

## 色度学

### 1.1 色彩的知识

人的视觉器官在色彩刺激作用引起大脑的心理反应,即视觉器官受不同波长光线的物理刺激的同时产生色彩刺激信号并传给大脑,大脑将其接受的色彩信号不断地译成色彩概念,并与储存在大脑里的视觉经验结合起来,加以解释形成了颜色知觉。颜色分非彩色和彩色,非彩色是指白色、黑色的各种深浅不同的颜色。彩色是指黑白系列以外的各种颜色。

由于感情效果和对客观事物的联想,色彩对视觉的刺激产生了一系列的色彩知觉心理效应。这种效应随着具体的时间、地点、条件(如外观形状、自然条件、个人爱好、生活习惯、形状大小及环境位置等)的不同而有所不同,一般来讲色彩可以产生温度感、距离感、重量感、空间感、阴暗感等。

### 1.2 色度学

色度学是研究人眼的颜色视觉规律、颜色测量理论与技术的学科,它是一门以光学、视觉生理、视觉心理、心理物理等学科为基础的综合性科学。对于颜色科学的研究,国内受到越来越广泛的重视,国外也是非常热门的学科,它在许多技术领域都有重要应用。

经过生理医学的研究证明,在正常人眼的视网膜上有三种锥体感光细胞——红、绿、蓝三种视色素,相当于在人眼的视网膜上作用着不同光谱响应度的三种接收器,其光谱响应度的最大值分别在红光、绿光和蓝光区域。由于各种颜色的光都可以由红、绿、蓝三种颜色的光按一定的比例混合而得到,则将红、绿、蓝称为三原色。当光照射到人眼的视网膜上后,可以同时引起三种感光细胞的反应。而波长不同时,反应的程度不同,人眼就产生不同的颜色感觉。

当长波端的光照射人眼时,由于蓝、绿感光细胞的反应程度相对于红光小很多,所以综合反应人眼感觉为红色。如短波端的光照射人眼时,蓝光感光细胞反应强烈,其它两种反应很小时,综合反应为蓝色。当只有红、绿光成分时,如果引起人眼的反应相同或相似时,综合反应结果为黄色,不同时为棕色。如以蓝光反应为主,相应红光反应较小,并且无绿光反应时,综合反应为紫色。

当引起红、绿、蓝三种感光细胞的反应相同时,则定会使人眼的颜色感觉为白

色。黑色则是三种感光细胞均不反应时的感觉。总的亮度感觉则为三种感光细胞中每种细胞所提供的亮度感觉之和。图 2-15 为三种感光细胞的反应曲线。横坐标为波长，纵坐标为相对响应度，其中蓝色曲线的纵坐标放大了 20 倍。

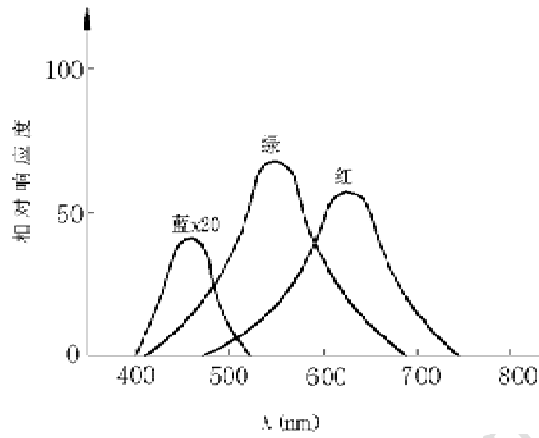


图 2-15 三种感光细胞的反应曲线

概念：下图为 1000W 钠铊铟灯（金卤灯）的相对光谱图，从 2-16 图可见，三条主要线状光谱的峰值波长约 450nm 的蓝光谱，540nm 的绿光谱和 590nm 的红色光谱。它们的光谱功率分布是高度不连续的线状光谱，因红、绿、蓝三光谱线引起人眼的反应相同，所以它呈现白光。由以上讨论，我们可以得出以下结论：任何一种颜色的光都可由三原色按一定的比例混合而得到，当光射入人眼后，三种颜色的光分别作用于视网膜上的三种接收器上而产生反应，反应的综合结果，人眼即产生颜色感觉。

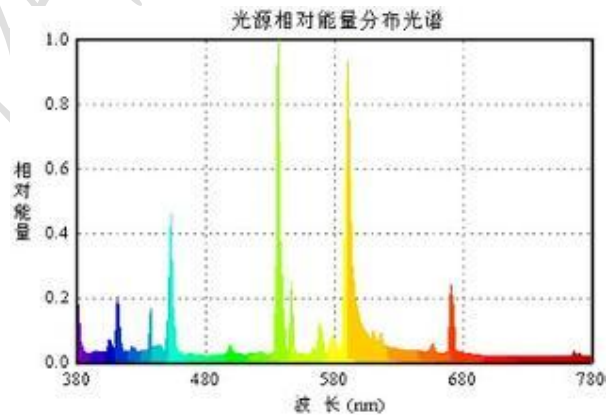


图 2-16 1000W 金卤灯光谱图

1.2.1 在色度学中，某种颜色的获得是由三原色按一定的比例混合而得到的。在颜色视觉领域里，通常由色调、明度、饱和度(纯度)三个参数来描述彩色特性。见图 2-17 三基色混色图。



图 2-17 三基色混色图

(1) 色调：彩色彼此相互区分的一种特性。在可见光谱中，红、橙、黄、绿、青、蓝、紫以及许多中间过渡波长，在人眼的视觉上都表现为各种色调。红色一般指 610nm 以上的光谱区域，570—590nm 的区域为黄色，500~

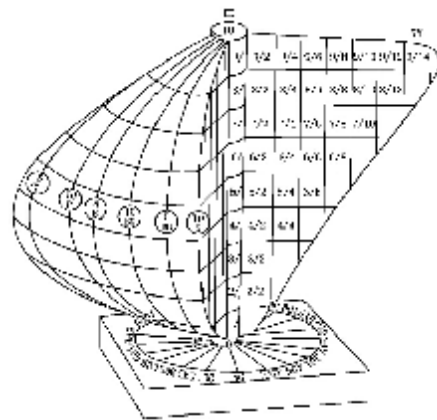
700nm 为绿色，500nm 以下为蓝色或蓝绿色，紫色为 400nm 附近。其余是介于中间的颜色。光源的色调是由其辐射的光谱组成对人眼所产生的感觉所决定的。而物体的色调，除与照明光源的光谱成分有关以外，还与物体的光谱反射和透射特性有关。

(2) 明度：人眼对物体明暗的感觉。明度的高低同样与两个因素有关，对于发光的光源来说，亮度越大，明度越高。而不发光的彩色物体，在照明光源一定的情况下，光谱反射比或光谱透射比越高，则明度越高，或者说引起人眼明暗感觉的程度大。明度除和亮度有关外，还受色调和背景的影响。如相同的能量，绿光引起人眼的视觉感觉强度大，同一彩色物体，亮背景的明度远高于在暗背景的明度。

(3) 饱和度：指彩色的纯结性，也称纯度。饱和度是指彩色和非彩色的差别，这种差别是指与同亮度的白光相比较，以避免将亮度的差别与彩色的差别混在一起。彩色是指黑白系列以外的各种颜色。非彩色是指黑色，白色和各种深浅不同的灰色。

1.2.2 孟塞尔颜色立体示意模型（图 2-18）中。将颜色的三个基本特性 H 表示色调、V 表示明度，C 表示饱和度。在模型的中央是一根表示明度的轴线，它代表无彩色

图 2-18 孟塞尔颜色立体示意图



白黑系列中性色，白色在顶部，黑色在底部，将亮度因数等于102的理想白色的明度V定为10，而把亮度因数等于0的理想黑色的明度V定为0。这样孟塞尔明度值V共分成由0~10共11个在感觉上等距的等级。

图 2-19 所示是孟塞尔颜色立体的水平剖面图，每一个水平剖面对应于一个明度值，水平剖面上的各个方向代表不同的色调。图中画出了 5 种主要的色调：红 (R)、黄 (Y)、绿 (G)、蓝 (B) 和紫 (P)。还画出了 5 种中间色调：黄红 (YR)、绿黄 (GY)、蓝绿 (BG)、紫蓝 (PB) 和红紫 (RP)。每一色调又分成从 1~10 的 10 个等级，并规定主要色调和中间色调的等级值都为 5。样品色沿 498 光源原理与设计径向的变化，则代表饱和度的变化。在孟塞尔系统中称为孟塞尔彩度，它表示具有相同明度值的颜色偏离中性灰色的程度。彩度也可分成许多视觉上相等的等级，在圆心彩度为 0，离圆心越远，彩度越大。应注意各种颜色的最大彩度是不一样的，这从图 2-19 可以清楚地看出任何颜色都可以用色调、明度和彩度加以标定，标定的

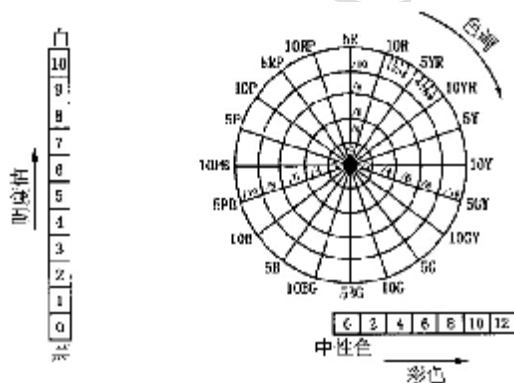


图 2-19 孟塞尔颜色立体的水平剖面  
方法是先写出色调 H，然后写明度值 V，在斜线后再写彩度 C 则

$$HV/C = \text{色调明度} / \text{彩度}$$

HV/C 就是颜色的标号。例如标号为 5Y8/12 的颜色，其色调为黄 (Y)，明度值为 8，彩度为 12，这是一种比较明亮、具有较高饱和度的黄色。

当物体对可见光中各种波长的反射均在 80% 以上时，此物体呈现为白色，当 100% 反射时，称为纯白色物体。实际上，白色与纯白色物体均与照明光源的光谱功率分布(在可见区)有关。纯黑色则是 100% 的吸收可见光。在日常生活中，纯白色和纯黑色物体是一种理想的颜色，在自然界中是找不到这样的物体的，也无法在实验室中获得。

1.2.3 在可见光谱中，各种波长的单色光是最纯的彩色。如在单色光中掺加白光，则纯度将下降。同样，物体色的饱和度与其本身的光谱反射特性有关，如反射光的波长范围很窄，其它波长的光全部吸收掉了，则说明物体的颜色纯度很

高。对于非彩色，它们只有明度的差别，而无色调和饱和度等特性。

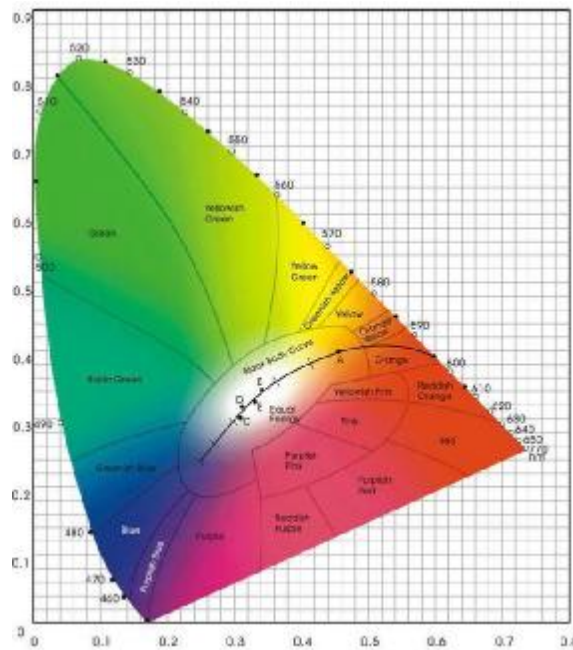
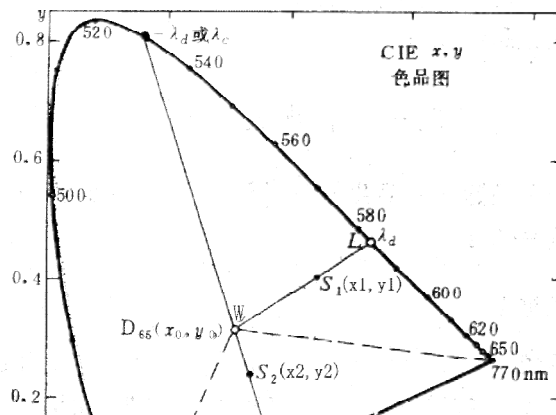


图 2-20 CIE1931 色度图

根据色度学原理，所有颜色均可由红、绿、蓝三种颜色匹配而成，这三种颜色称为三基色。为了定量地表示颜色，常用的方法是采用“三刺激值”，即红、绿、蓝三基色的量，分别用 X、Y、Z 表示。

图 2-20 称为 CIE1931 色度图，在图中红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三基色坐标点为顶点，围成的三角形内的所有颜色的所有颜色可以由三基色按一定的量匹配而成。

1.2.4 国际照委会制定的 CIE1931 色度图如图 2-20。色度图中的弧形曲线上的各点是光谱上的各种颜色即光谱轨迹，是光谱各种颜色的色度坐标。红色波段在图的右下部，绿色波段在左上角，蓝紫色波段在图的



左下部。图下方的直线部分，即连接 380nm 和 770nm 的直线，是光谱上所没有的、由紫到红的系列。

图 2-20 主波长和色纯度

### (1) 主波长

任何一个颜色都可以看作为用某一个光谱色按一定比例与一个参照光源（如 CIE 标准光源 A、B、C 等，等能光源 E，标准照明体 D65 等）相混合而匹配出来的颜色，这个光谱色就是颜色的主波长。颜色的主波长相当于人眼观测到的颜色的色调（心理量）由图 2-20 中心的 W 点（E 光源  $x=0.3333$ ,  $y=0.3333$ ）作为参照光源来计算决定颜色的主波长。设色度图上有一颜色  $S_1$  点，由 W 点通过点  $S_1$  画一直线至光谱轨迹 L 点（580nm）， $S_1$  点的主波长即为 580nm。

### (2) 补波长

由图 2-20 从底部线段上的任一点通过 W 点画一直线抵达对侧光谱轨迹的一点，这个非光谱色就用该光谱颜色的补波长来表示。设色度图上有一颜色  $S_2$  点，先由 W 点通过点  $S_1$  画一直线至光谱轨迹 P 点，由于底部光谱轨迹线没有对应的主波长，所以需由 PW 的反向延伸至光谱轨迹线上侧，作为  $S_2$  的补波长- $\lambda_a$  或  $\lambda_c$ 。

### (3) 色纯度

由图 2-20 此处光谱的颜色即  $S_1$  的色调（橙色）。 $S_1$  点位于从 W 到 580nm 光谱轨迹的 55% 处，所以它的色纯度为 55%（色纯度% =  $(WS / WL) \times 100\%$ ）。某一颜色离开 W 点至光谱轨迹的距离表明它的色纯度，即饱和度。颜色越靠近 W 点越不纯，越靠近光谱轨迹越纯。

### (4) 色温 符号 K 单位开尔文 (k)

当光源所发出的光的颜色与“黑体”在某一温度下辐射的颜色相同时，“黑体”的温度就称为该光源的色温。“黑体”的温度越高，光谱中蓝色的成分则越多，而红色的成分则越少。

不同的色温会引起人们在情绪上不同的反应，我们一般把光源的色温分成三类：

(a)暖色光：暖色光的色温在 3300K 以下，暖色光与白炽灯光色相近，红光成分较多，给人以温暖、健康、舒适的感觉，适用于家庭、住宅、宿舍、医院、宾馆等场所，或温度比较低的地方。

(b)暖白光：又叫中间色，它的色温在 3300K—5500K 之间。暖白光光线柔和，使人有愉快、舒适、安祥的感觉，适用于商店、医院、办公室、饭店、餐厅、候车室等场所。

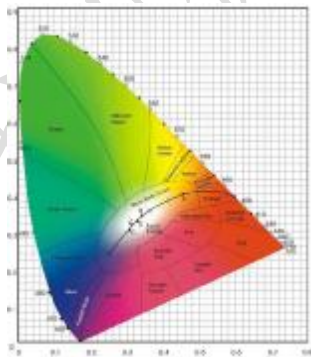
(c)冷色光：又叫日光色，它的色温在 5500K 以上，光源接近自然光，有明亮的感觉，使人精力集中，适用于办公室、会议室、教室、绘图室、设计室、图书馆的阅览室、展览橱窗等场所。

#### (5) 相关色温

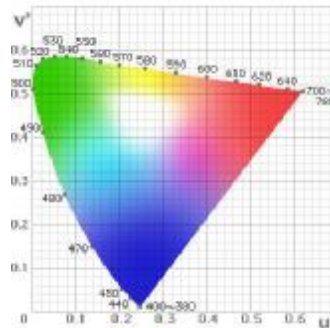
一种广义的色品与某一温度下完全辐射体的色品最接近的完全辐射体的温度称为光源的相关色温，亦即在 CIE 色品图上色差距离最小的完全辐射体的温度。

#### (6) 色品坐标

类似于  $(x, y)$  在直角坐标系上的坐标，色品坐标指颜色在标准色度图上的位置，目前 CIE 规定了多种颜色表示方法及颜色表示坐标系，常见的有 CIE 1931(见图 2-21)、CIE1964、CIE 1976(见图 2-22)等。



2-21 CIE 1931 色度图



2-22 CIE 1976 色度图

#### (7) 显色性

照明光源对物体色表的影响，该影响是由于观察者有意识或无意识地将它与参比光源下的色表相比而产生的。

光源对物体颜色呈现的程度称为显色性，也就是颜色的逼真的程度，显色性高的光源对颜色的表现较好，我们所看到的颜色也就较接近自然颜色，显色性低的光源对颜色的表现较差，我们所看到的颜色偏差也较大。

为何会有演色性高低之分呢？其关键在于该光线之分光特性，可见光之波长在 380nm 至 780nm 之范围内，也就是我们在光谱中见到的红、橙、黄、绿、青、蓝、紫光范围，如果光源所放射的光之中所含的各色光的比例与自然光相近，则我们眼睛所看到的颜色也就较为逼真。

我们一般以显色指数为表征显色性。标准颜色在标准光源的辐射下，显色指数定为 100。当色标被试验光源照射时，颜色在视觉上的失真程度，就是这种光源的显色指数。显色指数越大，则失真越少，反之，失真越大，显色指数就越小。

不同的场所对光源的显色指数要求是不一样的。在国际照明协会中一般把显色指数分成五类：

类别 Ra 适用范围

- 1A >90 美术馆、博物馆及印刷等行业及场所
- 2B 80—90 家庭、饭馆、高级纺织工艺及相近行业
- 2 60—80 办公室、学校、室外街道照明
- 3 40—60 重工业工厂、室外街道照明
- 4 20—40 室外道路照明及一些要求不高的地方

#### (8) 显色指数

在具有合理允许的色适应状态下，被测光源照明物体的心理物理色与参比光源照明同一色样的心理物理色符合程度的度量，图 2-23 为显色指数标准色板图。



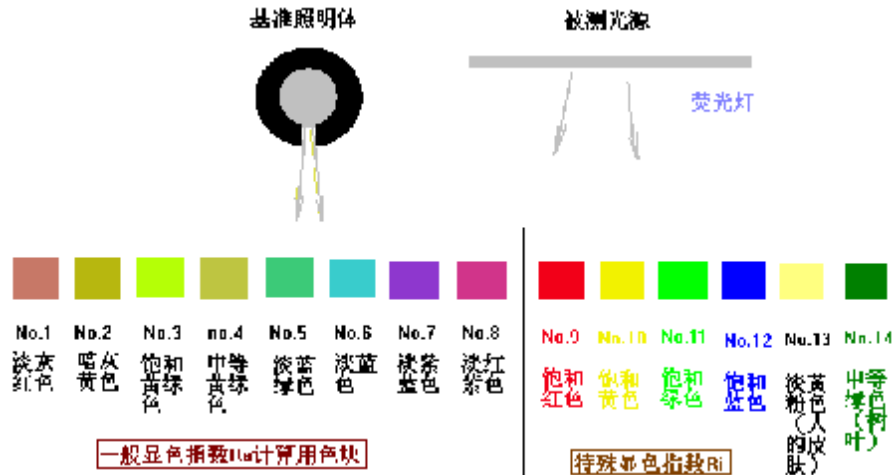


图 2-23 显色指数标准色板图

选用与被测光源色温相同(或接近)的，人工日光标准光源，其对十四个(中国加一个亚洲妇女肤色)指定颜色的显色指数都定为 100。同样十四个(中国加一个亚洲妇女肤色)指定颜色，在被测光源照射下显现的颜色与标准光源的光照射下显现的颜色的差异  $\Delta E_i$ ，则对某颜色的显色指数：

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i \tag{式 2-19}$$

取前八个颜色， $R_1$ 、 $R_2$ 、...、 $R_8$ ，加起来后再平均，则为  $R_a$ ，称为一般显色指数，代表被测光源的显色性能。计算公式如下：

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \tag{式 2-20}$$

### (8) 色容差

色容差是指电脑计算的配方与目标标准的相差，以单一照明光源下计算，数值愈小，准确度则愈高。但是要注意，它只代表某一光源下的颜色比较，未能检测于不同光源下的偏差。光源发出的光谱与标准光谱之间的差别。

标准光谱随着色温改变，同一个光源如果标准光谱不同其色容差也不同，但是测量的时候，一般光电分析系统会自动识别被测光源所在的色温范围，以确定标准光谱的色温取值，色容差的单位是 SDCM，一般的节能灯行业要求的色容差要小于 7SDCM。

我们可以这么理解色容差，它是给定点中心点画出的麦克亚当椭圆。



右图 2-24 (荧光灯) 就是以 F6500K(0. 3130, 0. 3370)为中心点画出的各阶麦克亚当椭圆。

图 2-24 F6500 7 阶椭圆示意图

不同色温的标准光源 (荧光灯) 是不同的, 各色温的标准色中心坐标点如下表 2-3:

标准光源	标准光源坐标点
F2700	6430K (0. 3130, 0. 3370)
F3000	5000K (0. 3460, 0. 3590)
F3500	4040K (0. 3800, 0. 3800)
F4000	3450K (0. 4090, 0. 3940)
F5000	2940K (0. 4400, 0. 4030)
F6500	2720K (0. 4600, 0. 4200)

表 2-3 各色温在标准光源下的标准色中心坐标点