

# 外反射像在折射率自动测量中的应用

阎智春 段文琴 王世焯

**摘要:** 本文介绍一种用外反射像引导光探测器、由光探测器跟踪外反射像的“引导—跟踪”式自动调节测量系统的方法。在调节测量系统使其成为对称光路的同时,可完成自动寻找最小偏向角位置以及准确测量最小偏向角,实现折射率的自动测量。

## 一、引 言

在折射率的测量中,以封闭式二倍最小偏向角方法的测量精度最高。但是以该方法进行折射率的自动测量时,安装在测角仪度盘上的光探测器对最小偏向角的寻找和确定比较困难。这是因为:第一,当样品棱镜置于光路中时,有与某顶角(如 $A$ 角)相关的外、内反射光及折射光(还会有与另一顶角相关的外、内反射光及折射光)等同时存在。因此,由光探测器寻找顶角 $A$ 的折射像就比较困难,第二,当样品置于载物台上时,并非是在任何情况下顶角 $A$ 的折射光都会产生。如果入射角小于样品的临界角,则没有折射光从样品出射,此时由光探测器寻找折射光会导致失败;第三,即使光探测器已经寻找到所需要的折射像,为调节测量系统,载物台仍有二个可能的转向,而且,在调节测量系统的过程中,测角仪的度盘和载物台需根据不同的初始状态,作同向不同步或反向不同步的转动。所以,用最小偏向角方法实现折射率的自动测量是一个比较复杂的问题。我们研究了一种由微计算机及其外围设备控制的,利用外反射像引导光探测器自动调节光学测量系统,寻找并准确测定最小偏向角的折射率自动测量方法,其中对外反射像的利用是该方法的关键。

## 二、测量原理

用最小偏向角方法测量样品的折射率,需要调节测量系统,使测量光路为对称光路,此时称样品棱镜处于最小偏向位置。

当一束准直光照射等边棱镜样品时,产生折射光和反射光,如图1所示,其中 $AB$ 面和 $BC$ 面的外反射光以及 $A$ 角和 $C$ 角的折射光同时存在(还有两束内反射光从棱镜出射,但光探测器对它们已不灵敏,图中未画出)。如果样品的加工精度满足一定要求(不同材料的样品对加工精度有不同要求),则当样品处于最小偏向位置时,测量光路为对称光路,此时 $A$ 角的外反射光与折射光相互平行,经成像系统后重合在一起,如图2所示。因此,在自动测量中有可能利用外反射像来调节测量系统,使样品棱镜基本处于最小偏向位置。

如果再使光探测器转至准直光束的另一侧,并旋转样品台使测量系统达到新的最小偏向

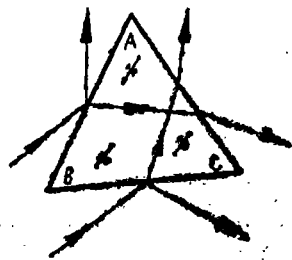


图 1

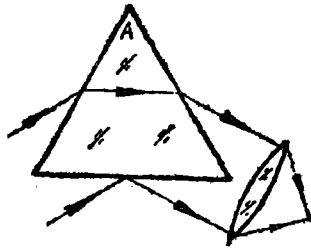


图2 对称光路

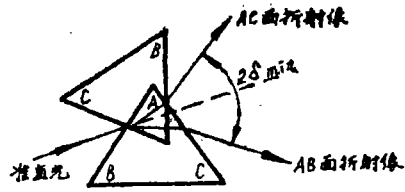


图3 二倍 $\delta_{min}$ 的测量

位置，即可测得与A角相关的二倍最小偏向角，如图3所示。分别对棱镜的三个顶角进行二倍最小偏向角的测量，按下式可求得样品的折射率

$$n = 2 \sin \left( 30^\circ + \frac{A + B + C}{12} \right)$$

式中A、B、C分别为A角、B角和C角的二倍最小偏向角。

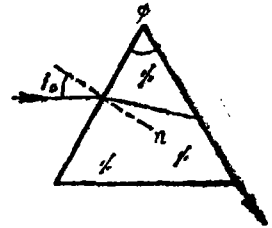
### 三、外反射像的利用

#### 1. 外反射像的特征

把样品置于光路中，并非任何情况下都有折射光从样品出射。如果以 $i_0$ 表示样品的临界角，则当准直光以入射角 $i_1$  ( $< i_0$ ) 入射时，产生全反射、像方没有折射光，如图4所示。对不同材料的样品，有不同的 $i_0$ 值， $i_0$ 可由下式确定

$$i_0 = \sin^{-1} \left[ n \sin \left( \phi - \sin^{-1} \frac{1}{n} \right) \right]$$

式中 $\phi$ 为棱镜顶角、 $n$ 为材料的折射率。



如果样品均磨制成等边棱镜，则上式表明 $i_0$ 是样品折射率的函数。对不同材料的待测样品， $i_0$ 是一个可变的未知量。因此，在自动测量中直接用光探测器寻找折射像是困难的。

但是对外反射光，情况就不是这样。只要棱镜底边与准直光有一夹角，即可产生外反射光。如果先由微机控制光探测器瞄准此光束，再旋转样品台，样品台一经调节，外反射像将会移出光探测器。当外反射像移出光探测器时，探测器便跟踪外反射像，如此反复。这样，通过光探测器不断地瞄准外反射像，就可以借助于外反射像引导光探测器来调节整个测量系统，使测量光路最后接近对称光路。

#### 2. 引导——跟踪式模型

将样品置于载物台上，使其底边与准直光 $I_0$ 有一夹角 $\alpha$ ，则有外反射光 $I'_1$ 形成，如图5所示。使光探测器先瞄准该反射光，微机再控制样品台沿逆时针（或顺时针）方向旋转，光探测器便紧紧跟踪 $I'_1$ 。当A角由“1”位置转至“2”位置时（设载物台作逆时针旋转），测量光路几乎成对称光路，此时光探测器已跟踪至 $I_1$ 、测试信号成倍增大，因为折射光 $I_2$ 同时被接收。这时样品已

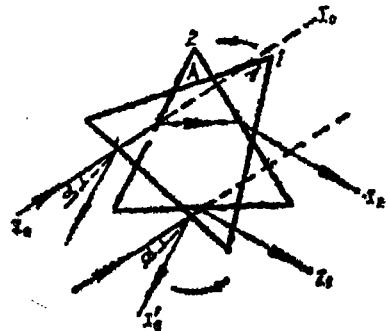


图5

接近最小偏向位置。

在上述过程中，外反射像起引导作用，光探测器响应这种引导并紧紧跟踪外反射像，从而使测角仪载物台和度盘共同得到不断调节直至测量光路接近对称光路为止。整个引导——跟踪过程由微机自动控制。该过程控制的程序框图如图 6 所示。

在引导——跟踪式的控制模型中，外反射像同时用作控制量和中断信号，方便了控制软件的编程。控制程序同相应的硬件电路以及微机外设相配合，通过外反射像和光探测器的“一呼一应”，使测角仪载物台和度盘共同得到连续地自动调节。

### 四、最小偏向角的测量

#### 1. 最小偏向位置的精确定位

测量系统完成引导——跟踪的调节过程后，样品已接近最小偏向位置，此时对外反射像的利用已经结束。欲精确测量最小偏向角，测量系统又经过如下调节。

自动测量中，采用极值法对折射像进行精确瞄准。当光探测器未达到最小偏向角位置时，转动样品台、将有两次光信号通过光探测器。所以，在样品接近最小偏向位置的条件下，当样品台作微小转动时，探测器上将产生如图 7 所示的电信号，其中两个最大值之中心位置与最小偏向位置对应。微机控制测量系统使样品台按此位置定位，同时控制探测器跟踪折射像并做多次瞄准，以确定折射像  $I_2$  的准确位置，此位置与准直光位置的角度差即最小偏向角。

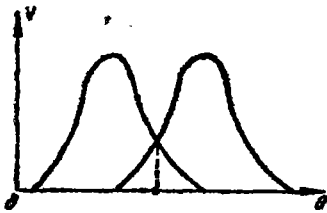


图 7

#### 2. 样品位置对测量精度的影响

样品的位置决定准直光的入射角。下面讨论入射角的变化对折射角的影响。

如图 8 所示，有下列几何关系

$$\begin{cases} \delta = i_1 + i_2' - \phi \\ \phi = i_1' + i_2 \end{cases}$$

关于  $i_1$  求导得

$$\begin{cases} \dot{\delta} = 1 + i_2' & (1) \\ \dot{i}_1' = -i_2 & (2) \end{cases}$$

由折射定律有

$$\begin{cases} \sin i_1 = n \sin i_1' \\ n \sin i_2 = \sin i_2' \end{cases}$$

关于  $i_1$  求导得

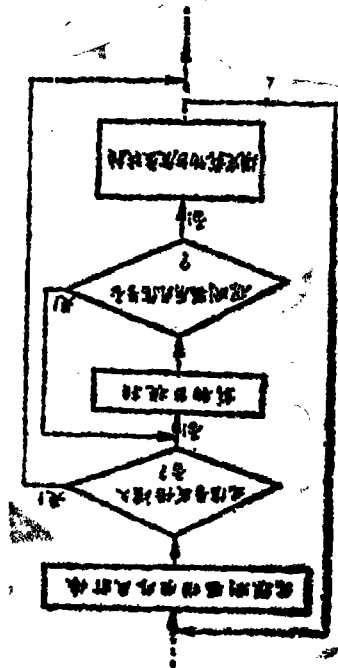


图 6

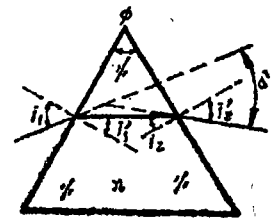


图 8

$$\begin{cases} \cos i_1 = n \cos i_1' \cdot i_1' & (3) \\ n \cos i_2' \cdot i_2 = \cos i_2' \cdot i_2' & (4) \end{cases}$$

整理得

$$i_1' = \cos i_1 / n \cos i_1' \quad (3')$$

$$i_2' = (n \cos i_2 / \cos i_2') i_2 \quad (4')$$

由 (2)、(3') 及 (4') 得

$$i_2' = -\cos i_1 \cdot \cos i_2 / \cos i_1' \cdot \cos i_2'$$

代入 (1) 式得

$$\delta = 1 - \cos i_1 \cos i_2 / \cos i_1' \cdot \cos i_2' \quad (5)$$

当测量系统满足最小偏向角条件时

$$\begin{cases} i_1 = i_2' \\ i_2 = i_1' \end{cases}$$

(5) 式变为

$$\delta \Big|_{\delta = \delta_{\min}} = 0$$

这表明：当测量系统处于最小偏向角位置时，出射光线（即折射光线）的位置对入射角的变化率等于零。

实际上，当样品接近最小偏向位置时，折射光线的位置已经对入射角的变化很不灵敏。该结论可由实验数据得到验证。

根据图 8，可得出偏向角  $\delta$ 、入射角  $i_1$ 、棱镜顶角  $\phi$  及折射率  $n$  之间的关系如下：

$$\delta = i_1 - \phi + \sin^{-1} \left[ n \sin \left( \phi - \sin^{-1} \frac{\sin i_1}{n} \right) \right]$$

以  $K_2$  玻璃为例， $\phi = 60^\circ$ 、 $n_D = 1.5163$ ，表 1 给出了  $\delta$  随  $i_1$  变化的实验数据。

实验结果表明，该样品的最小偏向角  $\delta_{\min} = 38^\circ 36' 9.91''$ 。如果折射率的精度为  $\Delta n = \pm 3 \times 10^{-6}$ ，则  $\delta_{\min}$  的测量精度为  $\pm 1''$  即满足要求。据表 1 数据可见， $i_1$  在  $49^\circ 15'$  至  $49^\circ 20'$  范围内变化（亦即对样品台的定位精度为  $\pm 2.5'$ ）， $\delta$  均符合要求。这就验证了上面的结论。所

表 1.  $\delta$  与  $i_1$  的变化

$i_1$	$\delta$	$i_1$	$\delta$
$40^\circ 0'$	$42^\circ 13' 08.53''$	$49^\circ 18'$	$38^\circ 36' 9.91''$
$45^\circ 0'$	$38^\circ 54' 28.86''$	$49^\circ 19'$	$38^\circ 36' 9.92''$
$48^\circ 0'$	$38^\circ 37' 45.08''$	$49^\circ 20'$	$38^\circ 36' 9.97''$
$49^\circ 0'$	$38^\circ 36' 14.93''$	$49^\circ 25'$	$38^\circ 36' 10.64''$
$49^\circ 5'$	$38^\circ 36' 12.54''$	$49^\circ 30'$	$38^\circ 36' 12.07''$
$49^\circ 10'$	$38^\circ 36' 10.91''$	$49^\circ 35'$	$38^\circ 36' 14.27''$
$49^\circ 15'$	$38^\circ 36' 10.06''$	$50^\circ 0'$	$38^\circ 36' 36.49''$
$49^\circ 17'$	$38^\circ 36' 9.93''$	$55^\circ 0'$	$39^\circ 03' 51.56''$

以, 当样品趋近最小偏向位置时, 入射角的变化对最小偏向角的测量精度影响很小, 采用前面所述的方法对样品进行最小偏向位置的精确定位是可行的。仪器的机械设计对载物台旋转精度的要求是每步  $20''$ , 这对  $\delta_{min}$  的测量已满足精度要求。

## 五、结 论

文中所研究的以外反射像引导、光探测器跟踪的自动寻找最小偏向角的方法, 能够实现最小偏向角方法的折射率自动测量。利用该方法调节测量系统、使其光路最后成对称光路的控制模型简便可靠, 便于智能化、仪器化。测量系统满足测量最小偏向角的精度要求。因此, 利用外反射像引导光探测器实现最小偏向角方法的折射率自动测量是成功的、方法是可行的。

### The Use of Outside Reflection Image in Automatic Measuring Refractive Index

Yan Zhichun Duan Wenqin Wang Shizhuo

#### Abstract

In this paper a method called guiding-tracing method is introduced in which a detector is guided by a outside reflection image traced by the dectector. By this method, optical measurement system can be regulated automatically. When the measurement system is adjusted to symmetry optical system, the exact position of the minimum deviation angle can be traced by the detector and the minimum deviation angle as well as the refractive index of a sample can be measured automatically.