

## 【特别提示】

**第一次实验**，所有同学都预习[硅光电池特性](#)实验

**第二次实验**，所有同学都预习[RGB 三基色配色](#)实验

## 【实验要求】

### 1. 课前预习

- (1) 认真阅读实验讲义
- (2) 不写预习报告，完成在线测验题

请点击预习测试题链接：<https://ks.wjx.top/vj/rrRhmZT.aspx> 或扫描二维码作答



### 2. 实验阶段

- (1) 实验仪器：了解仪器的功能，掌握仪器的使用；轻拿轻放、爱护实验设备。
- (2) 实验数据：如实、规范记录实验数据；不得篡改、抄袭。
- (3) 数据签字：实验完毕，原始数据须经指导老师签字；并整理实验设备。
- (4) 出门测试：完成实验后，扫描实验室里提供的二维码在线填写出门测试题。

### 3. 实验报告

- (1) 简述实验原理、基本公式、原理图等，篇幅 1 页。
- (2) 提供原始签字实验数据
- (3) 数据处理：按实验要求处理数据、绘图、分析与讨论等。
- (4) 思考题：回答思考题。

# RGB 配色实验

## 【实验目的】

- (1) 了解色度学的相关知识
- (2) 理解 LED 发光原理与基本特性
- (3) 掌握色光相加混色规律

色度学是研究颜色度量与评价方法的一门学科，是颜色科学领域的一个重要部分。色度学最早开创于牛顿的颜色环概念。19 世纪，格拉斯曼 (Grassmann)、麦克斯韦 (Maxwell)、亥姆霍兹 (Helmholtz) 等对色度学的发展做出了巨大的贡献，吉尔德 (Guild)、贾德 (Judd) 等科学家的研究奠定了现代色度学的基础。物体颜色的定量度量涉及到观察者的视觉生理、照明条件等许多因素，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，称为 CIE 标准色度系统，构成了近代色度学的基础。从 1931 年 CIE 色度学系统建立以来，色度学在工业、农业、科学技术和文化事业等部门获得广泛应用，指导着彩色电视、彩色摄影、彩色印刷、染料、纺织、造纸、交通信号和照明技术的发展和应用。

## 【实验原理】

自然界中人眼所能观察到的绝大多数颜色，都可以由三种相互独立的基本颜色按一定的比例混合得到；相反，自然界中的任意一种颜色又可以被分解为不同比例的相互独立的三种基色。所谓“相互独立”的三基色，是指三中基色中的任意一种颜色都不能由其他两种颜色混合产生，即三基色线性无关。三基色之间的比例，直接决定混合色的色调和色饱和度，混合比例相同时，色调是相同的。图 1 是将三种不同亮度的基色光同时投射到一个表面上合成不同彩色。

- 红色+绿色=黄色
- 绿色+蓝色=青色
- 蓝色+红色=紫色
- 红色+绿色+蓝色=白色
- 红色+青色=白色
- 绿色+紫色=白色
- 蓝色+黄色=白色
- 改变三束光的强度，可得到各种常见的彩色光。

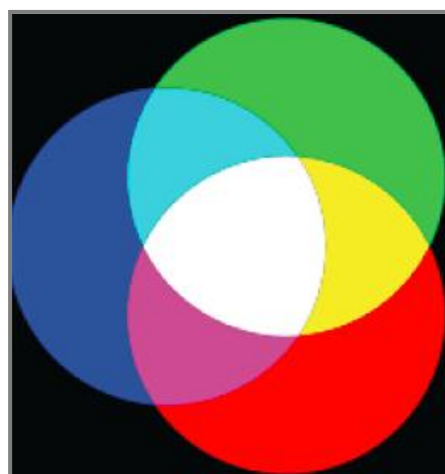


图 1 相加混色图

对颜色的定量表述有多种系统，如用色卡表述的孟塞尔 (Munsell) 表色系统、国际照明委员会 (CIE) 表色系统等，各系统之间在一定条件下可以相互转换。本实验主要介绍常用的 CIE 表色系统，

它是基于相加混色系统发展而来的。

### 1. 颜色匹配方程

在颜色匹配实验中，若以（C）代表被匹配颜色的单位，（R）、（G）、（B）代表产生混合色的红、绿、蓝三基色的单位。 $R, G, B, C$  分别代表红、绿、蓝和被匹配色的数量，则颜色方程表示为：

$$C(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (1)$$

式中，“ $\equiv$ ”符号表示视觉上相等，即颜色匹配。

### 2. 三刺激值

在颜色匹配实验中，与待配色达到色匹配时所需要三基色的数量，称为三刺激值，即颜色匹配方程（1式）的  $R, G, B$  值。一种颜色与一组  $R, G, B$  数值相对应，颜色可以通过三刺激值来定量表示。三刺激值的单位（R）、（G）、（B）不用物理量为单位，而是选用色度学单位（也称三 T 单位）。其确定方法是：选一特定白光（W）作为标准，用颜色匹配实验选定的三基色光（红、绿、蓝）相加混合与此白光（W）相匹配；如达到匹配时分别测得的三基色光通量值（R）为  $I_R$  流明、（G）为  $I_G$  流明、（B）为  $I_B$  流明，则比值  $I_R : I_G : I_B$  定义为色度学单位（即三刺激值的相对亮度单位）。若匹配  $F_C$  流明的（C）光需要  $F_R$  流明的（R）， $F_G$  流明的（G）和  $F_B$  流明的（B），则颜色方程为：

$$F_C(C) \equiv F_R(R) + F_G(G) + F_B(B) \quad (2)$$

式中，各单位以 1 流明表示。若用色度学单位来表示，则方程为：

$$C(C) \equiv R(R) + G(G) + B(B) \quad (3)$$

式中， $C=R+G+B$ ， $R=F_R/I_R$ ， $G=F_G/I_G$ ， $B=F_B/I_B$ 。

### 3. CIE 1931-RGB 系统

如果色光是单一波长的光，那么对应着单一波长色光的三刺激值（ $R, G, B$ ）。如果色光的波长遍及可见光范围，则得到刺激值按波长的变化，称为光谱三刺激值，它反映了人眼对光与色转换按波长变化的规律。为了将人眼对颜色感知的详细数据做一个标准化，CIE 在 1931 年规定红、绿、蓝三基色的波长分别为 700nm、546.1nm、435.8nm。当这三基色光的相对亮度比例为 1.0000：4.5907：0.0601 时就能匹配出等能白光，CIE 选取这一比例为红、绿、蓝三基色的单位量，即（R）：（G）：（B）=1：1：1。

如果将各单色光都保持相同的辐射能量（对应的光谱分布称为等能光谱），则得到的三刺激值称为光谱三刺激值，用  $\bar{r}$ ， $\bar{g}$ ， $\bar{b}$  表示。光谱三刺激值又称为颜色匹配函数，数值只取决于人眼的视觉特性。匹配方程表示为：

$$C_\lambda \equiv \bar{r}_\lambda(R) + \bar{g}_\lambda(G) + \bar{b}_\lambda(B) \quad (4)$$

任意色光都可以看成是不同单色光的混合，故光谱三刺激值是颜色定量测量的基础。

如果预先测得单色光的光谱三刺激值，则能计算出任意色光相应的三刺激值，计算方法是将待测光的光谱分布函数  $\varphi(\lambda)$ ，按波长加权光谱三刺激值，得出每一波长的三刺激值，再进行积分，就得出该待测光的三刺激值：

$$\begin{aligned} R &= k' \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G &= k' \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B &= k' \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $k'$  为常数，积分的波长范围为可见光范围内（380nm~760nm）。

一个单位颜色（C）的色坐标只取决于三基色的刺激值各自在  $R+B+C$  总量中的相对比例——色品坐标，用符号  $r$ 、 $g$ 、 $b$  表示。色品坐标与三刺激值之间的关系如下：

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R+G+B} \\ g &= \frac{G}{R+G+B} \\ b &= \frac{B}{R+G+B} \end{aligned} \quad (6)$$

且  $r+g+b=1$ 。

#### 4. CIE 1931-XYZ 色度系统

虽然 CIE 1931-RGB 系统的色匹配函数  $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$  可用于色度学计算，但匹配函数会出现负值，使用不便且不易理解。CIE 在 1931 年又确定了新的假想原色（X）、（Y）、（Z），建立了 XYZ 色度系统，称为 CIE1931 标准色度系统。

CIE 1931-XYZ 色度系统规定（X）、（Z）两原色只代表色度，没有亮度，光度量只与三刺激值 Y 成比例。XYZ 色度系统的色匹配函数为  $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ ，如图 2 所示。

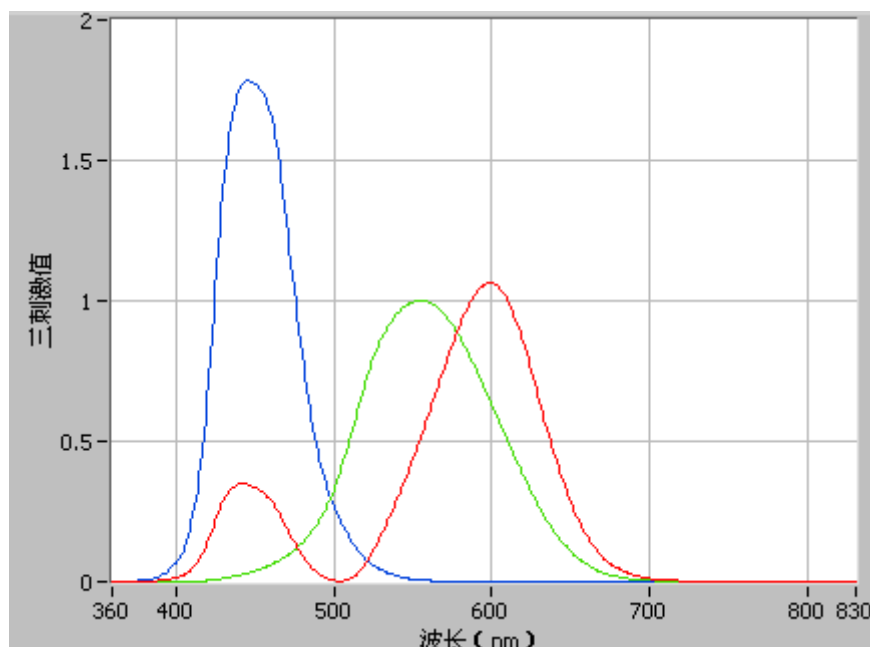


图 2 1931CIE-XYZ 标准色度观察者光谱三刺激值

CIE 1931- $RGB$  色度系统中的三刺激值  $R$ 、 $G$ 、 $B$  与 CIE 1931- $XYZ$  色度系统中的三刺激值  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  可以按一定的数学关系式进行换算，同样色度坐标  $r$ 、 $g$ 、 $b$  与  $x$ 、 $y$ 、 $z$  间也可相互转换。要计算某颜色的三刺激值时，可以参照  $RGB$  色度系统中的做法，由下式来计算得出：

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\varphi(\lambda)$  为颜色刺激函数， $k$  为归一化常数：

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (8)$$

对于自发光物体， $\varphi(\lambda) = S(\lambda)$ ；对于反射光物体， $\varphi(\lambda) = R(\lambda) \cdot S(\lambda)$ ；对于透光物体， $\varphi(\lambda) = T(\lambda) \cdot S(\lambda)$ 。其中， $S(\lambda)$  为照明光源的相对光谱功率分布； $R(\lambda)$  为物体的光谱反射比； $T(\lambda)$  为物体的光谱透射比。

由三刺激值  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  可得到  $XYZ$  色度系统的色品坐标：

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (9)$$

且  $x + y + z = 1$ 。

#### 4. 发光二极管

发光二极管，简称 LED，它是一种直接将光能转化为电能的半导体器件。LED 具有结构简单、重量轻、体积小、耗电少、寿命长、环保与响应快等优点，被公认为继白炽灯、荧光灯、节能灯等之后的第四代照明光源。LED 已逐渐应用于照明、信号灯、背光源、通讯、医疗和农业等领域，未来将成为通用照明和特殊照明的主流器件。LED 是由 III-V 族化合物（例如 GaAs、GaP 与 GaAsP）半导体材料构成，其核心是 PN 结。它具有一般 PN 结的正向导通，反向截止、击穿特性。LED 的工作电压一般在 1.5-3.5 V，在正向电压下，电子由 N 区注入 P 区，空穴由 P 区注入 N 区，从而结区出现不平衡状态，这些注入的电子与空穴在 PN 结区发生复合，发射光子。此外，一些电子被无辐射中心俘获，能量以热能形式散发，称为非辐射复合。辐射复合相对于非辐射复合比例越大，光量子效率越高。理论和实践证明，发射光子的能量与材料能隙有关。

$$\lambda = \frac{1240}{E_g} (nm) \quad (10)$$

式中， $E_g$  的单位为电子伏特 (eV)。因不同的材料，电子和空穴所占的能级也有所不同，能级差影响电子和空穴复合后发射光子的能量，从而产生不同波长的光。若能产生可见光 (380~760 nm)，半导体材料的  $E_g$  应在 3.26~1.63 eV 之间。

##### 【实验仪器】

直流电源（取 3.0V）、三色 LED（负极管脚公用）、毫安表、数字万用表（只用电压档、欧姆档、二极管检测档）、硅光电池、电阻箱、白板、开关、导线、分压盒

##### 【基础内容】

#### 1. LED 的伏安特性测量

按图 3 接线，在  $I \leq 100mA$  内，分别测量红、率、蓝 LED 的正向电压 ( $U$ ) 与电流 ( $I$ ) 关系，绘制红、率、蓝 LED 的  $I-U$  特性曲线。

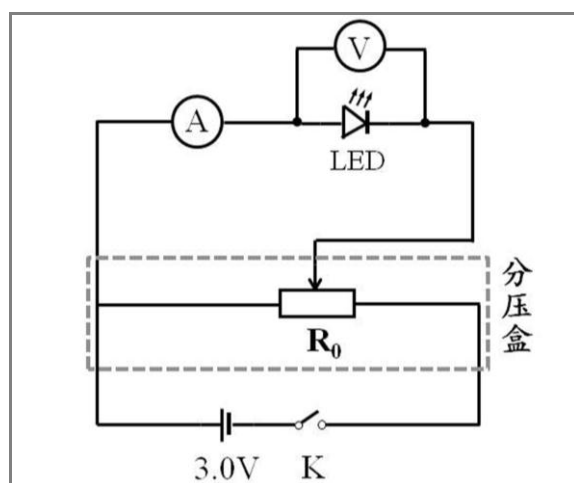
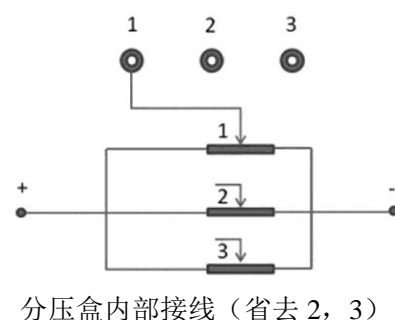


图 3 LED 伏安特性测量



## 2. LED 的发光波长测量

基于伏安特性曲线，计算红、绿、蓝 LED 的发光中心波长，叙述测量原理和方法。

### 【提升内容】

### 1. LED 的光强与电流关系

在  $I \leq 100\text{mA}$  内，测量绿色 LED 的相对光强 ( $L$ ) 与电流 ( $I$ ) 的关系，绘制绿色 LED 的  $L$ - $I$  特性曲线，给出近似函数关系。

( $L$  定义：LED 到光电池距离约为 20 cm 时，光电池输出电压值)。

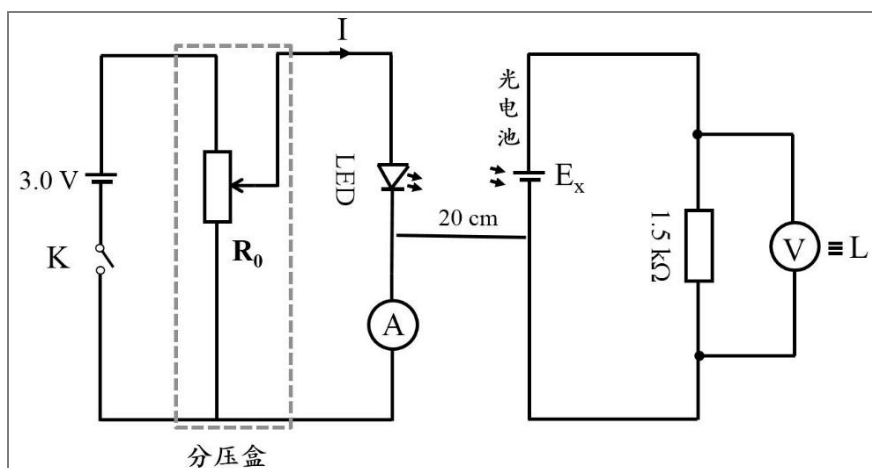


图 4 LED 发光强度测量

### 【进阶内容】

### 1. 加法混色实验

按图 5 所示，将红、绿、蓝 LED 光源作为 RGB 三基色，相加混合法配出指定色卡的颜色。

调整白屏，使 3 个 LED 光斑在白屏上呈同心圆。

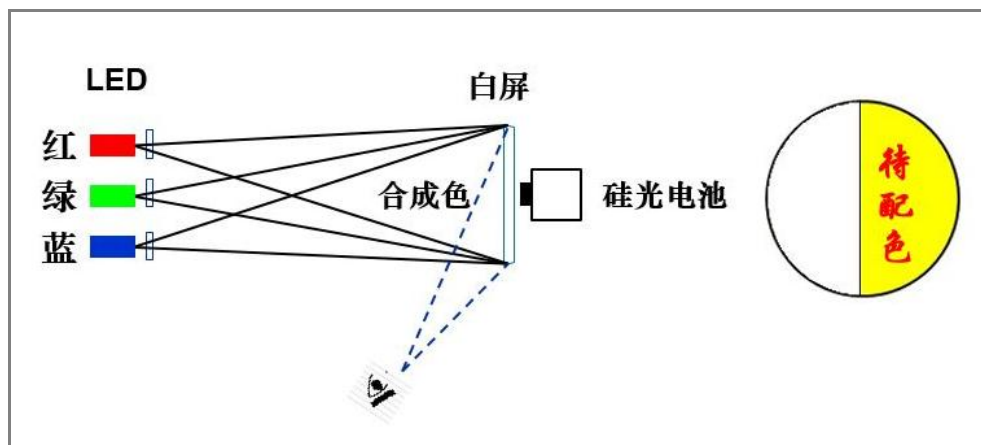


图 5 RGB 配色示意图

(1) 按图 6 接线，调节分压盒，分别采用两个 LED，在  $I \leq 100\text{mA}$  内，配出标准色卡的黄色、青色、紫色，将光电池放置于白屏处，测量两个 LED 的及配色的相对光强  $L$ ，给出两个基色的光强比。

( $L$  定义：光电池输出电压值；提示：需扣除背景光强)

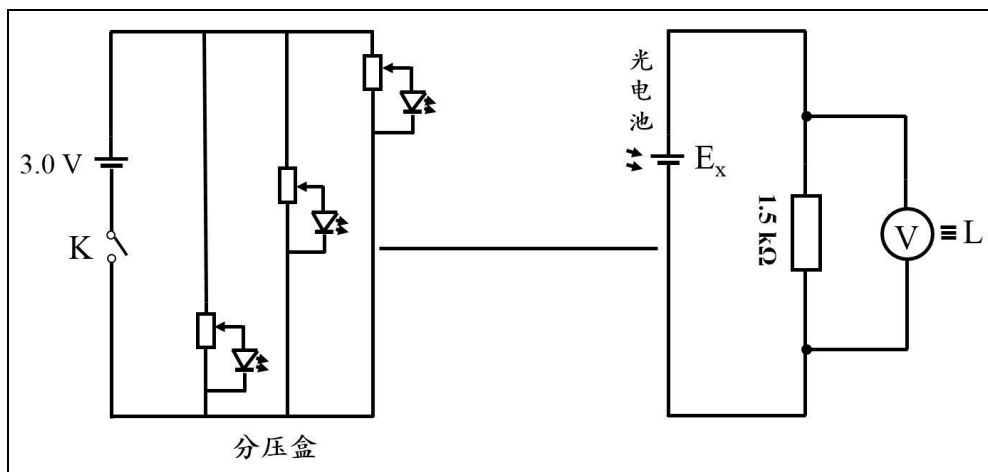


图 6 RGB 配色相对光强测量

(2) 按图 6 接线，调节分压盒，采用三个 LED，在  $I \leq 100\text{mA}$  内，配出标准色卡的白色，将光电池放置于白屏处，测量三个 LED 的及配色的相对光强  $L$ ，给出三个基色的光强比。

( $L$  定义：光电池输出电压值；提示：需扣除背景光强)

### 【高阶内容】

#### 1. 减法混色实验

按图 7 减法混色，利用溴钨灯或三基色 LED 配出白色光，在光路中放置不同的滤色片，观察透过滤光片的颜色变化；总结减法混色规律。

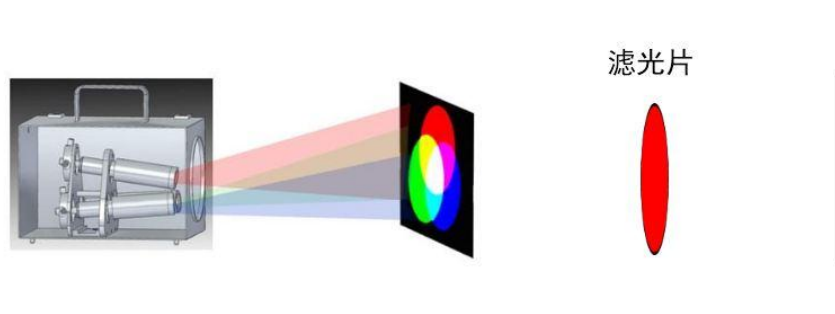


图 7 相减混色示意图



### 【思考题】

1. 什么是人眼的视敏特性？用什么函数度量？
2. 甲光 R:G:B 为 1:2:3；乙光 R:G:B 为 2:4:6，甲光和乙光有什么区别？
3. 色光混合及色料混合的基本规律？色料三原色的补色分别是什么颜色？

### 【注意事项】

1. 勿打开 LED 机箱，随意调整 LED；
2. 测量 LED 光强特性时，务必关闭照明光源；
3. 勿将直流稳压电源的输出端直接接到 LED 电极两端；