

模块 3 角度测量

知识目标

- 了解光学经纬仪、电子经纬仪的基本结构。
- 了解测角误差的影响和误差的消除方法。
- 掌握水平角、竖直角测量的原理与方法。
- 熟悉光学经纬仪的读数方法与使用方法。

技能目标

- 能熟练操作 DJ₆ 型光学经纬仪，并能进行水平角和竖直角的测量。
- 能进行水平角和竖直角的记录、计算。
- 能进行光学经纬仪的校验与校正。

本模块主要介绍角度测量的基本原理、角度测量的仪器和操作方法、经纬仪的使用和检验校正、测角误差的影响和消除误差的方法。本模块的学习重点是测角原理、经纬仪的操作与检验校正、测角误差的影响和误差消除方法。本模块的难点是水平角和竖直角的计算、经纬仪的检验与校正。

3.1 角度测量的基本原理

为了确定一点的空间位置，角度是基本要素之一，角度测量是测量的一项基本工作。

3.1.1 水平角测量的原理

地面上一点到两目标方向线的垂直投影在水平面上所形成的夹角，称为水平角。如图 3-1 所示，地面上有测站点 O ，目标点 A 、 B ，将 OA 、 OB 投影到水平面 H 上，其投影直线 O_1A_1 与 O_1B_1 所形成的夹角 β 即水平角。因此，水平角就是通过 OA 、 OB 的两个竖直面 V_1 、 V_2 所夹的二面角。

为了测定水平角，可以在地面点 O 上水平安置一个带有刻度的圆盘水平度盘，并使圆盘中心在过 O 点的铅垂线上；通过 OA 和 OB 各作一个铅垂面 V_1 、 V_2 ，设这两个铅垂面在刻度盘上截取的读数分别为 a 和 b ，则所求水平角值为

$$\beta = b - a \quad (3-1)$$

水平角 β 的角值为右读数 b 减去左读数 a ，若观测者面向观测角方向，则左侧为左目标，右侧为右目标，若右目标的读数小于左目标的读数，即 $b < a$ ，则要先加上 360° ，即

$$\beta = b + 360^\circ - a \quad (3-2)$$

水平角没有负值，取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

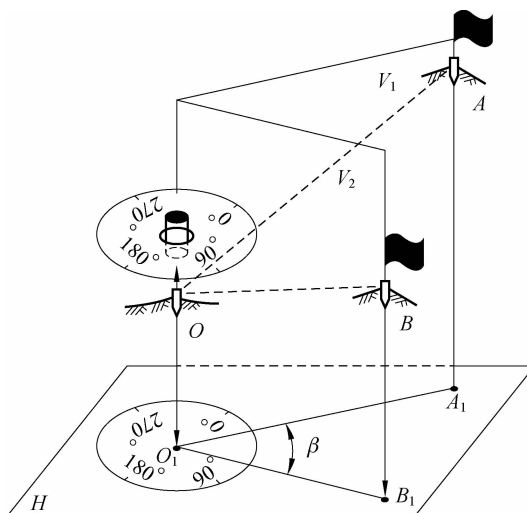


图 3-1 水平角测量的原理图示

3.1.2 竖直角测量的原理

在同一竖直面内，一点至观测目标的视线与水平线所夹的锐角称为竖直角，也称为高度角，通常用 α 表示。若倾斜视线在水平线之上，则竖直角为正，称为仰角，如图 3-2 所示；若倾斜视线在水平线之下，则竖直角为负，称为俯角，如图 3-2 所示。竖直角的取值范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。目标方向与天顶方向（该点的铅垂线方向）所构成的角称为天顶距，一般用符号 Z 表示，其角值范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

竖直角与天顶距的关系为

$$\alpha = 90^\circ - Z \quad (3-3)$$

因此，在测量工作中，竖直角和天顶距只需测出一个即可。

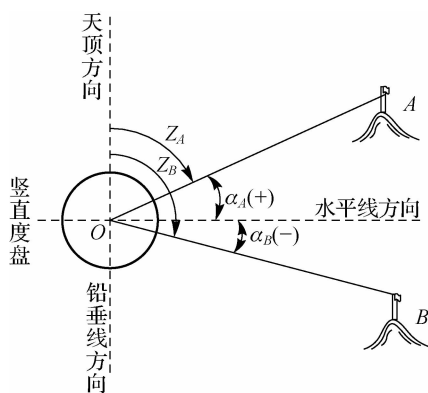


图 3-2 竖直角测量的原理图示



为了测定竖直角，可在照准设备（望远镜）旁安置一个带有刻度的竖直圆盘（称为竖直度盘，简称竖盘），竖直度盘的中心与望远镜旋转横轴的中心重合，度盘平面与横轴轴线垂直，视线水平时指标线为一个固定读数，当望远镜照准目标时，竖盘随之转动，则望远镜照准目标的方向线读数与水平方向上的固定读数之差为竖直角。对观测仪器而言，水平视线方向的竖直度盘读数应为 90° 的整倍数。因此，在测量竖直角时，只要瞄准目标，读取竖直度盘的读数，就可以计算出竖直角。

3.2 角度测量的仪器及其使用

3.2.1 经纬仪的型号

根据测角原理设计制造的用以观测水平角、竖直角的仪器称为经纬仪。经纬仪是工程测量中最常用的一种仪器，根据读数系统的不同，经纬仪可分为光学经纬仪和电子经纬仪；按测角精度划分，光学经纬仪可分为 DJ₀₇、DJ₁、DJ₂、DJ₆、DJ₁₅ 五个等级。其中，DJ 为“大地测量”和“经纬仪”首字汉语拼音的声母，下标 07、1、2、6、15 分别为该仪器一测回方向观测中误差 [以秒 (") 为单位]，即测角精度。不同精度的经纬仪所使用的场合不同，DJ₀₇、DJ₁、DJ₂ 型光学经纬仪用于精密角度测量，DJ₆、DJ₁₅ 型光学经纬仪用于普通角度测量。

3.2.2 DJ₆ 型光学经纬仪

水平度盘和竖直度盘都采用光学玻璃制造，利用光学系统读数的经纬仪称为光学经纬仪。每个等级的经纬仪，由于生产厂家的不同而有各种型号，仪器的部件和结构也不完全一样，但其主要部件的构造大致相同。北京光学仪器厂生产的 DJ₆ 型光学经纬仪如图 3-3 所示。

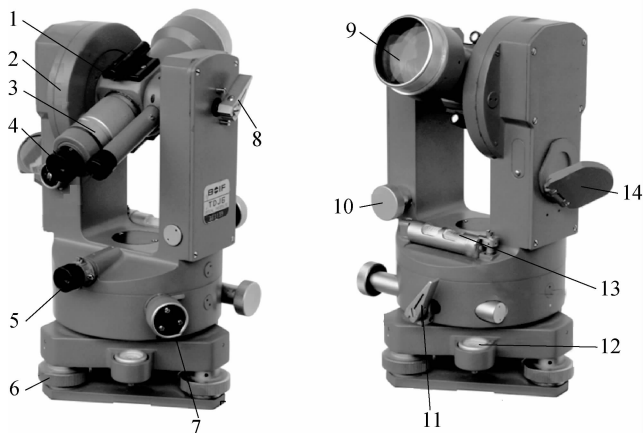


图 3-3 DJ₆ 型光学经纬仪

- 1—粗瞄器；2—竖直度盘；3—物镜调焦螺旋；4—目镜调焦螺旋；5—对点器；6—脚螺旋；
7—度盘拨动手轮；8—竖盘制动；9—物镜；10—水平微动螺旋；11—水平制动扳钮；
12—圆水准器；13—水准管气泡；14—反光镜

1. 基本构造

光学经纬仪主要由照准部、水平度盘部分和基座组成。

(1) 照准部。照准部的主要部件有望远镜、照准部水准管、竖直度盘、读数设备等。

① 望远镜。望远镜由物镜、目镜、十字丝分划板、调焦透镜等组成。望远镜的主要作用是照准目标，其与横轴固连在一起，在制动螺旋和微动螺旋的控制下做上下转动。照准部可绕竖轴在水平方向上转动，在水平制动扳钮和水平微动螺旋的控制下做水平转动。

② 照准部水准管。照准部水准管用于精确整平仪器。

③ 竖直度盘。竖直度盘是为了测竖直角而设置的，可随望远镜一起转动。另设竖盘指标自动补偿器装置和开关，借助自动补偿器使读数指标处于正确位置。

④ 读数设备。读数设备通过一系列光学棱镜将水平度盘和竖直度盘及测微器的分划都显示在读数显微镜内，通过仪器反光镜将光线反射到仪器内部，以便读取度盘读数。

另外，为了能将竖轴中心线安置在过测站点的铅垂线上，在经纬仪上都设有对点装置。一般光学经纬仪都设置有垂球对点装置或光学对点装置，垂球对点装置是在中心螺旋下面装垂球挂钩，将垂球挂在钩上的对点装置；光学对点装置是通过安装在旋转轴中心的转向棱镜，将地面点成像在对点分划板上，通过对中目镜放大，同时看到地面点对点分划板的影像，若地面点位于对点分划板的刻划中心，且水准管气泡居中，则说明仪器中心与地面点位于同一条铅垂线上。

(2) 水平度盘部分。水平度盘部分主要有水平度盘和复测扳手或度盘拨动手轮。

① 水平度盘。水平度盘是一个光学玻璃圆环，圆环上按顺时针刻划注记 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 分划线，主要用来测量水平角。

② 复测扳手。复测扳手又称为离合器。在观测水平角时，经常需要将某个起始方向的读数配置为预先指定的数值，称为水平度盘的配置。复测扳手就是水平度盘的配置机构，它可以控制水平度盘与照准部之间的离与合。将复测扳手往上扳时，度盘与照准部分离，照准部转动，度盘不动，此时读数就会随照准部的转动而变化；将复测扳手往下扳时，度盘与照准部结合在一起随照准部一起转动，读数保持不变。所以，在观测时，复测扳手应保持向上。

③ 度盘拨动手轮。有的仪器没有离合器装置，而单独设有拨动手轮，转动手轮可以使水平度盘转动。

(3) 基座。与水准仪类似，经纬仪的基座主要由轴座、脚螺旋、圆水准器和连接板组成。

① 轴座。轴座用于支撑仪器的上部结构，将竖轴轴套插入到轴座内，用轴座固定螺旋固紧，即可将仪器上部固定连接在基座上。使用仪器时，切勿松动轴座的固定螺旋，以防仪器因与基座脱离而摔坏。

② 脚螺旋。脚螺旋用来整平仪器，通过调节脚螺旋可使照准部水准管的气泡居中，竖轴竖直，水平度盘水平。

③ 圆水准器。圆水准器用于粗略整平仪器。

④ 连接板。通过连接板可将仪器固定在脚架上。

2. 测微装置

由于受到度盘尺寸的限制，光学经纬仪的度盘分划线的最小分划值难以直接刻划到



秒，一般只能刻划到 1° 或 $30'$ ，为了实现精密测角，要借助光学测微技术制作测微装置来测量不足度盘分划值的微小角值，所以，测微装置就是用来测定不足度盘格值的读数装置。DJ₆ 型光学经纬仪常用的测微装置有分微尺和单平板玻璃测微器两种。使用不同的测微装置，读数方法也不相同。

(1) 分微尺。分微尺为一块平板玻璃，上面一般刻有 60 格分划线，并每隔 10 格注记，安装在光路上的读数窗之前。经过折射和透镜组放大后的度盘分划线成像在分微尺上，度盘分划线经放大后的间隔弧长恰好等于分微尺的全长，分微尺就可将这一间隔等分为 60 格。图 3-4 所示为在读数显微镜中看到的度盘影像和分微尺影像，上面注有“H”或“水平”的窗口为水平度盘读数窗，下面注有“V”或“竖直”的窗口为竖直度盘读数窗。通常 DJ₆ 型光学经纬仪的度盘分划间隔为 1° ，所以分微尺上的一格就代表 $1'$ ，每 10 格注记表示整 $10'$ 。读数时，先读出落在分微尺间的度盘线注记的整数度（如图中的水平度盘为 57° ），再以度盘分划线为指标线，读取微小角值的整 $10'$ 数（分微尺注记数，如图图中为 $30'$ ），再读出分数，并估读到 $0.1'$ （如图图中可读为 $7.7'$ ）；然后，将这三部分相加就可得到完整的读数（如图图中为 $57^\circ 37.7'$ ，记为 $57^\circ 37' 42''$ ）。同理，图 3-4 中竖直度盘的读数为 $97^\circ 17' 30''$ 。

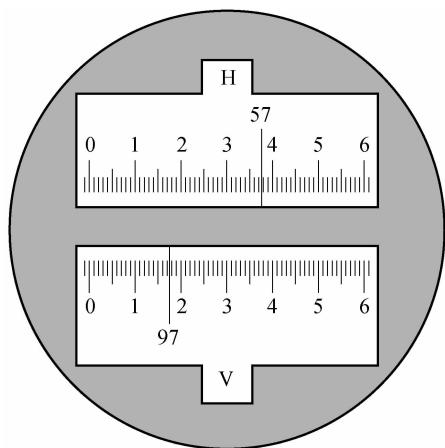


图 3-4 分微尺的读数方法

(2) 单平板玻璃测微器。单平板玻璃测微器主要由平板玻璃、测微尺、测微轮和传动装置等组成。单平板玻璃安装在光路的显微透镜组之后，与传动装置和测微尺连在一起。转动测微轮，可以使平板玻璃与测微尺同轴旋转，平板玻璃将随之倾斜，根据光学原理，此时出射光线与入射光线不共线而是偏移一个量，这个量可以在测微尺上读出。图 3-5 所示为单平板玻璃测微器经纬仪在读数显微镜中看到的影像，共有三个读数窗，上面的小窗口为测微窗，有一根单指标线；中间的窗口为竖直度盘，下面的窗口为水平度盘，均有双指标线。读数前，应先转动测微轮，使某一度盘的分划线位于双指标线的中间读出度数和整 $30'$ 数 [图 3-5 (a) 为 $7^\circ 30'$]，再读出测微窗中单指标线所指出的测微尺读数 [图 3-5 (a) 为 $8' 47''$]，两者相加即水平度盘的读数 $7^\circ 38' 47''$ 。竖直度盘的读数方法与此相同，如图 3-5 (b) 中竖直度盘的读数为 $97^\circ 20' 40''$ 。

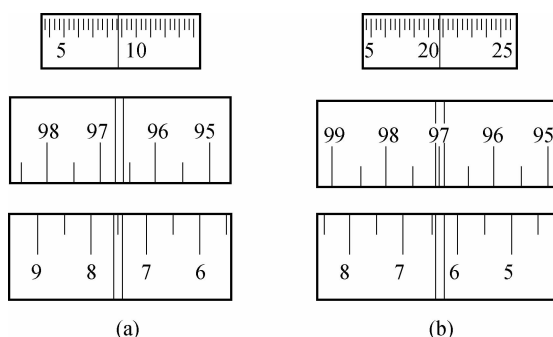


图 3-5 单平板玻璃测微器的读数窗

3.2.3 电子经纬仪

传统的光学经纬仪采用的是玻璃度盘刻划并注记，配以光学测微器读取角值的读数系统；随着科技的发展，采用光电度盘读数系统，利用光电扫描度盘获取照准方向的电信号，通过电路对信号的识别、转换、计数，拟合成相应的角值显示在显示屏上的电子经纬仪已逐渐普及开来。如图 3-6 所示，电子经纬仪与光学经纬仪具有相似的外形结构，在仪器的操作方面也具有相同之处，相比光学经纬仪，电子经纬仪具有以下的特点：

(1) 实现了测量的读数、记录、计算、显示自动一体化，避免了人为的影响。

(2) 仪器的中央处理器配有专用软件，可自动对仪器的几何条件进行检校和各种计算改正。

(3) 储存的数据可通过输入/输出 (in/out, I/O) 接口输入计算机进行相应的数据处理。

(4) 与光电测距仪联机可组成组合式全站仪，进行各种测量工作。



图 3-6 南方 DT-05 电子经纬仪

电子经纬仪的关键部件是光电度盘，仪器获取的电信号与光电度盘的形式有关。目前，电子经纬仪有编码度盘、光栅度盘和格区式度盘三种测角形式的光电度盘。

3.2.4 经纬仪的基本使用方法

在进行角度测量时，应先将经纬仪安置在测站点（角顶点）上，使水平度盘居于水平位置，然后进行观测。经纬仪的技术操作有对中、整平、照准、读数与配置度盘读数（或置数）等步骤。

1. 对中

对中的目的是使水平度盘的中心与测站点（标志中心）位于同一条铅垂线上。对中时可采用垂球对中或光学对中器对中，垂球对中的精度一般在 3 mm 以内，光学对中器的对中精度可达到 1 mm。

(1) 用垂球对中。打开三脚架并调整到合适高度（平胸），将架头大致水平地安放在测站



点上,架腿与地面约成 75° 角。在脚架连接螺旋的下方悬挂垂球,如果垂球尖离中心太远,可以先固定一个脚架尖移动另外两个脚架尖,或将三脚架整体平移,使垂球尖大致对准测站点的中心,再踏紧脚架尖。然后装上经纬仪,旋上连接螺旋(不要旋紧),双手扶好基座,在架头上平移仪器,使垂球尖精确对准测站点。最后,将连接螺旋拧紧。若在架头上移动仪器无法精确对中时,则需要重新调整三脚架的脚位,此时应注意先旋紧中心螺旋,以防仪器摔落。

(2) 用光学对中器对中。由于垂球容易摆动,有风时操作更加困难,因此一般采用光学对中器安置经纬仪。利用光学对中器对中时,应先平移脚架,使仪器大致对中,调节光学对中器的目镜,使地面点的影像清晰。此时,可根据对面情况固定一个脚架尖,移动另外两个脚架尖,使地面点的影像进入对中器圆圈中心,若还有微小偏差,可稍稍松开中心连接螺旋,在架头上移动仪器,使其精确对中,再将脚架的三个架腿踩紧。

2. 整平

整平的目的是使仪器竖轴铅垂,使水平度盘处于水平位置。在操作时,分为粗略整平和精确整平两步。

(1) 粗略整平。经纬仪的粗略整平主要靠调节脚架达到目的,特别是使用光学对中器的仪器,尤其需要注意不能随便转动脚螺旋。操作时,根据圆水准器中气泡的位置判断脚架各个方向的高低情况,一般保留偏高的架腿不动,将两条偏低的架腿升高,使圆水准器中的气泡居中。在调节过程中,应注意不可使脚架的位置发生变化。

(2) 精确整平。将圆水准器中的气泡居中之后,需进一步调节仪器。操作时,松开水平制动螺旋,转动照准部使照准部水准管与任意两个脚螺旋的连线平行。双手相向转动这两个脚螺旋使气泡居中,如图 3-7 (a) 所示(注意气泡移动方向与左手大拇指的移动方向一致);再将照准部旋转 90° ,调整第三个脚螺旋使气泡居中,如图 3-7 (b) 所示。如此反复操作,直到将仪器转至任意位置,水准管气泡均居中且不超过 1 格时为止。

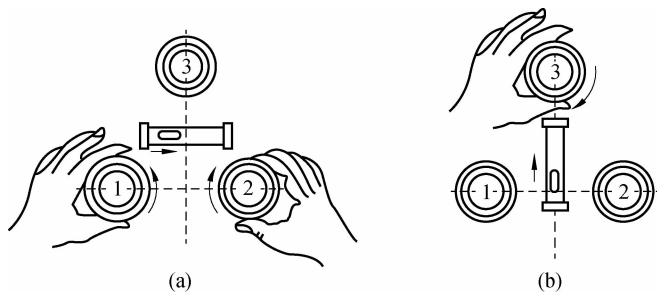


图 3-7 经纬仪的精确整平

需要注意的是,整平与对中是相互影响的,操作时应交替、反复进行,完成整平后,应再次观察对中器是否还在点位中心,如不在中心,应先稍微松开连接螺旋,在架头上轻轻移动仪器,使对中器精确对准点位,再拧紧连接螺旋,重复整平步骤,直至仪器既对中又整平。

3. 照准

照准的目的是使望远镜十字丝交点和目标的影像重合。照准时,先松开水平和竖直制动螺旋,调节目镜,使十字丝清晰;再通过望远镜上的照门、准星或光学瞄准器粗略对准目标,拧紧水平和竖直制动螺旋;再进行物镜调焦,以达到能通过望远镜看到最清晰的目标。

标，并消除视差。最后，转动水平和竖直微动螺旋，使十字丝分划板的竖丝精确地照准（纵丝平分或夹准）目标，如图 3-8 所示。测量水平角时，应尽量对准目标底部。

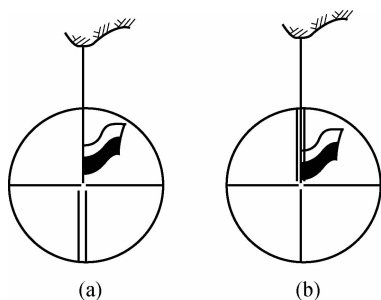


图 3-8 目标的照准

4. 读数与置数

读数的目的是读出照准方向的度盘数字。读数时，先将进光反光镜张开适当角度，并转动使镜面朝向光源，使读数窗明亮且亮度均匀；旋转显微镜调焦螺旋，使分划和注记清晰，然后读数。

为了减小误差和方便测设，有时需要将水平度盘的读数调整到 $0^{\circ}00'00''$ 或某个指定读数（如 $167^{\circ}35'36''$ ），这一操作称为置数。当把水平度盘的读数调整为零时，称为置零。由于仪器的不同，置数的方法也有所不同。

(1) 复测经纬仪置数。装有度盘离合器的经纬仪称为复测经纬仪。复测经纬仪一般采用“先配盘后瞄准”的方法置数。即先转动测微轮，使测微尺的读数为 $0^{\circ}00'00''$ （或置为指定读数中小于度盘分划值的微小角值，如 $5'36''$ ）；然后将复测扳手往上扳，转动照准部，用水平微动螺旋将度盘 0° （或指定读数的度数和整 $30'$ 数，如 $167^{\circ}30'$ ）分划线准确夹在双指标线的中央，再将复测扳手往下扳；接着转动照准部准确照准目标后，再将复测扳手往上扳。此时，照准目标方向的水平度盘的读数为 $0^{\circ}00'00''$ （或 $167^{\circ}35'36''$ ）。

(2) 方向经纬仪置数。装有度盘拨动手轮的经纬仪称为方向经纬仪，一般采用“先瞄准后配盘”的方法置数。即先转动照准部准确照准目标，制动仪器；再打开度盘拨动手轮的护盖，转动度盘拨动手轮使水平度盘读数为 $0^{\circ}00'00''$ （或欲配置数，如 $167^{\circ}35'36''$ ），最后盖上度盘拨动手轮的护盖。

3.3 水平角观测

普通角度测量中常用的水平角测量方法有测回法和方向观测法。测回法常用于测量两个方向之间的单角，是测角的基本方法。方向观测法用于在一个测站上观测两个以上方向的多角。

3.3.1 测回法

如图 3-9 所示，设 O 为测站， A 、 B 为观测目标，欲测定水平角 $\angle AOB$ 可采用测回法，其观测步骤和数据记录、计算方法如下：



1. 安置仪器

在顶点 O 处安置经纬仪，对中、整平；并在 A 、 B 两个目标点处设置标志（竖立测钎或花杆）。

2. 盘左观测

将经纬仪的竖直度盘放置在望远镜的左侧（称为盘左或正镜），转动照准部，先精确照准 A 点，制动仪器；并调节目镜和望远镜调焦螺旋，使十字丝和目标成像清晰，消除视差；读取水平度盘的读数 A_L ($0^\circ 03' 18''$)，称为方向读数，记入手簿的相应位置（见表 3-1）；接着松开制动螺旋，顺时针旋转照准部，精确照准 B 点，读取水平度盘的读数 B_L ($97^\circ 19' 36''$)，记入手簿的相应位置。以上称为盘左上半测回，由此计算得到上半测回的角值 β_L 为

$$\beta_L = B_L - A_L = 97^\circ 16' 18''$$

3. 盘右观测

松开制动螺旋，纵转望远镜，使竖直度盘位于望远镜的右侧（称为盘右或倒镜），先照准 B 点，读取水平度盘的读数 B_R ($277^\circ 19' 36''$)；再逆时针旋转照准部照准 A 点，读取水平度盘的读数 A_R ($180^\circ 03' 24''$)，记入手簿。以上称为盘右下半测回，其角值 β_R 为

$$\beta_R = B_R - A_R = 97^\circ 16' 12''$$

4. 取平均值

上、下半测回合称为一测回，从理论上讲，两次测得的角值应该相等，但由于各种误差的影响，使其相差一个 $\Delta\beta$ ($\Delta\beta = \beta_L - \beta_R$)，称为较差，当 $\Delta\beta$ 在容许范围内时（DJ₆ 型经纬仪为 $\pm 36''$ ，表 3-1 中相差 $6''$ ，在容许范围内），观测结果合格，取盘左、盘右观测的两个半测回值的平均值作为一测回角值 β ，即

$$\beta = \frac{1}{2}(\beta_L + \beta_R) = 97^\circ 16' 15''$$

当 $\Delta\beta$ 超过容许范围时，说明观测有误，应检查数据，重新观测。当要提高测角精度时，往往要对一个角度观测若干个测回。为了减小度盘分划不均匀误差的影响，在各测回之间，应按测回数 n 将水平度盘的位置依次变换 $180^\circ/n$ 。例如，对于某角，要求观测三个测回，则各测回的起始度盘读数应按 60° 递增，第一测回起始方向（左目标）的水平度盘位置的应配置在略大于 0° 处，第二、三测回起始方向的水平度盘的位置应分别配置在略大于 60° 、 120° 处。由表 3-1 可知，该观测共观测两测回，故第二测回起始方向的水平度盘的读数应为 $97^\circ 02' 06''$ 。各测回之间的角值之差称为测回差，应不超过 $\pm 24''$ 。



图 3-9 测回法测水平角

表 3-1 测回法观测手簿

测站	竖盘位置	目标	水平度盘读数			半测回角值			一测回角值			各测回平均角值		
			°	'	″	°	'	″	°	'	″	°	'	″
O	左	A	0	03	18	97	16	18	97	16	15	97	16	12
		B	97	19	36									
	右	B	277	19	36	97	16	12						
		A	180	03	24									
	左	A	90	02	06	97	16	06	97	16	09			
		B	187	18	12									
	右	B	7	18	24	97	16	12						
		A	270	02	12									

另外，由于水平度盘是顺时针刻划和注记的，因此在计算水平角时，总是用右目标的读数减去左目标的读数，如果不够减，应先在右目标的读数上加 360°，再减去左目标的读数，决不可以倒过来减。

例如，在表 3-1 的第二测回中，盘右对准右目标（B 点）读数小于对准左目标（A 点）的读数，故该半测回角值应为 $7^{\circ}18'24'' + 360^{\circ} - 270^{\circ}02'12'' = 97^{\circ}16'09''$ 。

3.3.2 方向观测法

当测量 3 个及以上方向交汇于测站点所构成的几个角度时，使用方向观测法更为方便，因为使用这种方法测量时，照准部要旋转 360°，所以方向观测法又称为全圆方向观测法。

1. 方向观测法的观测步骤

如图 3-10 所示，方向观测法的观测步骤如下：

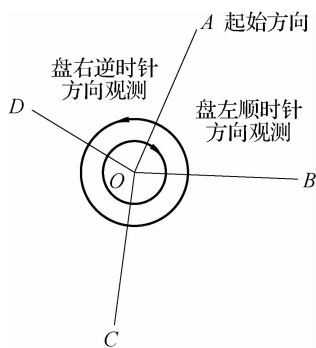


图 3-10 方向观测法测水平角

(1) 在 O 点安置好仪器，盘左照准起始方向 A 点，设置水平度盘读数稍大于 0°，读数并记入表 3-2 中。

(2) 按顺时针方向依次照准 B、C、D 各点，分别读取各读数，记入表 3-2 中。

(3) 继续按顺时针方向旋转照准部，照准 A 方向读数，称为归零，记入表 3-2 中。两



次瞄准起始方向 A 的读数差称为归零差。

(4) 纵转望远镜，盘右照准起始方向 A 点，读取水平度盘的读数，记入表 3-2 中。

(5) 按逆时针方向依次照准 D、C、B 各点分别读取水平度盘的读数，记入表 3-2 中。

(6) 继续按逆时针方向旋转照准部，照准 A 方向读数（归零），记入表 3-2 中。

以上顺时针方向、逆时针方向观测分别为上、下半测回，构成一个测回。

表 3-2 方向观测法记录手簿

测站	测点	水平度盘读数		2c	平均读数	归零后 方向值	各测回归 零方向值 的平均值	水平角
		盘左	盘右					
		° ' "	° ' "					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
O	A	00 15 00	180 15 12	-12	00 15 03 00 15 06	0 00 00	0 00 00	
	B	41 51 54	221 52 00	-6	41 51 57	41 36 54	41 36 51	
	C	111 43 18	291 43 30	-12	111 43 24	111 28 21	111 28 15	
	D	253 36 06	73 36 12	-6	253 36 09	253 21 06	253 21 03	
	A	00 14 54	180 15 06	-12	00 15 00			
	A	90 03 30	270 03 36	-6	90 03 33 90 03 33	0 00 00		
	B	131 40 18	311 40 24	-6	131 40 21	41 36 48		
	C	201 31 36	21 31 48	-12	201 31 42	111 28 09		
	D	343 24 30	163 24 36	-6	343 24 33	253 21 00		
	A	90 03 30	270 03 36	-6	90 03 33			

2. 记录手簿的计算

方向观测法记录手簿的计算如下：

(1) 半测回归零差的计算。计算表 3-2 中第 (3) 栏和第 (4) 栏中起始方向 A 的两次读数之差，即半测回归零差，看其是否符合表 3-3 的要求。

(2) 两倍照准误差 2c。同一方向上盘左、盘右读数之差计为 2c，即

$$2c = \text{盘左读数} - (\text{盘右读数} \pm 180^\circ) \quad (3-4)$$

式中，当盘右读数大于 180° 时取“-”号，反之取“+”号。

《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011) 只规定了 DJ₆ 型以上经纬仪的 2c 值的变化范围的限值，对于 DJ₆ 型未做具体规定。

(3) 计算各方向的平均读数。

$$\text{平均读数} = \frac{1}{2} [\text{盘左读数} + (\text{盘右读数} \pm 180^\circ)] \quad (3-5)$$

将计算结果填入表 3-2 中的第 (6) 栏。该栏括号内的读数为各测回起始方向的平均读数。

(4) 计算各方向归零后的方向值。将各方向的平均读数减去起始方向的平均读数（括号中的数）后即得各方向归零后的方向值，填入表 3-2 中的第（7）栏。

(5) 计算各测回归零后方向值的平均值。各测回归零后同一方向值的互差应符合表 3-3 的要求，在符合要求后取其平均值作为该方向的最后结果，填入表 3-2 中的第（8）栏。

《城市测量规范》（CJJ/T 8—2011）规定，方向观测法的限差应符合表 3-3 的规定。

表 3-3 方向观测法的限差

仪器型号	半测回归零差	各测回同方向 2c 值互差	各测回同一方向值互差
DJ ₂	12"	18"	12"
DJ ₆	18"	—	24"

3.4 竖直角的相关计算及观测

3.4.1 竖盘的结构及读数系统

由前述可知，竖直角是在同一竖直面内、一点至目标的视线与水平线所夹的锐角，即竖直角等于照准目标时倾斜视线的读数与水平视线读数的差值。因为水平视线在竖盘上的读数是个定值，所以竖直角就等于照准目标时倾斜视线的读数与该固定值的差值。

简单地说，竖直角测量装置包括竖直度盘、竖盘指标水准管和竖盘指标水准管微动螺旋，如图 3-11 所示。竖直度盘被固定在望远镜横轴的一端，随望远镜在竖直面内一起俯仰转动，为此，必须有一个固定的指标来读取望远镜视线倾斜和水平时的读数。竖盘指标水准管与由一系列棱镜、透镜组成的光具组为一个整体，被固定在竖盘指标水准管微动架上，即竖盘指标水准管微动螺旋可使竖盘指标水准管做微小的俯仰运动。当水准管气泡居中时，水准管轴水平，光具组的光轴，即竖盘读数指标处于铅垂位置，用以指示竖盘读数。测角时，度盘随望远镜的旋转而旋转，而指标则固定不动，因而可读得不同位置的竖盘读数，得到不同目标的竖直角。

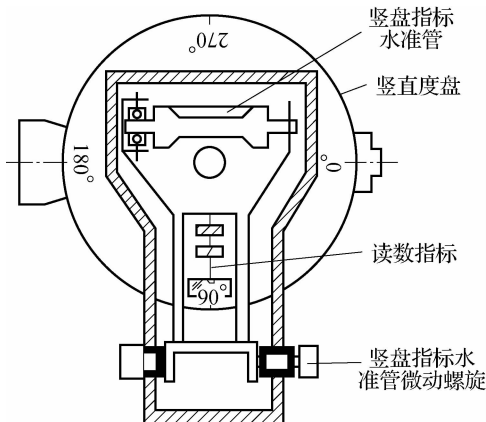


图 3-11 竖盘构造

光学经纬仪的竖直度盘为玻璃圆盘，其分划与水平度盘相似，但其注记形式较多，对于 DJ₆ 型光学经纬仪，竖盘刻度通常有 0°~360°顺时针和 0°~360°逆时针注记两种形式，如图 3-12 所示。当视线水平（视准轴水平）且竖盘水准管气泡居中时，竖盘盘左位置竖盘指标的正确读数应为 90°；当视线水平且竖盘水准管气泡居中时，竖盘盘右位置竖盘指标的正确读数应为 270°。

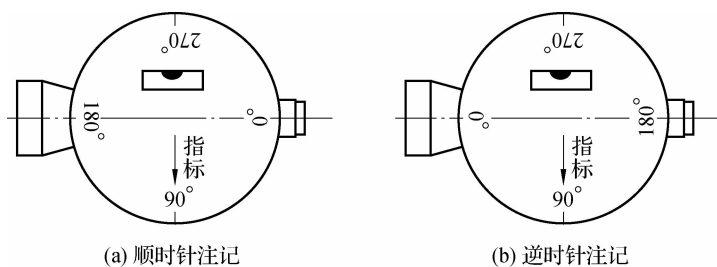


图 3-12 竖盘刻度注记形式

现在常用的光学经纬仪多采用自动归零装置（补偿器）来取代指标水准管的功能。自动归零装置为悬挂式（摆式）透镜，安装在竖盘光路的成像透镜组之后。当仪器稍有倾斜、读数指标处于不正确位置时，归零装置靠重力作用使悬挂透镜的主平面倾斜，通过悬挂透镜的边缘部分折射，使竖盘成像透镜组的光轴到达读数指标的正确位置，实现读数指标自动归零（自动补偿）。其补偿原理与自动安平水准仪类似。使用自动归零经纬仪测量竖直角时无须调节指标水准管，照准目标即可立即读取竖盘读数，提高了工作效率。但该装置的补偿范围有限（一般为±2'），所以作业时应注意将仪器整平；同时，使用前应检查补偿器的有效性，避免失灵造成读数错误。带有补偿器锁紧钮的仪器，使用前应打开锁紧钮让其处于悬挂的工作状态，用后再将其锁紧，以防搬站、运输时损坏补偿器。

3.4.2 竖直角度的计算

图 3-13 所示为常用的 DJ₆ 型光学经纬仪（顺时针注记）在盘左时的三种情况。若指标位置正确，则当视准轴水平且指标水准管气泡居中时，指标所指的竖直度盘的读数 $L_{\text{始}} = 90^\circ$ ，如图 3-13 (a) 所示；当视准轴仰起，测量仰角时，读数 L 比 $L_{\text{始}}$ 小，如图 3-13 (b) 所示；当视准轴俯下，测量俯角时，读数 L 比 $L_{\text{始}}$ 大，如图 3-13 (c) 所示。由此可知，盘左时竖直角 α_L 的计算公式为

$$\alpha_L = 90^\circ - L \quad (3-6)$$

由式 (3-6) 可知，当 $\alpha_L > 0$ 时，观测角为仰角；当 $\alpha_L < 0$ 时，观测角为俯角。

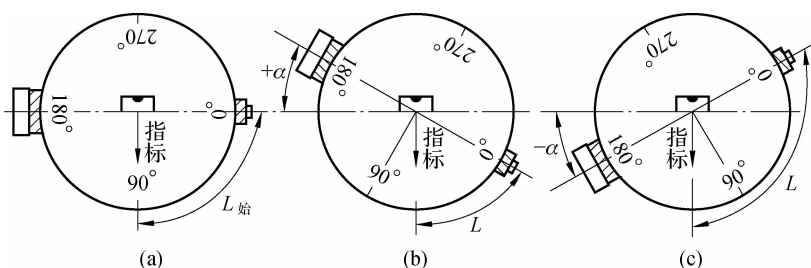


图 3-13 竖直角计算示意图 (盘左)

图 3-14 所示为常用的 DJ₆ 型经纬仪 (顺时针注记) 在盘右时的三种情况, $R_{\text{始}} = 270^\circ$, 与盘左相反, 仰角时读数 R 比 $R_{\text{始}}$ 大, 俯角时读数比 $R_{\text{始}}$ 小。因此, 盘右时竖直角计算公式为

$$\alpha_R = R - 270^\circ \quad (3-7)$$

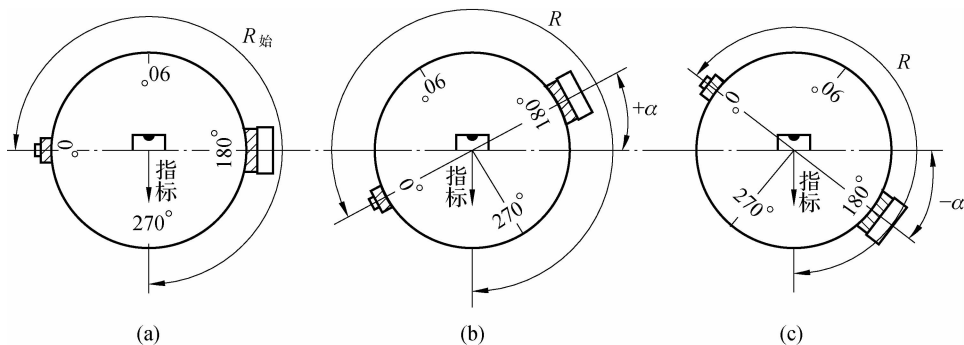


图 3-14 竖直角计算示意图 (盘右)

由于盘左、盘右一般都含有误差, α_L 和 α_R 不相等。我们取二者的平均值作为竖直角 α 的最后结果, 则

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_R) \quad (3-8)$$

3.4.3 竖盘指标差的计算

按照竖盘结构可知, 望远镜视线水平且竖盘水准管气泡居中时, 竖盘指标的正确读数应是 90° 的整倍数。但是由于各种原因, 竖盘水准管与竖盘读数指标的关系难以完全正确。视线水平且竖盘水准管气泡居中时的竖盘读数与应有的竖盘指标正确读数之间有一个小的角度差 x , 称为竖盘指标差, 即竖盘指标偏离正确位置引起的差值, 如图 3-15 所示。竖盘指标差 x 本身有正负号, 一般规定当竖盘读数指标偏移方向与竖盘注记方向一致时, x 取正号, 反之 x 取负号。

图 3-15 (a) 所示为盘左位置, 由于存在指标差, 其正确的竖直角计算公式为

$$\alpha_L = (90^\circ + x) - L \quad (3-9)$$

图 3-15 (b) 所示为盘右位置, 其正确的竖直角计算公式为

$$\alpha_R = R - (270^\circ + x) \quad (3-10)$$

将式 (3-9) 和式 (3-10) 相加并除以 2, 得

$$\alpha = \frac{1}{2}(\alpha_L + \alpha_R) = \frac{1}{2}(R - L - 180^\circ) \quad (3-11)$$

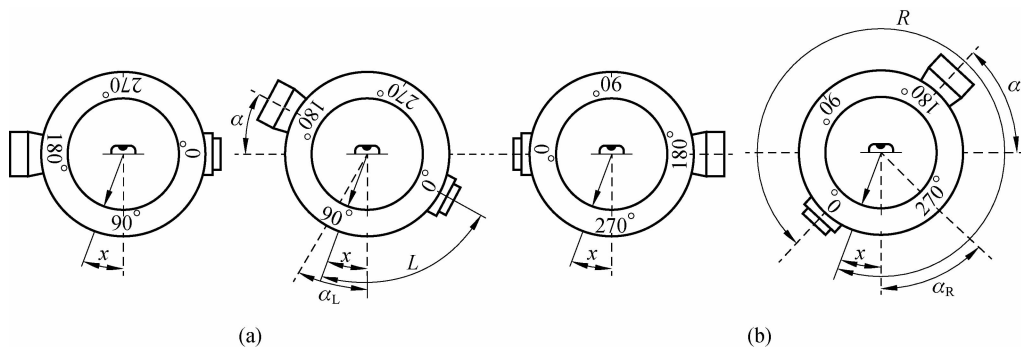


图 3-15 竖盘指标差

由此可见, 在测量竖直角时, 用盘左、盘右观测, 取平均值作为竖直角的结果, 可以消除竖盘指标差的影响。

如果观测没有误差, 从理论上讲, 盘左测得的竖直角 α_L 与盘右测得的竖直角 α_R 应相等, 即 $\alpha_L = \alpha_R$, 则有

$$90^\circ + x - L = R - (270^\circ + x)$$

可得指标差的计算公式为

$$x = \frac{1}{2}(L + R - 360^\circ) \quad (3-12)$$

式 (3-12) 为竖盘指标差的计算公式。指标差互差 (所求指标差之间的差值) 可以反映观测成果的精度。

3.4.4 竖直角观测

1. 竖直角观测步骤

竖直角观测方法有两种, 一种是中丝法, 另一种是三丝法。现在工程中常用的是中丝法, 故这里只介绍中丝法的观测方法。

中丝法是指用十字丝的中丝切准目标进行竖直角观测的方法。现以测量实例介绍其操作步骤。

设 O 点为测站, A、B 分别为仰角、俯角目标, 观测步骤如下:

(1) 安置仪器。在测站上安置经纬仪, 对中整平; 在目标点上设置标志, 将竖直度盘置于盘左位置, 将望远镜大致放平, 然后将望远镜上仰, 如果竖盘读数减小, 说明竖直度盘为顺时针注记 (反之为逆时针)。照准目标, 固定照准部和望远镜, 转动水平微动螺旋与望远镜微动螺旋, 使十字丝的中丝精确对准目标的特定位置, 如标杆的顶部或标尺上的某一位置。

(2) 盘左观测。照准目标 A, 转动竖盘指标微动螺旋, 使指标水准管气泡居中; 若仪器安装有自动归零装置, 则直接照准目标 A 即可, 读取竖盘读数 $L = 66^\circ 45' 23''$, 记入表 3-4。根据式 (3-6), 得 $\alpha_L = 90^\circ - L = 90^\circ - 66^\circ 45' 23'' = 23^\circ 14' 37''$ 。

(3) 盘右观测。倒转望远镜, 照准原目标 A, 转动竖盘指标微动螺旋, 使指标水准管

气泡居中, 读取竖盘读数 $R=293^{\circ}14'55''$, 记入表 3-4。根据式 (3-7), 该半测回角值为

$$\alpha_R = R - 270^{\circ} = 293^{\circ}14'55'' - 270^{\circ} = 23^{\circ}14'55''$$

(4) 竖直角计算。

① 指标差计算。根据竖盘指标差计算公式式 (3-12) 可得

$$x = \frac{1}{2} (66^{\circ}45'23'' + 293^{\circ}14'55'' - 360^{\circ}) = +9''$$

② 测回角计算。根据式 (3-8) 计算平均值, 即

$$\alpha = \frac{1}{2} (23^{\circ}14'37'' + 23^{\circ}14'55'') = 23^{\circ}14'46''$$

用同样的方法观测目标 B , 并用指标差 x 检核观测中误差是否超限, 如果超出限差要求应重测。若精度要求较高, 可测若干测回取平均值作为最终观测结果。操作过程中, 将观测数据及计算结果依次填入表 3-4 中。

表 3-4 竖直角观测记录手簿

测站	目标	竖盘位置	竖盘读数	半测回竖直角	指标差	一测回竖直角	备注
O	A	左	$66^{\circ}45'23''$	$23^{\circ}14'37''$	$+9''$	$23^{\circ}14'46''$	竖直角 盘为顺时 针注记
		右	$293^{\circ}14'55''$	$23^{\circ}14'55''$			
	B	左	$98^{\circ}38'24''$	$-8^{\circ}38'24''$	$-5''$	$-8^{\circ}38'29''$	
		右	$261^{\circ}21'26''$	$-8^{\circ}38'34''$			

2. 竖直角观测的限差要求

竖直角观测主要对以下两方面有限差要求:

(1) 竖盘指标差互差。竖盘指标差可用来检查观测质量, 竖盘指标差属于仪器误差。在同一测站上, 竖盘指标差 x 可视为常数, 各个方向的指标差在理论上应该相等, 取盘左、盘右观测角值的平均值可消除 x 的影响。但在观测中, 由于照准、整平和读数的影响, x 是不尽相同的, 若 x 的变化 (最大值与最小值之差) 超过一定范围, 则表明观测质量较差, 就不可能消除其影响, 必须返工重测。按《城市测量规范》(CJJ/T 8—2011) 规定, DJ_6 型经纬仪的竖盘指标差互差的限差为 $25''$ 。

(2) 竖直角互差。对同一目标不同测回间竖直角的互差, 从理论上讲, 对同一目标的竖直角观测所得数值应该相等, 但在实际观测中, 由于各种误差的影响, 结果并不完全一致。按规定, DJ_6 型经纬仪不同测回间竖直角的互差不应超过 $25''$ 。

3.5 光学经纬仪的检验与校正

为了测得正确、可靠的水平角和竖直角, 使之达到规定的精度标准, 作业开始之前必须对经纬仪进行检验和校正。

3.5.1 经纬仪的主要轴线及应满足的几何条件

如图 3-16 所示，经纬仪的主要几何轴线有视准轴 C_1C_1 、横轴 H_1H_1 、照准部水准管轴 L_1L_1 和仪器竖轴 V_1V_1 。为使经纬仪正确工作，其轴线应满足下列条件：

- (1) 照准部水准管轴应垂直于竖轴 ($L_1L_1 \perp V_1V_1$)。
- (2) 十字丝竖丝应垂直于横轴。
- (3) 视准轴应垂直于横轴 ($C_1C_1 \perp H_1H_1$)。
- (4) 横轴应垂直于竖轴 ($H_1H_1 \perp V_1V_1$)。
- (5) 竖盘指标差 x 应为零。
- (6) 光学对中器的视准轴应与竖轴重合。

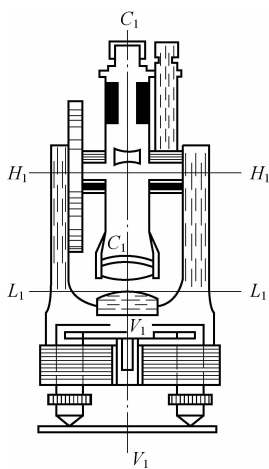


图 3-16 经纬仪的几何轴线

3.5.2 照准部水准管轴垂直于竖轴的检验与校正

1. 检校目的

整平仪器后（照准部水准管气泡居中后），应保证竖轴和垂线方向一致 ($L_1L_1 \perp V_1V_1$)，从而使水平度盘处于水平位置。

2. 检验方法

先将仪器粗略整平后，使水准管平行于任意两个脚螺旋，并用两个脚螺旋使水准管气泡精确居中。然后将照准部旋转 180° ，若气泡仍然居中，则说明此条件满足。若偏移量超过 1 格则应进行校正。

若 L_1L_1 不垂直于 V_1V_1 ，则气泡居中时 (L_1L_1 水平)， V_1V_1 不铅垂，它与铅垂线有一个夹角 α ，如图 3-17 (a) 所示；当绕倾斜的 V_1V_1 旋转 180° 后， L_1L_1 便与水平线形成 2α 的夹角，如图 3-17 (b) 所示，它反映为气泡的总偏移量。

3. 校正方法

调节与水准管平行的脚螺旋，使气泡回移总偏移量的一半，如图 3-17 (c) 所示。用

校正针拨动水准管一端的校正螺丝，使气泡居中，如图 3-17 (d) 所示。反复检校几次，直至满足要求。

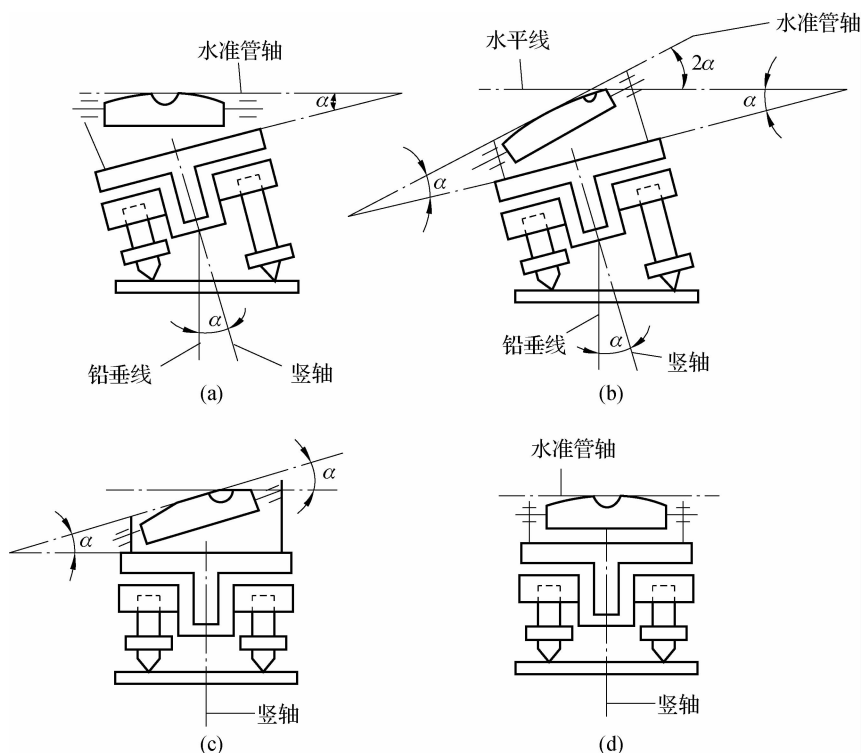


图 3-17 照准部水准管轴垂直于竖轴的检验与校正

3.5.3 十字丝竖丝垂直于横轴的检验与校正

1. 检验目的

满足在水平角测量时，保证十字丝竖丝与照准面一致，满足竖丝垂直于横轴 HH 。

2. 检验方法

整平仪器后，用十字丝竖丝的一端照准一个小而清晰的目标点，拧紧水平制动螺旋和望远镜制动螺旋，再用望远镜的微动螺旋使目标点移动到竖丝的另一端，如图 3-18 (a) 所示。若目标点此时仍位于竖丝上，则此条件满足；否则，需要校正。或者在墙壁上挂一根细垂线，用望远镜竖丝瞄准该垂线，若竖丝与垂线重合，则此条件满足；否则，需要校正。

3. 校正方法

校正十字丝分划板的位置，它位于望远镜的目镜端。将护罩打开后，有四个分划板固定螺旋，如图 3-18 (b) 所示。稍稍拧松这四个螺旋，慢慢转动分划板，直至条件满足。最后，旋紧固定螺旋，并将护罩盖好。

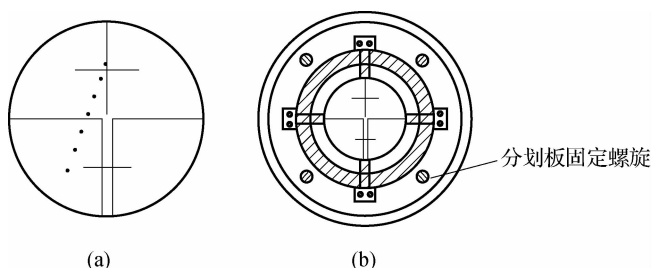


图 3-18 十字丝竖丝垂直于横轴的检验与校正

3.5.4 视准轴垂直于横轴的检验与校正

1. 检验目的

望远镜视准轴是物镜光心与十字丝交点的连线。望远镜物镜光心是固定的，而十字丝交点的位置是可以变动的。所以，视准轴是否垂直于横轴，取决于十字丝交点是否处于正确位置。当十字丝交点不在正确位置时，使得视准轴与横轴不垂直，偏离一个小角度 c ，称为视准轴误差。这个视准轴误差使视准面不是一个平面而成为一个锥面，这样对于同一铅垂面内不同高度的目标，其水平度盘的读数将不同，导致测角误差，所以这项检验工作的目的就是保证经纬仪视准轴垂直于横轴 ($C_1C_1 \perp H_1H_1$)，从而使视准面成为平面。

2. 检验方法

如图 3-19 所示，选一块长约 100 m 的平坦地面，在一条直线上确定 A、O、B 三点 (OB 长度大于 10 m)，将仪器安置在 O 点。在 A 点设一个照准目标，在 B 点横放一把有毫米分划的小尺。先以盘左位置照准 A 点目标，固定照准部，纵转望远镜，在 B 点小尺上读数得 B_1 点。然后用同样方法以盘右照准 A 点，固定照准部，再纵转望远镜，在 B 点小尺上读数得 B_2 点，若 B_1 和 B_2 重合则条件满足，若不重合则条件不满足，需要进行校正。视准轴不垂直于横轴，相差一个 c 角，则盘左照准 A 时纵转望远镜后照准 B_1 点所得 B_1B 长为 $2c$ 的反映，盘右照准 A 时纵转望远镜后照准 B_2 点所得 B_2B 长也为 $2c$ 的反映，所以 B_1B_2 长为 $4c$ 的反映。则视准误差 c 为

$$c = \frac{1}{4} \frac{B_1B_2}{OB} \rho$$

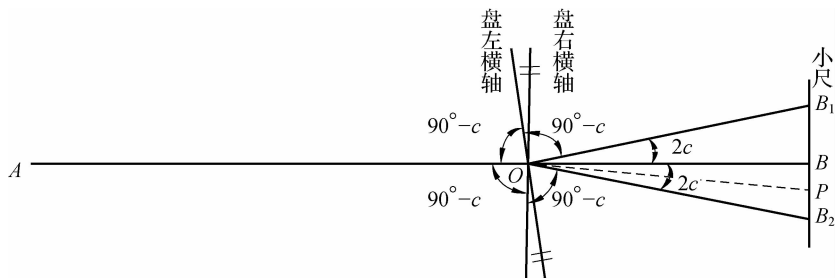


图 3-19 视准轴垂直于横轴的检验与校正

3. 校正方法

在图 3-19 中, 若视线与横轴不垂直, 存在视准误差 c , $\angle B_1OB_2 = 4c$, 则只需校正一个 c 角。取靠近 B_2 点的 B_1B_2 的 $1/4$ 处 P 点, 认为 $\angle POB_2 = c$, 在照准部不动的条件下, 校正分划板校正螺旋, 使十字丝交点左右移动, 使其对准 P 点, 则此条件即可满足。

另外, 也可采用水平度盘读数法进行检验, 方法是分别用盘左和盘右照准同一目标, 得盘左和盘右读数, 两读数应相差 180° , 若不相差 180° , 则存在视准误差, 即 $c = (a_L - a_R \pm 180^\circ) / 2$ 。校正时, 盘右位置水平度盘的读数应为 $a'_R = a_R + c$, 用水平微动螺旋使水平度盘读数为应读数 a'_R , 此时十字丝交点不再对准目标, 利用十字丝校正螺丝校正十字丝分划板的位置, 使交点对准目标即可。这种校正方法只对水平度盘无偏心或偏心差影响小于估读误差时有效; 若偏心差过大, 则用这种校正方法将得不到正确结果。

3.5.5 横轴垂直于竖轴的检验与校正

1. 检验目的

当仪器整平后, 使横轴处于水平位置, 在满足上述几个条件的前提下, 望远镜上下转动将形成一个铅垂平面。若横轴不垂直于竖轴, 则仪器整平后, 即竖轴处于铅垂位置时, 横轴不水平而是与水平线有一个夹角 i , 此时即使上述几个条件均满足, 望远镜照准面也将为一个倾斜平面, 其倾角也为 i , 此角称为横轴误差。横轴误差产生的原因是横轴两端的高度不相等。因此, 该检验目的是使仪器满足 $H_1H_1 \perp V_1V_1$ 的条件, 当望远镜绕横轴旋转时, 视准轴的轨迹为一个铅垂面而不是一个斜面。

2. 检验方法

在竖轴铅垂的情况下, 若横轴不与竖轴垂直, 则横轴倾斜。若视准轴已垂直于横轴, 则视准轴绕横轴旋转时构成的是一个倾斜平面。在进行这项检验时, 应将仪器架设在一个高墙附近, 如图 3-20 所示。在距离墙面 $20 \sim 30$ m 处将仪器整平以后, 盘左照准墙壁高处一个清晰的目标点 P (倾角大于 30°), 然后将望远镜放平, 在墙上标出一点 P_1 , 再将望远镜改为盘右, 仍然照准 P 点, 放平视线, 在墙上标出一点 P_2 , 若 P_1 和 P_2 两点重合, 则此条件满足; 否则需计算 i 值, i 值的计算式为

$$i = \frac{\overline{P_1P_2}}{2d \tan \alpha} \rho$$

式中, $\overline{P_1P_2}$ 为 P_1P_2 的距离 (m); d 为仪器到目标的水平距离 (m); $\rho = 206\,265''$ 。

对于 DJ₆ 型经纬仪, 当 i 值超过 $20''$ 时, 需要进行校正。

3. 校正方法

取 P_1 、 P_2 的中点 P_M , 则 P 与 P_M 在同一条铅垂线上。照准 P_M 点, 将望远镜抬高使其与 P 点同高, 则视线必然偏离 P 点。校正时保持仪器不动, 校正横轴的一端, 将横轴支架的护罩打开, 松开偏心轴承的三个固定螺旋, 转动轴承, 使横轴端点上下移动。使视线落在 P 点上, 校正好后, 旋紧固定螺旋, 并上好护罩。这项校正需打开支架护罩, 不宜在室外进行, 应在无尘的室内环境中进行, 并使用专用的平行光管进行操作。

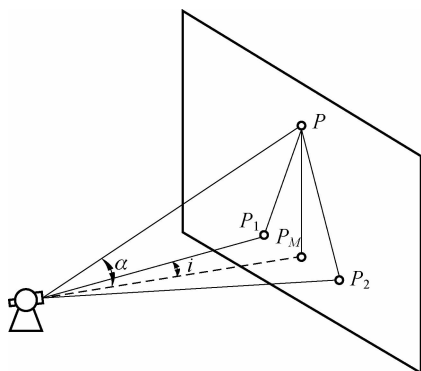


图 3-20 横轴垂直于竖轴的检验与校正

3.5.6 竖盘指标差的检验与校正

1. 检验目的

使竖盘指标差 x 为零，当指标水准管气泡居中时，使竖盘读数指标处于正确位置。

2. 检验方法

检验竖盘指标差的方法是用盘左、盘右照准同一个目标，并读得其读数 α_L 和 α_R 后，按指标差的计算公式来计算其值 x ，若不符合限差则需校正。

3. 校正方法

保持盘右照准原来的目标不变，这时的正确读数应为 $\alpha_R - x$ 。用指标水准管微动螺旋将竖盘读数安置在 $\alpha_R - x$ 的位置上，这时水准管气泡不再居中，调节指标水准管校正螺旋使气泡居中即可。有竖盘指标自动补偿器的仪器应校正竖盘自动补偿装置。

3.5.7 光学对中器的检验与校正

1. 检验目的

满足光学对中器视准轴与仪器竖轴线重合的条件。安置好仪器后，水平度盘的刻划中心、仪器竖轴和测站点应位于同一条铅垂线上。

2. 检验方法

在平坦的地面上安置仪器，严格整平，在地面脚架中央固定一张白纸，用光学对中器调焦，在纸上标记出视线的位置 P ，将光学对中器旋转 180° ，观察视线的位置 P 是否离开原来的位置或偏离超限；若是，则需要校正。

3. 校正方法

在纸板上画出分划圈的中心与 P 点的连线，取中点 P' 。通过调节对中器上相应的校正螺丝使 P 点移至 P' 点。反复 $1 \sim 2$ 次，直到照准部旋转到任何位置时目标都落在分划圈的中心为止。

上述的每一项校正，一般都需要反复进行几次，直到误差在容许范围内且满足条件为止。

3.6 角度测量误差及注意事项

3.6.1 角度测量误差

在角度测量中存在着各种各样的误差。仪器误差和作业各环节产生的观测误差及外界条件的影响都会给角度测量的精度带来影响，为了获得符合精度要求的角度测量成果，必须分析这些误差的影响，对这些误差进行分析研究，采取相应的措施将其消除或控制在容许范围内。

测角误差有三类，即仪器误差、观测误差和外界条件影响造成的误差。

1. 仪器误差

仪器误差主要包括两个方面：一是仪器检校不完善，留有残余误差；二是仪器加工与制造不完善而引起误差。

经纬仪的各轴线之间如果不满足应有的几何条件，将会产生仪器误差，即使经过校正，也难免会存在残余误差，但只要仔细地检验和校正，采用正确的观测方法，大部分仪器误差的影响均可得到消除。

主要的仪器误差有水准管轴不垂直于竖轴造成的误差、视准轴不垂直于横轴造成的误差、横轴不垂直于竖轴造成的误差、照准部偏心造成的误差、竖盘指标差及度盘分划误差等。

(1) 水准管轴不垂直于竖轴造成的误差。这项误差主要影响仪器的整平，竖轴不能严格铅垂，横轴也不水平，但在安置好仪器后，它的倾斜方向是固定不变的，不能用盘左、盘右消除。如果存在这一误差，可先在仪器整平且在一个方向上使气泡居中后，将照准部水平旋转 180° ，这时气泡必然偏离中央；然后用脚螺旋使气泡移回偏离值的一半，则可以使竖轴处于铅垂状态。这项操作要在互相垂直的两个方向上进行，直至照准部旋转至任何位置时，气泡虽不居中，但偏移量保持不变。

(2) 视准轴不垂直于横轴造成的误差。这项误差又称为视准轴误差。因该误差对水平方向观测的影响值为 $2c$ ，并且盘左、盘右观测时该值符号相反，故在水平角测量时可采用盘左、盘右观测，取一测回平均值的方法予以消除。

(3) 横轴不垂直于竖轴造成的误差。这项误差又称为横轴误差，盘左、盘右测量均含有此项误差，且大小相等、方向相反。故在水平角测量时，同样可采用盘左、盘右观测，并用取一测回平均值作为最后结果的方法来消除横轴误差。

(4) 照准部偏心造成的误差。该误差由仪器零部件加工、安装不完善造成。照准部旋转中心 O' 与水平度盘刻划中心 O 不重合而产生的误差，又称为照准部偏心差。如图 3-21 所示，不存在该项误差时照准目标的盘左正确读数为 α_L ，存在该项误差时盘左的读数为 α'_L ， α'_L 将比 α_L 大 x ，盘右读数将比正确读数小 x ， x 即该项误差的影响，该影响的大小及符号是根据偏心方向与照准方向的关系而变化的。如果照准方向与偏心方向一致，其影响为零；当两者互相垂直时，影响最大。对于 DJ₆ 型单指标读数类型的仪器，同一目标盘左、盘右观测取平均值即可消除照准部偏心差的影响。

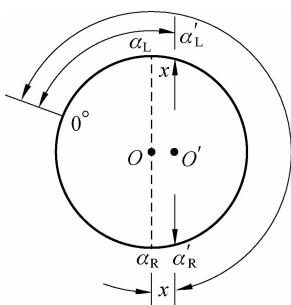


图 3-21 照准部偏心对读数的影响

(5) 竖盘指标差。竖盘指标差是由竖盘指标线不处于正确位置而引起的。其原因可能是竖盘指标水准管没有整平，气泡没有居中，也可能是经检校之后的残余误差。因此，观测竖直角时，首先应调节竖盘指标水准管，使气泡居中。若此时竖盘指标线仍不在正确位置，则可采用盘左、盘右观测一测回取其平均值作为竖直角度的方法来消除竖盘指标差。

(6) 度盘分划误差。由于仪器加工工艺不完善，度盘的刻划总是或多或少存在误差。现代光学测角仪器的度盘分划误差很小，一般可忽略不计。要提高测角精度，可在观测水平角时先利用复测器扳手或水平度盘位置变换手轮在多个测回之间按一定方式 ($180^\circ/n$) 变换水平度盘起始位置的读数，使各测回间的方向值分布在度盘的不同区间，然后取各测回角值的平均值，即可有效地减小度盘分划误差的影响。

2. 观测误差

造成观测误差的原因有两个：一个是工作时不够细心，另一个是受到人的感官和仪器性能限制而产生误差。观测误差主要有测站偏心差、目标偏心差、照准误差、读数误差及竖盘指标水准器的整平误差（针对竖直角观测）。

(1) 测站偏心差。测站偏心差又称为对中误差，是由于仪器中心与测站中心不重合而引起的误差。如图 3-22 所示，A、C 为目标点，B 为测站点，B' 为仪器中心，e 为偏心距，若实际测得的角为 β' 而非应测的 β ， δ_1 、 δ_2 为对中误差产生的测角影响，则有测站偏心差为

$$\Delta\beta = \beta - \beta' = \delta_1 + \delta_2 = \left[\frac{\sin \theta}{d_1} + \frac{\sin (\beta' - \theta)}{d_2} \right] e \rho \quad (3-13)$$

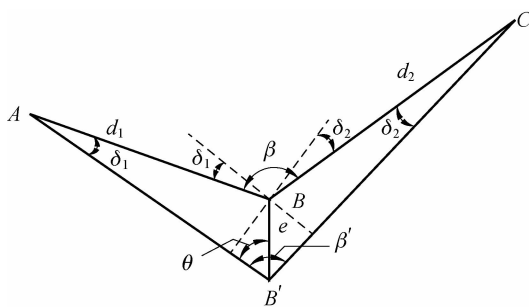


图 3-22 测站偏心差

由式(3-13)可知,对中误差与偏心距成正比,与边长成反比,还与测角的大小有关,测角越接近 180° 其影响越大。对中误差不能通过观测方法消除,所以在观测水平角时要仔细对中,对于短边、钝角尤其要注意。

(2) 目标偏心差。观测水平角时,望远镜所瞄准的目标标志应处于铅垂位置。如图3-23所示,如果标志发生倾斜,瞄准目标标志的上部时,其投影 A' 与地面目标点 A 不重合,而产生目标偏心差。由图3-23可知,在测站 O 点上观测 $\angle AOB$ 的大小应该是 β ,但由于观测者瞄准了 A 目标的上部,由此而测得的水平角将不是 β ,而是 β' ,两者的差值即目标偏心差,其值为

$$\Delta\beta = \beta - \beta' = \delta = e_1 \frac{\sin \theta}{S} \rho \quad (3-14)$$

式中, e_1 为目标偏心距(m); S 为仪器至目标点的距离(m); θ 为目标偏心方向与观测方向的夹角($^\circ$)。

由式(3-14)可知, δ 与目标偏心距 e_1 成正比,与仪器至目标点的距离 S 成反比,当 $\theta=90^\circ$ 时,即目标偏心方向与观测方向垂直时,目标偏心的影响最大。

因此,为了减少目标偏心对水平角观测的影响,提高测角精度,立在目标点上的标志应尽可能竖直,且瞄准时应尽可能瞄准目标点标志的底部。当边长短且看不到底部时,可以在目标点上悬挂垂球,通过瞄准垂球线进行读数。

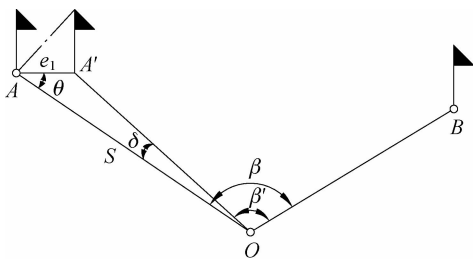


图 3-23 目标偏心差

(3) 照准误差。视准轴偏离目标理想瞄准线的夹角称为照准误差,照准误差的大小主要取决于人眼的分辨能力和望远镜的放大率。

照准误差无法消除,只能从照准标志的形状、大小、颜色、亮度等方面进行改进,来削弱其影响。照准时应仔细操作,对粗的目标宜用双丝照准,对细的目标宜用单丝照准。

(4) 读数误差。读数误差主要取决于仪器读数设备的照明度和判断的准确性。对于分微尺读法,主要是估读最小分划的误差,对于 DJ_6 型经纬仪,读数的最大误差为 $\pm 12''$,而对于 DJ_2 型仪器,一般为 $\pm 2'' \sim \pm 3''$ 。电子经纬仪则不受到读数误差的影响。

(5) 竖盘指标水准器的整平误差。在读取竖盘读数时,须先将指标水准器整平。 DJ_6 型仪器的指标水准器分划值一般为 $30''$, DJ_2 型仪器一般为 $20''$ 。这项误差对竖直角的观测影响很大,操作时应特别注意。有自动归零装置的经纬仪则需注意是否超过其补偿范围。

3. 外界条件影响造成的误差

外界条件的影响因素很多,如温度变化、风力、大气折光、大气透明度等,这些因素



都会影响观测结果的精度。具体情况如下：

- (1) 温度变化会影响仪器（如视准轴位置）的正常状态。
- (2) 大风会影响仪器和目标的稳定。
- (3) 大气折光会导致视线改变方向。
- (4) 大气透明度（如雾气）会影响照准精度。
- (5) 地面的坚实与否、车辆的振动等都会影响仪器的稳定。

为此，在测量角度时应采取措施，如选择有利的观测时间确保成像清晰、稳定，踩实三脚架的脚尖，为仪器撑伞遮阳，尽可能使视线远离建筑物、水面及烟囱顶等，以防止这些部位因气温变化引起大气密度变化而产生大气折光等。

3.6.2 角度测量的注意事项

在进行角度测量时，应注意以下事项：

- (1) 观测前应先检验仪器，如不符合要求应进行校正。
- (2) 安置仪器要稳定，脚架应踩实，应仔细对中和整平。尤其对短边应特别注意仪器对中，在地形起伏较大的地区进行观测时，应严格整平，一测回内不得再次对中、整平。
- (3) 目标应竖直，仔细对准地面上标志的中心，根据远近选择不同粗细的标杆，尽可能瞄准目标杆的底部，最好直接瞄准地面上标志的中心。
- (4) 严格遵守各项操作规定和限差要求。采用盘左、盘右位置观测取平均值的观测方法。照准时应消除视差，一测回内观测应避免碰动度盘。在进行竖直角观测时，应先使竖盘指标水准管气泡居中，然后才能读取竖盘读数。
- (5) 应该对一个水平角进行 n 个测回（次）的观测，各测回间应变换度盘起始位置，每测回观测时度盘起始读数的变动值为 $180^\circ/n$ 。
- (6) 观测水平角时，应用十字丝交点附近的竖丝仔细照准目标底部；观测竖直角时，应以十字丝交点附近的中丝照准目标的顶部（或某一个标志）。
- (7) 读数应果断、准确，要特别注意估读数，应及时将观测结果记录到正规的记录手册中，当场进行计算。直到确认各项限差都满足规定要求时，方能搬站。如有超限或者错误，应立即重测。
- (8) 选择有利的观测时间和避开不利的外界因素干扰。



思考与练习

1. 什么叫水平角？什么叫竖直角？它们的取值范围有什么不同？
2. DJ₆ 型经纬仪由哪几部分组成？
3. 经纬仪对中、整平的目的是什么？
4. 分微尺读数与单平板玻璃测微器读数有何不同之处？现有使用分微尺读数装置与使用单平板玻璃测微器 DJ₆ 型经纬仪各一台，照准目标后的读数窗口分别如图 3-24 和图 3-25 所示，试分别读取其水平度盘和竖直度盘的读数。

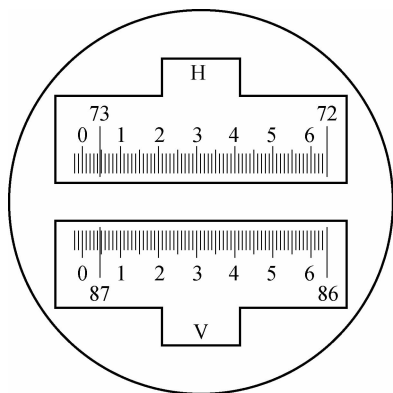


图 3-24 题 4 用图 (一)

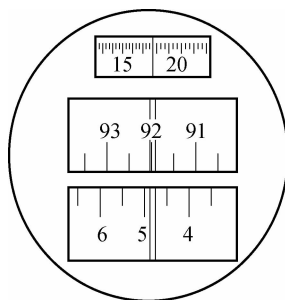


图 3-25 题 4 用图 (二)

5. 如何利用经纬仪上的复测机构（度盘配置装置）进行置数？
6. 简述测回法观测水平角的操作步骤。
7. 测量水平角时，采用盘左、盘右观测取平均值的方法可以消除哪些仪器误差？
8. 测量竖直角时，为什么在每次竖盘读数前应转动竖盘指标水准管的微动螺旋使气泡居中？
9. 用经纬仪照准同一竖直面内不同高度的两点时，水平度盘上的读数是否相同？此时在竖直面度盘上的两读数差是否就是竖直角？为什么？
10. 什么叫竖盘指标差？如何消除？
11. 经纬仪有哪些主要轴线？它们之间应满足哪些几何关系？
12. 在角度测量的过程中，有哪些方面的误差会对测量结果造成影响，如何消除或削弱这些影响？
13. 用 DJ₆ 型光学经纬仪按测回法观测水平角，观测数据见表 3-5，试进行水平角的各项计算。

表 3-5 题 13 用表

测站	竖盘位置	目标	水平度盘读数	半测回角值	一测回角值	各测回平均角值
			° ' "	° ' "	° ' "	° ' "
O	左	A	0 00 24			
		B	58 48 54			
	右	B	238 49 18			
		A	180 00 54			
O	左	A	90 00 12			
		B	148 48 48			
	右	B	328 49 24			
		A	270 00 36			



14. 用 DJ₆ 型光学经纬仪按全圆方向观测法观测水平角，观测数据见表 3-6，试进行水平角的各项计算。

表 3-6 题 14 用表

测站号	测回数	目标	水平度盘读数		2 <i>c</i>	$\frac{L+(R \pm 180^\circ)}{2}$	一测回 归零方向值	各测回 平均方向值	水平角
			盘左 (L)	盘右 (R)					
			° ' "	° ' "	''	° ' "	° ' "	° ' "	° ' "
O	1	A	00 00 26	180 00 22					
		B	60 00 00	239 59 54					
		C	131 49 32	311 49 30					
		D	167 34 18	347 34 10					
		A	00 00 28	180 00 28					
	2	A	90 02 36	270 02 32					
		B	150 02 18	330 02 14					
		C	221 51 44	41 51 38					
		D	257 36 30	77 36 24					
		A	90 02 36	270 02 34					

15. 用 DJ₆ 型光学经纬仪按中丝法观测竖直角，观测数据见表 3-7，试进行水平角的各项计算。

表 3-7 题 15 用表

测站	目标	竖盘位置	竖盘读数	半测回竖直角	指标差	一测回竖直角	备注
			° ' "	° ' "	''	° ' "	
O	A	左	79 20 24				 盘左竖盘注记
		右	280 40 00				
	B	左	98 32 18				
		右	261 27 30				

16. 用 DJ₆ 型光学经纬仪观测某一目标，盘左竖度盘的读数为 $71^\circ 45' 24''$ ，该仪器竖盘注记为顺时针注记，测得竖盘指标差 $x = +24''$ ，试求该目标正确的竖直角 α 的值。