

## 实验 8 色度测量和计算

颜色是由亮度和色度共同表示的，色度是不包括亮度在内的颜色的性质，它反映的是颜色的色调和饱和度。人的视觉系统对色彩的感知是错综复杂的，为了可以量化地描述色彩，国际照明协会根据实验，将人的视觉系统对可见光内不同波长的辐射，所能引发的感觉用红、绿、蓝三原色的配色函数来加以纪录。人们使用此配色函数对色彩加以描述运用。

### 【实验原理】

#### 一. 专用术语介绍

1931 C.I.E 系统：物体颜色的定量是复杂的，它涉及到观察者的视觉生理，视觉心理及照明条件，观察条件等许多问题，为了能够得到一致的度量效果，国际照明委员会（简称 CIE）规定了一套标准色度系统，成为 CIE 标准色度系统。本系统是近代色度学的基础组成部分，它是一种混色系统，是基于每一种颜色都能用三个选定的原色按适当比例混合而成的基本事实建立起来的。

三刺激值：在 CIE 系统中，为混合某一种颜色时所需的三个基本颜色（即原色）的数量。

主波长：一种颜色  $s_\lambda$  的主波长，指的是某一种光谱色的波长，这种光谱色按一定比例与一种确定的参照光源相加混合，能匹配出颜色  $s_\lambda$ 。

色纯度：是指样品的颜色同主波长光谱色接近的程度。色纯度有兴奋纯度和色度纯度两种表示法。

兴奋纯度：是指主波长的光谱色在样品中所占亮度的比例，在 CIE 色度图上用白光到样品点的距离与样品点到主波长点的距离的比例表示。一种颜色的兴奋纯度是指一种主波长的光谱色被白光冲淡的程度，实质上是表示了主波长光谱色的三刺激值在样品三刺激值中所占的比重，在 CIE 色度图上无法表示出来。

色度纯度：当样品颜色的纯度用亮度的比例来表示时称为色度纯度，它是指主波长的光谱色在样品中所占亮度的比重。

标准光源：能发光的物理辐射体，如灯、太阳。CIE 规定了“标准光源”来实现标准照明体的光谱分布。

标准照明体：指特定的光谱分布，这样的光谱分布不一定能用一个具体的光

源来实现。CIE“标准照明体”是由相对光谱分布来定义的，以表格的函数形式给出。

## 二. 色度学基础

为定量表示颜色，采用三刺激值是一种可行的方法，为了测得物体颜色的三刺激值，首先必须研究人眼的颜色视觉特性，测出光谱的三刺激值。实验证明不同观察者的视觉特性多少是有差别的，但是具有正常颜色视觉的人此差异是不大的，故有可能根据一些观察者进行的颜色匹配实验，将他们的实验数据加以平均，确定一组匹配等能光谱色所需的三原色数据。此数据称为“标准色度观察者光谱

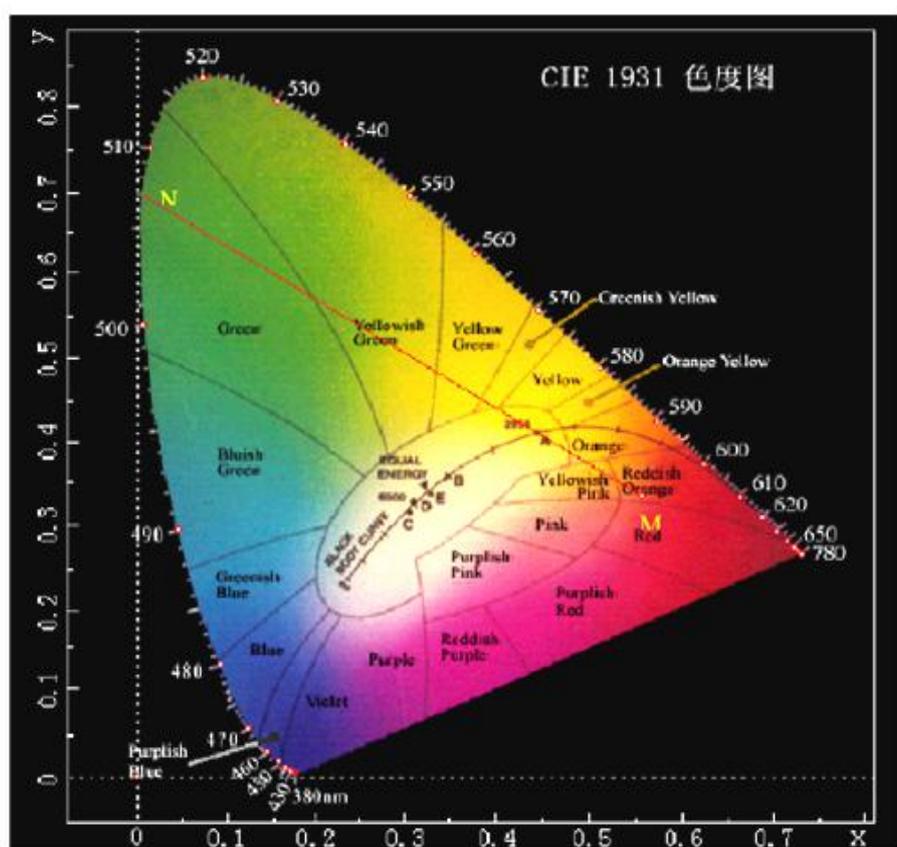


图1 CIE1931 色度图

三刺激值”，以次来代表人眼的平均颜色视觉特性。当时，不少科学工作者进行了这类实验，但是由于选用的三原色不同及确定三刺激值单位的方法不一致，因而数据无法统一。1931年在美国剑桥举行的CIE第8次会议上，统一了上述实验结果，提出了最早的推荐书—CIE标准色度观察者和色度坐标系统，并规定了三种标准光源（A, B, C），并对测量反射面的照明观测条件进行了标准化。从而建立起CIE 1931标准色度系统。

1931年CIE指定在色度测量中使用的三种标准(照明)光源： $s_A$ -工作在色温2856K的钨丝灯； $s_B$ -中午的太阳光； $s_C$ -全日平均太阳光。在说明一样品的颜色时，要指出三种基本颜色(即原色)的相对含量，就是说，把这三种颜色加在一起时，刚好与在三种标准光源之一照明下样品的颜色一样。在CIE系统中，三个基本颜色被称为“基础激励”，而一个颜色使用它的三色激励值(又称三刺激值)表示的。三个基础激励 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 相应于红(R)、绿(G)、蓝(B)。这三者却不是真正的颜色。它们只不过是说，任何颜色可以用 $\bar{x}$ 数量的 $x$ ， $\bar{y}$ 数量的 $y$ ， $\bar{z}$ 数量的 $z$ 混合起来加以说明。例如560nm的纯光谱色，在单位辐射通量时，看起来等价于 $\bar{x}=0.595$ 、 $\bar{y}=0.995$ 、 $\bar{z}=0.0039$ 组合而成的混合色，这里 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 、 $\bar{z}$ 是三色激励值。

在理论上为了定量表示颜色，采用平面直角色度坐标

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (1)$$

其中 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为三刺激值，所有的光谱色在色坐标上为一马蹄形曲线，该图称CIE1931色坐标(图61)，在图中红、绿、蓝三基色坐标为顶点，围成的三角形内的所有颜色均可以由三基色按一定的量匹配生成。任一颜色 $M(x,y)$ 的色调是由其照明光源坐标点(如 $A$ 光源)到 $M$ 点连线并延长与光谱轨迹相交于 $N$ 点， $N$ 点的光谱色调，即为主波长(或补色波长)，则 $M$ 的饱和纯度

$$P = \frac{AM}{AN} = \frac{x_M - x_A}{x_N - x_A} \quad (2)$$

$M$ 的色度纯度

$$M = \frac{AM}{MN} = \frac{x_M - x_A}{x_N - x_M} \quad (3)$$

为测量某光源(发光体)的色坐标，必须先测量其光谱组成的功率分布 $s(\lambda)$ ，然后再查表找出各光谱的三刺激值 $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ 则光源的三刺激值为：

$$X = K \sum_{\lambda} s(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta \lambda, \quad Y = K \sum_{\lambda} s(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda, \quad Z = K \sum_{\lambda} s(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta \lambda \quad (4)$$

式中 $K$ 为调整因数，它是将发光体的 $Y$ 值调整为100时得到的值。

$$K = \frac{100}{\sum_{\lambda} s(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta \lambda} \quad (5)$$

色坐标为，

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (6)$$

为测量某透射或反射样品的色坐标，必须先测量其样品的透射或反射曲线  $T(\lambda)$ ，然后再查表找出各光谱的三刺激值  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$  及参考光的功率分布  $s(\lambda)$ ，则

$$X = \sum_{\lambda} s(\lambda)T(\lambda)\bar{x}(\lambda), \quad Y = \sum_{\lambda} s(\lambda)T(\lambda)\bar{y}(\lambda), \quad Z = \sum_{\lambda} s(\lambda)T(\lambda)\bar{z}(\lambda) \quad (7)$$

该样品的色坐标为，

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (8)$$

### 【实验仪器】

WGS-9 型色度实验系统，由光栅单色仪（光谱仪），接收单元，扫描系统，电子放大器，A/D 采集单元，计算机及打印机等组成。该设备集光学、精密机械、电子学、计算机技术于一体。各部分之间的连接如下图 2 所示（各部分的连线插头均唯一，不会出现插错现象）。

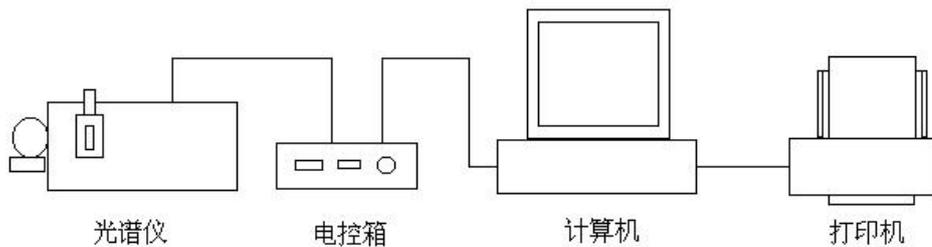


图 2 WGS-9 型色度实验系统连线图

光谱仪部分有以下几部分组成：单色器外壳，狭缝，吸收池，积分球，接

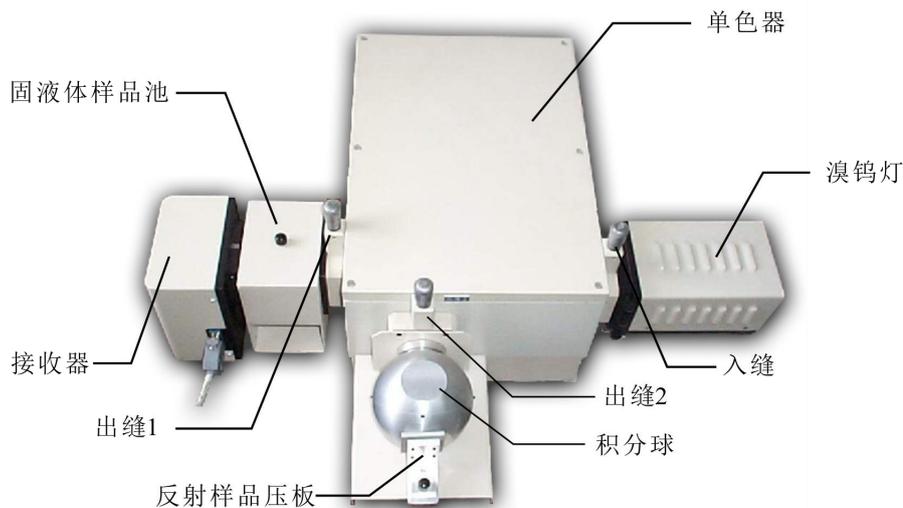


图 3 谱仪外形图

收单元，光栅驱动系统以及光学系统等。

(1) 仪器采用双出缝的方式，使得在不同模式测量时，即能有较方便的操作，又能提供足够的能量，使得在测量中，有较好的信噪比，如图 3 所示。

(2) 固/液体样品池：采用液体样品池、固体样品架以及光栏组合的方式，使得固/液体都能方便的测量，光栏的存在，使得对固体样品的大小要求较低（直径大于 5mm），如图 4 所示。

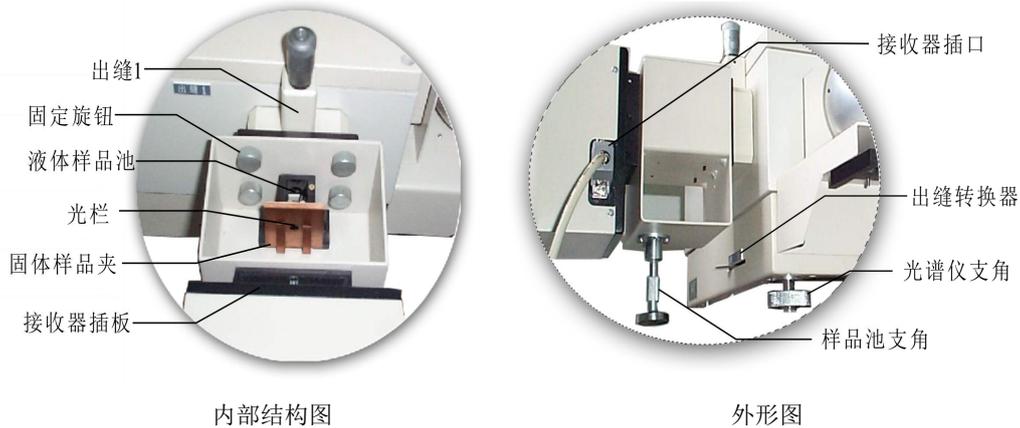


图 4 样品池

(3) 反射测量装置，如图 5 所示。

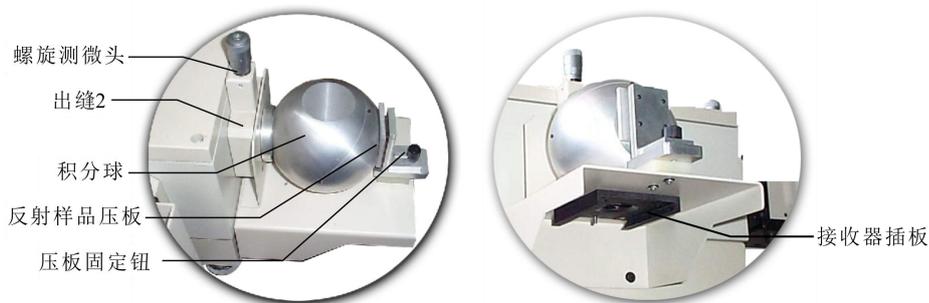


图 5 反射测量装置

(4) 仪器采用如图 6 所示“正弦机构”进行波长扫描，丝杠由步进电机通过同步带驱动，螺母沿丝杠轴线方向移动，正弦杆由弹簧拉靠在滑块上，正弦杆与光栅台联接，并绕光栅台中心回转，从而带动光栅转动，使不同波长的单色光依次通过出射狭缝而完成“扫描”。

(5) 狭缝为直狭缝，宽度范围 0-2.5mm 连续可调，顺时针旋转为狭缝宽度加大，反之减小，每旋转一周狭缝宽度变化 0.5mm。为延长使用寿命，调节时注意最大不超过 2.5mm，平日不使用时，狭缝最好开到 0.1-0.5mm 左右。

(6) 为去除光栅光谱仪中的高级次光谱，在使用过程中，操作者可根据需要

把备用的滤光片插入入缝插板上。

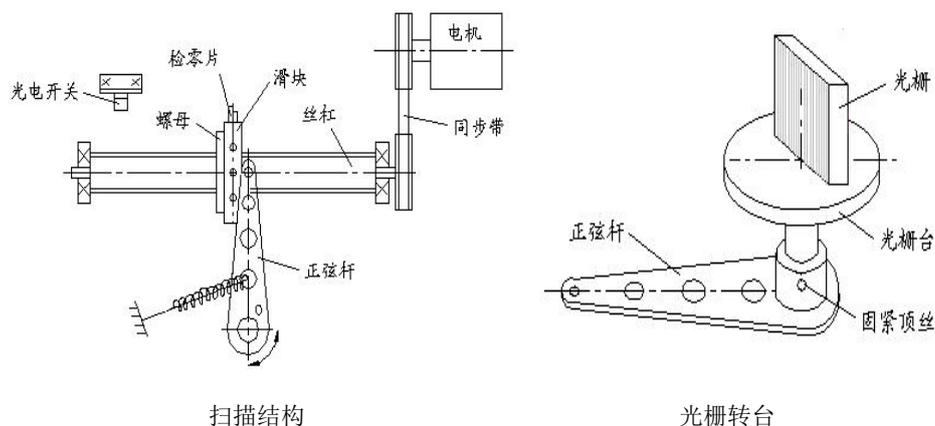


图 6 正弦机构图

(7) 电控箱：控制谱仪工作，并把采集到的数据及反馈信号送入计算机，如图 7 所示。

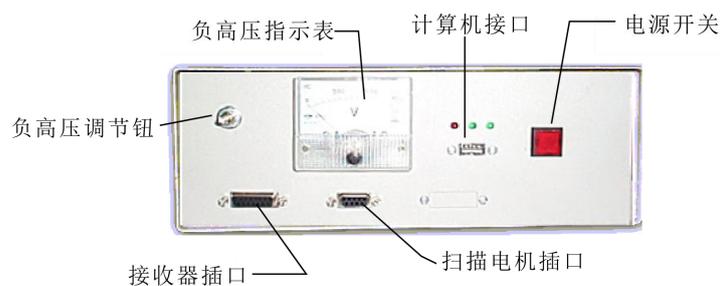
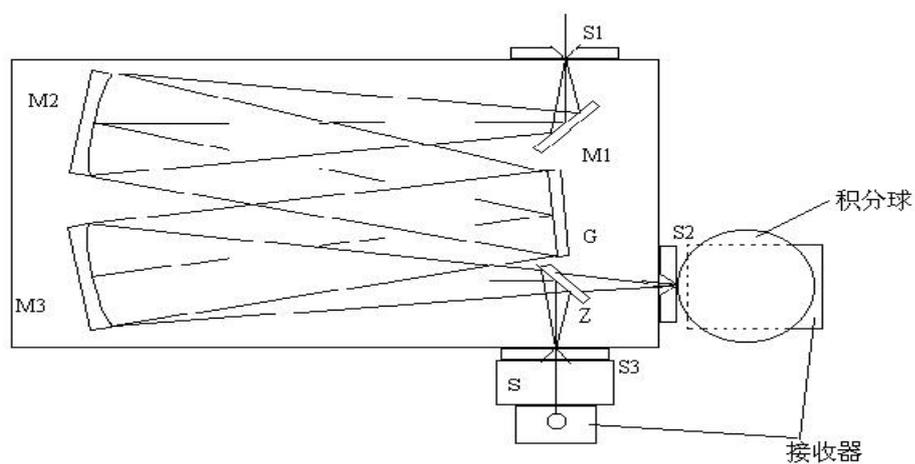


图 7 电控箱



M1-反射镜；M2-准光镜；M3- 物镜；G-平面衍射光栅；Z-转镜；  
S1-入射狭缝；S2-光电倍增管接收；S3-观察口；S-样品池

图 8 光路图

### 3. 光路系统

单色器的光路图如下图 8 所示，采用的是光栅分光系统（C-T 型）。入射狭缝、出射狭缝均为直狭缝，宽度范围 0-2.5mm 连续可调，光源发出的光束进入入射狭缝 S1，S1 位于反射式准光镜 M2 的焦面上，通过 S1 射入的光束经 M2 反射成平行光束投向平面光栅 G 上，衍射后的平行光束经物镜 M3 成象在 S2 上或 S3 上（通过转镜调节）。

#### 4. 仪器使用说明

##### (1) 开机

确认各条信号线及电源线连接好后，按下电控箱上的电源按钮，仪器正式启动。

##### (2) 透过率及发光体测量的使用方法

如果当前接收器不是放在出缝 1 端，请关闭电源，把接收器移到出缝 1 端，并把转镜打到出缝 1 端。当放置样品时，打开样品池盖，把有液体样品的比色皿放入液体样品池或把固体样品直接插在固体样品架上，然后开机测量(当测量透过率时，要先放空白样品做透过基线)，光路图如下图 9 所示。

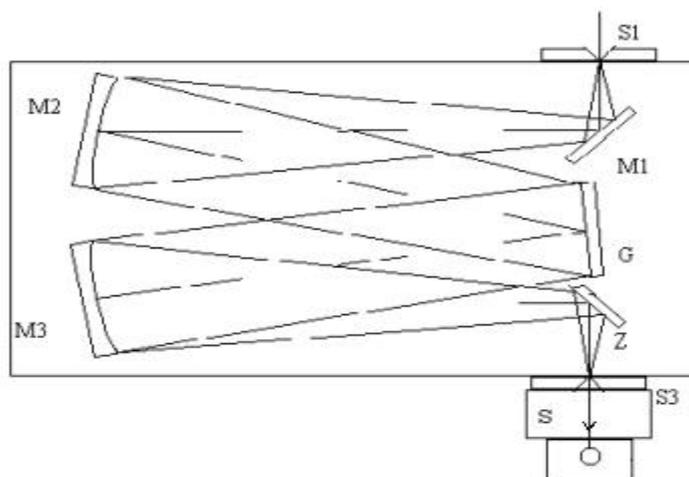


图 9 透过率测量光路图

##### (3) 反射测量的使用方法

如果当前接收器不是放在出缝 2 端，请关闭电源，把接收器移到出缝 2 端，并把转镜打到出缝 2 端。当放置样品时，拉开样品压板，把样品放在积分球的样品反射口处，并压上压板，然后开机测量（当测量反射率前，要先放标准白板做反射基线），光路图如下图 10 所示。

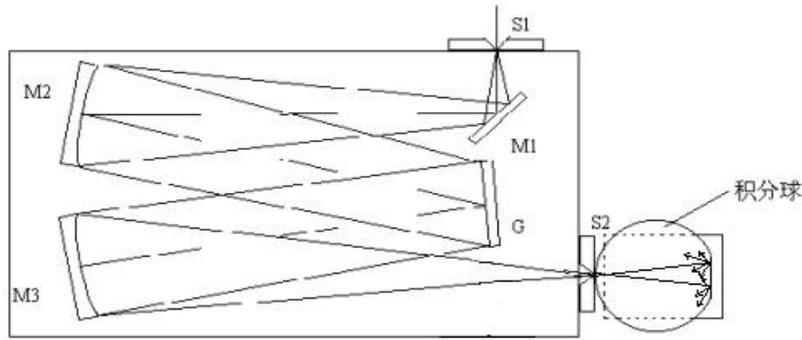


图 10 反射测量光路图

#### (4) 关机

先检索波长到 400nm 处，使机械系统受力最小，然后关闭应用软件，最后按下电控箱上的电源按钮关闭仪器电源。

### 【实验内容】

#### 1. 测量透射样品的色度

(1) 开仪器电源及光源，选择出射狭缝 1，启动计算机并启动控制软件。

(2) 在软件参数设置区，将电机延时定为 10ms，采集次数定为 300 次，选择“透过基线”工作模式，寄存器 1。样品池置空，调节负高压（约为 300V）及狭缝，使测量到的透射基线比较大（一般在 20%~40%），但信号又没溢出（此步骤可能要反复做几遍才能得到理想的结果）。

(4) 上面确定的条件不变的情况下，测量空气的透过率曲线，定出透射基数。

(5) 模式选择为“透过率”，放入红色滤光片，选择寄存器 2，测量其透射率曲线。

(6) 打开“色度计算”窗口，选择寄存器 2 和参照光源后，计算样品在参照光源下的色度坐标及其它参数（光源是工作在色温 2856K 的钨丝灯，所以选择标准 A 光源），数据填入自拟表格。

(7) 将红色滤光片分别换成绿、蓝两种滤光片，对应寄存器 3, 4，测量其透射率曲线，重复步骤(6)计算样品在参照光源下的色度坐标及其它参数。在更换样品时若没有改变电机延时和采集次数，则不需要重测透射基线

#### 2. 反射样品的测量方法

(1) 在开机的情况下，选择出射狭缝 2，在参数设置区，将电机延时定为 10ms，采集次数定为 300 次，选择“反射基线”工作模式，寄存器 1。

(2) 将标准白板放入反射测量样品池，调节负高压（450V 左右）及狭缝，使测量到的反射基线比较大（一般在 20%~40%），但信号又没溢出（此步骤可能要反复做几遍才能得到理想的结果）。

(3) 上面确定的条件不变的情况下，使用标准白板做反射基线。

(4) 模式选择为“反射率”，将白板拿出，放入样品 1（蓝色纸片），在寄存器 2 中测量样品的反射率。

(5) 打开“色度计算”窗口，选择寄存器 2 和参照光源后，计算该样品在参照光源下的色度坐标及其它参数（选择标准 A 光源）。

(6) 更换样品 2（红色纸片），选择寄存器 3，测量它的反射率和其他参数。