丝分划板是一块具有刻线的玻璃片，通过校正螺丝固定在望远镜筒上，十字丝的构造和形式如图 2-6 所示，十字丝中央交点和物镜光心的连线称为视准轴，即视线。十字丝玻璃片上的上、下短丝称为视距丝。水准测量就是当视线水平时，用中间横丝截取水准尺读数。

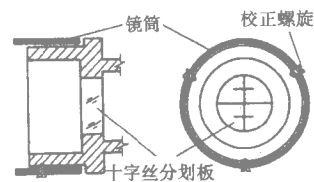


图 2-6

为了控制望远镜的左右水平转动，以便视准轴对准目标，水准仪一般装有一套制动螺旋和微动螺旋。有些仪器是靠摩擦制动，只设微动螺旋。

二、水准器

水准器是标志视线是否水平、竖轴是否铅垂的装置。水准器有两种：水准盒和水准管。

1. 水准盒

水准盒顶面内壁是一个球面，球面中心的外壁刻有一个圆圈，其圆心称为水准盒零点，零点的球面法线称为水准盒轴线。当气泡中心与零点重合时，称为气泡居中。此时水准盒轴就处于铅垂位置，如图 2-7 (a) 所示。气泡移动 2mm，水准盒轴相应倾斜的角度 τ 称为水准盒分划值，是用以表示水准器灵敏度的标准。

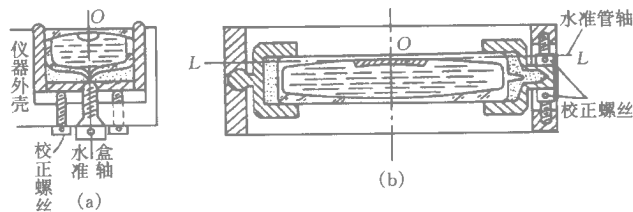


图 2-7

2. 水准管

水准管是把玻璃管的纵向内壁制成圆弧，管内装入热乙醇和乙醚混合液，密封冷却而成。水准管圆弧中点 O 称为水准管零点，过零点与内壁圆弧相切的直线称为水准管轴。水准管气泡中点与水准管零点重合时称为气泡居中，此时水准管轴处于水平位置，如图 2-7 (b) 所示。气泡移动 2mm，水准管轴相应倾斜的角度 τ 称为水准管分划值，如图 2-8 所示。

设水准器曲率半径为 R_{mm} 水准气泡移动 2mm ，则 $\tau = \rho'' \cdot 2/R$ ($\rho'' = 206\,265''$)。

DS_3 型水准仪上的水准盒和水准管分划值分别为 $8'/2\text{mm}$ 和 $20'/2\text{mm}$ 。水准盒和水准管分别用于概略整平和精密整平。

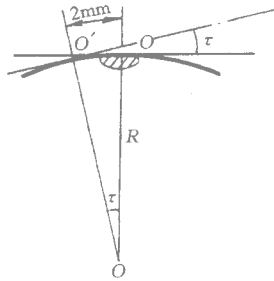


图 2-8

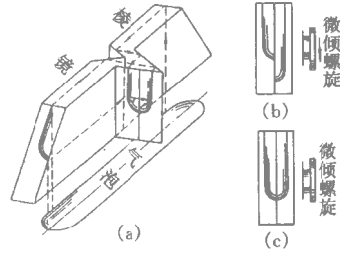


图 2-9

为了提高水准管气泡居中精度，在水准管上方装置一组符合棱镜组，称为符合水准器，如图 2-9 (a) 所示。借助棱镜组的折射、反射使气泡两端的像反映到气泡观察镜中。若气泡两端的像相互错开，如图 2-9 (b) 所示，表示气泡没有居中，此时应转动微倾螺旋，使气泡两端的像吻合为圆弧形，如图 2-9 (c) 所示，说明气泡已居中。

三、基座

基座主要由轴座、脚螺旋和连接板组成。仪器上部通过竖轴插入轴座内，由基座承托，整个仪器用连接螺旋与三脚架连接。

四、水准尺及尺垫

常用的水准尺有塔尺和板尺两种，如图 2-10 所示。塔尺的零点在尺的底部，尺的刻划是黑（红）白格相间，每一黑（红）格或白格是 1cm 或 0.5cm ，尺上分米处注有数字，分米的准确位置有的以字底为准，有的以字顶为准，还有的将字写在所在分米之间。超过 1m 的注记在分米字头上设红点，红点数代表米数。为适应望远镜的正、倒像读数，尺两面一般均有刻划，一面为正字，另一面为倒字。板尺为黑红双面刻划，其特点是两面零点不一致，黑面分划尺底为零，红面分划尺底为一常数（一般为 4.687m 或 4.787m ）。利用黑红面尺零点差可以对水准读数进行校核。使用水准尺前一定要认清刻划特点。

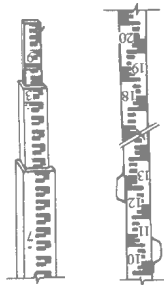


图 2-10

水准板尺一般长 3m ，常用于三、四等水准测量。塔尺有 5m 和 3m 等多种，常用于等外水准测量，当使用塔尺两节以上时，要注意两节接口位置是否对准，卡簧是否卡住。

尺垫用生铁铸成，如图 2-11 所示，中央有一半圆体样的凸起，作为立尺和标志转点之用。



图 2-11

五、水准仪的使用

1. 仪器的安置

水准仪的安置主要是整平水准盒，使仪器概略水平。做法是：选好安置位置，用连接螺旋将仪器紧固在三脚架上，先踏实两支架腿尖，前后、左右摆动另一支架腿，使水准盒气泡概略居中，然后用脚螺旋使气泡完全居中。转动脚螺旋使气泡移动的操作规律是：气泡需要向哪个方向移动，左手姆指（或右手食指）就向哪个方向转动脚螺旋。如图 2-12 所示，如果气泡偏离在图 2-12 (a) 的位置，首先按箭头所指方向两手同时相对转动脚螺旋 ① 和 ②，使气泡移到图 2-12 (b) 的位置；再按图中箭头所指方向转动脚螺旋 ③，使气泡居中，一般要反复几次，直至气泡完全居中为止。

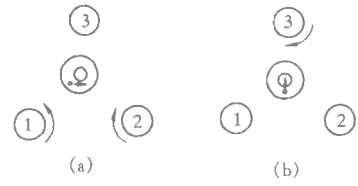


图 2-12

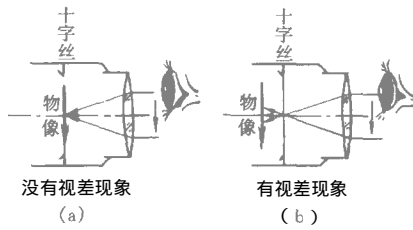


图 2-13

2. 对光照准

先将望远镜对着明亮背景，转动目镜对光螺旋，使十字丝清晰。然后松开制动螺旋，转动望远镜，利用镜筒上的准星和照门照准目标后，这时尺像应在望远镜视场内，可旋紧制动螺旋。转动物镜对光螺旋使尺像清晰，再旋转微动螺旋使尺像位于横丝中部。随之应消除望远镜视差，当观测者眼睛在目镜后上、下晃动时，如果十字丝交点总是指在尺像的一个固定位置，即横丝读数没有变化，说明无视差现象，物像已成像在十字丝面上，如图 2-13 (a) 所示；如果影像与十字丝有相互错动的相对运动现象，说明有视差，原因是物像没有成在十字丝面上，如图 2-13 (b) 所示，这将对读数的准确性有影响，应继续仔细进行物镜对光，直到消除视差。

3. 精密整平

轻轻转动微倾螺旋，使符合水准气泡居中，即气泡两端的像吻合，如图 2-9 (c) 所示。

4. 读数

以十字丝横丝为准，读出其指示数值。读数时注意尺上注字，依次读出来、分米、厘米，估读出毫米。使用仪器前应辨认望远镜是正像还是倒像，图 2-14 为倒像望远镜读尺的例子，每次从望远镜内读数前及读数后都应检查符合气泡是否居中，以保证视线在水平时读数。

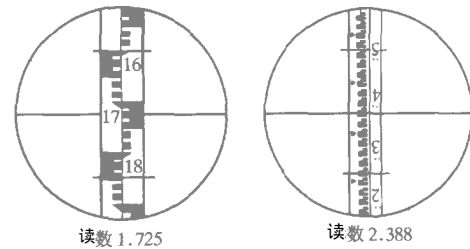


图 2-14

§ 2-3 水准测量的实施

一、水准点

水准点是一种已知其高程的测量标志，常以“BM”表示，其高程一般用几何水准测量

测定，在困难地带也可用电磁波测距高程导线进行测量。水准点有永久性和临时性两种，国家水准点一般用混凝土或不易风化的岩石凿刻制成，设置在土质坚实、便于保存及使用处，底部并应埋设在冻土层以下，顶部设置半球状标志，如图 2-15 (a) 所示；有的用金属标志镶嵌埋设在坚固稳定的永久性建筑物上，如图 2-15 (b) 所示；建筑工地上的永久性水准点式样如图 2-15 (c) 所示；临时性的水准点可用地面上凸出和坚硬岩石、房屋勒脚或建筑物基础代替，也可用大木桩打入地下，用混凝土浇筑加固，桩顶钉以半球形铁钉，如图 2-15 (d) 所示。

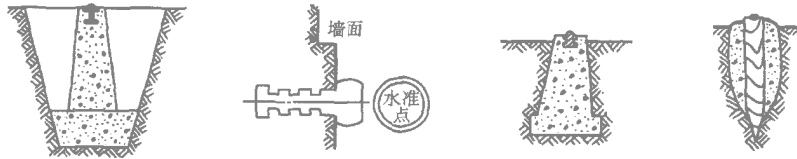


图 2-15

二、水准路线的布置形式

按已知高程的水准点分布情况和实际需要，水准路线的布置形式及其闭合差（即观测值与理论值之差）计算各有不同，一般有以下几种。

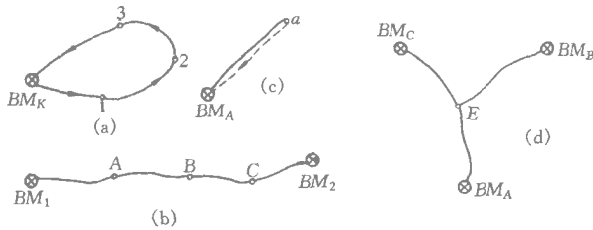


图 2-16

1. 闭合路线

如图 2-16 (a) 所示，从一已知高程的水准点 BM_K 出发，沿各待定点进行测量，最后又回到 BM_K 。其高差总和理论上应等于零，即 $\sum h_{理} = 0$ ，但在观测中有误差存在，其闭合差为

$$f_h = \sum h_{测} - \sum h_{理}$$

由于 $\sum h_{理} = 0$ ，故

$$f_h = \sum h_{测} \tag{2-7}$$

式中 f_h ——高差闭合差；

$\sum h_{测}$ ——各个测站测得的高差总和。

2. 附和路线

如图 2-16 (b) 所示，从一已知高程水准点 BM_1 出发，沿线测量各待定点，最后附和到另一已知高程的水准点 BM_2 。其高差总和理论值应为两已知点高差，即 $\sum h_{理} = H_{终} - H_{始}$ 而其高差闭合差为

$$\left. \begin{aligned} \text{即} \quad f_h &= \sum h_{测} - \sum h_{理} \\ f_h &= \sum h_{测} - (H_{终} - H_{始}) \end{aligned} \right\} \tag{2-8}$$

式中 $H_{终}$ 与 $H_{始}$ ——终了水准点与起始水准点的已知高程。

3. 支水准路线

如图 2-16 (c) 所示，从一水准点 BM_A 出发，沿线测量各待定点，其路线既不闭合到

原来已知点，也不附合到另一已知点。但为了检查应进行往、返观测。理论上往测高差总和 $\Sigma h_{往}$ 与返测高差总和 $\Sigma h_{返}$ 两者的绝对值相等而符号相反，则其高差闭合差为

$$f_h = \Sigma h_{往} + \Sigma h_{返} \quad (2-9)$$

实际上，通过往、返观测，支水准路线与闭合水准路线形式一致，也可按闭合路线处理。

4. 水准网

水准网是指由若干条单水准路线相互连接而成的图形，如图 2-16 (d) 为具有一个结点（即公共点）的水准网。水准网的形式还有附合水准网、独立水准网等多种。

三、水准测量的施测方法

(一) 观测与记录

如图 2-2 所示，水准点 M 、 N 的高程分别为 H_M 和 H_N ，现需从 M 点观测至 N 点，以求 A 点高程。在离 M 处适当距离（一般为 50m~100m）的地点安置仪器，在路线前进方向上与后视距离大致相等处选转点 ZD_1 ， BM_M 及 ZD_1 处分别铅直竖立水准尺，以望远镜瞄准后视 BM_M 处水准尺，精确整平符合水准管后在水准尺上读数，设为 2.004m，记入后视读数栏内，如表 2-1 (a)；再瞄准前视 ZD_1 水准尺，符合水准管居中后读数，设为 1.125m，记入前视栏内；后视读数减前视读数所得之差 + 0.879m 记入高差栏内；如此完成了一个测站的工作。 ZD_1 水准尺位置不动，把 M 点处的水准尺移至 ZD_2 上，仪器安置在 ZD_1 和 ZD_2 之间，使其距两尺距离尽量相等，按上述步骤进行观测和计算，依此类推，一直测至前视 N 点，待求点 A 是该路线上必须立尺的点。这种测法称为高差法水准测量。

表 2-1 (a) 高差法水准测量手簿

测 站	点 号	后视读数 (m)	前视读数 (m)	高 差 (m)	高 程 (m)	备 注
1	BM_M	2.004			40.704	
	ZD_1	1.483	1.125	+0.879 ⁺²	41.585	
2	ZD_2	2.197	1.670	-0.187 ⁺²	41.400	
3	A	1.886	0.749	+1.448 ⁺¹	42.849	
4	BM_N		1.652	+0.234 ⁺²	43.085	
计算校核		$\Sigma a = 7.570$	$\Sigma b = 5.196$	$\Sigma h = 2.374$		
		-) $\Sigma b = 5.196$				
		$\Sigma h_{测} = 2.374$				
路线校核		$f_h = \Sigma h_{测} - (H_{终} - H_{始}) = 2.374 - 2.381 = -0.007m$				
		$f_{h允} = \pm 5\sqrt{n}mm = \pm 10mm$				
	精度合格	$v_{每站} = -\frac{f_h}{n} = -\frac{-0.007}{4} = +1.75mm$				

注：此法常用于引测水准点。

如采用表 2-1 (b) 将后视点高程 40.704m 加后视读数 2.004m 所得之和 42.708m 记入

视线高栏内，将视线高减去前视读数 1.125m 所得之差 41.583m 记入 ZD_1 点高程栏内，如此完成一个测站。这种测法称为视线高法水准测量。

视线高法水准测量手簿

测站	点号	后视读数 (m)	视线高 (m)	前视读数 (m)	高程 (m)	改正后高程 (m)
1	BM_M	2.004	42.708		40.704	40.704
	ZD_1	1.483	43.066	1.125	41.583 ⁺²	41.585
2	ZD_2	2.197	43.593	1.670	41.396 ⁺⁴	41.400
3		A	1.886	44.730	0.749	42.844 ⁺⁵
4	BM_N			1.652	43.078 ⁺⁷	43.085
计算校核		$\Sigma a = 7.570$ -) $\Sigma b = 5.196$ $\Sigma h_{测} = 2.374$		$\Sigma b = 5.196$	$H'_{终} = 43.078$ $H_{始} = 40.704$	2.374
路线校核		$f_h = H'_{终} - H_{终} = 43.078 - 43.085 = -0.007m$ $f_{h允} = \pm 5\sqrt{n}mm = \pm 10mm$ 精度合格 $v_{每站} = -\frac{f_h}{n} = -\frac{-0.007}{4} = +1.75mm$				

注：此法常用于路线纵断面测量。

(二) 水准测量的校核工作

水准测量时，操作、记录、计算等环节中稍有疏忽很易出错，因此，除在工作时要专心、认真仔细地完成任务外，还要采取一些措施多方面检核，以保证测量成果正确无误，精度符合要求。一般要进行以下三项检核。

1. 计算校核

为了检查计算过程中有无错误，应进行计算校核。在表 2-1 (a) 中，采用式 (2-6)，即

$$\Sigma h = \Sigma a - \Sigma b$$

在表 2-1 (b) 中，采用

$$\Sigma a - \Sigma b = H'_{终} - H_{始} \quad (2-10)$$

式中 $H'_{终}$ 、 $H_{始}$ ——以观测值推算的终点高程和已知的起始点高程。

2. 测站校核

上述计算校核无误，只说明记入表格中的数据计算没有错误，不能检核外业观测和记录中的问题。因此采取一种措施，即对每一站的观测和记录都及时在现场进行校核，称为测站校核，常采用的方法有：变动仪器高法、双面尺法及双仪器法。

(1) 变动仪器高法 是在一个测站上用不同的仪器高度，两次测出高差。改变仪器高度应大于 10cm。两次所测高差之差按精度要求的不同，不得超过规定值，一般为 3mm~

5mm，符合要求后取其平均值为最后结果，否则须重测。

(2) 双面尺法 在仪器高度不变的情况下，利用水准尺的黑、红面测出的黑面尺高差及红面尺高差，两高差之差不应超过规定值。

(3) 双仪器法 利用两台水准仪同时观测两点高差，测得两高差之差不应超过规定值。

3. 路线校核

前面提到过水准路线的三种布置形式——闭合路线、附和路线及支水准路线，由于测量不可避免地存在误差，各种路线均会产生闭合差，即观测值与理论值不符，其值可用公式(2-7)、(2-8)及(2-9)求出，再与规定之允许误差比较，判断观测精度是否合格，如此起了一定校核作用。如果超过了允许误差范围，要查明原因，必要时应返工重测。

(三) 水准测量的精度要求

测绘单位和各建设部门，根据各自的实际需要，在研究误差产生的规律和总结经验的基础上，制定了测量的有关规范，规定了适合各种工程或其它用途的各种精度等级的测量闭合差允许范围，即允许误差，又称限差。凡测量成果的误差在限差范围之内时，说明精度符合要求，成果可以使用。否则应查明原因返工重测。凡误差超过限差时称为超限。

四、水准测量的高程计算

1. 高差闭合差及其允许值的计算

按水准路线的不同形式，计算高差闭合差。按水准路线的不同等级的精度要求，计算各路线的闭合差允许值。此两项应列式计算，写在表 2-1 (a) 或表 2-1 (b) 的路线校核栏内。

2. 高差闭合差的分配与高程计算

当闭合差在允许误差范围内时，说明精度合格，可以进行闭合差的分配。分配的原则是：对于闭合或附和路线，改正数 v 与测站数（或路线长度）成正比，并与闭合差符号相反，即

$$\text{或} \quad \left. \begin{aligned} v_{\text{每站}} &= -\frac{f_h}{n} \\ v_{\text{每km}} &= -\frac{f_h}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2-17)$$

式中 n ——测站数；

L ——路线总长度（以 km 为单位）

改正数的计算过程应填写在记录表的路线校核栏内。如用高差法，改正数填写在每个高差的右上角，一般以 mm 为单位，对每个高差进行改正，如表 2-1(a) 所示。如用视线高法改正数以累计方式写在每个对应高程的右上角，对每个高程进行改正，如表 2-1 (b) 所示。

在表 2-1 (a) 中，用改正后的高差推算各点高程，填写在高程栏内；在表 2-1 (b) 中，高程加改正数后，填写在改正后高程栏内。对于支水准路线，取往测高差和返测高差绝对值的平均值，并取往测高差的符号作为实测高差，进而推算待定点高程。

3. 水准测量成果整理

当水准路线较长、测站数较多时，不必采用表 2-1 (a) 或表 2-1 (b) 的格式对每一测站逐一进行高差改正和逐一求出每个立尺点的高程；而是采用表 2-2 的格式，用待定点将路线分为若干测段，对各测段逐一进行高差改正，然后求出各待定点高程。