

分光计的调整和使用

分光计又称测角仪，是一种测量光线偏转角的精密光学仪器。分光计的发展历史可以追溯到光学的早期研究阶段。1666 年，艾萨克·牛顿通过棱镜实验将白光分解为彩虹色光谱，揭示了光的色散现象，奠定了光谱学的基础。1802 年，德国物理学家威廉·海德·沃拉斯顿使太阳光先经过狭缝，再经过三棱镜，发现彩虹色光谱带中出现五条黑线。1814 年，德国物理学家约瑟夫·冯·夫琅禾费将棱镜和小型望远镜组合起来，观测从狭缝中出射的太阳光，发现太阳光谱中的 700 多条暗线。这是历史上第一台分光计，这些暗线被称为“夫琅禾费线”。1859 年，德国的两位科学家，古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫和罗伯特·威廉·本生，使用分光计观测研究发现这些暗线其实是由于太阳外层温度较低的大气层中的化学元素吸收造成的，由此开启了天文光谱观测的时代。

分光计是光学实验中的一种基本仪器，可以精确测量平行光的偏转角度，并据此计算相关的其他物理量，如折射率、光栅常数、光波波长等。其基本结构是现代光谱仪的基础，如棱镜光谱仪、光栅光谱仪等。

为了保证测量的精度，减小测量误差，分光计在使用前必须进行调整。

【实验目的】

1. 了解分光计的结构。
2. 学会正确的分光计调节和使用方法。
3. 利用分光计测量三棱镜的顶角。
4. 用掠入射法测量三棱镜的折射率。
5. 用最小偏向角法测量三棱镜的折射率。
6. 测定玻璃材料的折射率及色散曲线。

【实验原理】

1. 用自准直法进行望远镜调焦

在望远镜物镜前方放一镜面垂直于望远镜光轴，调节亮十字与物镜之间的距离(即调焦)，如果亮十字恰好处于物镜的焦平面上，则亮十字上任意一点发出的光经物镜变为平行光，此平行光由反射镜反射回来，经物镜后所成亮十字像应位于物镜的焦平面上，即亮十字所在平

面上，且位于亮十字关于望远镜光轴对称的位置。所以在调焦过程中只要在亮十字所在平面上看到反射回来的清晰的亮十字像时，望远镜即已调焦至无穷远处。这个调焦方法叫做自准直法。光路如图 1 所示。

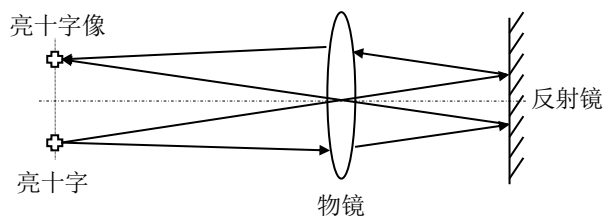


图 1

2. 三棱镜顶角测量

(1) 利用棱脊分束法测量三棱镜棱角

三棱镜中相邻两个光学平面之间的夹角称为棱角。用一束平行光入射到三棱镜的棱角，如图 1，光线 1 经 AB 面反射，光线 2 经 AC 面反射，两反射光线的夹角为 α 。两反射光线的夹角 α 与棱角 $\angle A$ 的关系很容易从几何光学中求得：

$$\angle A = \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

设两读数窗为 I 窗和 II 窗，则当望远镜在右边时，读得两窗读数为： $\angle\varphi_{右I}$ 和 $\angle\varphi_{右II}$ ；同理，当望远镜在左边时，读得两窗读数为： $\angle\varphi_{左I}$ 和 $\angle\varphi_{左II}$ 。所以 $\alpha_I = \angle\varphi_{右I} - \angle\varphi_{右II}$ ， $\alpha_{II} = \angle\varphi_{右II} - \angle\varphi_{左II}$ ，为了消除仪器的偏心差，取 $\alpha = \frac{\alpha_I + \alpha_{II}}{2}$ ，所以棱角 $\angle A$ 的计算公式为：

$$\angle A = \frac{1}{4} (|\angle\varphi_{左II} - \angle\varphi_{左I}| + |\angle\varphi_{右II} - \angle\varphi_{右I}|) \quad (2)$$

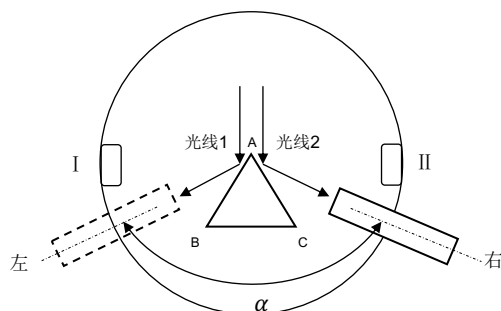


图2

(2) 利用自准直法测量三棱镜顶角

如图 2 所示，将望远镜转至左侧对准反射面 AB 时，游标 I 窗和 II 窗的读数分别为 $\angle\varphi_{左I}$

和 $\angle\varphi_{\text{左 II}}$ ；保持三棱镜和载物台固定不动，将望远镜转至右侧对准反射面 AC 时，游标 I 窗和 II 窗的读数分别为 $\angle\varphi_{\text{右 I}}$ 和 $\angle\varphi_{\text{右 II}}$ ，望远镜转过的角度为 β ，那么 $\angle A$ 的计算公式为

$$\angle A = 180^\circ - \frac{1}{2} (|\angle\varphi_{\text{右 I}} - \angle\varphi_{\text{左 I}}| + |\angle\varphi_{\text{右 II}} - \angle\varphi_{\text{左 II}}|) \quad (3)$$

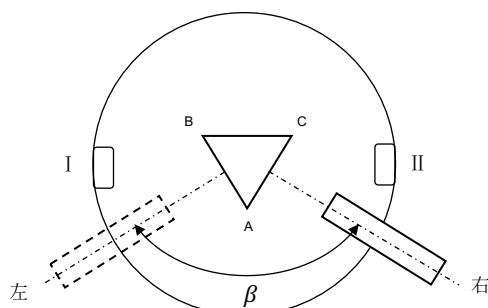


图3

3. 三棱镜折射率测量

折射率是材料光学性质的一个重要参数，对一般透明材料，折射率随入射光波长减小而增大，这种现象称为色散。折射率随波长变化的曲线，称为色散曲线。

当一束复色光照射到同一棱镜时，入射角相同，而由于折射率不同，不同波长的光具有不同的偏向角。测量透明材料折射率的方法很多，常用的方法有掠入射法、最小偏向角法等。下面介绍测量原理。

(1) 用掠入射法测量折射率原理

用一束单色扩展光源照射到三棱镜的光学面 AB 上，经两次折射后从另一光学面 AC 射出。入射光线与 AB 面法线的夹角 i 为入射角，第一次折射光线与 AB 面法线的夹角 r ，第二次折射的入射光线与 AC 面法线的夹角 r' ，出射光线与 AC 面法线的夹角 ψ 为出射角，如图 4 所示。根据折射定律，

$$n_0 \sin i = n \sin r \quad (4)$$

$$n \sin r' = n_0 \sin \psi \quad (5)$$

其中 n_0 和 n 分别是空气和玻璃的折射率，一般 $n_0 = 1$ 。根据几何关系可知

$$r + r' = A \quad (6)$$

代入 (4-5) 式并消去 r 和 r' ，得到

$$n = \sqrt{\sin^2 i + \frac{(\sin i \cos A + \sin \psi)^2}{\sin^2 A}} \quad (7)$$

当光线以 90° 角度入射，即掠入射时， $\sin i = 1$ ，此时出射角 ψ 最小，称为极限角，上式可

以简化为

$$n = \sqrt{1 + \frac{(\cos A + \sin \psi)^2}{\sin^2 A}} \quad (8)$$

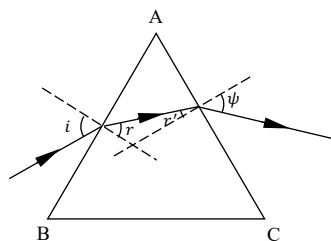


图 4

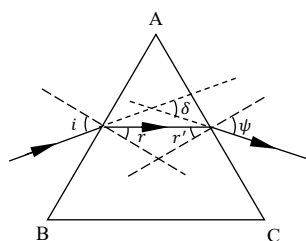


图 5

(2) 用最小偏向角测量折射率的原理

如图 5 所示, 出射光线与入射光线的夹角为 δ , 由几何关系可知 $\delta = (i - r) + (\psi - r')$, 将 (6) 代入可得,

$$\delta = i + \psi - A \quad (10)$$

令 $\frac{d\delta}{di} = 0$, 得到偏向角最小时的条件为: $i = \psi$, $r = r' = \frac{A}{2}$; 此时 $i = \frac{\delta_m + A}{2}$ 。利用最小偏向角测折射率公式为

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_m + A}{2}}{\sin \frac{A}{2}} \quad (11)$$

4. 利用光栅衍射测量光栅常数

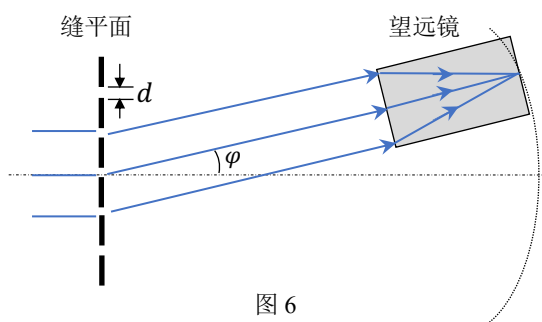


图 6

光波遇到与其波长相等或小于其波长的障碍时, 能绕过障碍的现象称为光的衍射。光栅的狭缝数通常很大, 一般每毫米几十至几千条, 相邻两条缝之间的距离称为光栅常数。当波长为 λ 的单色平行光垂直入射到光栅平面时, 每条缝的衍射和各缝间的干涉, 会在屏幕上形成明暗相间的条纹。形成光栅衍射明条纹的条件为:

$$d \sin \varphi = k\lambda, (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (12)$$

其中 d 是光栅常数, φ 是衍射角, k 是衍射级次。

已知光波长时，测量出行射角，即可计算得到光栅常数 d 。

【实验装置】

实验装置包括分光计、双面平面反射镜、三棱镜。常用的分光计主要由望远镜、平行光管、载物平台和读数装置四部分组成，外型结构示意图如图 7 所示。

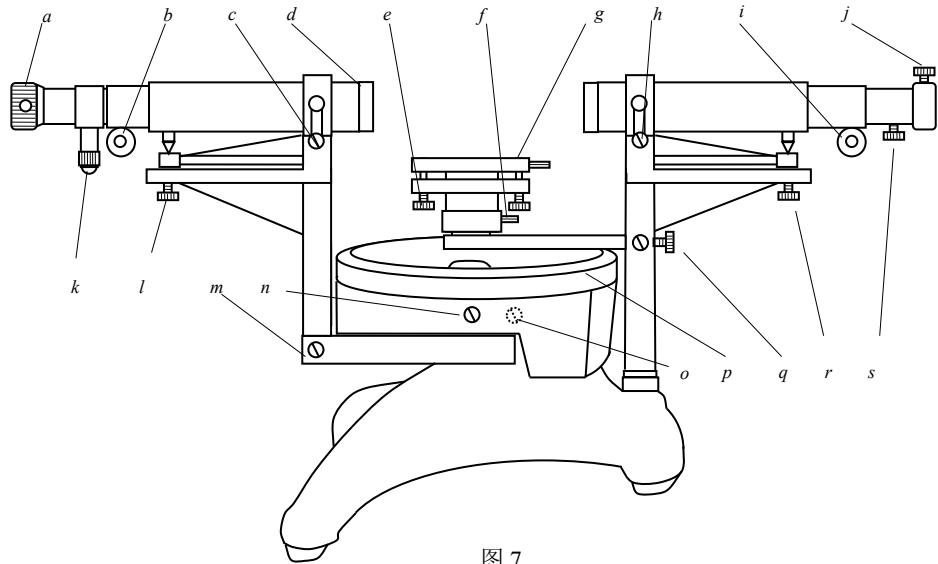


图 7

(a -目镜调焦, b -十字调焦, c -望远镜水平指向调节螺钉, d -物镜, e -载物台调平螺钉, f -载物台升降锁住螺钉, g -载物平台, h -平行光管水平指向调节螺钉, i -平行光调焦螺钉, j -狭缝大小调节螺钉, k -灯珠, l -望远镜倾角调节螺钉, m -转座水平方向微调螺钉, n -望远镜止动螺钉, o -转座与刻度盘锁住螺钉 (在后面), p -刻度盘, q -游标盘止动螺钉, r -平行光管倾角调节螺钉, s -平行光管狭缝器锁住螺钉)

1. 望远镜

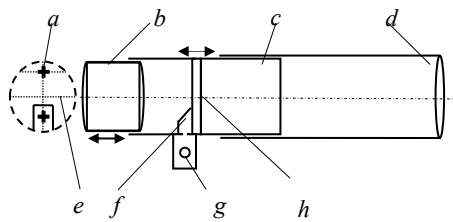


图 8

(a -亮十字像, b -目镜, c -可调镜筒, d -物镜, e -“十”形叉丝, f -全反射小棱镜, g -电珠, h -叉丝分划板)

望远镜用来观察和确定光线行进的方向，见图 8，它由物镜、目镜、全反射小棱镜和带“十”形叉丝的分划板组成。其中，小棱镜紧贴分划板的直边镀有全反膜，并刻有透光的十字，斜边镀有半透半反膜，小灯珠发出的光经小棱镜反射后再经物镜投射到载物平台上的反射镜反射回来的像是一亮十字像。当望远镜光轴与载物平台上的反射镜镜面垂直时，反射回

来的亮十字像应位于分划板的“十”形叉丝的上刻线处相重合。

2. 平行光管

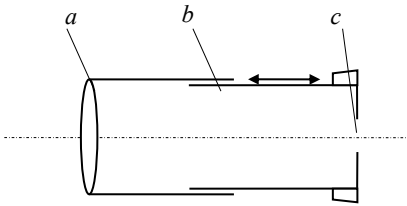


图9
(a-会聚透镜, b-平行光管, c-狭缝器)

平行光管用于产生平行光。它由一个可改变缝宽的狭缝及一个会聚透镜所组成，见图 9。狭缝至透镜的距离可调节。当用光源照射狭缝时，若狭缝刚好位于透镜焦平面处，则由狭缝入射的光束经透镜后即为平行光束。

3. 载物平台

载物平台是双层结构，上层用来用来放置光学元件，两层之间有三个互成 120° 夹角的调节螺钉，用以调节上层平台的高度和倾斜度。

4. 读数装置

望远镜和载物台分别与刻度盘和游标盘相连，它们的相对转动角度 φ 可从读数游标窗中读出，如图 10 所示。刻度盘的圆心 O_1 和游标盘的圆心 O_2 可能存在一定偏差，游标盘上设置两个中心对称的读数游标窗，I 窗和 II 窗，分别读取望远镜转过的角度 φ_1 和 φ_2 ，这样 $\varphi_1 = \varphi + \theta_1$ ， $\varphi_2 = \varphi - \theta_2$ 。然后取平均值，则 $\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$ ，可消除中心轴可能存在的偏心差。

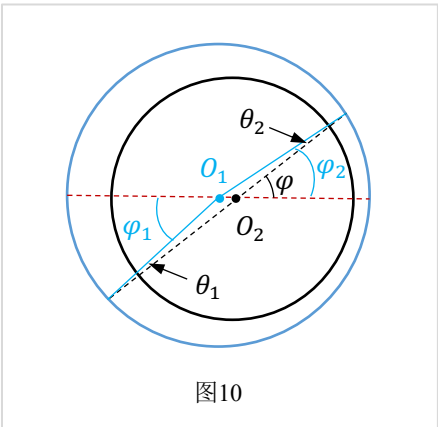


图10

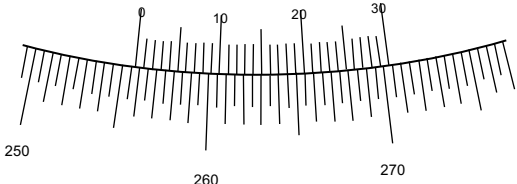


图 11

本实验中分光计角游标的最小分度为 $1'$ ，主刻度盘上每小格为 $30'$ ，角游标 30 分格的弧长与刻度盘 29 分格的弧长相等，因此，角游标每小格与刻度盘上每小格之差为 $1'$ 。

刻度盘读法：读取角游标上 0 刻线对下来的角度数据；角游标读法：读取刻度盘上某一刻线与角游标刻线对齐的角游标刻线上的角度数据；将这两个角度数据相加作为当前角度值。图 11 中读得角度为 $255^{\circ}30' + 17' = 255^{\circ}47'$ 。

【实验内容】

A. 基础内容

1. 分光计的调整

分光计在实验中通常用来测量光通过各种光学元件后的偏转角度，需要调整分光计达到的状态目标为：

- 1) 入射光线是平行光，即平行光管发射平行光；
- 2) 望远镜能接收平行光，即望远镜调焦到无穷远；
- 3) 望远镜的光轴垂直于分光计中心转轴；
- 4) 载物平台垂直于分光计中心转轴；
- 5) 平行光管和望远镜的光轴共轴，且与分光计中心转轴垂直。

归纳来说，就是“**等高共轴、两个焦距、三个垂直**”。先进行粗调，再按光路逆行顺序进行调节，即先调节望远镜的目镜和物镜，再同时调节望远镜水平倾斜度和载物台，最后调节平行光管。

(1) 粗调

通过目测法调节望远镜、载物台和平行光管：

① 调节望远镜和平行光管的水平指向调节螺钉，目测使望远镜和平行光管共轴，并且轴线通过载物台的中心；

② 调节望远镜倾斜度调节螺钉，使望远镜光轴基本与分光计中心转轴垂直；

③ 调节载物平台下面三个倾斜度调节螺钉，使载物平台平面基本与分光计中心转轴垂直。

如果目测望远镜或载物平台明显不水平，在望远镜中很难找到绿色亮十字反射像，这是因为反射像超出了望远镜视场范围，见图12所示。

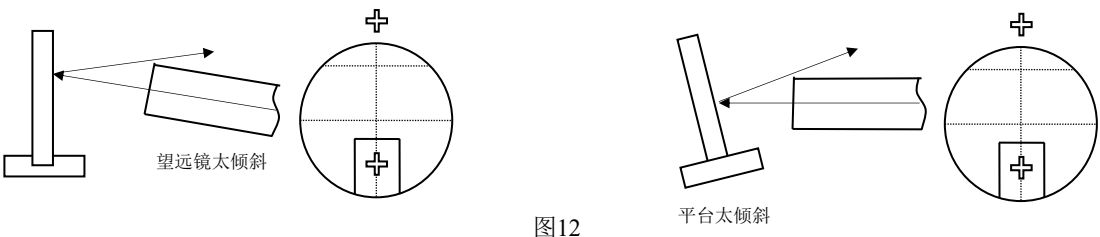


图12

(2) 望远镜调焦无穷远

首先，将双面反射镜的一侧反射面紧贴望远镜物镜。然后，调整目镜调节滚轮，直到清晰地看到“十”形叉丝为止。接着，调节望远镜十字调焦螺钉，直到看到清晰的亮十字像。这时，望远镜已经调焦至无穷远。

(3) 调整望远镜光轴、载物平台面分别与分光计中心转轴垂直

载物平台平面与分光计中心转轴垂直要借助双面反射镜来调整，采用自准直法进行调节。一般来说，在调节平台面与分光计中心转轴垂直时，在载物台平面内选取两条相交的线，分别调节使其垂直于中心转轴。简单起见，我们选择螺钉①、②的连线和其中垂线这两条相互垂直的线。调节分两步：

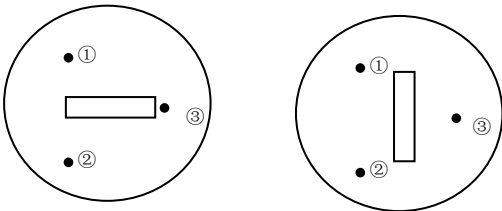


图13

第一步，将反射镜置于垂直于①、②脚连线且通过平台中心的地方，调节螺钉①、②的连线垂直于分光计中心转轴，如图 10 左图。将载物台锁住螺钉缩紧，松开游标盘制动螺钉，转动游标盘带动载物台及其上的反射镜，在望远镜内依次观察双面镜两个反射面反射回来的亮十字像。如果粗调到位，双面镜两个反射面分别对准望远镜时，应能在望远镜视场中观察到亮十字像，并观察其相对“十”形叉丝的上刻线（目标位置）在垂直方向上的位置。

如果两个反射面反射回来的亮十字像均位于目标位置的上方或者下方，则说明望远镜筒存在较大倾斜，可以通过调节望远镜倾角调节螺钉，将亮十字像调至目标位置。

如果两个反射面反射回来的亮十字像分别位于目标位置的上方和下方，则说明载物平台

存在倾斜。需要反复转动载物平台，调节载物平台倾斜螺钉①、②中的一颗，使两面反射的亮十字像相对目标位置的垂直距离各减小一半(称为二分之一调节法)，重复上述步骤，直至两面反射的亮十字像都重合在“十”形叉丝的上刻线上。

这里需要同学们思考的是，如果我们在望远镜目镜筒内可以观察到反射镜的一个反射面反射回来的亮十字像，而无法观察到另外一个反射面反射回来的亮十字像，是由于什么原因造成的？又该如何进行调节呢？

第二步，调节螺钉①、②连线的中垂线垂直于仪器转轴，此时拿起反射镜转过 90 度，置于平行于①、②脚连线且通过平台中心的地方，如图 13 右图所示。调节螺钉③，使亮十字像与“十”形叉丝的上刻线重合。注意此时不能再调螺钉①、②及望远镜倾角调节螺钉。

实验中，望远镜和载物台调好后，它们的倾角调节螺钉都不能再动了。

(4) 调整平行光管光轴与分光计中心转轴垂直

移走载物平台上的反射镜，利用已调好的望远镜，调节平行光管狭缝至透镜的距离，使在望远镜中能看到狭缝清晰的像，即缝像与“十”形叉丝无视差，这时平行光管已发射平行光。然后，转动狭缝器，使平行光水平射出，再调节平行光管倾斜度使平行光与“十”形叉丝的下刻线上重合。最后，再转动狭缝器，将平行光竖立放置，并调节狭缝大小约目视 2mm。此时平行光管光轴已调至与分光计转轴垂直了。

2. 测量三棱镜顶角

调节好分光计后，采用棱脊分束法或自准直法测量三棱镜顶角。

(1) 棱脊分束法：用汞灯照亮平行光管的狭缝，将三棱镜放置在载物台上，三棱镜顶角对准平行光管的中心，使平行光分成两半，在 AB 和 AC 面上反射出去，并且三棱镜顶角应接近平台中心偏上一点点位置，否则望远镜中会看不到反射光。测量左右两反射光线的角位置时，移动望远镜使分划板竖直刻线与狭缝像重合，利用公式(2)计算得到棱镜顶角大小。重复测量六次，每次测量时稍微改变三棱镜顶角接近平台中心的位置。

(2) 自准直法：该方法不需要额外的光源。将三棱镜放置在载物台上中心位置，顶角朝向望远镜，并将载物台固定不动。将望远镜转至左侧对准反射面 AB，转动望远镜使得亮十字像位于“十”形叉丝的上叉丝处，此时记录游标 I 窗和 II 窗的读数， $\varphi_{左 I}$ 和 $\varphi_{左 II}$ ；保持三棱镜和载物台固定不动，将望远镜转至右侧对准反射面 AC 时，游标 I 窗和 II 窗的读数分别为 $\varphi_{右 I}$ 和 $\varphi_{右 II}$ ，利用公式 (3) 计算三棱镜顶角。

实验 次数	左		右		$\varphi_{\text{左 I}} - \varphi_{\text{右 I}}$	$\varphi_{\text{左 II}} - \varphi_{\text{右 II}}$	$\angle A$
	I 窗	II 窗	I 窗	II 窗			
1							
2							
3							
4							
5							
6							

B. 提升内容

3. 使用掠入射法测量三棱镜折射率

调节好分光计后，按图 4 将三棱镜放置在载物平台上，使钠光灯处于 AB 反射面的延长线方向，并在钠灯前放置一块毛玻璃，使其成为扩展光源。用肉眼在 AC 反射面观察，找到一条明显分界线，转动望远镜将其分划板上的竖直刻线对准这条分界线，记录游标 I 窗和 II 窗的读数。保持载物平台不动，再转动望远镜至 AC 面的法线位置，记录游标 I 窗和 II 窗的读数，可以计算得到光线掠入射时的出射极限角 ψ ，根据公式（8）计算三棱镜的折射率。

自行设计数据记录表格，并计算三棱镜折射率。

C. 进阶内容

4. 使用最小偏向角法测量三棱镜折射率

调节好分光计后，测定三棱镜对汞灯绿色谱线（ $\lambda = 546.0\text{nm}$ ）的最小偏向角 δ_m 。

按图 14 将三棱镜放置在载物台上，旋转载物台，使一光学面 AC 与平行光管入射方向基本垂直。从平行光管发出平行光射向三棱镜光学面 AB，经过三棱镜光学面 AC 折射出来，望远镜从毛玻璃面 BC 底边出发，沿着逆时针方向旋转，就会看到清晰的汞单色系列光，说明已经找到折射的光路。

此时再转动载物平台，观察汞单色光偏向角的变化，如果向右移动，偏向角 δ 会变小。继续慢慢转动载物平台直到汞单色光走到一定位置时突然向左移动，使偏向角 δ 变大，此转折点即为该汞单色光的最小偏向角位置，把望远镜对准这个转折位置，并记录下此时的分光

计读数游标窗口数据为 $\theta_{\min I}$ 、 $\theta_{\min II}$ 。然后移去三棱镜，使望远镜对准入射光（平行光管位置），读取读数游标窗口数据为 θ_{0I} 与 θ_{0II} ，则最小偏向角为：

$$\delta_m = \frac{1}{2} (|\theta_{\min I} - \theta_{0I}| + |\theta_{\min II} - \theta_{0II}|) ,$$

利用公式（11）计算折射率。

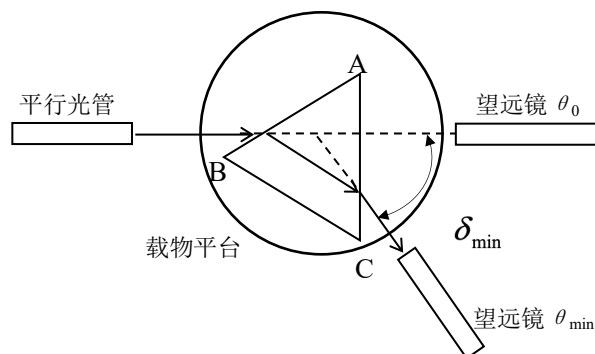


图 14

5. 测量光栅常数

分光计调整好之后，将光栅片放置在载物台上，旋转载物台，使光栅平面垂直于平行光管的光轴。打开汞灯，转动望远镜筒，观察光栅的各级衍射光谱。沿光栅法线方向的中央位置，能观察到白亮线，即为 0 级衍射线。在法线方向的两侧各能观察到黄（非常相邻的两条谱线）、绿、蓝、紫的 ± 1 级、 ± 2 级、 ± 3 级衍射谱线。

将望远镜目镜筒内分划板上的竖直刻线与 $+k$ 级的各谱线对齐，分别记录两个游标的读数， φ_{+kI} 和 φ_{+kII} ，再将望远镜内的竖直刻线与 $-k$ 级的各谱线对齐，并分别记录两个游标的读数， φ_{-kI} 和 φ_{-kII} ，衍射角可用公式 $\varphi = \frac{1}{4} (|\varphi_{+kI} - \varphi_{-kI}| + |\varphi_{+kII} - \varphi_{-kII}|)$ 计算得到。

假设汞灯绿线波长已知（见附录），利用公式（12）计算光栅常数。再利用光栅常数，和黄、蓝、紫线的衍射角，计算各线对应的波长，并与附录表格中的标准波长进行对比。重复测量三次。

D. 高阶内容

6. 设计实验测定玻璃折射率随波长变化的色散曲线

设计实验，利用钠灯、汞灯、氢灯等光源测定玻璃折射率随波长变化的色散曲线，调研色散曲线的常用形式，并对测量结果进行拟合。

【思考题】

1. 测量三棱镜顶角时，棱镜摆放的位置怎么放置，有区别吗？
2. 望远镜观察时是否发现视差问题？如有，应当怎样解决？
3. 如果望远镜中看到十字像在“十”形叉丝上刻线的上面，而当平台转过 180° 后发现看不到亮十字像了，试问产生这种现象的原因是什么？此时应该调节望远镜的倾斜度还是载物平台的倾斜度呢？
4. 采用棱脊分束法测量三棱镜顶角时，当使用望远镜观察狭缝经三棱镜反射面的反射像时，发现狭缝是倾斜的，说明什么问题？应如何解决？

【附录】

附表：汞灯的谱线波长（nm）

颜色	紫	紫	紫	蓝	蓝	蓝	蓝	青	青	绿
波长	404.66	407.78	410.81	433.92	434.75	435.83	491.61	496.03	535.41	536.51
相对强度	强	较强	弱	弱	弱	很强	弱	弱	弱	
颜色	绿	绿	黄绿	黄	黄	黄	橙	橙	橙	红
波长	546.07	567.59	576.96	579.07	585.93	588.89	607.27	612.34	623.45	671.64
相对强度	很强	弱	强	强	弱	弱	弱	弱	较强	弱