

# 第十章 颜色

# 主要内容

---

- 可见光，明度与亮度，
  - 半色调技术
  - 颜色的特征，三基色
  - 各种色彩模型：RGB模型，CMY模型，HSV模型等
-

# 掌握要点

---

- 了解可见光的波长范围，光效率函数的作用；
  - 掌握什么是亮度、明度，它们之间的关系；
  - 掌握什么是半色调技术(或称颜色抖动技术)，它是如何工作的；
  - 掌握颜色空间是三维的，任何一种颜色都可用三基色来描述，红、绿、兰是一组典型的三基色；
  - 掌握光栅显示系统中常用的颜色模型：RGB模型、CMY模型、HSV模型，以及它们之间的关系。
-

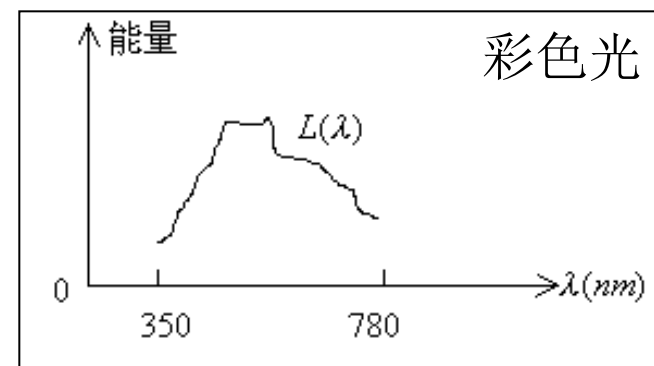
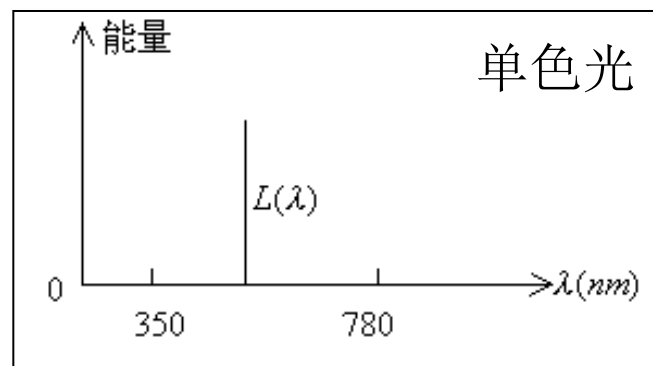
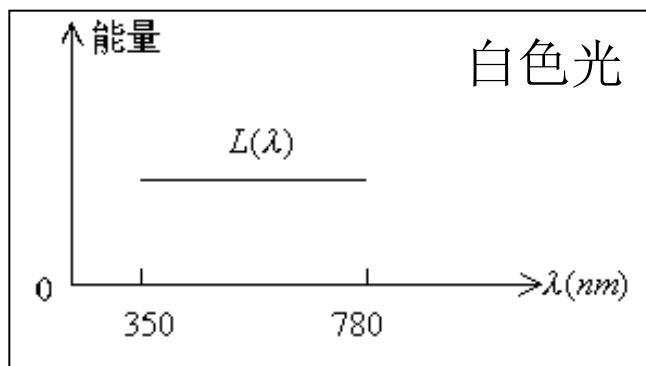
# 10.1 基本概念

---

- 颜色是外来的光刺激作用于人的视觉器官而产生的主观感觉。因而物体的颜色不仅取决于物体本身，还与光源、周围环境的颜色，以及观察者的视觉系统有关系。
  - 光的属性
    - 光(可见光)：人的视觉系统能感受到的电磁波，波长范围350nm~780nm
-

## ■ 光谱能量分布

- 当一束光的各种波长的能量大致相等时，我们称其为白光；否则，称其为彩色光；若一束光中，只包含一种波长的能量，其它波长都为零时，称其为单色光。

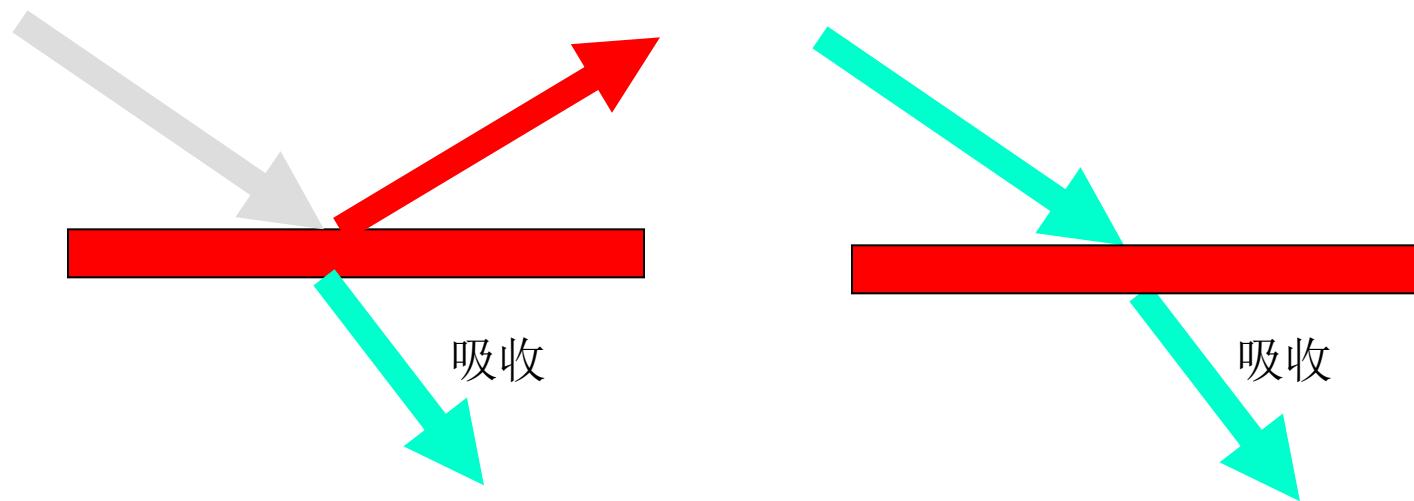


---

- 反射光的光谱能量分布

$$F(\lambda) = \rho(\lambda)L(\lambda)$$

□ 其中 $\rho(\lambda)$ 为入射光的光谱能量分布,  $L(\lambda)$  表示物体表面对各种波长光的反射率。



## □ 光效率函数

### ■ 杆状细胞与暗视觉

□ 细长，数量较多，感光灵敏，但没色感

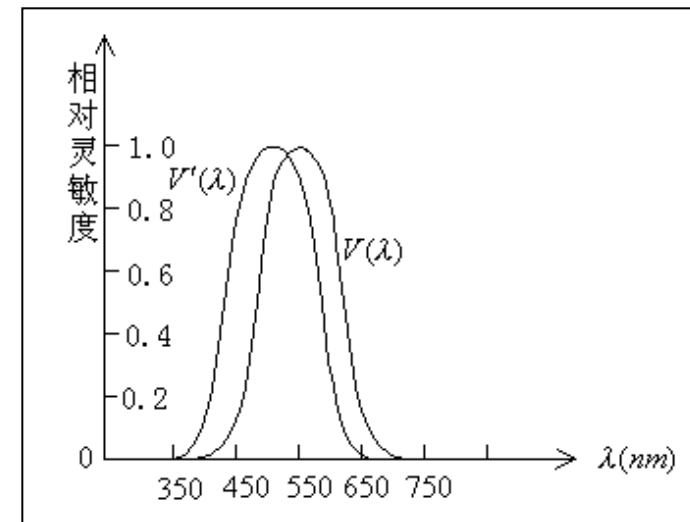
### ■ 锥状细胞与明视觉

□ 粗短，数量较少，感光不灵敏，有色感

### ■ 光效率函数

□ 反映不同波长的光刺激人眼产生亮度的效率。

□ 右图 $V(\lambda)$ ,  $V'(\lambda)$  分别是昏暗和明亮条件下的光效率函数。



$$Y(F) = \int_{350}^{780} F(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

亮度                      光能量  
                                    分布函数

---

## □ 明度，亮度及亮度对比

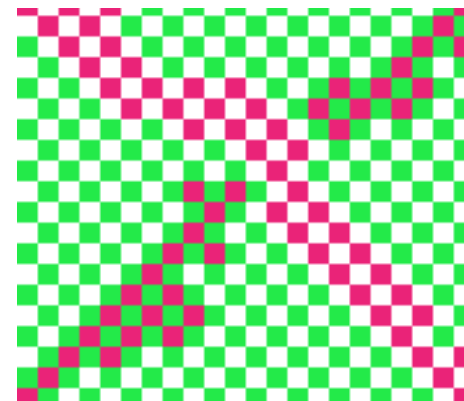
- 物体表面的亮度是客观的，与周围环境的亮度无关。
- 物体表面的明度是主观的，与周围环境的亮度有关。
- Webe定律

记物体明度 $C$ ，亮度 $Y$

$$dC = a_1 \frac{dY}{Y} \Rightarrow C = a_2 + a_1 \log Y$$

$a_1 > 0, a_2$ 为某一常数

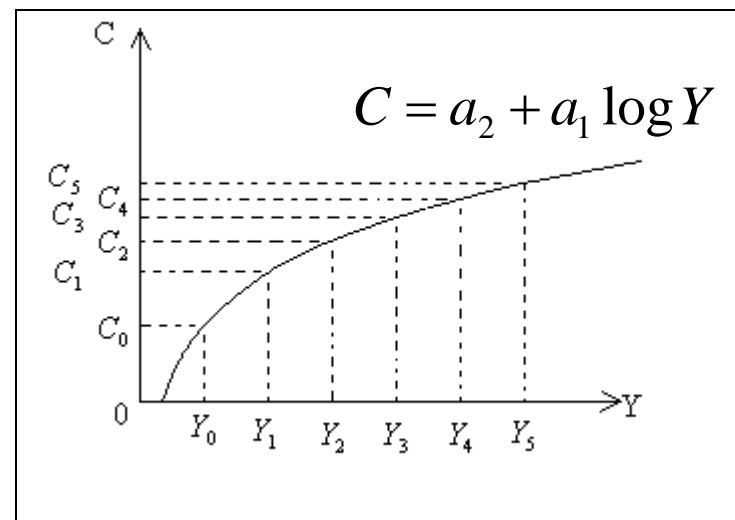
即物体明度正比于亮度的对数。





## 10.2 单色模型

- 灰色是用亮度来描述的。灰度显示器可以产生多级亮度(称为灰度), 每一级灰度用一个整数值标识。
  - 问题: 已知显示器能显示的灰度范围是  $[Y_0, 1]$ , 如何产生均匀分布的  $n+1$  级灰度?
  - 方案一
    - 亮度均匀分布  $\{Y_i\}_{i=0}^n$
    - 结论: 明度不均匀



# 单色模型

---

## ■ 方案二

□ 明度均匀分布  $\{C_i\}_{i=0}^n$

$$C_{i+1} - C_i = \text{常数} \stackrel{C=a_2+a_1 \log Y}{\Leftrightarrow} \frac{Y_{i+1}}{Y_i} = r \Leftrightarrow Y_{i+1} = rY_i \Leftrightarrow Y_i = r^i Y_0$$

$$\text{最大灰度值 } Y_n = r^n Y_0 = 1 \Rightarrow r = \left(\frac{1}{Y_0}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$\Rightarrow Y_i = Y_0^{\frac{n-i}{n}}$$

## ■ 结论

□ 给定灰度级数 $n$ 和最低灰度值 $Y_0$ ，根据上式得到合理分布的灰度序列

---

# 单色模型

---

## □ 半色调技术

- 许多硬拷贝设备只能产生黑白两级灰度，如何以这样的设备产生更多的颜色？
  - 方法：半色调技术 (颜色抖动)，它是一种牺牲空间分辨率来增加灰度级的方法。
  - 如：用 $2 \times 2$ 像素模拟一个像素能产生5个灰度级，但代价是显示器的水平和垂直分辨率都降低了一倍。
  - $3 \times 3$ 时？
-

## 10.3 彩色模型

---

- 三色学说：在物理学上对光与颜色的研究发现
    - 颜色具有恒常性。即人们可以根据物体的固有颜色来感知它们，而不会受外界条件变化的影响。颜色之间的对比效应能够使人区分不同的颜色。
    - 颜色具有混合性，牛顿在十七世纪后期用棱镜把太阳光分散成光谱上的颜色光带，用实验证明了白光是由很多颜色的光混合而成。
-

- 
- 十九世纪初，Yaung提出一种假设，某一种波长的光可以通过三种不同波长的光混合而复现出来，且红绿蓝三种单色光可以作为基本的颜色 - 原色，把这三种光按照不同的比例混合就能准确的复现其它任何波长的光，而它们等量混合就可以产生白光。
  - 后来，Maxwell用旋转圆盘所作的颜色混合实验验证了Yaung的假设。
  - 在此基础上，1862年，Helmholtz进一步提出颜色视觉机制学说，即三色学说，也称为三刺激理论。
  - 到现在，用三种原色能够产生各种颜色的三色原理已经成为当今颜色科学中最重要的原理和学说。
-

- 
- 近代的三色学说研究认为，人眼的视网膜中存在着三种锥体细胞，它们包含不同的色素，对于不同的光就有不同的颜色感觉。
  - 研究发现，三种锥体细胞分别专门感受红光、绿光和蓝光。三者共同作用使人产生不同的颜色感觉。
    - 例如，当黄光刺激眼睛时，将会引起红、绿两种锥体细胞几乎相同的较强反应，而只引起蓝细胞很小的反应，这三种不同锥体细胞的不同程度的兴奋程度的结果产生了黄色的感觉。
  - 三色学说是我们真实感图形学的生理视觉基础，我们所采用的RGB以及其他颜色模型都是根据这个学说提出来的。
-

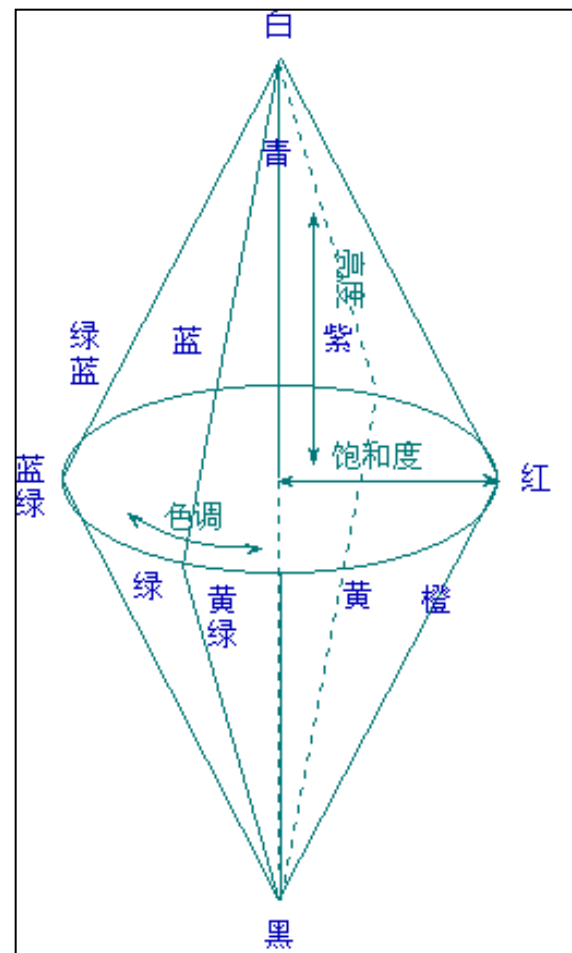
# 颜色的特征

---

- 从心理学和视觉的角度出发，颜色有如下三个特性：色调(Hue)、饱和度(Saturation)和明度(Lightness).
    - 色调，是一种颜色区别于其它颜色的因素，也就是我们平常所说的红、绿、蓝、紫等；
    - 饱和度是指颜色的纯度，鲜红色饱和度高，而粉红色的饱和度低。
    - 明度是视觉系统感知到的亮度
  - 与之相对应，从光学物理学的角度出发，颜色的三个特性分别为：主波长(Dominant Wavelength)、纯度(Purity)和亮度(Luminance).
    - 主波长是产生颜色光的波长，对应于视觉感知的色调；
    - 光的纯度对应于饱和度，
    - 亮度就是光的亮度。
-

# 颜色纺锤体

- 在三维空间中，我们可以用一个纺锤体把颜色的三种基本特性来表示出来。
  - 颜色纺锤体的垂直轴线表示白黑系列的亮度变化，顶部是白色，到底部是黑色。
  - 色调由水平圆周表示，圆周上不同角度的点代表了不同色调的颜色，如红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等。
  - 半径方向体现饱和度的变化，圆周中心的色调是灰色，越往外色彩越纯。





## 10.4 光栅系统中的颜色模型

---

### □ 颜色模型

- 所谓颜色模型就是指某个三维颜色空间中的一个可见光子集，它包含某个颜色域的所有颜色。
- 颜色模型的用途是在某个颜色域内方便地指定颜色。

### □ 面向硬件的颜色模型

- RGB模型、CMY模型、YIQ模型

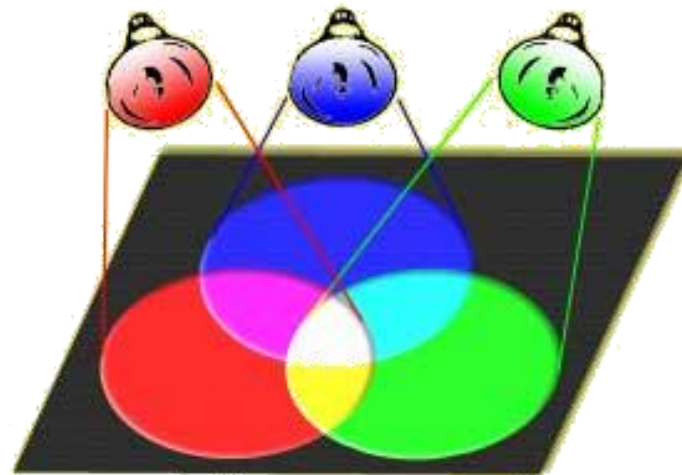
### □ 面向用户的颜色模型

- HSV模型
-

---

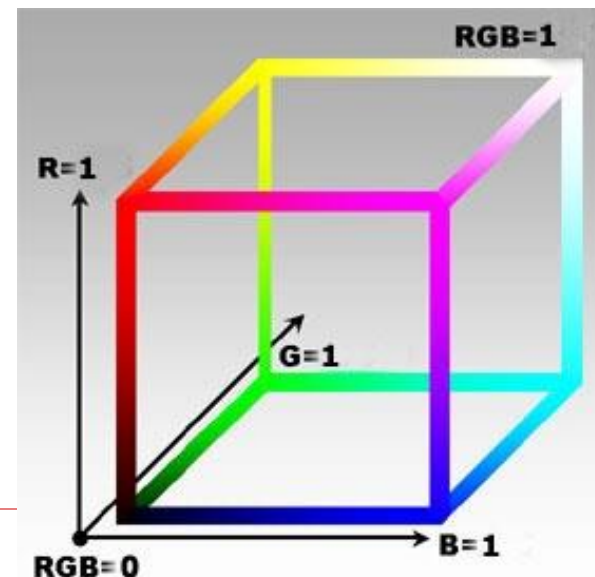
## □ RGB模型

- Red(红)、Green(绿)、Blue(蓝)
- 大多数的彩色图形显示设备都是使用红、绿、蓝三原色，是使用最多、最熟悉的颜色模型。
- 加色系统 (从无光环境中增加某种颜色)



## ■ RGB颜色模型

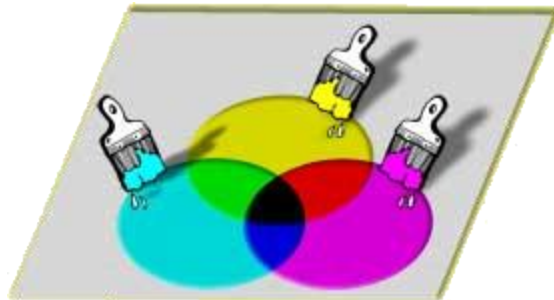
- 它采用三维直角坐标系，红、绿、蓝为原色，各个原色混合在一起可以产生复合色。
- 通常采用单位立方体来表示
- 在正方体的主对角线上，各原色的强度相等，产生由暗到明的白色，也就是不同的灰度值。
- 正方体的其它六个角点分别为红、黄、绿、青、蓝和品红。
- 需要注意的一点是，RGB颜色模型所覆盖的颜色域取决于显示设备荧光点的颜色特性，是与硬件相关的。



---

## □ CMY模型

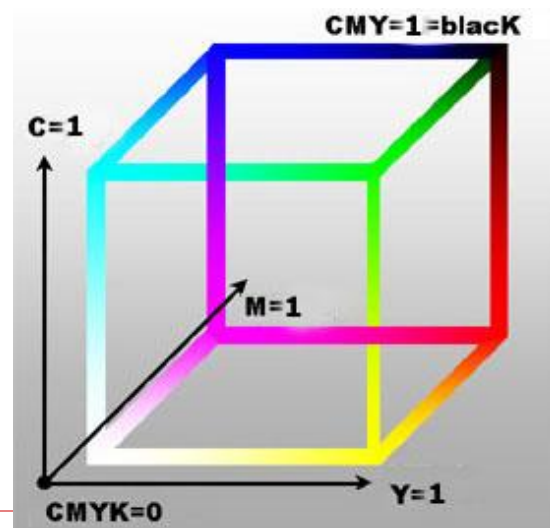
- 以红、绿、蓝的补色青(Cyan)、品红(Magenta)、黄(Yellow)为原色构成。
- 应用：硬拷贝设备
- 减色模型(从白光中滤去某种颜色)
  - 如：当在纸面上涂青色颜料时，青色颜料从白光中滤去红光。也就是说，青色是白色减去红色。品红颜色吸收绿色，黄色颜色吸收蓝色。
  - 假如在纸面上涂了黄色和品红色，那么纸面上将呈现红色，因为白光被吸收了蓝光和绿光，只能反射红光了。



## ■ 与RGB模型的关系

- CMY颜色模型对应的直角坐标系的子空间与RGB颜色模型所对应的子空间几乎完全相同。差别仅仅在于前者的原点为白，而后者的原点为黑。
- 原因：前者是定义在白色中减去某种颜色来定义一种颜色，而后者是通过从黑色中加入颜色来定义一种颜色。

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



---

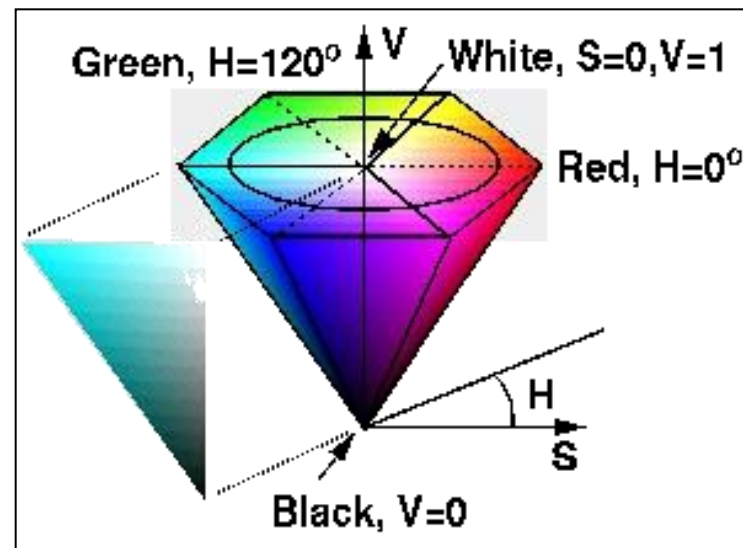
## □ YIQ模型

- Y: 亮度, I、Q: 色差
- 应用: 电视传播系统
- 为什么采用YIQ模型?
  - 向后兼容黑白电视
  - 节约带宽
    - **Y:I:Q = 4 : 1.5 : 1.5**
    - **Total = 6M**

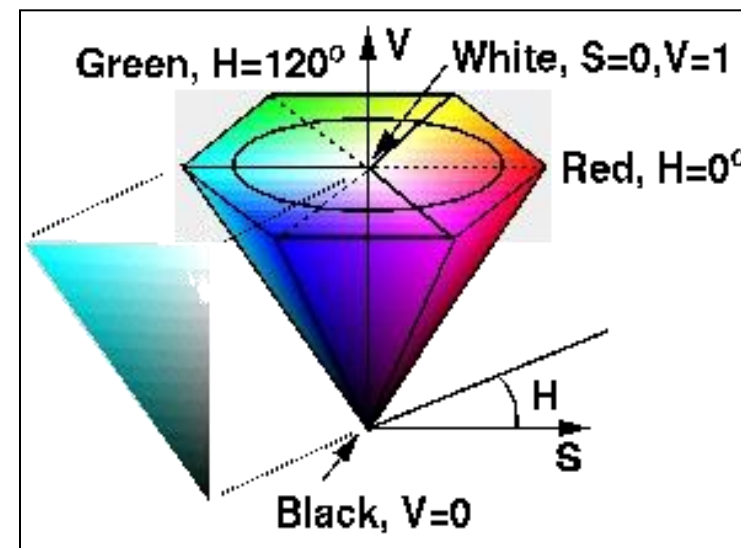
$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.522 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

## □ HSV模型(面向用户的颜色模型)

- H(Hue): 色彩, S(Saturation): 饱和度, V(Value): 明度
- 该模型对应于圆柱坐标系的一个圆锥形子集。
- 圆锥的顶面对应于 $V=1$ , 代表的颜色较亮。

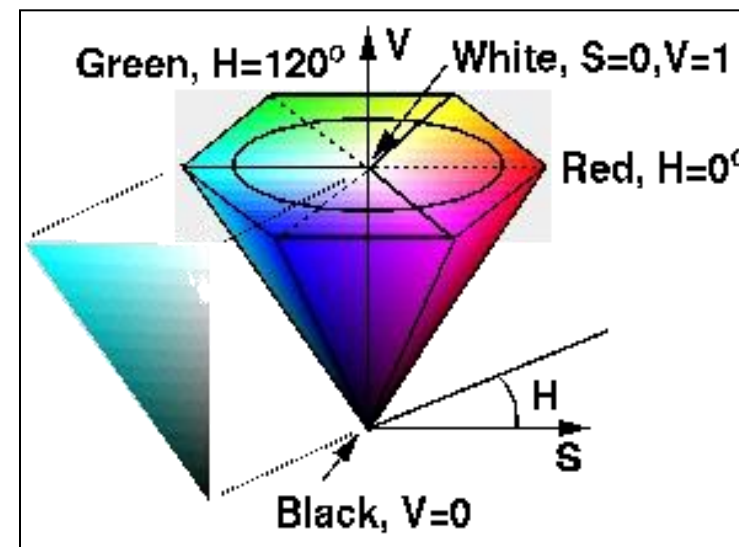


- 色彩H由绕V轴的旋转角给定，红色对应于0度，绿色对应于120度，蓝色对应于240度。
  - 每一种颜色和它的补色相差180度。
  - 饱和度S取值从0到1，由圆心向圆周过渡。
  - 圆锥的顶点处代表黑色，圆锥顶面中心处代表白色，从该点到原点代表不同灰度的白色。
  - 任何 $V=1$ ， $S=1$ 的颜色都是纯色。



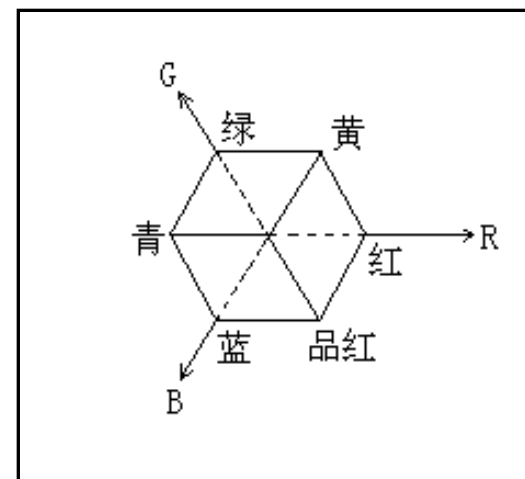
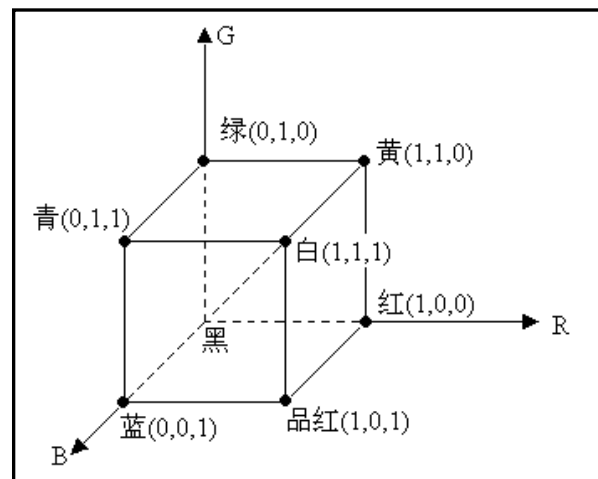


- HSV颜色模型对应于画家的配色的方法。画家用改变色浓和色深的方法来从某种纯色获得不同色调的颜色。
- 做法：配色后，在一种纯色中加入白色以改变色浓，加入黑色以改变色深，同时加入不同比例的白色，黑色即可得到不同色调的颜色。
- 右为具有某个固定色彩的颜色三角形表示。



## ■ 与RGB模型的关系

- 从RGB立方体沿着主对角线向原点方向投影，可以得到一个正六边形,容易发现，该六边形是HSV圆锥顶面的一个真子集。
- RGB空间的主对角线，对应于HSV空间的V轴。



# 颜色的交互指定和颜色插值

## □ 颜色的交互指定

- RGB
- HSV



---

## □ 颜色插值

- 对两个给定颜色进行插值以获得它们之间的均匀过渡色。
  - 应用于：真实感图形的Ground着色处理，动画时的图像融合，反混淆。
  - 关键：
    - 选择一个合适的色彩模型
    - 找到这两个颜色，画直线，经过的颜色是其插值色。
-

---

# END

---

---