

计算机图象处理

(上册)

容 观 澳

清 华 大 学

1989.8.

1990.9.

第二章 数字图象

要全面理解数字图象处理就应把图象的形成机制充分了解。我们日常见的图象多是模拟图象(连续信号)它又和光度、色度、人的感觉有关。了解连续图象的形成就加上采样、量化、数字化过程才能形成数字图象。数字图象处理就是要把图象中包含所有的信息,充分利用它们才可能处理成人或机器有用的数据。

§ 2-1 图象的形成和人的视觉

数字图象处理所涉及的都是以不同方式形成的实际图象。这些图象的形成和对这些图象的感觉,对图象处理问题的提出有关键性的作用。人所感受的图象大都是通过光的反射、传输而作用到人的视觉系统中来的。因此,讨论图象的形成基础和感觉就涉及到光的辐射、光强的计量、人的视觉系统等因素。当然待处理的图象并不能是可见光形成的图象,如合成孔径雷达图、X光图、红外辐射图、超声图、地震图、地形轮廓图等,当它们被转换成光图象时仍然可以利用同样的有关图象处理的原理。

一、光的辐射

光是一种能引起人眼视网膜产生视觉感受的辐射能量,它占据电磁频谱中一段窄的区域即350毫微米(紫色)到780毫微米(红色)。与所有形式的能量一样,辐射的能量Q也可以定量地测量出来,其单位是焦耳或其它方便表达的单位名称。下面列出描述辐射能量随空间及时间而变化的几个定义。

1. 可见光

波长在380~780毫微米范围内的电磁波人眼可以直接看到,称为可见光。彩色是可见光的一种属性,是可见光(外界的客观物质)作用于人眼(感觉器官)而引起的视觉反应(感觉和意识)。在可见光范围内,随着波长从长到短的变化,在人眼中引起的颜色感觉依次是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫各色。一束太阳光通过玻璃三棱镜后,可以分解为按上述颜色次序排列的一系列光。可见,白光并不是单色光,而是由各种颜色的光混合组成的。可见光按波长的分布情况(可见光谱)及其在电磁辐射波谱中的位置如图2.1.1所示。

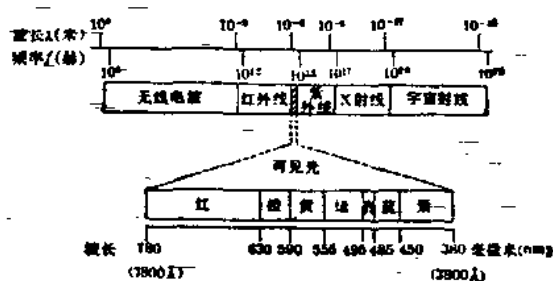


图 2.1.1 电磁辐射波谱和可见光谱

2 相对视敏度

在可见光谱范围内,眼睛对不同波长的光的亮度感觉很不相同。

设波长 λ 为 555 nm 的黄绿色光的亮度感觉为 1，比较辐射功率相同的各个波长的光的亮度，可以得到视力正常的观察者在明亮环境中的相对视觉灵敏度（即视敏度或视见度）曲线 $V(\lambda)$ ，如图 2.1.2 所示。

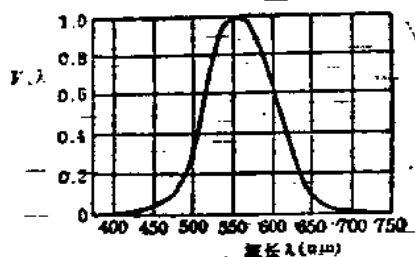


图 2.1.2 人眼的相对视敏度曲线

由图可见，视敏度曲线的最大值位于 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 处， $V(555) = 1$ ，在高峰的两侧， $V(\lambda)$ 均小于 1，曲线几乎对称地下降至零。这是由于人眼中的光学介质对短的波段具有吸收作用，而视网膜对长的波段敏感性差所造成的。

3 光源的辐射功率波谱

光仅在很少的情况下是近似单一波长的，这时眼睛看到的是“纯”光谱色（单色）。在一般情况下，我们遇到的是包括可见光及非可见光的各种波长的波的合成。太阳是照亮大自然的巨大光源，它就是一个热、光和各种射线的辐射体，其辐射功率的波长范围很广，辐射能量主要集中在可见光范围内，包括了可见光的全部光谱。由灼热固体或液体所发出的白光中通常也包含有各种波长的光，为了能够区别各种光源，必须弄清光源的辐射功率按波长的分布情况。

光源的辐射功率分布可利用分光仪器加以测定。测量结果通常用曲线来表示，称为辐射功率波谱 $P(\lambda)$ 。

为了便于比较各种光源的辐射功率波谱，同时考虑到人眼对于波长为 555 nm 的黄绿色光最敏感这个因素，所以常把辐射功率波谱表示成相对于 555 nm 的相对值。相对功率波谱可用 $\varphi(\lambda)$ 来表示，其意义如下，

$$\varphi(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P(555)}$$

例如，太阳光在可见光范围内的一个典型的辐射功率波谱如图 2.1.3 所示。

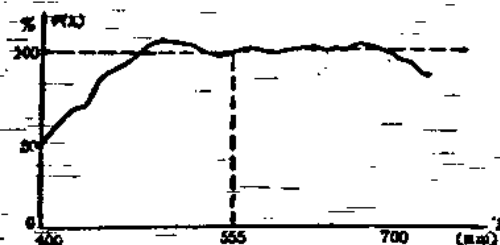


图 2.1.3 太阳的辐射功率波谱

4. 可见光的度量

可见光的辐射功率是一个与人眼视觉特性无关的客观物理量，象其它波长范围的电磁辐射一样，是可以物理仪器（功率计）测量的。但是，由于人眼对不同波长的光视觉灵敏度不一样，因此，用“辐射功率”这个物理量尚不足以反映可见光的特性。对可见光进行度量的仪器是模拟人眼的，其度量的结果，反映了人眼对光的视觉特性。这样测出的光是所谓“光度学”的一些基本量，如光通量、光强、亮度、照度等。

(1) 光通量 F

光源以电磁波的形式向各个方向射出的光功率之和称为光通量。利用光谱灵敏度曲线与人眼视觉灵敏度曲线相似的光电管可以直接测量光源的光通量，其单位为“流明”。

对单一波长的光而言，其光通量 F 与辐射功率的数值之间具有如下的简单关系，

$$F(\text{流明}) = k \times \text{辐射功率} \times \text{相对视敏度} \quad (2.1.1)$$

式中 $k = 673 \text{ 流明/瓦}$ 。

例如， $\lambda = 700 \text{ nm}$ 的红光的相对视敏度 $V(700) = 0.004$ ，若光源的辐射功率为 250 瓦 ，则其光通量应为，

$$F = 250 \text{ 瓦} \times 0.004 \times 673 \text{ 流明/瓦} = 673 \text{ 流明}$$

显然对于 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 的黄绿色光，由于 $V(555) = 1$ ，每瓦辐射功率的光通量为 673 流明 。

若光源的辐射功率波谱为 $P(\lambda)$ ，则波长 λ 附近、 $\Delta\lambda$ 区间内的光功率应为， $k P(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda$ ，在可见光范围内 ($380 \sim 780 \text{ nm}$) 对所有波长成分求和，即得到光源的光通量，

$$F = k \sum_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} P(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda \quad (2.1.2)$$

几种实用光源输出的光通量和发光效率如下表所示，

表 2.1.1

光源	40瓦 钨灯	100瓦 钨灯	1000瓦 钨灯	1000瓦 钨灯	1000瓦 高压水 银灯	40瓦 荧光灯
光输出 (流明)	465	1630	21500	28000	32000	2100
发光效率 (流明/瓦)	11.7	16.3	21.5	28	32	52.5

(2) 发光强度 I

光源在单位立体角内辐射的光通量叫作发光强度（简称光强），其单位为烛光， I 烛光表示在单位立体角内辐射了 I 流明的光通量。

$$\text{烛光} = \frac{\text{流明}}{\text{立体角}}$$

发光强度 I 与光通量 F 的关系表示为，

$$I = \frac{F}{\omega} \text{ 或 } F = I\omega \quad (2.1.3)$$

所谓立体角 ω 就是从球心射向球面面积 S 上的锥体角。设球的半径为 r ，则立体角

$$\omega = \frac{S}{r^2}$$

例如点光源，它在各个方向上的发光强度是相同的。由于球的总面积等于 $4\pi r^2$ ，即整个立体空间的立体角 $\omega = 4\pi$ ，所以点光源辐射的光通量应为 $F = 4\pi I$ 。

一般说来，光源在不同方向的光强是不同的。多数光源只在半球空间辐射，特别是具有散射表面的光源，光强的方向分布近于余弦规律，例如，在纸平面内，如图 2.1.4 所示，即

$$I_a = I_n \cos \alpha$$

其中 I_a 是光源面法线方向即垂直方向的光强，显然 α 角越大， I_a 越小，当

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ 时 } I_a = 0$$

(3) 亮度 B

亮度是发光面明亮程度的度量，决定于单位面积的光强。光可以由一个面光源直接辐射出来，也可以由入射光照射下的某一表面反射出来。亮度这个词对两种情况都是同样适用的。如果我们从某个角度 α 看发光面 S ，如图 2.1.5 所示，所见亮度 B 自然与光强 I_a 成正比，同时还与所见面积 $S \cdot \cos \alpha$ 成反比，即

$$B = \frac{I_a}{S \cdot \cos \alpha} \quad (2.1.4)$$

如果发光面是理想的散射面，即光强按 (2.1.3) 式所示的余弦规律分布，那么由 (2.1.4) 式可得：

$$B = \frac{I_n \cdot \cos \alpha}{S \cdot \cos \alpha} = \frac{I_n}{S} \quad (2.1.5)$$

即散射面的亮度与方向无关。例如，我们看电视图象时，由于显象管荧光屏面可近似视为余弦分布的散射面，所以从不同角度看去，亮度都一样，但若用仪表去测光强，则不同 α 角的数值自然是不同的。

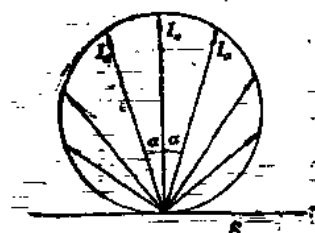


图 2.1.4 散射面光强的分布

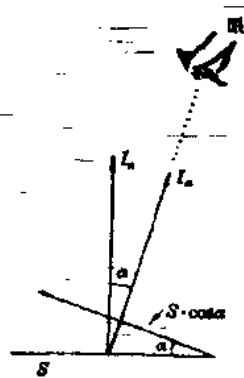


图 2.1.5 发光面的视在面积

亮度的单位叫尼特，即烛光/平方米，1尼特等于1平方米发光面在法线方向辐射1烛光的光强。

黑白接收机和彩色接收机屏幕的典型亮度分别为200尼特和120尼特的数量级。

(4) 照度 E

照射在单位面积上光通量就是照度。

设被照面积为 S，光通量为 F，则照度 E 就是

$$E = \frac{F}{S} \quad (2.1.6)$$

照度的单位叫勒克斯。1勒克斯表示1平方米面积上照有1流明的光通量。物体的照度可以直接用照度计量测。

各种环境下的照度大致如下表所示：

表 2.1.2

环境条件	黑夜	月夜	阴天 室内	阴大 室外	晴天 室内	晴天 室外
照度 (勒克斯)	0.001 ~0.02	0.02 ~0.2	5~50	50 ~500	100 ~1000	10000 ~100000

在人工照明条件下，物体上的照度与灯具的配置关系很大。设物体离开点光源的距离为 R，物面正对光源，那么由(2.1.3)式可求得照射在物体面上的光通量：

$$F = I_{\omega} = I \frac{S}{R^2}$$

则照度

$$E = \frac{F}{S} = \frac{I}{R^2} \quad (2.1.7)$$

即照度与距离的平方成反比，称为照度的平方反比定律。

在电视演播室里，照度约需300~2000勒克斯。黑白电视要求较低；彩色电视的要求较高，要取上限。

以上所讲的光度学单位采用的是 SI 光度单位（国际单位制），现汇总列表如下：

表 2.1.3

物理量	SI 单位	缩写符号
光通量	流明	lm
发光强度	烛光	cd
亮度	烛光/平方米 (即尼特)	cd/m ²
照度	勒克斯 (即流明/平方米)	lx

5 黑体辐射与色温

太阳光是经过大气层的吸收以后射到地球上来的，在地球上测量太阳辐射功率波谱

时, 测量结果将随着季节、气候以及早、中、晚而变化。

实际上, 任何热体都是辐射体, 拍摄彩色电视用的各种光源都是热辐射体, 当温度不同时, 辐射功率波谱也不同, 颜色也有变化。

为了便于描述不同温度辐射体的光辐射情况, 我们在这里先引进关于“绝对黑体”的概念。

假如有一个物体, 能在任何温度下都完全吸收具有任何组成的光, 即吸收系数 $\alpha(\lambda) = 1$, 这种物体称为绝对黑体。自然界中没有理想的绝对黑体, 但是用人为的方法可以制造非常接近于绝对黑体的模型。图 2.1.6 表示一个绝对黑体的模型, 这是一个几乎密闭的容器, 上面只有一个很微小的孔。所有经过小孔射入容器的光线都要经过很多次反射, 每反射一次光都要被容器壁吸收掉一部分, 最后只有极微小的一部分经过小孔返回。因此, 小孔的吸收本领对所有波长都接近于 1, 小孔可看作是绝对黑体的表面。黑体不仅能全部吸收外来的辐射, 而且在黑体温度升高后也能以电磁波的形式向外辐射能量, 这种现象称为黑体辐射, 它较之相同温度下的任何其它物体的辐射能力要强。(物体涂黑以后, 辐射能力增强, 大功率晶体管管的散热板往往涂黑, 以利于散热, 就是一个实例)。



图 2.1.6 绝对黑体模型

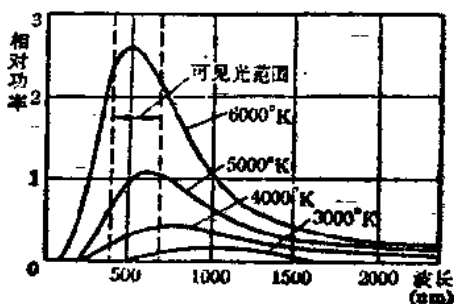


图 2.1.7 绝对黑体辐射的功率分布

绝对黑体辐射功率按波长的分布情况如

图 2.1.7 所示, 由图可见, 绝对黑体的辐射分布仅由温度决定。随着温度上升, 辐射显著增强, 曲线的最大值增加并向短波方向移动。这些曲线可以说明一已知的现象, 即受热物体的亮度随着温度的上升而迅速增加, 同时发射光的颜色也发生变化, 在温度较低时, 辐射的最大值位于长波区域, 物体主要辐射红外线, 可见光功率非常小以致眼睛感觉不到光。当温度升到 600°C 左右, 功率中有一部分处于可见光谱的长波边缘, 足以引起视神经感觉, 物体发暗红色; 温度再升高, 最大值越来越向短波方向移动, 可见光部分功率增加, 因此, 物体发光越来越亮, 越来越白; 当温度再继续升高时, 其所发之光就变成了蓝色。

为了比较和区分各种光源的颜色, 可以改变绝对黑体的温度, 使它与被比较的光源(温度辐射体)颜色相同, 此时绝对黑体的温度可用来表示光源的特性, 这个用来表征颜色的温度叫做“色温”, 并以绝对温度 $^{\circ}\text{K}$ 来表示。应该说明, 色温并不是光源本身的实际温度, 例如, 当一个钨丝灯泡保持在温度 2800°K 时, 它辐射的是色温为 2854°K 的白光。

6. 标准光源

绝对黑体不能作为实用光源, 太阳光受气候等因素的影响也不能作为实用的标准光源。在彩色电视中, 为了使光源比较和色度计算有个标准, 国际上规定了以下几种标准

白光：A、B、C、D₆₅ 和E，它们的近似光谱分布曲线大致如图2.1.8所示，作为对照，在图2.1.9中画出了各种色温的黑体辐射的光谱分布曲线。

各种标准白光的主要特性简述如下：

A白光：是色温为2856 °K的充气钨丝白炽灯所产生的光。

B白光：近似中午直射的太阳光，色温4874 °K的黑体辐射光与此相近，A光源经过滤色镜可产生B白光。

C白光：近似阴天天空散射光性质，通常称为正常白天的光线，色温6774 °K的黑体辐射光与此光源相近，这种白光曾一度广泛地用作彩色电视中的标准白光。A光源经过滤色镜也可产生C白光。

D₆₅ 白光：这是现在彩色电视中采用的标准白光，相当于直射太阳光与散射“天空光”的混合。色温6504 °K的黑体辐射光与此光源相近。现代荧光染料需要紫外光的激励，它们能吸收紫外光，再以可见光能量辐射出来，因而颜色分外鲜艳。D₆₅ 光源的光谱在400 nm以下范围内的功率要比B光源和C光源多，这对于已经日益广泛应用的荧光染料是有利的，从实现彩色电视的彩色重现的角度来看也是较为理想的。

E白光：也称作等能白光，这是一种假想的白光，如果可见光谱的所有波长都具有相等的功率，将产生这种光。E白光用于色度学中，作为理论分析和计算的标准比较方便。

7 辐射谱分解及反射率

辐射能量或功率都是辐射波长的函数，可表为 $P(\lambda)$ 所以总功率 P ，

$$P = \int_0^{\infty} p(\lambda) d\lambda$$

所以接收到总功能后可以分解为各波长的部分功率 $p(\lambda_k)$ 叫作辐射谱分解。

辐射谱的反射率 $\rho(\lambda)$ 、传输率 $\tau(\lambda)$ 、吸收率 $\alpha(\lambda)$ 当辐射功率 P_i 入射

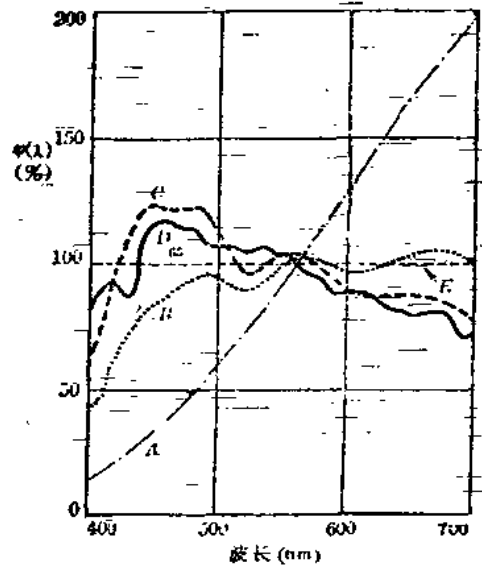


图2.1.8 标准光源的光谱分布曲线

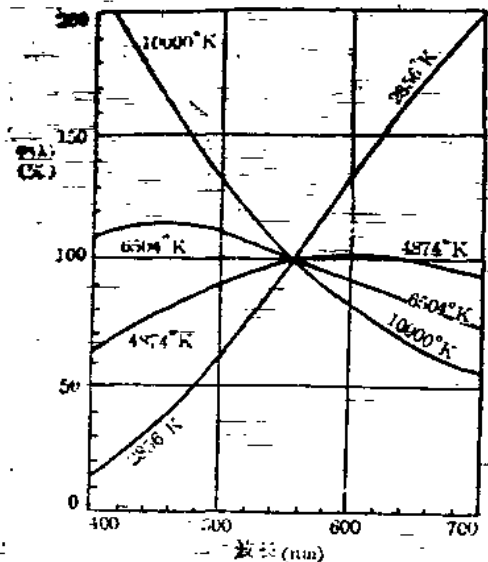


图2.1.9 各种色温的黑体辐射光谱分布曲线

到一个物体上, 某些功率 P_R 由表面反射出来, 某些功率 P_T 由物体传输出去, 还有些功率 P_A 被物体吸收。这时入射功率 P_I 分成三部分, 即

$$P_I = P_R + P_T + P_A \quad (2-1-8)$$

而物体对进入的、不同波长的辐射, 其反射率 $\rho(\lambda)$ 、传输率 $\tau(\lambda)$ 及吸收率 $\alpha(\lambda)$, 分别为:

$$\rho(\lambda) = \frac{P_R(\lambda)}{P_I(\lambda)},$$

$$\tau(\lambda) = \frac{P_T(\lambda)}{P_I(\lambda)},$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{P_A(\lambda)}{P_I(\lambda)}$$

(2-1-9)

在使用如上定义参数时, 需要把空间的因素考虑进去才更准确。

光是一种辐射能量, 但是从日常生活中可以知道光的辐射率与人们感觉到的亮度之间不是一种简单的关系。例如, 一束小的“暗光”在白天很难看出, 而在夜间看起来就足够亮了。这就与人眼的视觉特性有关系。为此要探讨光度学, 对正常人的观察而言, 这是一种把感受到的亮度与辐射能量联系起来的学问。

照明强度的单位用烛光来定义, 一支烛光对应工作在白金凝固温度 (2045°K) 时的黑体辐射在投影面积为六十分之一平方厘米上的

照明强度 (也就是单位立体弧度上的流明数)。在亮光条件下及暗光条件下, 正常人的观察对不同波长感受到的照明度 (单位是流明/瓦特) 的关系曲线示于图 2-1-10。这个图是国际标准的照明度函数。由这种照明度函数定义的观察者是国际标准观察者。对不同的观察者或者对同一个观察者在不同观察条件时的照明度函数都将会有所差别。利用这种照明度函数可以把照明强度与辐射强度联系起来。这种函数也反映出正常的观察者对辐射频谱的响应关系。

二、人的视觉系统

据有关资料得知, 人的视觉现象 99.9% 是由物理和生理因素引起的, 只有 0.1% 是由心理因素引起的。简单地描述一下人的视觉系统的解剖图是有用的。人的视觉系统, 如图 (2-1-11) 所示可以分成四个部分, 人的眼睛 (眼球)、视神经传导途径、侧外膝状体及视觉皮层。景物在左、右视网膜接收器上形成景象, 这些视网膜接收器

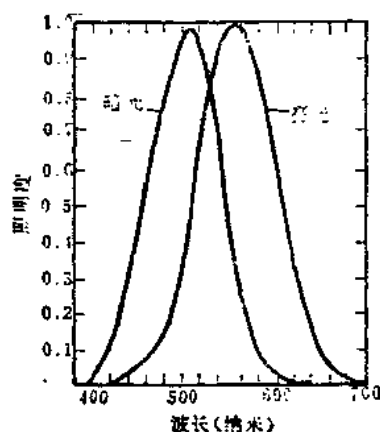


图 2-1-10 归一化照明度函数

通过光化反应把光能转换成电脉冲，这些脉冲通过视神经传到视径交叉，再传到侧外膝状体，最后到达人脑中的视觉皮层。

再来看一下图 2-1-12 的人眼的简化截面图，眼球最外面一层不透明的叫巩膜。它的形状接近一个球状外壳，半径约 11 毫米，厚度 1 毫米，在眼的前部，巩膜埋入透明的角膜中去。角膜厚度约 1 毫米，并以 8 毫米为半径向前凸出。眼球背部视神经在主轴鼻侧一边渗入巩膜。在角膜与巩膜连接点贴近的后面有睫状体。在睫状体贴近的前部是虹膜，虹膜是接近圆形的孔径，它构成眼球的瞳孔。由于照明及心理的影响，肌肉的膨胀和收缩控制虹膜使瞳孔的开度大小可以在 2 到 8 毫米内改变。

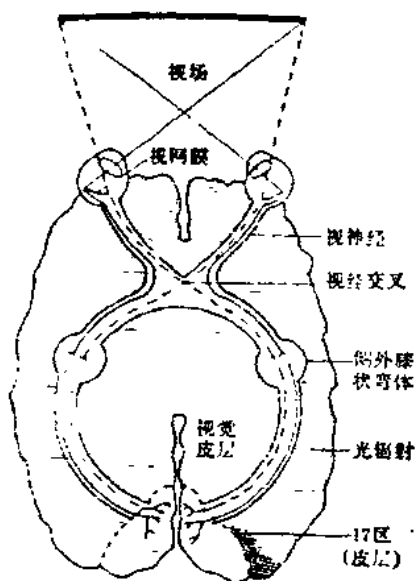


图 2-1-11 人的视觉系统结构

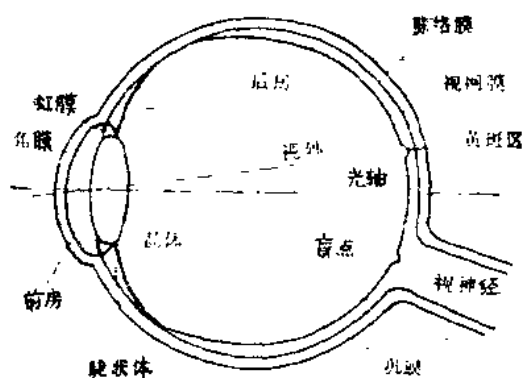


图 2-1-12 人眼的简化截面图

在瞳孔的贴背后有一个双凸晶体，它的形状可以改变，从而可以调节晶体构成的透镜的有效焦距以适应观察不同距离上的景物。晶体前有充满水样液的前房，晶体后为充满玻璃状粘液的后房。眼球的最内层覆盖着感光的视网膜，它由光的接收器及视神经所构成。

视网膜表面包含了不均匀分布的感光细胞，即杆状体及锥状体。在眼球后中心部的视网膜呈内陷状的是黄斑区，在这个区内只有锥状体感光细胞，这个区对景象及其色彩的识别能力最强。在黄斑区内视神经与锥状体是一对一地连接起来的，随着离黄斑区的距离越远，一根视神经连接的感光细胞数越来越多，在视网膜边缘上达到 1 比 140 的程度，杆状体对弱照明很灵敏，它承担了暗光条件下的视觉功能，而锥状体则对强照明很敏感，它承担了亮光条件下的视觉功能。

眼球的瞳孔在强光照明下能收缩，从而减少落到视网膜上的光亮。随着时间的推移，视网膜能适应新的感光水平，这时瞳孔恢复到原来的尺寸大小。瞳孔能控制进入的光量约 30 倍左右，视网膜能适应的光强度范围约有 10^{10} 倍。

视网膜上的感光细胞与视神经联系起来，通过视径交叉把视神经作交叉集合后又再

度分开，并通过外侧膝状体达到后脑的视觉皮层——视中核。

三、视觉

描述视觉系统、图象信息及摄象装置的特性时，往往用到一些与视觉现象有关的名词术语和参量，下面来说明一下这些概念。

亮度

这是一个与光刺激量有联系的一个心理学概念。由于眼睛对光刺激有很好的适应能力，因此人不能准确地判定绝对亮度。光源的照明强度与它发射的光量及发射的立体张角有关。两个相同强度的光源并不一定呈现出具有相同的亮度。

对比度

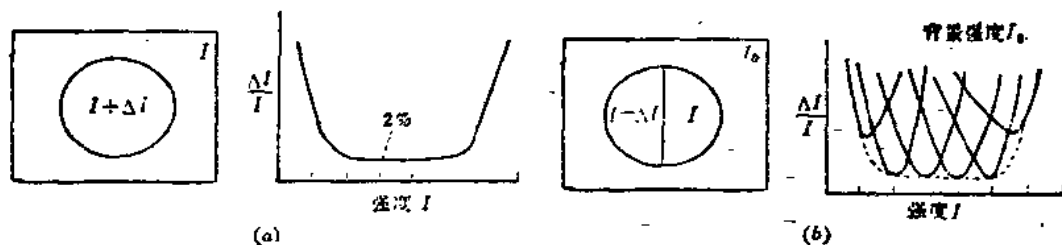


图 2-1-13 对比度

(a) 韦伯律；(b) 费希纳律。

眼睛对照明强度变化的响应是非线性的。假如在背景强度 I 中有一个强度为 $I + \Delta I$ 的光斑点，则刚好能从背景中看出来这个斑点所需的强度增量 ΔI 是 I 的一个函数，见图 2-1-13 (a)。由图可见在 I 相当大的范围内，比值 $\frac{\Delta I}{I}$ 的值保持一个约

为 0.02 的恒值，这个比值被称之为韦伯 (Weber) 比值。在 I 值高区及低区，比值迅速增大。假如背景强度为 I_0 ，则具有不同强度 (I , $I + \Delta I$) 的光点斑的两半部分要能区别开来，其所需的增量 ΔI 由图 2-1-13 (b) 所示。这时在不同背景强度 I_0 条件下的韦伯比值随 I 而变化的关系曲线中，比值保持恒值的范围缩小了。各条曲线的下限包络与图 2-1-13 (a) 中的曲线相当。虽然这个比值的恒值区缩小了，但对于大多数电子摄象系统来说明它们的动态范围与在固定背景 I_0 条件下 $\frac{\Delta I}{I}$ 比值

恒值区的大小还是差不多的。可以列出下列关系式：

$$d[\log I] = \frac{dI}{I} \quad (2-1-10)$$

这意味着韦伯比值对应于强度对数的微分，也即强度对数的增量对应于韦伯比值，它能与对比度直接联系起来。为此很多图象处理系统中往往对图象点的强度对数值而并不对其强度值进行处理操作。

视在的亮度与局部背景的关系很大，若几幅均匀背景中的小方块中各个小方块的强度都是一样的，但是由于它们周围局部的背景强度不一样，看起来这些小方块的强

度好象是不一样的。这就是视觉的“同时对比”现象。

马赫带

若有一组不同灰度值条带的照片如黑白电视的灰度渐变竖条，波形如图 2-1-14 (a) 每个条带内所反射的光强度是相等的，一相邻条带间的反射强度相差一个常值。然而看起来每个条带的右边要比左边来得亮，这就叫做马赫带效应。若马赫带图案的波形示于图中 (b)。在看到照片中的 B 处有一条亮带，在 D 处有一条暗带，纯粹从强度分布来解释这个现象是说不通的。这种亮度过冲的马赫带效应是由于眼睛的空间频率响应性质而引起的。由于眼睛不可能对空间高频率的亮度变化完美地作出反应，因此图象处理系统对边缘轮廓保真度的要求有时可以降低一些。

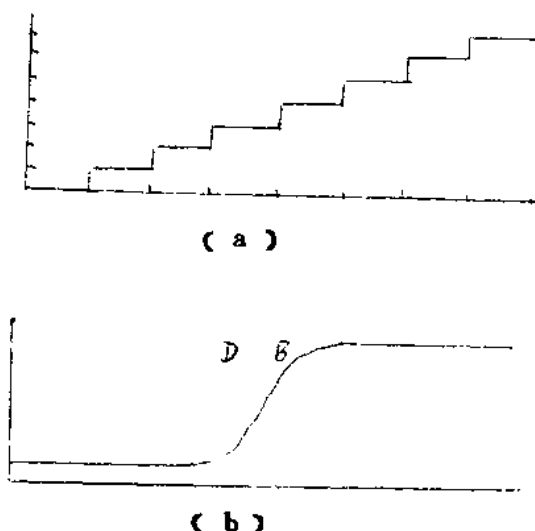


图 2-1-14 马赫带效应举例

(a) 阶跃强度分布

(b) 斜升强度分布

分辨率

分辨率是与视觉系统有联系的最复杂的参量之一。它可以利用调制传递函数 (M、T、F)、光线对、电视行数或光点尺寸来加以定义。光线对是一条白线与一条黑线构成的线对。一毫米长度中的线方数可以用来描述空间频率。当线对的宽度越来越窄，直到人眼区分不开黑白线时，这时就可以用一毫米内的线对数来定义分辨率。在电视中的行数并不等于光线对数，电视中黑线与白线各算成一行，再加上显象管光点亮度的空间分布呈高斯状，因此行的宽度要用亮度为峰值的一半的地方来确定；例如电视行数 1000 大约等于 416 对光线对。利用电视行数也可以表达分辨率，还有用调制传递函数 (M、T、F) 来定义分辨率的，这是一种心理学的度量。若观察一个光的传输率按空间频率正弦变化的测试图案，则可得不同空间频率条件下的视觉响应如图 2-1-14 所示。若规定一个输出幅度的下限值，可以定出响应超过下限值的频域范围，因此可以据此来定义分辨率。这种调制传递函数不仅可以作分辨率的度量，还可反映出视觉

系统对任意输入图案的系统响应。由图(2-1-15)可见视觉系统的调制传递函数呈现为一种带通滤波器的特性。在空间频率的低端及高端处传递函数值全都降落下来了。这就说明了为什么会出现马赫带效应的现象。

分辨率反映了人眼对视场中细节的区别能力。边缘的锐度与分辨率是有关系的,但应该把这两者区别开来。图2-1-16示出分辨率是非锐边缘的宽度、边缘锐度是边缘形状的函数,而对比度则是强度差 $I(b) - I(a)$ 的函数。

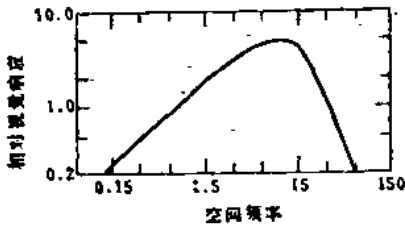


图2-1-15 视觉系统响应灵敏度

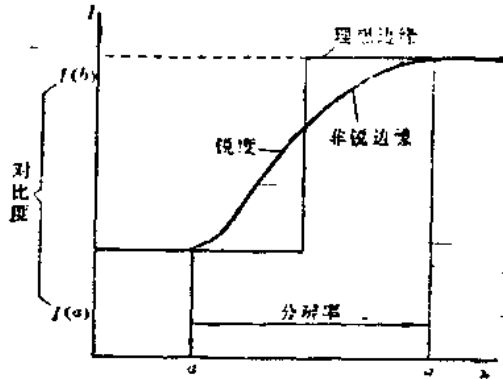


图2-1-16 对比度、锐度、分辨率的关系

§2-2 彩色视觉

一、物体的颜色

除了自己能发光的物体(光源)具有一定的颜色(光源色)之外,一般物体本身虽不能发光,但在光源的照射之下,仍呈现一定的颜色,这叫做物体色。在日常生活中,人们往往把物体色看作是物体本身的性质。实际上,物体之所以呈现某种颜色,是由于它反射或透射了入射光谱的一部分而吸收了其余的部分。因此,我们眼睛所看到的颜色既与物体本身的反射光谱特性 $\rho(\lambda)$ 或透射光谱特性 $\tau(\lambda)$ 有关,也与照明光源的辐射功率波谱 $P(\lambda)$ 有关。也就是说,光源色决定于 $P(\lambda)$, 物体色决定于 $P(\lambda) \cdot \rho(\lambda)$ 或 $P(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$ 。概括起来一句话,物体的颜色决定于由该物体射入眼睛的光的组成情况。在黑暗中所有物体都是黑的。在光源照射下,一个反射能力很低的物体,例如,反射系数小于(5~10%)的物体,通常也被当作是黑色的。一个屏幕,我们称它为白色,是因为它对于不同波长的光具有几乎同样高的反射特性。这个屏幕只有在白光照射下才呈现白色,如果用红光照射,则屏幕所呈现的就是红色了。同样道理,如果一块布在白光照射下能够反射蓝光,我们称它为蓝布,若改用红光照明,这块布就会被看成是黑色的。这些事例说明,人眼看到的物体色是物体本身的性质与照明条件的综合效果。

二、三基色原理和混色方法

所谓三基色原理,是指自然界常见的绝大多数彩色都可以用三种基本色按照适当的比例混合组成的某个等效色来模拟,这个等效色与实际色作用于人眼引起的彩色视觉是

相同的。

为了说明这个原理，我们来研究一下混色的情况。将红、绿、蓝三束单色光投射在一个白色屏幕上相互迭加，适当调整其亮度比例，可以得到如图2.2.1所示的现象。

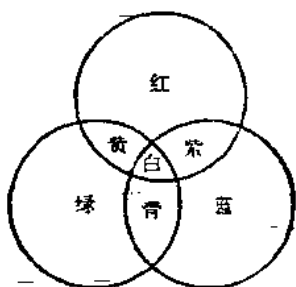


图 2.2.1 彩色光的混合

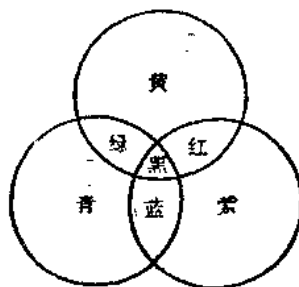


图 2.2.2 颜料混色

我们看到：红光 + 绿光 = 黄光；
红光 + 蓝光 = 紫光；
绿光 + 蓝光 = 青光；
红光 + 绿光 + 蓝光 = 白光。

适当改变混色的比例，可以得到各种颜色的光。例如，红光与绿光混合时，如果绿光比例由小逐渐增大，则依次产生橙红、橙、黄橙、黄、黄绿、草绿等各色光。当红、绿、蓝三色光以不同比例混合时，亦可得到各种较淡的颜色，如淡青、淡紫、淡绿、淡黄、粉红、浅蓝等各色光。

红、绿、蓝三色称为彩色光的三基色，三基色光相加以获得各种彩色的方法通常称为相加混色。

在彩色印刷、绘画和电影中采用了颜料，白光照射在颜料上后，光谱的某些部分便被吸收，而其余的部分被反射或透射，从而表现出某种颜色。混合颜料时，每增加一种颜料，都要从白光中减去更多的光谱成分，因此颜料混合的过程称为相减混色。采用的基色（称颜料基色）是紫（吸收绿光）、黄（吸收蓝光）、青（吸收红光）三色。可以将它们写成表达式：

紫色 = 白光 - 绿光；

黄色 = 白光 - 蓝光；

青色 = 白光 - 红光。

调配颜料基色，也可以得到各种颜色，如图2.2.2所示。可以看到：

黄色 + 紫色 = 白光 - 蓝光 - 绿光 = 红色；

黄色 + 青色 = 白光 - 蓝光 - 红光 = 绿色；

紫色 + 青色 = 白光 - 绿光 - 红光 = 蓝色；

黄色 + 青色 + 紫色 = 白光 - 蓝光 - 红光 - 绿光 = 黑色。

对于任一颜色的光而言，都存在着另一种颜色的光，当这二色光按适当比例混合时，总可以得到白光，这两种颜色就称为互补色。例如，青、紫、黄三色分别是红、绿、蓝三色的补色，反之亦然。所以，颜料三基色与彩色光三基色正好是互为补色。

无论是相加混色或相减混色，都符合三基色原理。用混合三基色的方法可以模拟实际的现象说明。光谱成分彼此差异很大的彩色光，可以引起完全相同的彩色视觉。

前面，我们在讲解相加和相减混色时，所举的例子是将三基色同一时间作用于同一空间位置的直接迭加方法。实际上这是在一种光的光谱中增加或减去某些光谱成分。因此，这是一种“光谱混色”。此外，由于人眼具有极限分辨率和视觉惰性，所以对彩色还有空间和时间的混色效应。

空间混色法指的是当空间不同颜色的几个点靠得足够近，以至于它们对人眼所张的视角小于最小分辨角（人眼黑白分辨角约为 $1'$ ，而彩色分辨角约为 $4'$ ）时，人眼就不能分辨出它们各自的颜色，所感觉到的只是它们的混合色。

时间混色法利用的是人眼的视觉暂留特性，当各种色以足够快的速度轮换出现时，人眼不能辨别各自的颜色，看到的只是它们的乱合色。

另外，顺便提及，当两只眼睛观看不同颜色时，也会产生混色效应，例如一只眼睛遮上绿色滤色片，另一只眼睛遮上红色滤色片，如果只睁开一只眼睛，就只会看到红色或绿色，如果同时睁开双眼，观看同一目标，所见到的正好是黄色。这就是所谓生理混色法。

三、彩色视觉

在人眼视网膜里充满着大量能感光的圆锥细胞和圆柱细胞。圆锥细胞感受强光，主要在白光强光下起作用，能辨别颜色和图象的细节。圆锥细胞的数目约为七百万个，绝大部分分布在视网膜中部的黄斑区域。圆柱细胞的感光灵敏度很高，约比圆锥细胞高一万倍，它能在黄昏、光线暗弱时起作用，使人能看得见东西，但它不能辨别颜色。因此，在光线暗弱的情况下，物体的颜色难以辨认，看到的只是一片灰色。人眼里圆柱细胞多达一亿三千万人，主要分布在视网膜周围。圆柱细胞所产生的视觉叫做黄昏视觉（暗视）。圆锥细胞的视觉叫做白日视觉（明视）。

感光细胞中都包有一种感光的化学物质，叫做视色素。圆柱细胞只含有一种视色素而圆锥细胞分为三类，分别含有红敏、绿敏和蓝敏三种视色素。这三种视色素的吸收光谱灵敏度曲线分别为 $V_R(\lambda)$ 、 $V_G(\lambda)$ 、 $V_B(\lambda)$ ，如图 2.2.3 所示。其峰值分别在红（580 nm）、绿（540 nm）、蓝（440 nm）波段。三条曲线在某些区域互相看迭。在明亮条件下，由于圆柱细胞的活动被抑止，此时圆锥细胞起主要作用。因此，人眼的亮度曲线 $V(\lambda)$ （视敏度曲线）显然应是三种圆锥细胞光谱灵敏度曲线的总和。

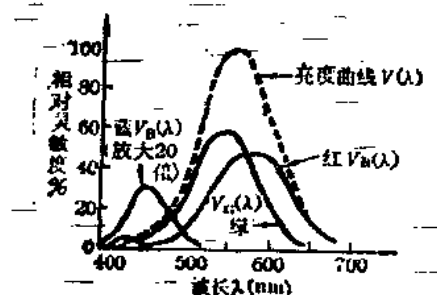


图 2.2.3 人眼三种锥状细胞的光敏曲线

当辐射功率波谱为 $P(\lambda)$ 的彩色光射入人眼时，三种圆锥细胞所受光刺激分别为，

$$\begin{aligned} F_R &= k \sum P(\lambda) V_R(\lambda) \Delta \lambda \\ F_G &= k \sum P(\lambda) V_G(\lambda) \Delta \lambda \\ F_B &= k \sum P(\lambda) V_B(\lambda) \Delta \lambda \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

大脑根据三种圆锥细胞所受光刺激的总和产生亮度感觉。所谓彩色视觉就包含以上两方面的含义。

如果一束光线只能引起某一种光敏细胞的兴奋（其所受光刺激较强），而另二种光敏细胞的兴奋很微弱，我们感觉到的便是其一种基色光，即红色、绿色或蓝色。如果红敏和绿敏细胞都兴奋，便感觉到黄色；绿敏和蓝敏细胞都兴奋，便感觉到青色；红敏和蓝敏细胞都兴奋，则感觉到紫色。如果三种光敏细胞都被引起同等程度的兴奋，我们感觉到的便是白光了。显然，随着三种光敏细胞所受刺激程度的差异，还会产生各式各样的彩色感觉。

如果两束光线对人眼三种圆锥细胞的光刺激量相同，人就感到两束光线的亮度和颜色相同，尽管二者的物理性能（光谱分布）可能完全不同。三基色混色原理正是反映了这一视觉特点，因而，任一实际色均可用三基色混合成的光谱分布可能完全不同的等效色来代替。

四、彩色量

彩色光的度量称为彩色量，它决定于彩色光引起的彩色视觉的总效果。为了全面地描述一个彩色量，必须要有三个数据，这就是亮度、色调和饱和度。（Brightness, Hue, Saturation）。

亮度表示这个彩色量所引起的视觉强度，也就是明亮程度，显然，亮度与光功率有关。色调表示颜色的类别，如红、橙、黄、绿等等，色调与光的波长成分有关。饱和度表示颜色的深浅（浓淡），它与彩色光中的白光含量有关。纯光谱色的饱和度为 100%；彩色中所掺白光越多，饱和度越低；白光的饱和度为 0。色调和饱和度合在一起称为色度，这也就是日常人们所说的颜色。

§ 2.3 色度 Chromaticity 和色度图 ~ diagram

1. “RGB” 计色系统

(1) 配色实验和物理三基色单位

根据三基色原理，按不同比例混合三种基色，可以得到各种彩色。同样，如果给定一种彩色，也可以找到配出这种彩色所需的三种基色的混合比例。通过图 2.3.1 所示的比色计，可以进行配色实验，从而确定三基色分量与任一彩色的数值关系。比色计中有两块互成直角放置的白板，构成漫反射的屏幕，将观察者的视场分为两等

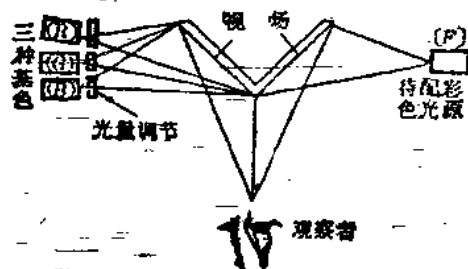


图 2.3.1—配色实验原理图

分。将待配的彩色投射到屏幕的一边，而将三种基色光投射到另一边。分别调节三种基色光的强度，直到三色混合后产生的彩色与待配彩色的色度和亮度完全一致为止。从三基色调节装置中读出所需的各个基色的数量，便可写出配色方程，

$$[F] = R(R) + G(G) + B(B) \quad (2.3.1)$$

符号 $[F]$ 表示具有一定亮度和色度的待配彩色量， (R) 、 (G) 、 (B) 分别表示红、绿、蓝三基色的单位量。上式说明，要配出彩色量 $[F]$ ，必须将 R 个单位的红基色、 G 个单位的绿基色和 B 个单位的蓝基色加以混合。 R 、 G 、 B 代表各个基色的强度（色量），称为三原系数（又称三基色刺激值），它们的数值决定了彩色量的色度和亮度。

什么是三基色的单位量呢？在色度学中度量彩色，一般不用辐射功率或光通量作单位，色度学规定配出一定量白光的三基色的量作为单位。基色单位中既包含色度、又包含亮度。“RGB”计色系统（又称物理三基色系统）的基色单位为：

红基色单位 (R) ：波长 700 nm 的红光 1 流明；

绿基色单位 (G) ：波长 546.1 nm 的绿光 4.5907 流明；

蓝基色单位 (B) ：波长 435.8 nm 的蓝光 0.0601 流明。

标准白光 $E_{\text{白}}$ 可用上述三基色各一个单位配出，

$$[E_{\text{白}}] = 1(R) + 1(G) + 1(B)$$

配出的 $E_{\text{白}}$ 的光通量为 $(1 + 4.5907 + 0.0601)$ 流明 $= 5.6508$ 流明。

同样，按 $(2.3.1)$ 式配出的彩色量 $[F]$ 的光通量（由于亮度与光通量成正比，因此，在色度学中，常将彩色量的亮度 Y 用光通量来表示）应为，

$$Y = 1R + 4.5907G + 0.0601B \text{ [流明]} \quad (2.3.2)$$

这就是“RGB”计色系统中的亮度公式。

上述基色色度的选择是考虑到，由这些基色配出的彩色范围要尽可能的大；为便于重复实验，基色的获得应该是简单而且准确的。在水银灯光谱中包含有上述绿和蓝两种单色光。

(2) 分布系数和三基色光谱响应曲线

如果待配的彩色是辐射功率为 1 瓦、波长为 λ 的谱色，此时所需的三个基色 (R) 、 (G) 、 (B) 的色系数可用符号 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 表示，称为分布三色系数，它们都是波长 λ 的函数。

$$[F(\lambda)]_{1W} = \bar{r}(\lambda)(R) + \bar{g}(\lambda)(G) + \bar{b}(\lambda)(B) \quad (2.3.3)$$

根据大量实验结果取平均值，可得分布三色系数数据，国际上采用的测量结果如下表所示：