

应用光学

谭峭峰

tanqf@mail.tsinghua.edu.cn

清华大学 精密仪器系 光电工程研究所

第八章

光度学与色度学基础

波长为400~760nm范围内的电磁波称为“可见光”

研究可见光的测试、计量和计算的学科称为“光度学”

研究电磁波辐射的测试、计量和计算的学科称为“辐射度学”

8.1 光度学

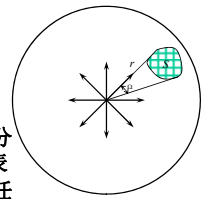
§ 8.1.1 辐射度学中的物理量

立体角：

任意一个封闭锥面所包含的空间部分为锥面顶点处的“立体角”，用 Ω 表示。立体角是以锥顶为球心，作一任意半径 r 的球面，锥面在球面上所截出的球面部分为 S ，则 S 与 r^2 的比值 S/r^2 即为此立体角的大小。

度量单位称为“立体弧度”，即“球面度”(sr)。

围绕球心的整个空间的立体角： $\Omega = 4\pi r^2 / r^2 = 4\pi$



光学系统中通常用平面角 U 来表示孔径角，若孔径角为 U ，则其对应的立体角的大小为：

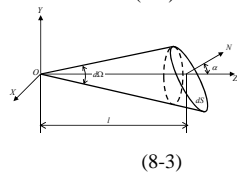
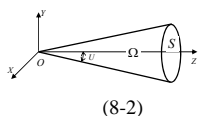
$$\Omega = 4\pi \sin^2 U \quad (8-1)$$

当 U 角很小时(u)，立体角为：

$$\Omega \approx 4\pi u^2 \quad (8-2)$$

假定距 O 点 l 处有一微面 dS ， dS 的法线 N 与 OZ 的夹角为 α ，那么微面 dS 对 O 点所张立体角为：

$$d\Omega = \frac{dS \cos \alpha}{l^2} \quad (8-3)$$



一、辐射通量

辐射通量的定义：

单位时间内辐射体所辐射的总能量，用 Φ_e 表示；
计量单位：**瓦特**

表示了一个辐射体辐射的强弱

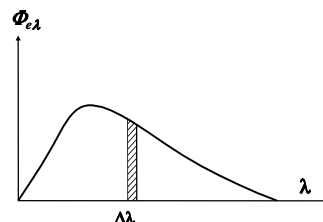
辐射通量就是辐射体的辐射功率

用**辐射通量的光谱密集度** $\Phi_{e\lambda}$ 来表示辐射体的辐射通量按波长分布的特性

$$\Phi_{e\lambda} = \lim_{\Delta\lambda \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi_{e\lambda}}{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi_{e\lambda}}{d\lambda} \quad d\Phi_{e\lambda} = \Phi_{e\lambda} d\lambda \quad (8-4)$$

辐射体总辐射通量即
辐射体的总辐射功率

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda} d\lambda$$



其他表示

1.面积元 ds 的辐射通量:

单位时间内面积元 ds 辐射出来的所有波长的光能量。

2.分布函数(谱辐射通量密度):

在单位时间内通过光源面积元的某一波长附近的单位波长间隔内的光能量,用 $e(\lambda)$ 表示。

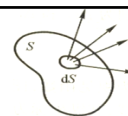
3.总辐射通量:

从光源面积元 ds 辐射出来的波长在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$ 间的辐射通量为:

$$d\Phi_{\lambda, \lambda+d\lambda} = e(\lambda) d\lambda$$

从光源面积元 ds 发出的各种波长光的总辐射通量为:

$$\Phi = \int_0^\infty e(\lambda) d\lambda$$



二、辐射强度

辐射体在**不同方向**上的辐射特性。在给定方向上取立体角 $d\Omega$, 在 $d\Omega$ 范围内的辐射通量为 $d\Phi_e$,

$d\Phi_e$ 与 $d\Omega$ 之比称为辐射体在该方向上的**辐射强度** I_e :

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} \quad (8-5)$$

辐射强度为单位立体角内发出的辐射通量, 单位为**瓦每球面度(W/sr)**。

均匀点光源: $I_e = \frac{\Phi_e}{4\pi}$

三、辐(射)出射度、辐(射)照度

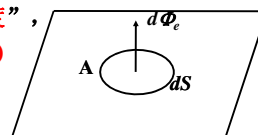
辐射强度不能表示辐射体表面**不同位置**的辐射特性

辐射体表面上任意一点A处的辐射强弱:

假定 ds 微面辐射出的辐射通量为 $d\Phi_e$, 则A点的辐(射)出射度为

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{ds} \quad (8-6)$$

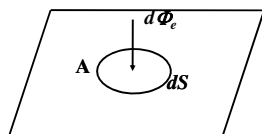
M_e 称为“**辐(射)出射度**”, 单位为**瓦每平方米(W/m²)**



某一物体表面被其它辐射体照射, 为了表示A点被照射的强弱, 假定物体所接受的辐射通量为 $d\Phi_e$, 把 ds 接受的 $d\Phi_e$ 与 ds 之比称为**辐(射)照度**, 符号为 E_e , 即

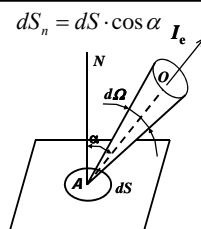
$$E_e = \frac{d\Phi_e}{ds} \quad (8-7)$$

辐(射)照度与辐(射)出射度的单位一样, 为**瓦/平方米(W/m²)**。



四、辐(射)亮度

用**辐(射)亮度**来表示辐射体表面**不同位置**和**不同方向**上的辐射特性, ds 在AO垂直方向上的投影面积为 ds_n



若在AO方向上的辐射强度为 I_e , 把 I_e 与 ds_n 之比称为**辐(射)亮度**,

$$L_e = \frac{I_e}{ds_n} \quad (8-8)$$

辐(射)亮度代表辐射体不同位置 and 不同方向上的辐射特性, 单位为**瓦每球面度平方米(W/(sr.m²))**。

名 称	定 义	单 位
辐射能	以辐射形式发射、传播或接收的能量。	焦耳(J)
辐射通量	以辐射形式发射、传播或接收的功率。	瓦特(W)
辐射出度	离开表面一点处面元的辐射通量除以该面元面积。	$W \cdot m^{-2}$
辐射照度	照射到表面一点处面元上的辐射通量除以该面元的面积。	$W \cdot m^{-2}$
辐射强度	在给定方向上的立体角内，离开点辐射源或辐射源面元的辐射功率除以该立体角。	$W \cdot sr^{-1}$
辐射亮度	表面一点处的面元在给定方向上的辐射强度除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积。	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$

§ 8.1.2 人眼的视见函数

可见光

光的辐射能中能引起人眼的视觉效应的区域。

- 400nm~760nm
- 人眼观察辐射体时，其视觉强弱与辐射波长和辐射强度（某一方向）有关

在可见光中不同波长的光所引起的视觉效应的灵敏度不同。在光度学中，为了表示这种差别，定义 $V(\lambda)$ 为“**视见函数**”（光谱光视效率）。

视见函数

- 把人眼对**黄光**的视觉灵敏度作为基准，其它色光的视觉灵敏度与黄光的视觉灵敏度相比，得出各种色光的相对视觉灵敏度，称为视见函数，用 $V(\lambda)$ 表示。
- 人眼最灵敏波长（ $\lambda=555nm$ ）的视见函数规定为1，即 $V(555)=1$ ， $V(\lambda) \leq 1$ 。
- 不同人在不同观察条件下的视觉函数略有差别。

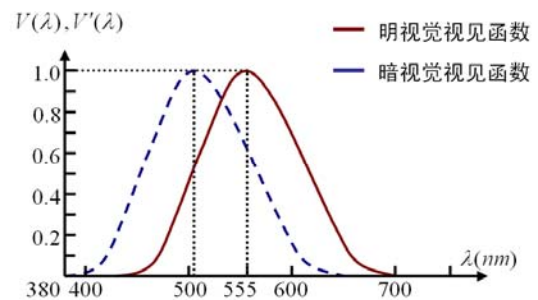


图6-1 人眼的视见函数

§ 8.1.3 光度学中的基本量

一、发光强度和光通量

发光强度是光度学中最基本量之一，与辐射度学中的辐射强度相对应。

辐射体的辐射波长为 λ 的单色光，在眼睛观察的方向上的辐射强度为 I_e ，瞳孔对辐射体所张的立体角为 $d\Omega$ ，则眼睛接受到的辐射通量为 $d\Phi_e = I_e d\Omega$

眼睛的视觉强度与辐射通量 $d\Phi_e$ 和视见函数 $V(\lambda)$ 成正比，该辐射所产生的**视觉强度**

$$d\Phi = C \cdot V(\lambda) \cdot d\Phi_e \quad (8-9)$$

$d\Phi$ 是按人眼视觉强度来度量的辐射通量，称为**光通量**。

C 为单位换算常数，由 $d\Phi$ 和 $d\Phi_e$ 所采用的单位决定。

光通量是描述客观辐射通量所引起的人眼视觉强弱的物理量，光通量的单位是**流明 (lm)**。

发光强度与辐射强度相对应，表示在指定方向上光源发光的强弱，即单位立体角内发出的光通量

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

$$d\Phi = C \cdot V(\lambda) \cdot d\Phi_e$$

$$I = C \cdot V(\lambda) \cdot \frac{d\Phi_e}{d\Omega} = C \cdot V(\lambda) \cdot I_e \quad (8-10)$$

发光强度的单位为坎德拉(cd)

均匀点光源： $I = \frac{\Phi}{4\pi}$

发光强度是光学基本量，是国际单位制中七个基本量之一，单位为坎德拉(cd)。

1979年第十六届国际计量大会对发光强度的单位作了明确的规定：“一个光源发出频率为 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ 的单色光，在一定方向的辐射强度为 $(1/683) \text{W/sr}$ ，则该光源在该方向上的发光强度为1坎德拉。

发光强度为1坎德拉的匀强点光源，在单位立体角内发出的光通量为1流明(lm)。

$$1 \text{lm} = 1 \text{cd} \cdot \text{sr}$$

由坎德拉及发光强度的定义可知：

$$V(555) = 1, \quad I_e = (1/683) \text{W/sr}, \quad I = 1 \text{cd}$$

$$I = C \cdot V(\lambda) \cdot \frac{d\Phi_e}{d\Omega} = C \cdot V(\lambda) \cdot I_e$$

$$C = 683 (\text{cd} \cdot \text{sr}) / \text{W}$$

二、光出射度和光照度

用光出射度 M 来表示A点处的发光强弱，即发光表面单位面积内所发出的光通量，与辐（射）出射度相对应。

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (8-11)$$

当发光表面均匀发光时，其光出射度为 $M = \frac{\Phi}{S}$

当某一表面被发光体照明，用光照度 E 来表示被照明表面A处的照明强弱，

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (8-12)$$

均匀照明情况下 $E = \frac{\Phi}{S}$

光照度表示被照明的表面单位面积上所接收的光通量。与辐射度学中的辐（射）照度相对应，单位为勒克斯(lx)。

1lx等于1m²面积上发出或接收1lm的光能量，即：

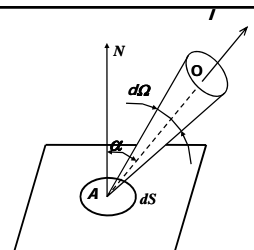
$$1 \text{lx} = 1 \text{lm} / \text{m}^2$$

三、光亮度

用光亮度来表示发光表面不同位置 and 不同方向的发光特性，在该方向上单位投影面积的发光强度。

$$L = \frac{I}{dS_n} = \frac{I}{dS \cdot \cos \alpha} \quad (8-13)$$

L 表示发光面上A点处在AO方向上的发光特性。



光亮度等于发光表面上某点周围的微面在给定方向上的发光强度除以该微面在垂直于给定方向的投影面积。光亮度 L 与辐射度学中的辐亮度相对应。光亮度的单位为坎德拉/米² (cd/m²) ——尼特 (nit)。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{I}{dS_n} = \frac{I}{dS \cdot \cos \alpha} \\ I &= \frac{d\Phi}{d\Omega} \end{aligned} \right\} L = \frac{I}{dS_n} = \frac{d\Phi}{dS \cdot \cos \alpha \cdot d\Omega} \quad (8-14)$$

光亮度表示发光面上单位投影面积在单位立体角内所发出的光通量

表8-1 常见发光表面的光亮度值

表面名称	光亮度(cd/m ²)	表面名称	光亮度(cd/m ²)
在地面上看到的太阳表面	(1.5~2.0)×10 ⁹	超高压毛细管汞灯	(2~100)×10 ⁷
日光下的白纸	2.5×10 ⁴	6V汽车头灯	1×10 ⁷
白天晴朗的天空	3×10 ³	放映灯	2×10 ⁷
在地面上看到的月亮表面	(3~5)×10 ³	卤丝灯	3×10 ⁷
月光下的白纸	3×10 ²	碳弧灯	(1.5~10)×10 ⁸
蜡烛的火焰	(4~6)×10 ³	超高压球形汞灯	(1~20)×10 ⁸
50W白炽钨丝灯	4.5×10 ⁶	仪用钨丝灯	1×10 ⁷
100W白炽钨丝灯	6×10 ⁶		

辐射度学与光度学物理量间的关系

名 称	定 义	单 位
辐射能 光能	以辐射形式发射、传播或接收的能量。光通量对时间的积分。	焦耳(J) 流明·秒 (lm·s)
辐射通量 光通量	以辐射形式发射、传播或接收的功率。发光强度为 I_v 的光源，在立体角元 $d\Omega$ 内的辐射通量。	瓦特(W) 流明(lm)
辐射出度 光出度	离开表面一点处面元的辐射通量除以该面元面积。 离开表面一点处面元的光通量除以该面元面积。	W·m ⁻² lm·m ⁻²
辐射照度 光照度	照射到表面一点处面元上的辐射通量除以该面元的面积。 照射到表面一点处面元上的光通量除以该面元的面积。	W·m ⁻² 勒克斯(lx)

名 称	定 义	单 位
辐射强度	在给定方向上的立体角元内，离开点辐射源或辐射源面元的辐射功率除以该立体角元。	W·sr ⁻¹
发光强度	光度量中的基本量。	坎德拉(cd)
辐射亮度	表面一点处的面元在给定方向上的辐射强度除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积。	W·sr ⁻¹ ·m ⁻²
光亮度	表面一点处的面元在给定方向上的发光强度除以该面元在垂直于给定方向平面上的正投影面积。	cd·m ⁻²
曝光量	光照度对时间的积分。	lx·s

四、余弦辐射体

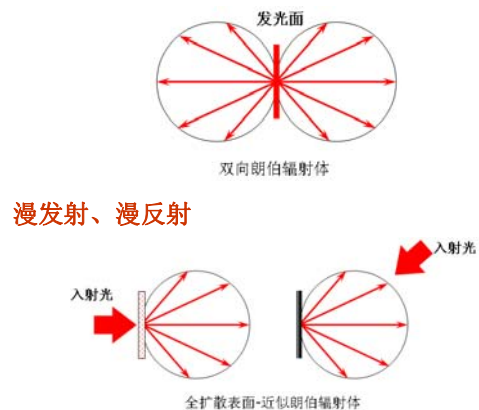
发光表面上各点沿不同方向的发光强度遵循简单的余弦规律，即 $I(\theta) = I_0 \cos \theta$ (8-15)

该光源为“余弦辐射体”，又称“朗伯辐射体”。

光亮度？

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{I}{dS_n} = \frac{I}{dS \cdot \cos \alpha} \\ \theta &= \alpha \end{aligned} \right\} L = \text{const}$$

余弦辐射体的光亮度是恒定的。



§ 8.1.4 光传播过程中光学量的变化规律

(1) 点光源在与之距离为 r 处的表面上形成的**光照度**

$$d\Omega = \frac{dS \cos \theta}{r^2}$$

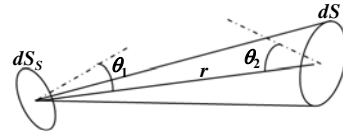
$$I = \frac{\Phi}{4\pi}$$

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = \frac{I \cos \theta}{r^2} \quad (8-16)$$

余弦定律、平方反比定律

1. I 越大则 E 越大;
2. r 越大则 E 越小;
3. 与方向有关, 垂直照明时 E 最大。

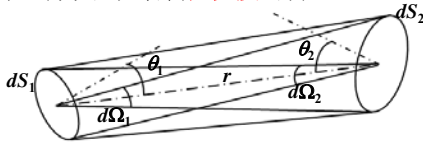
(2) 面光源在与之距离为 r 处的表面上形成的**光照度**



dS_s 代表光源的元发光面积, 在与之距离为 r 、面积为 dS 平面上形成的光照度:

$$E = \frac{d\Phi}{dS} = L \frac{dS_s \cos \theta_1 \cos \theta_2}{r^2} \quad (8-17)$$

(3) 单一介质元光管内**光亮度**的传递



两个面积很小的截面构成的直纹曲面包围的空间就是**元光管**。光在元光管内传播, 不从侧壁溢出, 即无光能损失。

光在元光管内传播, 各截面上的**光亮度相等**, 即光在元光管内传播, **光束亮度不变**。

$$d\Phi_1 = L_1 \cos \theta_1 dS_1 d\Omega_1 = L_1 \cos \theta_1 dS_1 \frac{dS_2 \cos \theta_2}{r^2} = L_1 \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dS_1 dS_2}{r^2}$$

光在同一介质中传播, 忽略散射及吸收, 则在传播中的任一截面上, 光通量与亮度不变。光束的亮度就是光源的亮度。

光在折射时, 不考虑能量损耗,

$$\frac{L_1}{n_1^2} = \frac{L_2}{n_2^2} \quad (8-18)$$

§ 8.1.5 像的光亮度和光照度

δS :余弦辐射体

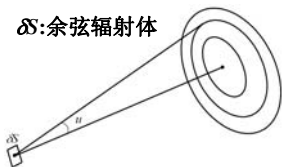


图6-2 入瞳上的环元及光线

单位时间内辐射到入瞳上的总的光通量:

$$\Phi = \pi L \cdot \delta S \cdot \sin^2 u_{\max} \quad (8-19)$$

单位时间内从出射光瞳射出的光通量:

$$\Phi' = \pi L' \cdot \delta S' \cdot \sin^2 u'_{\max} \quad (8-20)$$

能量守恒定律:

$$\Phi' \leq \Phi$$

$$L' \cdot \delta S' \cdot \sin^2 u'_{\max} \leq L \cdot \delta S \cdot \sin^2 u_{\max} \quad (8-21)$$

$$\frac{\delta S'}{\delta S} = \beta^2, \quad \frac{n \sin u_{\max}}{n' \sin u'_{\max}} = \beta \quad \text{小视场大孔径完善成像满足正弦条件}$$

$$\frac{L'}{n'^2} \leq \frac{L}{n^2} \quad (8-22)$$

轴上像点的光照度(小视场)

忽略光在光学系统内的损失:

$$\Phi' = \pi \left(\frac{n'}{n} \right)^2 L \cdot \delta S' \cdot \sin^2 u'_{\max} \quad (8-23)$$

轴上像点 P_0' 的光照度:

$$E_0' = \frac{\Phi'}{\delta S'} = \pi \left(\frac{n'}{n} \right)^2 L \cdot \sin^2 u'_{\max} \quad (8-24)$$

$$E_0' = \pi \left(\frac{n' \sin u'_{\max}}{n \sin u_{\max}} \right)^2 L \cdot \sin^2 u_{\max} = \pi L \cdot \sin^2 u_{\max} / \beta^2$$

光学系统孔径越大, 像面照度越大。

系统放大倍率越小, 像面照度越大 (若 β 大, 为了保证像面足够的像面照度, 要求照明好, u_{\max} 要大)

轴外像点的光照度(大视场)

$$E_0' = \pi L \cdot \sin^2 u_{\max} / \beta^2$$

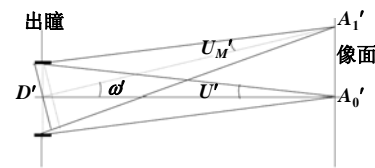


图6-3 轴外像点的光照度

主光线 $\omega' \rightarrow U_M' < U'$

等效出瞳面积缩小为 $\cos \omega'$ 倍

$$\sin U_M' \approx \sin U' \cos^2 \omega'$$

等效距离增大为 $1/\cos \omega'$ 倍

$$E_1' = E_0' \cos^4 \omega' \quad (8-25)$$

8.2 色度学

- 色度学是研究颜色度量和评价方法的一门学科。
- 色度学应用心理物理学方法, 通过大量科学实验, 建立现代色度学。
- 色度学是一门以光学、视觉生理、视觉心理、心理物理等学科为基础的综合性科学, 也是一门以大量实验为基础的实验性科学。
- 色度学最早开创于Newton, 引入颜色环概念, 从而开始了建立颜色图的思想, 还提出了颜色混合中用重心原理来确定混合色结果的方法。19世纪, 科学家Grassman、Maxwell、Helmholtz等对色度学的发展作出了巨大贡献。奠定现代色度学基础的科学家有Guild、Judd、MacAdam、Stiles、Wright、Wyszecki等。
- 现代色度学测量颜色的结果, 是在一定的简化条件下进行的, 有它的局限性, 还不能完全代表人们的色知觉。
- 色度学最终目标是解决在复杂环境中物体颜色外貌的度量问题。

§ 8.2.1 颜色的分类及颜色的表现特征

颜色: 不同波长可见光辐射作用于人的视觉器官后所产生的心理感受。颜色是一种和物理、生理及心理学有关的复杂现象。

非彩色(消色)和彩色: 白色、灰色和黑色统称为非彩色, 它们可以排成一个系列, 由白色逐渐到浅灰, 再到深灰, 直到黑色。非彩色系列的黑白变化对应于白色光的明度变化。

除非彩色以外的一切颜色统称为彩色。

颜色的表现特征: 明度Brightness、色调Hue和饱和度Saturation

明度: 颜色的明亮程度。

色调: 区分不同的彩色。实验证明, 自然界大多数颜色都可用某一单色光和白光按一定比例配成, 则这个颜色的色调用此单色光的波长(称主波长)表示。

饱和度: 颜色接近光谱色的程度。

光谱色和混合色: 由单一波长的光所构成的颜色叫单色光。所有单色光的颜色都叫光谱色。两种以上的波长的光混一起所呈现的颜色叫做混合色。有的两种颜色光按一定比例混合就可以获得白色光。能配合成白色光的两颜色称为互补色, 例如红与青、黄与绿、绿与品红皆为互补色。

颜色随光强的变化

人眼视网膜上的锥体细胞和柱体细胞执行着不同的视觉功能, 前者是明视觉器官, 在亮光条件下作用, 能够分辨物体的细节和颜色; 后者是暗视觉器官, 在暗光条件下起作用, 不能分辨物体的细节和颜色, 只能有黑白之感。锥体细胞能看到的深红色, 柱体细胞却误认为是黑色。

人眼所能适应的光的强度变化超过了 $10^6:1$ 范围, 该适应范围是由在亮光条件下起作用的锥体细胞和在暗光条件下起作用的柱体细胞的相互间转移完成的。如果光的强度比较强, 就能识别颜色; 如果光很弱就不能识别颜色。

即使在光强能达到使人眼分辨出颜色的情况下，颜色仍随光强有微小的变化。光谱中除了572nm(黄色)、503nm(绿色)、478nm(蓝色)是不随光强度变化的颜色之外，其它颜色在光强度增加时有的略向红色，有的则向蓝色变化。

例如660nm红光投射到视网膜上的照度由原来的某一个值降低到该值的1/20时，必须减少波长34nm，才能保持原来的色调；525nm绿光在同样条件下则需增加波长21nm，才能保持原来的色调不变。颜色随光强而变化的这种现象叫Bezold-Brucke效应。

颜色适应和颜色对比

人眼在颜色刺激的作用下所造成的颜色视觉变化叫做颜色适应。眼睛对某一颜色光适应以后，再观察另一颜色时，在开始阶段，后者会发生失真，而带有前者的补色成份，这种现象就是颜色适应现象。

在视场中，相邻区域的不同颜色的相互影响叫做颜色对比。如果在一块彩色背景上放上另一彩色，由于颜色对比，两颜色互相影响，使每种颜色的色调向另一彩色的补色方向变化。如果两彩色是互补色，则彼此加强饱和度，在两彩色的边界处，颜色对比现象最明显。

§ 8.2.2 颜色混合及Grassman颜色混合定律

颜色混合

- (1) 色光混合：不同颜色的直接混合。混合色光为参加混合各色光之和，故称之为加混色。
- (2) 色料混合：色料是对光有强烈选择吸收的物质，在白光照明下呈现一定的颜色。色料混合是白光中去除某些色光，从而形成新的颜色，故称之为减色。

Grassman颜色混合定律(1853年)

- (1) 人的视觉只能分辨颜色的三种变化，分别是明度、色调和饱和度。
- (2) 两种颜色混合，如果一种颜色成分连续变化，混合色的外貌也连续变化。
补色律：互补色以一定比例混合，产生白色或灰色；以其他比例混合，产生接近占有比例大的颜色的非饱和光。
中间色律：两种非互补色混合，将产生颜色的中间色，其色调决定于两颜色的比例。
- (3) 颜色外貌（明度、色调、饱和度）相同的光，在颜色混合中是等效的。
代替律：相似色混合，混合色仍相似。
- (4) 混合色的亮度等于各色光亮度之和（亮度相加定律）。

仅适用于色光混合，不适用于色料混合。

§ 8.2.3 颜色匹配

通过改变参加混色的各颜色的量，使混合色与指定颜色达到视觉上相同的过程，称为颜色匹配。

色光混合，即颜色相加混合。

(1) 颜色转盘法



红绿蓝面积比例改变，色调和饱和度改变；黑色面积大小确定明度。

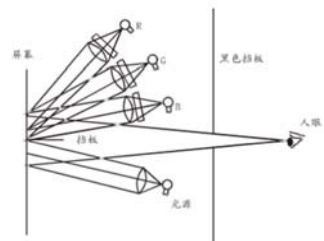
转动颜色转盘，外圈颜色和中心被匹配颜色一致。

(2) 色光混合匹配实验

调节红绿蓝三原色灯强度比例，产生看起来与另一侧颜色相同的混合色。

同色异谱：由红绿蓝三原色形成的颜色的光谱组成与被匹配的颜色光的光谱组成可能很不一致。

只能表达被匹配颜色的外貌（明度、色调和饱和度），而不能表达光谱组成情况。



颜色方程： $C=R(R)+G(G)+B(B)$

\equiv ：匹配，即视觉上相等。

C：代匹配颜色，RGB：红绿蓝三原色

RGB分别代表红绿蓝三原色的数量（三刺激值）

红绿蓝三种颜色以不同的量值（可能为负值）相混合，可匹配任何颜色。

红绿蓝不是唯一的能匹配所有颜色的三种颜色。三种颜色，只要其中的每一种都不能用其他两种混合产生，就可以用此三中颜色匹配所有的颜色。

§ 8.2.4 色度学中的几个概念

颜色刺激：能够引起颜色知觉的可见光辐射的辐通量称为颜色刺激。颜色刺激是波长的函数，是纯物理量。

三原色：能匹配所有颜色的三种颜色。通常选为RGB，恰好与人的视网膜上红视锥、绿视锥、蓝视锥细胞敏感颜色一致。

R：700nm，G：546.1nm，B：435.8nm

由RGB构成白光，亮度比为1:4.5907:0.0601

三刺激值：匹配某种颜色所需的三原色的量，用色度学单位来度量。

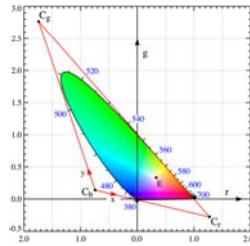
色品坐标与色品图：用三原色相应的三刺激值在三刺激值总量的比例来表示颜色。三刺激值各自的比例称之为颜色的色品。

$$r = \frac{R}{R+G+B}, g = \frac{G}{R+G+B}, b = \frac{B}{R+G+B}$$

$$r + g + b = 1$$

(1,0,0)、(0,1,0)、(0,0,1)构成的三角形为Maxwell三角形。

各光谱色色品点形成的曲线，为光谱色品轨迹。



颜色相加原理：混合色的三刺激值等于各组成色相应的三刺激值之和。

$$R = \sum_{i=1}^N R_i, G = \sum_{i=1}^N G_i, B = \sum_{i=1}^N B_i$$

一个任意光源的三刺激值等于匹配该光源各波长光谱色的三刺激值各自之和。 $\varphi(\lambda)$ 是颜色刺激函数。

$$R = \int \varphi(\lambda) R(\lambda) d\lambda, G = \int \varphi(\lambda) G(\lambda) d\lambda, B = \int \varphi(\lambda) B(\lambda) d\lambda$$

§ 8.2.5 CIE标准色度学系统

CIE：国际照明委员会

CIE标准色度学系统：现代色度学采用CIE所规定的一套颜色测量原理、数据和计算方法。

色度学系统以两组基本视觉实验数据为基础。

* “CIE1931标准色度观察者”数据，适用1°~4°视场的颜色测量

* “CIE1964补充标准色度观察者”数据，适用大于4°视场的颜色测量

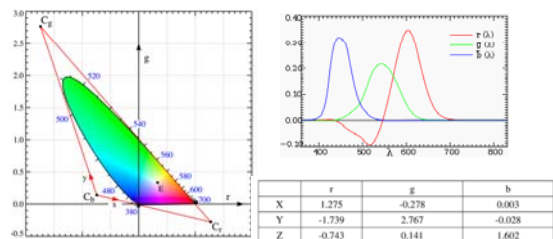
必须在明视觉条件下使用这两类标准观察者数据。

CIE1931标准色度学系统：

CIE1931-RGB系统：

R：700nm，G：546.1nm，B：435.8nm

由RGB构成白光，光亮度比为1:4.5907:0.0601



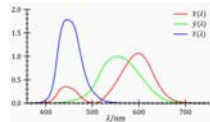
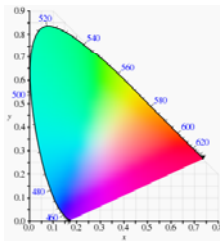
CIE1931-XYZ系统:

确定三原色XYZ:

三刺激值不出现负值;

实际不存在的颜色在色品图上所占面积应尽量小;

Y刺激值表示颜色的亮度和色调, XZ两刺激值只表示色调。

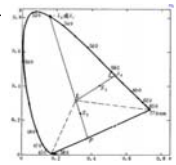
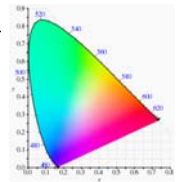


色品图根据三原色原理绘制,用匹配某一颜色的三原色比例来规定这一颜色, x 色品坐标相当于红原色的比例, y 色品坐标相当于绿原色比例, 图中没有 z 色品坐标 ($z=1-(x+y)$)。

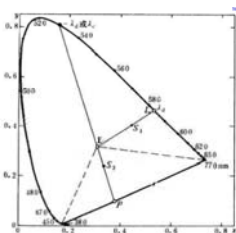
1、谱轨迹曲线以及连接光谱轨迹两端所形成的舌形内部包括一切物理上能实现的颜色。

2、坐标系统的原色(三基色)点,即三角形的三个角顶都落在这个区域之外,也就是说,原色点的色品是假想的,在物理上不可能实现。同样,凡是落在光谱轨迹由红端到紫端直线范围以外的颜色是物理上不能实现的颜色。

3、色品图中的W点是等能白光,其色品坐标为(0.333, 0.333)。

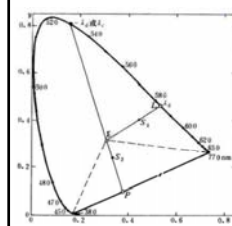


4、色坐标给定,可从色品图上定出该色的主波长和饱和度。某一颜色离开E接近光谱轨迹的程度表明它的纯度,越靠近E越不纯,越靠近光谱轨迹越纯,接近光谱轨迹的远近程度标志着饱和度的大小。



主波长和补色波长: 颜色的主波长是以一定比例与参考白光相混合匹配出该颜色的光谱色波长。

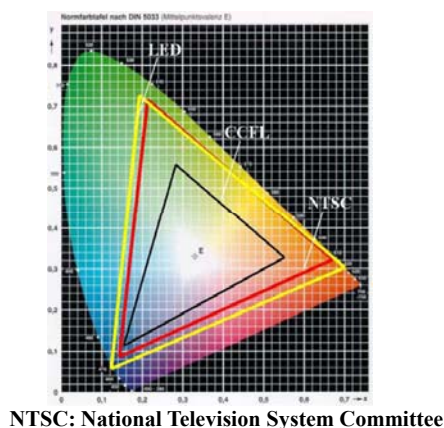
5、从色品图可推算出两种颜色混合所得的各种中间色。



6、700~770nm光谱波段有恒定色度值: $x=0.7347$ 、 $y=0.2652$ 、 $z=0$, 只由一个点来表示。将700~770nm光谱上任何不同波长调整到相同亮度,则颜色在人眼看来是一样的。

7、光谱轨迹540~700nm近似是一条直线,在这段光谱范围内的任何光谱色都是可以通过540nm和700nm二种波长的光以一定比例相混合而成。

8、光谱轨迹380~540nm是一段曲线,在此范围内的一对颜色的混合不能产生两者之间的位于光谱轨迹上的颜色,而只能产生光谱轨迹所包围面积内的混合色。



小结:

发光强度: 描述点光源的发光特性,单位立体角内发出的光通量。

光照度: 光源发出的光投射到某表面,该表面上的亮暗程度,单位面积上得到的光通量。

光亮度: 描述有限大小光源的发光特性,不同方向单位面积上的发光强度。

颜色的表现特征: 明度、色调和饱和度
三原色、三刺激值

CIE1931-RGB系统、CIE1931-XYZ系统