

大多数成像系统获取的图像或视频是给人看的,因此,其成像系统和工程设计都需要考虑人眼的视觉特性。人眼视觉系统(Human Visual System,HVS)本身也是一套机理非常复杂的成像系统。本章主要介绍人眼视觉的形成过程和视觉特性,这些内容不仅有助于选择成像器件和显示仪器的设计方案和成像参数,而且对图像处理算法的设计具有重要的指导意义。

3.1 光源与色温

许多成像技术中以白光作为标准光源。但是,统称为“白光”的光谱成分分布并不相同。为了说明各种白光因光谱成分不同而存在的光色差异,通常采用与绝对黑体辐射温度有关的“色温”来表征各种光源的具体光色。所谓黑体,是指既不反射也不透射而完全吸收入射光的物体,它对所有波长的光的吸收系数均为 1。当某一光源的相对辐射功率波谱及相应颜色与绝对黑体在某一特定热力学温度下的辐射功率波谱及颜色一致或相近时,则绝对黑体的这一特定热力学温度就是该光源的色温或相关色温,二者的单位均为开(K)。

根据色温的概念,国际照明委员会(CIE)定义了标准照明体和照明光源。照明体指入射在物体上的一个特定的相对光谱功率分布,可以看作一种标准,而光源指具体发光的物体,是某一标准的具体实现物体。表 3-1 列出了 CIE 定义的几种标准照明体和标准光源。

表 3-1 几种标准照明体和标准光源

照明体	定 义	光源	定 义
A	绝对黑体在 2856K 时发出的光	A	分布温度为 2856K 的透明玻壳充气钨丝灯
C	相关色温约 6774K 的平均昼光	C	分布温度为 6774K 的光源,可由标准光源 A 和特制的滤光器组合实现
D ₆₅	相关色温约 6504K 的平均昼光	D ₆₅	未规定
D ₅₅	相关色温约 5503K 的昼光	D ₅₅	未规定
D ₇₅	相关色温约 7504K 的昼光	D ₇₅	未规定

3.2 人眼的构造

如图 3-1 所示,人的眼睛是一个构造极其复杂而精密的信息处理系统。简单地说,眼球由水晶体隔成前房和后房两部分,前房内充满透明淡盐溶液,后房内是称作玻璃体的透明胶

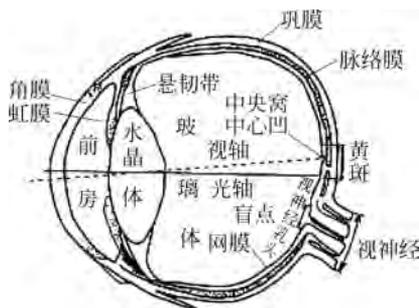


图 3-1 人眼的结构示意图

状物质。水晶体是透明的弹性物质,在睫状肌的作用下可以调节曲率改变焦距,使不同距离的景物在视网膜上成像,作用类似于照相机中的光学聚焦透镜。眼球周围自外向内包围着 3 层薄膜。最外层是白色坚固的巩膜,起保护眼球的作用。与巩膜层对应的眼球前端部分是坚硬透明的角膜。中间一层是黑色不透光的脉络膜,起营养眼球的作用。与脉络膜对应的眼球前端部分是不透明的虹膜,中间有一小孔叫瞳孔,在虹膜环状肌的作用下,瞳孔的直径可在

在 2~8mm 范围调节,以控制进入人眼的光通量。最里面的一层膜是视网膜,约占眼球内面的三分之二。视网膜由大量的光敏细胞和神经纤维组成,是人眼的感光部分,表面分布着大量的锥细胞和柱细胞。锥细胞分布在视网膜的中心,数量有 600 万~700 万,每个细胞都连到自己的神经末梢。锥细胞既能辨别光的强弱,又能辨别光的颜色,所以锥细胞视觉也称为适亮视觉。柱细胞位于视网膜的边缘部分,分布面大,数量有 7500 万~15 000 万,几个柱细胞连到同一个神经末梢,分辨率比较低。柱细胞对低照度比较敏感,主要提供视野的整体视像,但不感受颜色,所以柱细胞视觉称为适暗视觉。

视网膜上的感光细胞分布是不均匀的。在视网膜中心,锥细胞的密度最大处(每平方米 15 万个)形成一个椭圆形区称为黄斑,该区域是视觉最清楚的区域。黄斑中心部位的视网膜最薄,形成一个直径约为 0.4mm 的凹窝(约为 1.3°),称为中心凹。离中心凹越远,锥细胞密度越小。在离中心 $0.5^\circ\sim 1^\circ$ 的地方,开始出现柱细胞。在整个与视轴成 2.5° 的区域内,出现柱细胞密度增加,锥细胞密度减少的趋势,这个部位确定了中心凹的边缘,称为中央窝。在离视中心约 20° 的地方,柱细胞密度增至最大,约为每平方米 16 万个,锥细胞的密度则减少到约每平方米 0.5 万个。

视网膜的感光细胞与大脑皮层的神经纤维连接。神经纤维是由 $7\times 10^5\sim 8\times 10^5$ 个独立的神经束组成,在离视中心 15° 的地方与视神经乳头相连。在视网膜的视神经入口处,没有感光细胞。这个区域(水平方向约为 6° ,垂直方向约为 8°)不感光,叫作盲点。视网膜有 3 种神经单元,分别为视细胞、双极细胞和神经节细胞,它们在每个单元间的神经突触处会合。神经突触处保证了光信号由感光细胞到大脑皮层的单向传导,也保证了神经纤维刺激状态的积累作用,在神经突触处向大脑皮层传播的脉冲电流使人们产生视觉。

3.3 人眼视觉机理

3.3.1 人眼视觉形成过程

人眼的视觉形成过程比较复杂,包含光学过程、化学过程和神经处理过程。眼睛如同一个自动变焦和自动改变光圈大小的照相机。从光学角度看,眼睛中 3 个最重要的部分是水晶体、瞳孔和视网膜,它们分别对应照相机中的镜头、光阑和底片。简单来说,眼睛通过调节水晶体的弯曲程度(屈光)来改变水晶体的焦距获得倒立缩小的实像。人眼对不同距离的物体均可成像,视度调节由水晶体完成。正常状态下,水晶体后面的曲率半径比前部大,睫状肌自然放松,可以使无限远的景物成像在视网膜上。当观察近距离物体时,睫状肌收缩,使

水晶体前表面半径减小,焦距变短,后焦点前移,从而使物体在视网膜上清晰成像。根据水晶体聚焦中心和视网膜的距离与观测物体的距离比值,可以大致计算出实际物体在视网膜上的像尺寸。如图 3-2 所示,一个远在 100m 处,高 15m 的柱状物,当眼球前后距离为 17mm 时,在视网膜上的尺寸为 $15 \times 17 / 100 = 2.55\text{mm}$ 。

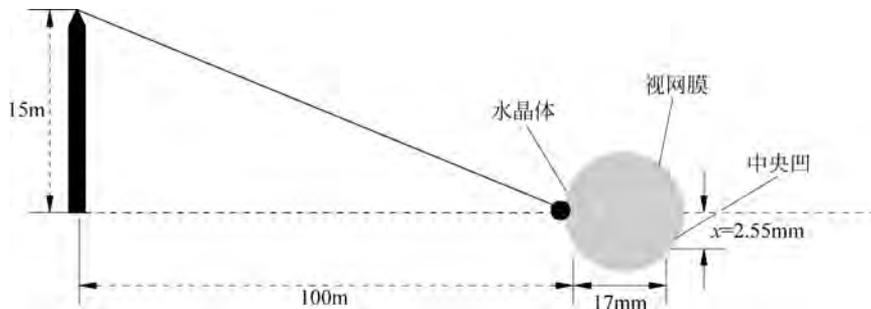


图 3-2 人眼物像关系示意图

综上所述,人眼的成像过程可以归纳为以下 4 个步骤:

(1) 景物经过水晶体聚焦于视网膜形成“光像”。视网膜上各点的光敏细胞受到不同强度的光刺激,锥细胞和柱细胞中的感光包色素受光照发生化学变化。

(2) 光学变化使视网膜上的点产生与光照度成正比的电位,将“光像”变成“电位像”。

(3) 视网膜上各点的电位分别激励对应的视神经放电,放电电流是振幅恒定而频率随视网膜电位大小变化的电脉冲,相当于视神经将视网膜的“电位像”按频率编码的方式传送给视皮质(visual cortex)。

(4) 视皮质将接收到的电脉冲信号(约 200 万个)分别存入视网膜光敏细胞相对应的细胞特殊表面中,然后进行综合的图像信息处理使人产生视知觉。

3.3.2 亮度、颜色与立体感觉

亮度感觉也称为明暗视觉。外界光源可以分为自然光源(如太阳)和人工光源(如蜡烛、电灯)。由光源辐射的光或由物体反射的光,其强度对应光的能量,光能量越大,人眼感受到的亮度越亮。我们知道,光度学是由朗伯于 1760 年建立起来的度量光强弱的学科,定义了光通量、发光强度、照度、亮度等主要光度学参量,并将发光强度的单位坎德拉(cd)指定为基本单位。1979 年第 16 届国际计量大会决定:坎德拉是一个光源在指定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色辐射,而且在此方向上的辐射强度为 $1/683(\text{W}/\text{Sr})$ 。光通量用来表征人眼所能感受到的光的辐射功率,单位是流明(lm),亮度则表示发光面在不同位置 and 不同方向的发光特性,单位为坎德拉每平方米(cd/m^2)。

人眼还可以感觉彩色。光源的颜色直接取决于它的辐射功率波谱,彩色物体的颜色则由照射光源的功率波谱和它的反射特性及透射特性决定。进入人眼的光刺激一般是含有不同颜色成分单色光的复合光。如前所述,人眼的彩色感觉能力主要由视网膜上的锥细胞完成。锥细胞内含有感受红、绿、蓝三基色的感色成分,它们具有不同的光谱特性,对光的吸收特性随光波长的变化而变化。当红、绿、蓝颜色的光投射到锥细胞上时,视神经把视细胞的感色兴奋传入大脑枕叶,三组感色神经系统所受刺激相对比例组合形成彩色视觉。另外,彩

色刺激与彩色感觉不是简单的因果关系,人眼的彩色感觉还会受到光谱成分和光照环境的影响。

人眼还可以感觉到自然景物的立体信息,即立体视觉。立体视觉分为双眼立体视觉和单眼立体视觉。形成双眼立体视觉的主要原因是双眼视差和辐辏。辐辏指眼球做旋转运动。当人们观察某一景物时,由于两眼相距一定距离,使得同一物体在左、右两眼视网膜上的成像存在一定差异,形成人眼对宽、高、深的立体视觉。单眼也能感受立体信息,不过需要适当调节睫状肌,适应眼睛与景物之间的距离变化,从而感受不同的深度感觉。



视频讲解

3.3.3 人眼视觉特性

人眼视觉受色调、亮度、时间等因素的影响,形成了一些可以利用的视觉规律,对成像系统的设计与理解具有重要指导意义。

1. 光谱响应特性

人眼在相同的亮度环境下,对不同波长的光感觉灵敏度不同。视敏度指在相同的亮度感觉下,测出的各种波长光的辐射功率 $P(\lambda)$ 。 $P(\lambda)$ 越大,说明人眼对该波长的光越不敏感; $P(\lambda)$ 越小,人眼对该波长的光越敏感。习惯上将 $P(\lambda)$ 的倒数定义为视敏度 $V(\lambda)$ 。如图 3-3 所示,为明亮环境下人眼对黄绿光视敏度的归一化曲线。在图 3-3 中,横坐标为光波的波长 λ ,单位是 nm,纵坐标是经归一化处理后的相对视敏度 $V(\lambda)$ 。可以看到,在等能量分布的光谱中,人眼感觉最暗的是红色,其次是蓝色和紫色,感觉最亮的是波长为 555nm 的黄绿色。

2. 谱尔金效应

如图 3-4 所示,在不同亮度环境下,人眼的视敏度曲线会发生变化。在弱光条件下,视敏度曲线会向左移。谱尔金效应源于视网膜内锥细胞和柱细胞的不同感光特点。

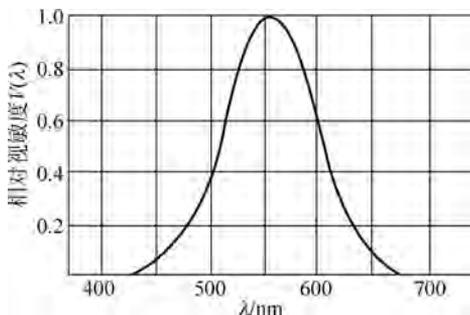


图 3-3 明亮环境下的相对视敏度曲线

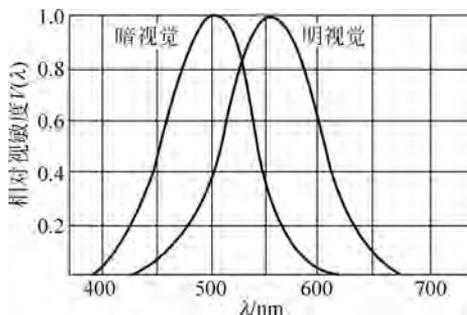


图 3-4 谱尔金效应

3. 韦伯定律

人眼对明暗的感觉具有相对性。人眼的亮度感觉不仅与物体的自身亮度有关,还与周围环境的亮度有关。例如,在晴朗的白天,人眼可分辨的亮度范围为 $200 \sim 20\,000 \text{cd/m}^2$,但是 200cd/m^2 以下的亮度就感觉黑。在夜间,可分辨的亮度范围为 $1 \sim 200 \text{cd/m}^2$, 100cd/m^2 的亮度就感觉很亮。基于人眼的这种明暗感觉特点,在设计成像系统时,有两点可供参考:第一,重现图像的亮度不需要等于实际景象的亮度,只要保持二者的对比度不变即可;第二,对于人眼不能察觉的亮度差别,在重现图像时也不必精确地复制出来,只要保证重现图

像和原景物有相同的亮度层次。

韦伯定律正是以公式总结出人眼明暗感觉的相对性。即,在均匀亮度背景下,韦伯-费赫涅尔系数为常数:

$$\xi = \frac{\Delta B_{\min}}{B} = \text{常数} \quad (3-1)$$

式中, ΔB_{\min} —— 可见度阈值;

B —— 背景亮度。

可见度阈值反映人眼可以觉察到的最小亮度差别。该值越小,表示人眼分辨景物细微差别的能力越强。韦伯-费赫涅尔系数通常在 0.005~0.02 范围内变化,当背景亮度很高或很低时,可达 0.05。大多数景物或图像的背景亮度是复杂而不均匀的,背景的亮度随时间和空间的变化而变化,这种现象称为视觉掩盖效应。一般地,背景越亮,越不易分辨细节。

4. 亮度感觉范围及适应性

人眼能感觉到的亮度范围很宽。但是,人眼并不能同时感受这么宽的亮度范围,实际的感受亮度只是以适应亮度为中心的一小部分,为 1000 : 1~10 : 1。

人眼的亮度感觉还具有适应性。当人眼由亮环境进入很暗的环境时,需要经过 3~5min 的适应后才能看清物体,瞳孔自动增大,称为暗适应;相反,人眼由暗环境进入亮环境时,瞳孔自动缩小,需要 2~3min 就可以恢复视觉,称为亮适应。

5. 人眼的分辨率

人眼的分辨率指人眼对景物细节的分辨能力。一般将被观察物体上刚能分辨的最近邻两黑点或两白点的视角的倒数称为人眼的分辨率。如图 3-5 所示,人眼的分辨率可以表示为:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2\pi L}{360 \times 60 \times d} \quad (3-2)$$

式中, L —— 人眼与画面之间的距离;

d —— 能分辨的相邻两点之间的距离;

θ —— 视场半角。

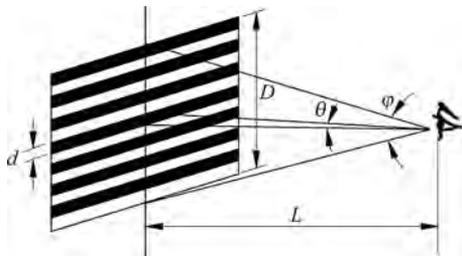


图 3-5 人眼的分辨率

有时候为了方便,也常用度数表示人眼的分辨极限。一般情况下,人眼的分辨极限 θ 为 $1'$,折算成分辨距离为 0.03mm。影响人眼分辨率的主要因素有环境亮度、景物的相对对比度、被观察物体的距离以及运动状态等。

6. 人眼的视觉惰性与马赫效应

人眼的亮度感觉有一个短暂的过渡过程,当一定强度的光突然作用于视网膜时,不能在

瞬间形成稳定的主观感觉,需要一定的时间。当光消失后,亮度感觉也不是立即消失,而是按指数函数规律逐渐减小,这种人眼亮度感觉的变化滞后于实际亮度变化的现象称为视觉惰性。视觉惰性源于视觉暂留特性,白天约为 0.02s,晚上约为 0.2s。

临界闪烁频率是与人眼视觉惰性紧密联系的概念,指刚好不引起闪烁感觉的最低频率。如果光脉冲频率不高,会使人眼产生一明一暗的闪烁感觉,长期观看容易疲劳。一般在电影播放中每秒放 24 幅固定的画面,电视系统每秒传送 25~30 幅图像,就可以使人眼感觉为连续活动的图像。

人眼对景物和图像上不同空间频率的成分具有不同灵敏度。实验表明,人眼对中频成分的响应较高,对高、低频率成分的响应较低。所以,人眼在观察亮度的跃变时,会感觉边缘侧更亮,暗侧更暗,这种效应称为马赫效应。

7. 人眼的视野

视野指头部不动,眼球转动时能观察到的空间范围。人眼的综合视野可以分解为水平视野和垂直视野。通常,正常人眼的最大视野范围为左右 35° 和上下 40° ,最佳视野范围约为左右 15° 和上下 15° ,最大固定视野范围约为左右 90° 和上下 70° 。头部活动时视野可以扩大,背景颜色会影响视野的大小。

除了以上视觉特性外,人眼对彩色的感觉能力比较复杂。例如,人眼对彩色细节的分辨率远比对黑白细节的分辨率低。而且,在色度和亮度相同的情况下,面积大的彩色区域给人亮度和饱和度较强的感觉,这也正是彩色电视大面积着色原理的视觉基础。此外,人眼对彩色色调及对比效应、彩色饱和度及对比效应均有不同的分辨率和感觉。



视频讲解

3.4 人眼的彩色视觉

人眼对彩色的观察和处理是一种非常复杂的生理和心理过程。为了有效利用彩色视觉,人们在总结实验结果的基础上,建立了不同的彩色模型。其中,常见的彩色模型有彩色色度学模型、工业彩色模型和视觉彩色模型 3 类。

3.4.1 彩色三要素

在色度学中,任一彩色光可用亮度(Brightness)、色调(Hue)和色饱和度(Saturation)三个基本参量表示,称为彩色三要素。

亮度指光作用于人眼时所引起的明亮程度的感觉,与色光所含的能量有关。一般而言,彩色光的功率大则感觉亮,功率小则感觉暗。

色调指颜色的类别,与光的波长有关。改变光的波谱成分,光的色调会发生变化。彩色物体的色调主要由物体本身的光吸收特性、反射和透射特性决定。另外,与照明光源的特性也有关系。

色饱和度指彩色光呈现色彩的深浅程度。同一色调的彩色光,饱和度越高,颜色越深,饱和度越低,颜色越浅。白光的饱和度是 0,所以,高饱和度的彩色光可以通过掺入白光而被冲淡。对物体而言,色饱和度与物体的反射光谱选择性有关。

色调与色饱和度合称为色度,它既说明彩色光的颜色类别,又说明颜色的深浅程度。色度再加上亮度,就构成了对彩色的完整说明。非彩色只有亮度的差别,没有色调和色饱和度特性。

3.4.2 三基色原理与混色方法

三基色原理指自然界中常见的大部分彩色都可由3种相互独立的基色按照一定比例混合得到。合成彩色的亮度是3个基色的亮度之和,色调和饱和度则由3个基色分量的比例决定。所谓独立,是指其中任何一种基色都不能由另外两种基色合成。1931年,CIE规定水银光谱中波长为700nm的红光为红基色光,波长为546.1nm的绿光为绿基色光,波长为435.8nm的蓝光为蓝基色光。当红、绿、蓝3束光比例合适时,就可以合成自然界中常见的大多数彩色。

不同颜色混合在一起,能产生新的颜色,这种方法称为混色法。混色分为相加混色和相减混色。

相加混色是各分色的光谱成分相加,混色所得彩色光的亮度等于成分基色的亮度之和。彩色电视系统就是利用红、绿、蓝3种基色以适当的比例混合产生各种不同的彩色。相加混色规律可以定性地表示为:

红色+绿色=黄色
 绿色+蓝色=青色
 红色+蓝色=品红
 蓝色+黄色=白色
 红色+青色=白色
 绿色+品红=白色
 红色+绿色+蓝色=白色

注意:

- (1) 这里的“+”表示混色符号,与数学中表示的相加不同;
- (2) 两种颜色混合为白色的颜色,称为互补色。例如,蓝色和黄色互为补色,红色和青色互为补色,绿色和品红互为补色。

实现相加混色的方法有以下4种:

(1) **时间混色法**。时间混色法是将3种基色光按照一定的时间顺序轮流投射到同一平面上,只要轮换的速度足够快,人眼由于视觉惰性而分辨不出3种基色,只能看到混合彩色的效果。

(2) **空间混色法**。空间混色法是将3种基色光分别投射到同一表面相邻的3个点上,只要3点距离足够近,由于人眼的分辨率有限,不能分辨出这3种基色,只能感觉到它们的混合色。空间混色法是同时制彩色电视的基础,阴极射线管显示器(CRT)、等离子体显示器和液晶显示器的显像都是利用空间混色法。

(3) **生理混色法**。当两只眼睛同时分别观看不同的颜色,也会产生混色效应,称为生理混色法。立体彩色电视的显像方法就是利用生理混色法。

(4) **全反射法**。全反射法是将3种基色按不同比例同时投射到一块全反射平面上进行混色。投影式彩色电视机就是利用这种方式进行混色。

相减混色是利用颜料、染料的吸色性质实现的,多用于彩色印刷、彩色胶片和绘画中。如图3-6所示,相减混色中的三原色为青(Cyan)、品红(Magenta)和黄色(Yellow),通常缩写为CMY。相减混色规律可以定性地表示为:

青色 = 白色 - 红色
 品红 = 白色 - 绿色
 黄色 = 白色 - 蓝色
 黄色 + 品红 = 白色 - 蓝色 - 绿色 = 红色
 黄色 + 青色 = 白色 - 蓝色 - 红色 = 绿色
 品红 + 青色 = 白色 - 绿色 - 红色 = 蓝色
 黄色 + 青色 + 品红 = 白色 - 蓝色 - 红色 - 绿色 = 黑色

注意：这里的“-”表示混色符号，与数学中表示的相减不同。

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。例如，青色颜料在白光的照射下，之所以呈现青色是因为从白光中吸收了红光成分。



图 3-6 相减混色法的三基色示意图

3.4.3 配色方程

定性的混色规律可以为配色提供指导。但是，在工程实践中往往需要对颜色及其混合进行定量计算。为此，CIE 制定了一整套颜色测量和计算方法，称为 CIE 标准色度学系统。

设红、绿、蓝的基色单位分别用 $[R_{\text{CIE}}]$ 、 $[G_{\text{CIE}}]$ 和 $[B_{\text{CIE}}]$ 表示，配色实验表明，三基色单位的光通量之比为 $1 : 4.5907 : 0.0601$ 时，可以配出等量的白光。可见，标准白光的 3 种基色光的光通量比例有效数字是 4 位小数。为简便计算，把光通量为 1lm 的红光作为 1 个红基色单位，记为 $1[R_{\text{CIE}}]$ ；4.5907lm 的绿光作为 1 个绿基色单位，记为 $1[G_{\text{CIE}}]$ ；0.0601lm 的蓝光作为蓝光的 1 个蓝基色单位，记为 $1[B_{\text{CIE}}]$ ，则标准白光的配色关系可以表示为：

$$F_{\text{白}} = 1[R_{\text{CIE}}] + 1[G_{\text{CIE}}] + 1[B_{\text{CIE}}] \quad (3-3)$$

对于任意给定的彩色光 F ，其配色方程为：

$$F = c_r[R_{\text{CIE}}] + c_g[G_{\text{CIE}}] + c_b[B_{\text{CIE}}] \quad (3-4)$$

式中， c_r ——红色基系数；

c_g ——绿色基系数；

c_b ——蓝色基系数。

式(3-4)说明，彩色光 F 可以由 c_r 个红基色单位、 c_g 个绿基色单位、 c_b 个蓝基色单位配出。当 $c_r = c_g = c_b$ 时， F 表示标准白光。可见，三者的比例关系决定了所配彩色光的色度，三者的大小决定了所配彩色光的光通量，所以，式(3-4)也可以看作某彩色光的亮度公式。

在不同的彩色模型中，三基系数大小不同，存在一定的变换关系。如图 3-7 所示，在明视觉和 2° 的视场观察条件下，为配出单位辐射功率、波长为 λ 的单色光所需要的三基色的单位数，称为分布系数，分别用 \bar{r} 、 \bar{g} 、 \bar{b} 表示。于是，单位功率辐射的单色光的配色方程为：

$$F_{\text{单色}} = \bar{r}[R_{\text{CIE}}] + \bar{g}[G_{\text{CIE}}] + \bar{b}[B_{\text{CIE}}] \quad (3-5)$$

3.4.4 彩色模型

1. 彩色色度学模型

1) CIE-RGB 模型

在式(3-4)的配色方程中，令 $m = c_r + c_g + c_b$ ， m 称为色模，代表某彩色光所含三基色单

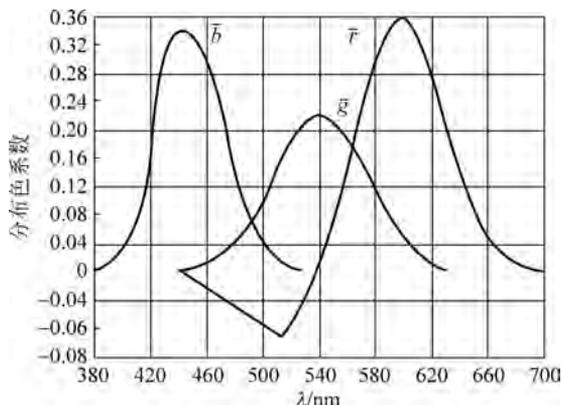


图 3-7 CIE-RGB 混色曲线

位的总量,即彩色光的亮度。再令:

$$r = \frac{c_r}{m}, \quad g = \frac{c_g}{m}, \quad b = \frac{c_b}{m} \quad (3-6)$$

则 r, g, b 称为相对色系数或色度坐标,它们代表彩色光的色度。显然, $r + g + b = 1$ 。如果已知分布色系数 $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$, 则可用下式求出相对色系数 r, g, b :

$$r = \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad g = \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad b = \frac{\bar{b}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}} \quad (3-7)$$

由于 $r + g + b = 1$, 所以知道两个相对色系数就能确定彩色的色度, 这是 1931 年由 CIE 规定的色度图, 故称为 CIE-RGB 色度图。 $r = g = b = 1/3$ 表示等能白光。如图 3-8 所示, CIE-RGB 色度图中, 单位红基色的色度坐标为 $(1, 0)$, 单位绿基色的色度坐标为 $(0, 1)$, 单位蓝基色的色度坐标为 $(0, 0)$ 。在由三基色色度坐标构成的直角三角形内, 任意一点的相对色系数 r, g, b 均为正值。在该三角形之外、舌形闭合曲线之内的点, 有一个相对色系数为负值, 对应高饱和度的彩色。舌形曲线上的点表示谱色, 可见光谱中有一个固定的波长与之对应。虚线上的点代表的彩色是红基色和蓝基色相加混色得到的。越靠近谱色轨迹的彩色饱和度越高, 越靠近三角形内部 E 点处的彩色饱和度越低。

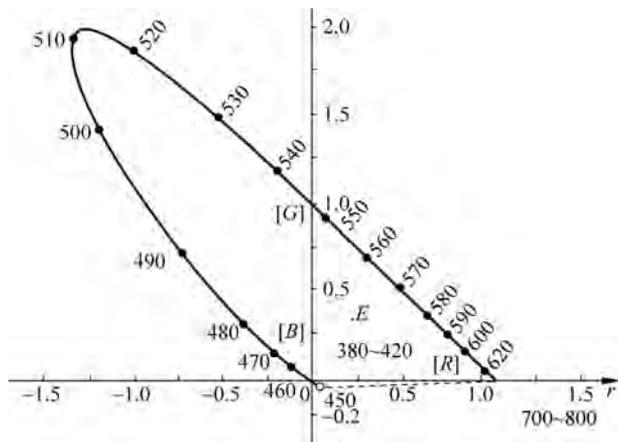


图 3-8 CIE-RGB 色度图

2) XYZ 彩色模型

CIE-RGB 彩色模型并不能产生所有彩色,为此,CIE 于 1956 年又提出了 XYZ 彩色模型。XYZ 彩色模型的配色方程为:

$$F = X[X] + Y[Y] + Z[Z] \quad (3-8)$$

式中, X 、 Y 、 Z ——三色系数;

$[X]$ 、 $[Y]$ 、 $[Z]$ ——三色单位;

$X[X]$ 、 $Y[Y]$ 、 $Z[Z]$ ——三色分量。

当 $X=Y=Z$ 时, F 仍为等能白光。 X 、 Y 、 Z 并不代表真实的物理彩色,它与 CIE-RGB 物理三基色之间存在如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4187 & -0.0912 & 0.0009 \\ -0.1580 & 0.2524 & -0.0025 \\ -0.0828 & 0.0157 & 0.1786 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{\text{CIE}} \\ G_{\text{CIE}} \\ B_{\text{CIE}} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

XYZ 彩色模型的混色曲线如图 3-9 所示。其中, \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 为 XYZ 彩色模型的分布色系数。与 CIE-RGB 彩色模型的分布色系数不同, \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 均为正值。曲线 \bar{y} 代表人眼对不同波长的光的亮度感觉。

如图 3-10 所示,为 XYZ 彩色模型的色度图,可以实现的彩色位于舌形封闭曲线内部。可以看出,与图 3-8 所示的 CIE-RGB 色度图相比,最大的区别就是所有配色系数都位于第一象限,即均取正值。而且,XYZ 彩色模型能够配出的彩色更加丰富。

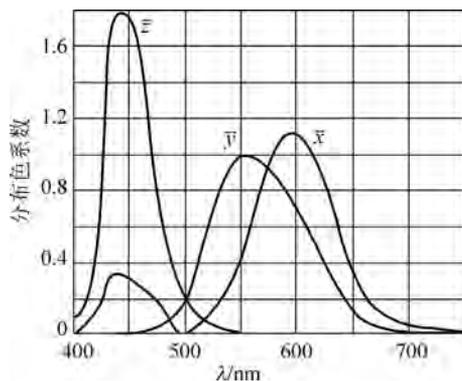


图 3-9 XYZ 彩色模型的分布色系数曲线

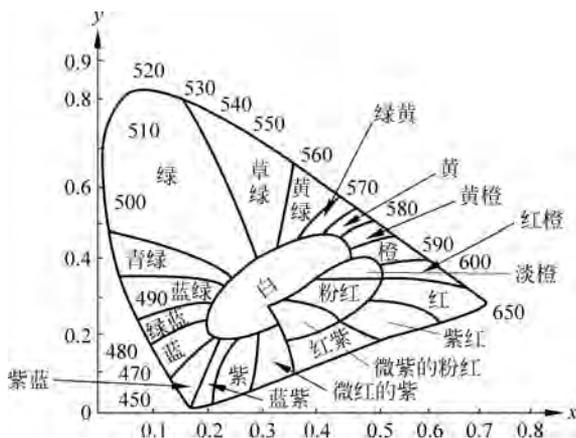


图 3-10 XYZ 彩色模型的色度图

2. 工业彩色模型

1) RGB 彩色显示模型

RGB 工业彩色模型是美国国家电视委员会(NTSC)提出的用于 CRT 显示彩色图像的模型(NTSC-RGB),是应用最为广泛的一种工业彩色模型。如图 3-11 所示,该模型可以用基于笛卡儿坐标系的单位归一化立方体表示。在图 3-11 中,3 个坐标轴分别为红(R)、绿(G)、蓝(B)分量,彩色立方体中 3 个坐标为(1,0,0)、(0,1,0)、(0,0,1)的顶点分别对应红、绿、蓝三基色,另外 3 个顶点对应于三基色的补色,原点对应黑色,离原点最远的顶点对应白色。在这个模型中,从黑到白的灰度值分布是沿从原点到离原点最远顶点间的连线(虚线表

示),而立方体内其余各点对应不同的颜色,可以用从原点到该点的向量表示。RGB 工业彩色模型主要面向诸如彩色显示器、数字扫描仪、数字摄像机等成像和显示设备。

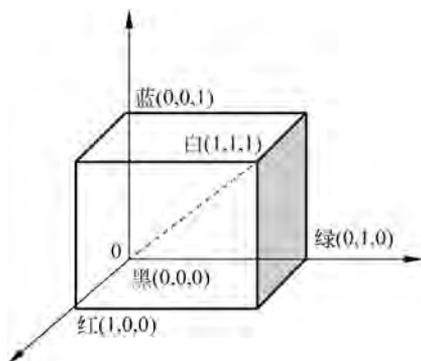


图 3-11 NTSC-RGB 彩色模型立方体

前述的两个彩色色度学模型 CIE-RGB 彩色模型和 XYZ 彩色模型均可由 NTSC-RGB 彩色模型转换得到:

$$\begin{bmatrix} R_{\text{CIE}} \\ G_{\text{CIE}} \\ B_{\text{CIE}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.167 & -0.146 & -0.151 \\ 0.144 & 0.753 & 0.159 \\ -0.007 & 0.059 & 1.128 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.174 & 0.201 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 0.117 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

2) CMYK 彩色模型

在印刷、彩色胶片和绘画中,通常采用相减混色法,即选用青色(C)、品红(M)和黄色(Y)为三基色,它们分别吸收各自的补色光(红、绿、蓝光)。为了使颜料的颜色或打印的彩色更加逼真鲜艳,并能生成更多颜色,可以在 CMY 三基色中再增加黑色(K),构成 CMYK 四种基色,即 CMYK 模型:

$$\begin{cases} K = \min(R, G, B) \\ C = 1 - R \\ M = 1 - G \\ Y = 1 - B \end{cases} \quad (3-12)$$

3) 彩色传输模型

彩色传输模型主要用于彩色电视系统中电视信号的传输。为了减少信号频带和节约信道资源,不同电视制式分别提出了不同的彩色传输模型,主要有 YUV、YIQ、YCbCr 模型,其中的 Y 分量代表黑白亮度信息,其余分量代表彩色信息。

(1) YUV 彩色模型。YUV 彩色模型用于 PAL 制式彩色电视系统, Y 是亮度分量, U、V 是彩色色差分量。YUV 彩色模型可由 RGB 工业彩色模型转换得到:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.287 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

在对信号进行传输与处理后,可以将 YUV 模型再转换为 RGB 模型以便显示:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 1.140 \\ 1.000 & -0.395 & -0.581 \\ 1.000 & 2.032 & 0.001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

(2) **YIQ 彩色模型**。YIQ 彩色模型是 NTSC 制式电视信号的彩色模型,与 YUV 彩色模型的区别主要在于对色差信号的处理方式不同,它与 RGB 工业彩色模型的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.275 & -0.321 \\ 0.212 & -0.523 & 0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

可见,在模拟电视系统中,彩色模型的亮度公式可以表示为:

$$Y = R[R] + G[G] + B[B] = 0.30R + 0.59G + 0.11B \quad (3-16)$$

式中, $[R]$ ——0.30lm 的红基色光;

$[G]$ ——0.59lm 的绿基色光;

$[B]$ ——0.11lm 的蓝基色光。

同样,在对信号进行传输与处理后,可以将 YIQ 模型转换为 RGB 模型以便显示:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.956 & 0.620 \\ 1.000 & -0.272 & -0.647 \\ 1.000 & -1.108 & 1.700 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

(3) **YCbCr 彩色模型**。YCbCr 彩色模型主要用于数字视频的传输与处理,它与 RGB 工业彩色模型的互相转换关系为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_b - 128 \\ C_r - 128 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{77}{256} & \frac{150}{256} & \frac{29}{256} \\ -\frac{44}{256} & -\frac{87}{256} & \frac{131}{256} \\ \frac{131}{256} & -\frac{110}{256} & -\frac{21}{256} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.4020 & 0.0000 \\ 1.0000 & 0.0000 & 1.7720 \\ 1.0000 & -0.7140 & -0.3441 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ C_b - 128 \\ C_r - 128 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

3. HIS 彩色模型

HIS 彩色模型主要用于艺术领域和以彩色处理为目的的应用,例如动画中的彩色图形,反映了人眼视觉系统观察彩色的方式。在 HIS 彩色模型中, H 表示色调(Hue), I 表示亮度(Intensity), S 表示饱和度(Saturation)。该模型有两个特点:一是亮度分量 I 与图像的彩色信息无关,二是色调和饱和度分量与人感受颜色的方式紧密相连。

HIS 彩色模型与 NTSC-RGB 彩色模型之间的转换关系为:

$$\begin{cases} I = \frac{1}{3}(R + G + B) \\ S = 1 - \frac{3}{R + G + B}[\min(R, G, B)] \\ H = \arccos \left\{ \frac{[(R - G) + (R - B)/2]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\} \end{cases} \quad (3-20)$$

由式(3-20)直接算出的 H 值为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 对应 $G \geq B$ 的情况, 当 $G < B$ 时, 应采用 $\bar{H} = 360 - H$ 将其转到 $180^\circ \sim 360^\circ$ 范围。需要注意, 当饱和度 $S = 0$ 时, 色调 H 没有意义, 而当强度 $I = 0$ 时, 饱和度 S 没有意义。

若设 S, I 的值在 $[0, 1]$ 区间, R, G, B 的值也在 $[0, 1]$ 区间, 则从 HIS 彩色模型到 RGB 彩色模型的转换公式为:

$$\begin{cases} B = I(1 - S) \\ R = I \left[1 + \frac{S \cos H}{\cos(60^\circ - H)} \right] & H \in [0^\circ, 120^\circ] \\ G = 3I - (B + R) \end{cases}$$

$$\begin{cases} R = I(1 - S) \\ G = I \left[1 + \frac{S \cos(H - 120^\circ)}{\cos(180^\circ - H)} \right] & H \in [120^\circ, 240^\circ] \\ B = 3I - (G + R) \end{cases} \quad (3-21)$$

$$\begin{cases} G = I(1 - S) \\ B = I \left[1 + \frac{S \cos(H - 240^\circ)}{\cos(300^\circ - H)} \right] & H \in [240^\circ, 360^\circ] \\ R = 3I - (G + B) \end{cases}$$

本章小结

本章主要介绍了人眼的构造、人眼视觉系统及视觉形成机理和视觉特性, 这些内容对成像系统的工程设计和视觉感知的理解具有指导意义。此外, 本章对人眼的彩色视觉、三原色原理和配色方法、不同系统和应用场合中采用的彩色模型以及相互转换关系进行了介绍。

思考题

- (1) 如何理解图像的 NTSC-RGB 和 HIS 颜色模型, 写出二者的互换公式。
- (2) 简述人眼视觉原理及视觉特性。
- (3) 解释人眼产生颜色视觉的机理。
- (4) 光度学中有哪些基本概念? 如何理解?