

第 1 章 图像与图像通信概论

图像是人类接触世界、获取信息的最重要途径，也是现代通信系统中传输的主要内容之一。图像通信已和语音通信、数据通信一起构成了现代通信的三大支柱，应用越来越广泛。本章将介绍人眼的视觉特性、图像的相关概念、图像通信的分类及系统组成等内容。

1.1 人眼的视觉特性

光辐射刺激人眼时，将会引起复杂的生理和心理变化，这种感觉就是视觉。视觉是人类最重要、最完美的感觉，也是人类获取信息的主要来源。据统计，在人类从外界获取的信息中，70%以上来自视觉。

人眼构造精妙绝伦，使人眼视觉具备了一系列无与伦比的特性。这些特性对于视频图像处理具有重要的指导意义，也构成了视频图像通信的基本依据。

1.1.1 可见光

人们之所以能看到大自然的景物，首先是太阳光对大地照射的结果，离开阳光，地球将是一个黑暗的世界。由物理学可知，光是一种电磁波，兼有波动特性和微粒特性。日光是太阳上的热核反应所发出的多种波长范围的电磁辐射的一部分，这些电磁波混合在一起，同时作用于人眼，便获得了白色光的感觉。当然，并不是一切波长的电磁波都能引起人眼的视觉反应，只有波长在 380~780 nm 的电磁波才能被人眼所感觉，通常把这部分电磁波称为可见光。按波长由长到短的顺序排列的电磁辐射波谱如图 1-1 所示，依次是无线电波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和宇宙射线等。

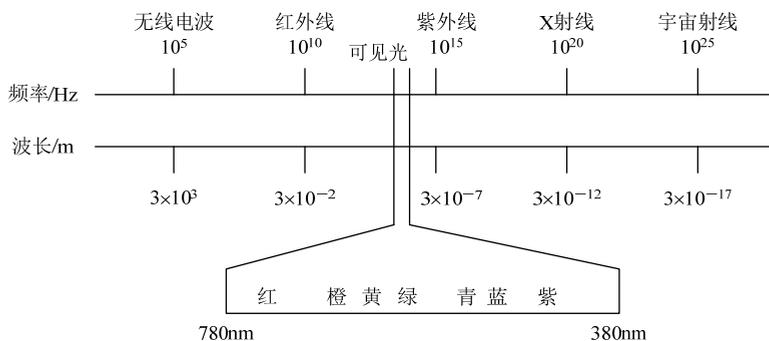


图 1-1 电磁辐射波谱

不同波长的光所呈现的颜色各不相同，随着波长的缩短，显现的颜色依次为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫。

只含有单一波长成分的光或所占波谱宽度小于 5 nm 的光称为单色光，含有两种或两种

以上单色光成分的光称为复合光。单色光所呈现的色称为谱色，复合光所呈现的色称为非谱色。

太阳光是复合光，包含了自 380 nm 至 780 nm 所有波长的光，它刺激人眼引起的白色是非谱色。实验表明，利用三棱镜可以把太阳光分解成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七个范围的连续光谱，各彩色光的光谱范围见表 1-1。实验还表明，光具有可逆性，即可以用同样的三棱镜将上述七个范围的彩色光重新聚合起来，还原为一束白光。

表 1-1 各色光的光谱范围

色光名称	紫	蓝	青	绿	黄绿	黄	橙	红
光谱范围/nm	390~430	430~470	470~500	500~530	530~560	560~590	590~620	620~780

能够辐射光的物体称为光源或发光体，而不能辐射光的物体则统称为非发光体。太阳是最大的自然光源，是照亮大自然的光源之一。

能被人眼所感知的光归结起来有三种：直射光、透射光和反射光。由发光体产生并直接刺激人眼形成光感的光称为直射光，如日光、照明光等都属于这一类。发光体所产生的光，照射到透明或半透明物体上，被有选择地透射过来的光称为透射光。日常见到的墨镜、滤色片等就是这样的物体。同样，发光体所发出的光，照射到物体上，被该物体有选择地反射出来的光称为反射光。

就物体所呈现的颜色而言，发光体和非发光体是有区别的。对于发光体，它所呈现的颜色是由其本身发出的光的光谱分布所决定的。对于那些本身不发光的非发光体，其颜色是由照射它的光源的光谱分布及物体本身的反射或透射特性所决定的，亦即该物体在特定光源照射下所反射或透射的一定可见光谱成分作用于人眼所引起的视觉效果。通常，非发光体的颜色是指日光照射时所呈现的颜色。也就是说，自然界的不同景物，在日光照射下，由于反射（或透射）了可见光谱中的不同成分而吸收其余部分，从而引起人眼的不同彩色感觉。例如，一块红布，是因为该布中的颜料反射了日光中的红色光而吸收了其他各色光才使其呈红色；一个白色的物体，之所以呈白色，是因为它对日光中所有波长的光，具有同等的反射特性。如若不用日光照射，而是用其他照明光源照射非发光体，颜色就有可能发生变化。例如，若以不含红光成分的绿色光源去照射红布的话，则会因吸收了绿色光而使红布呈现暗黑色；同样，对于白色物体，若用红色光源去照射便会因为反射了红色光而呈现红色，如用绿色光源照射则会因为反射了绿色光而呈现绿色。可见，非发光体的彩色感觉取决于两个方面，一是人眼对可见光谱中不同成分有不同的视觉感受，二是光源所含的光谱成分以及物体反射（或透射）和吸收其中某些成分的特性。

1.1.2 人眼的视敏特性

视觉是由可见光刺激人眼引起的，如果光的辐射功率相同，而波长不同，则引起的视觉效果也不同。随着波长在 380~780 nm 内的改变，不仅颜色感觉不同，而且亮度感觉也不相同。

在等能分布的光谱中，人眼感觉最暗的是红色，其次是紫色和蓝色，而最亮的是黄绿色。换句话说，若要获得相同的亮度感觉，则所需的红光辐射功率要比黄绿光的辐射功率

大得多。图 1-2 是根据 1993 年国际照明委员会 (CIE) 获得的最佳数据绘制的相对视敏度 (视敏函数) 曲线, 体现了在光辐射功率相同的情况下, 人眼的亮度感觉随光波波长变化的一般规律。

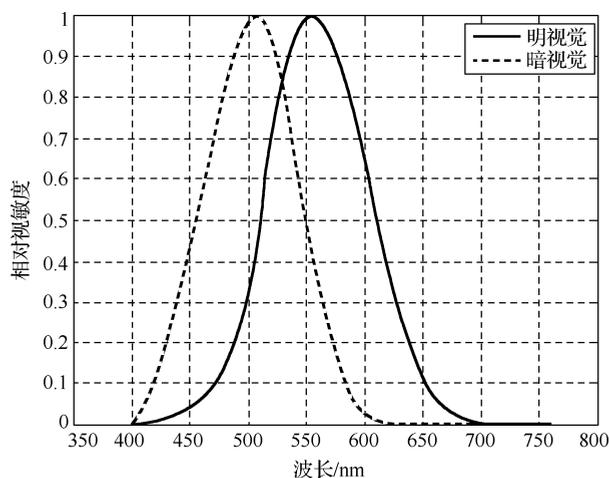


图 1-2 明视觉和暗视觉的相对视敏度曲线

在图 1-2 中, 实线为明视觉视敏函数曲线, 反映的是白天正常光照下人眼对不同波长光的敏感程度; 虚线为暗视觉视敏函数曲线, 反映的是人眼在夜晚或微弱光线下对不同波长光的敏感程度。可见, 在白天正常光照下, 人眼对波长为 555 nm 的光 (黄绿光) 具有最大的明视觉灵敏度。在夜晚或微弱光线下, 人眼主观亮度感觉规律有所变化, 表现为对波长短的光的敏感程度增大, 即视敏函数曲线左移, 人眼对波长为 507 nm 的光具有最大的暗视觉灵敏度。

产生明视觉和暗视觉的机理是: 人眼的视网膜层由大量光敏细胞组成。光敏细胞按其形状分为锥状细胞与杆状细胞两种。锥状细胞既可辨别光的强弱, 又可辨别光的色彩, 白天的视觉过程主要由锥状细胞来完成。杆状细胞只能感光, 不能感色, 但它对弱光的灵敏度要比锥状细胞高得多, 当光线暗到一定程度时主要靠它来辨别明暗。所以, 在暗处或微弱光线下人眼看到的景物都呈灰黑色, 并没有颜色感觉。

1.1.3 人眼的亮度视觉

除光源外, 自然界中各种物体的亮度决定于它所反射的光的强弱。因此, 在同样照明条件下, 各种物体的亮度取决于物体对入射光的反射能力。

人眼所能感觉的亮度范围 (称为视觉范围) 非常宽, 约有百分之几至几百万坎德拉每平方米 (cd/m^2)。其所以如此, 在于人眼的感光具备随外界光的强弱而自动调节的能力。这种调节能力也称眼睛的适应性, 它包括瞳孔的调节作用和视觉细胞本身的调节作用。当一个人从明亮的大厅步入一个较暗的房间时, 一开始会感到一片漆黑, 什么也看不清, 但经过一段时间的适应后就能够逐渐看清物体, 这就是所谓的暗光适应。同样, 从暗的房间一下子进入明亮的大厅时, 也会经历从什么都看不清到逐渐能分辨物体的过程, 即亮光适应过程。暗光适应需要 10~30 秒, 亮光适应则要快得多, 只需 1~2 秒。

当然，人眼并不能同时感受这样大的亮度范围。人眼的明暗感觉是相对的，实际观察景物时所得到的亮度感觉并不直接由景物的亮度所决定，还与周围环境的亮度有关。一方面，人眼在适应了某一环境的平均亮度后，能够分辨的亮度范围要窄得多；另一方面，随着所适应环境的平均亮度不同，人眼的视觉范围也有所不同。通常，在适当平均亮度下，人眼能分辨的最大亮度和最小亮度之比值（又称为对比度，记为 C ）为 1000；而当平均亮度很低时，这一比值只有 10。另外，在不同环境亮度下，对同一亮度的主观感觉也并不相同。例如，晴朗的白天，环境亮度约为 10000 cd/m^2 ，可分辨的亮度范围为 $200 \sim 20000 \text{ cd/m}^2$ ，低于 200 cd/m^2 的亮度都引起黑色感觉；但当环境亮度降至 30 cd/m^2 时，可分辨范围为 $1 \sim 200 \text{ cd/m}^2$ ，这时， 100 cd/m^2 的亮度已引起相当亮的感觉，只有低于 1 cd/m^2 的亮度才形成黑色感觉。可见，人眼在适应于某一平均亮度时，黑-白感觉对应的亮度范围较小，且对比度 C 几乎与绝对亮度无关。

实验表明，人眼察觉亮度变化的能力也是有限的，即对不同亮度 L ，能察觉的最小亮度变化 ΔL_{\min} 不同。但在相当大的范围内，可察觉的最小相对亮度变化 $\Delta L_{\min}/L$ 却等于常数 ζ ，称之为相对对比度灵敏度阈或费赫涅尔系数。随着环境条件不同， ζ 通常会在 $0.05 \sim 0.02$ 内变化；当亮度很高或很低时， ζ 可达 0.05。

根据对比度 C 和对比度灵敏度阈 ζ ，就可以计算出能分辨的亮度层次。亮度层次也称图像的黑白层次、图像亮度梯级数或灰度等级。能分辨的亮度层次越多，则图像越清晰，越逼真。

人眼的这些亮度视觉特性给景物的传送和重现带来了方便，一方面，重现景物的亮度无须等于实际景物的亮度，而只需要保持对比度 C 不变；另一方面，人眼不能察觉的亮度差别，在重现景物上也无须精确复制出来。总之，只要具有相同的对比度和亮度层次，对人眼主观感觉来说，重现景物就具有与实际景物相同的亮度感觉。正因为如此，并不反映景物实际亮度的电影和电视，却能给人以真实的亮度感觉。

1.1.4 人眼的彩色视觉

彩色视觉是人眼的一种明视觉功能。为确切表示某一彩色光，必须采用三个基本参量：亮度、色调和色饱和度。这三个量在视觉中组成一个统一的总效果，并严格地描述了彩色光，所以通常称其为彩色三要素。

1. 亮度 (I)

亮度是指光的明亮程度，是光作用于人眼所引起的明暗感觉。一般来说，彩色光的亮度由发光体的辐射功率决定，光功率大则感觉亮，反之则暗。就物体而言，其亮度则与照明光源的光功率以及物体的反射或透射特性有关。照射到同一物体上的光功率越大，则物体越明亮；如果照射物体的光功率为定值，则物体的反射（或透射）系数越大就越明亮。

2. 色调 (H)

色调是彩色光的种类或类别，即颜色的类别。不同波长的光所呈现的颜色不同，实际上就是指色调不同。一般来说，彩色光的色调由其光谱分布决定，而彩色物体的色调则与照明光源的光谱分布及物体的反射或透射特性有关。

色调是决定彩色本质的一个基本参量，是彩色的重要属性之一。

3. 饱和度 (S)

饱和度是指彩色光的深浅程度。对于同一色调的彩色光，其饱和度越高，说明它的颜色越深，如深红、深绿色；饱和度较低，则说明它呈现较浅的颜色，如浅红、浅绿等。饱和度与彩色光中掺入的白色光成分有关，即完全不掺入白光的彩色光，其饱和度最高（定为 100%）；若掺入一半的白光，则饱和度为 50%。高饱和度的彩色光可以因掺入白光而被冲淡，变成低饱和度的彩色光。例如，若将一束高饱和度的红光投射到白纸上，则人们看到白纸呈现为深红色；如果再将一束白光投射到该纸上，则人眼虽然仍感觉到红色色调，但已变成了淡红色，即饱和度降低了；投射的白光越强，则人眼感觉到的红色越浅。可见饱和度的下降程度反映了彩色光被白光冲淡的程度，亦即饱和度反映了某种彩色光的纯度。

色调与饱和度又合称为色度，它既说明彩色光的颜色类别，又说明颜色的深浅程度。

应该指出的是，虽然不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以由不同光谱成分的光来产生，这就是同色异谱现象。例如，波长为 580nm 的单色光引起的橙黄色感觉，可以用适当比例的红、绿两种单色光的混合色光来等效；尽管前者是单色光而后者是复合光，光谱成分不一样，但引起的彩色感觉却可以是相同的；故从视觉效果来讲，两者是等效的，可以相互代替。又例如：太阳光是白色光，它的光谱在 380~780nm 内是连续分布的，但如果用适当比例混合红、绿、蓝三种单色光，则人眼可以获得与太阳光相同的白色感觉。这就是说，单色光和复合光可以产生相同的彩色视觉，由不同光谱成分构成的复合光也可以产生相同的彩色视觉，即从彩色视觉角度而言它们是等效的。

1.1.5 人眼的立体视觉

人眼看到的自然界景物都是具有宽度、高度和深度的立体图像。当人们观察某一景物时，由于两眼球之间存在 58~72 mm 的距离，使得同一物体在左、右两眼视网膜上的成像存在一定的差异，这种差异形成了人眼的宽、高、深的立体视觉。

通常，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因素是双眼视差和辐辏。当被观察景物未能在左、右两眼相应点上成像时，看到的会是二重像，此时眼球需要做旋转运动，即辐辏。由于辐辏时，眼外肌的运动使景物能在视网膜上将二重像变为单像，因此，辐辏也是产生立体视觉的重要因素之一。单眼立体视觉是指用单眼观察景物时可分辨景物深度信息所产生的立体感觉。产生单眼立体视觉的因素很多，例如，为了使不同距离的景物能在视网膜上清晰成像，需要适当调节睫状肌，以适应眼睛与景物之间的距离变化，从而产生不同的深度感觉等。

1.1.6 人眼的视觉惰性和闪烁感觉

人眼视觉的建立和消失具有一定惰性。如图 1-3 所示，当一定强度 (I_{om}) 的光突然于 t_1 时刻投射到视网膜上时，人眼并不立刻形成稳定的亮度感觉，而有一段短暂的建立时间。亮度感觉随着时间由 t_1 增大到 t_2 ，逐渐达到稳定值 I_m 。另外，光线一旦消失（如 t_3 时刻），亮度感觉并不瞬时随即消失，而是经历 t_3 到 t_4 逐渐消失的。实测表明，亮度感觉曲线近似

于指数规律，建立时间稍短，消失时间较长（为 0.05~0.2 秒）。人眼的这种视觉特性称为视觉惰性，也称视觉暂留特性或视觉暂留效应。

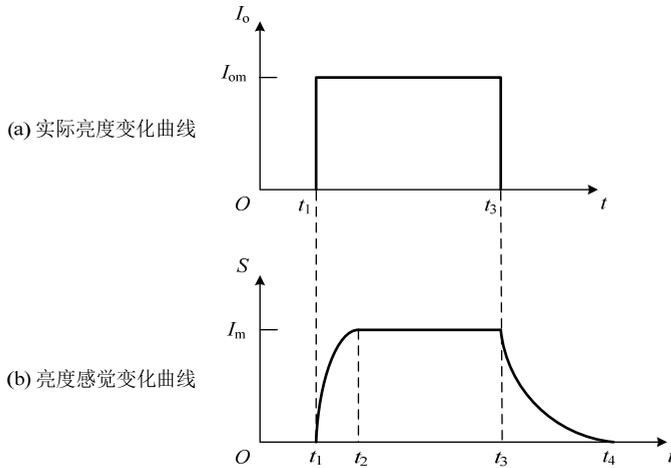


图 1-3 视觉惰性

如果有周期性的脉冲光源作用于视网膜上，当重复频率不够高时，人眼会产生一明一暗的闪烁感觉，这是因为人眼能在亮度感觉上分辨出有光和无光。如果将重复频率提高到某一定值以上，人眼将察觉不出是脉冲光源，而只感到是一种亮度恒定的不闪烁光源。不再引起闪烁感觉的脉冲光源最低重复频率，称为临界闪烁频率。实验测试表明，当 $I_{om}=100 \text{ cd/m}^2$ 时，人眼的临界闪烁频率约为 46 Hz。只要变化频率超过这个值，人眼就不会感到闪烁。

视觉暂留特性实际上就是人眼对于随时间变化的目标的分辨能力，也称时间分辨力。

视觉惰性很早就用在电影和各种频闪仪中得到应用。根据电影技术的经验，一幅一幅不动的画面，若其内容在相对位置上有些改变，则在每秒钟换幅 24 次（每幅画面曝光两次）的情况下，就能给人以较好的连续运动景物的感觉。但如果实际景物运动速度过快，以致相邻两幅画面的内容差异较大，则仍会有跳动的感觉。

1.1.7 人眼的分辨力

人眼的分辨力是指人在观看景物时人眼对景物细节的分辨能力。当与人眼相隔一定距离的两个黑点（如图 1-4 所示）靠近到一定程度时，它们在视网膜上的像将落在同一个光敏细胞上，人眼就分辨不出有两个黑点存在，而只感觉到是连在一起的一个黑点。这说明人眼分辨景物细节的能力有一个极限值，该值就是人眼的空间分辨力。

通常，将人眼对被观察物体上能分辨的最紧邻两点的最小视角称为分辨角，记为 θ 。图 1-4 中， L 表示人眼与图像之间的距离， d 表示能分辨的最紧邻两点之间的距离，分辨角 θ 与 L 、 d 具有如下关系：

$$\theta = \frac{57.3 \times 60 \times d}{L} = 3438 \frac{d}{L} \quad (\text{分}) \quad (1-1)$$

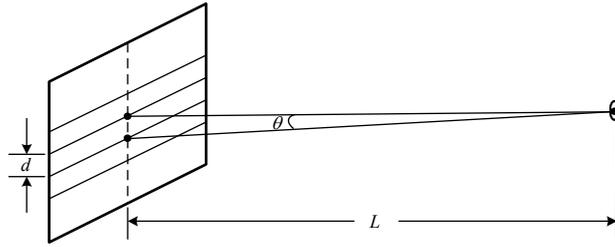


图 1-4 人眼的分辨力

显然，分辨角 θ 越小，人眼的分辨力越高，故将分辨角 θ 的倒数定义为人眼的分辨力，又称视觉锐度。

分辨角在很大程度上与照明强度和景物的相对对比度有关。照度太大时人眼感到炫目，分辨力会降低；照度太小时锥状细胞将不起作用，靠杆状细胞来感受，分辨力也差。当景物亮度与背景亮度比较接近（即相对对比度较小）时，人眼自然会难以分辨，故分辨力下降，亦即分辨角变大。受视觉惰性的影响，人眼对运动物体的分辨力是低于对静止物体的分辨力的。

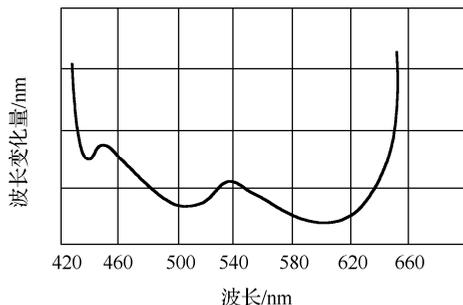
具有正常视力的人，在中等亮度和中等相对对比度下观察黑白静止图像时，分辨角 θ 约为 $1' \sim 1.5'$ 。

此外，人眼对彩色细节的分辨力比对亮度细节的分辨力要差，如果黑白分辨力为 1，则黑红为 0.9，绿蓝为 0.19，见表 1-2。由表可见，人眼分辨景象彩色细节的能力很差。例如，彩色电视系统在传送彩色图像时，细节部分只传送黑白图像而不送彩色信息，即采用大面积着色以节省传输频带，正是利用了人眼的这一特性。

表 1-2 人眼的相对分辨力

颜色	黑白	黑绿	黑红	黑蓝	绿红	红蓝	绿蓝
分辨力	100%	94%	90%	26%	40%	23%	19%

对不同色调，人眼的分辨力也不同。通常，人眼能分辨 100 多种色调。人眼对色调细节的分辨能力可用色调分辨阈值来表征，它是指当人眼观察某一波长 λ 的彩色时，将波长改变为 $\lambda + \Delta\lambda$ ，这时人眼刚好能分辨出这两种彩色色调的差别，称 $\Delta\lambda$ 为色调分辨阈值。实验表明，在可见光范围内，对于不同的波长 λ ，其 $\Delta\lambda$ 是不同的，如图 1-5 所示。例如，当波长在 $580 \sim 640 \text{ nm}$ （对应的彩色在红、黄之间）内时， $\Delta\lambda$ 较小，这说明在该波长范围人眼的色调分辨力最高。若色彩饱和度较低或亮度较低，则人眼的色调分辨力会有所下降。

图 1-5 色调分辨阈值 $\Delta\lambda$ 与波长 λ 的关系

人眼能分辨同一色调不同饱和度的彩色。实验表明，人眼对不同色调的饱和度变化的敏感程度不同。例如，对于黄光，人眼能分辨出的饱和度变化只有4级，是最不敏感的；而对于红光和蓝光，人眼能分辨的饱和度变化则可达25级。

1.2 图像的基本概念

人眼之所见即人眼所获取的图像。在日常生活、工作或学习中，图像都是必不可少的组成部分，它为人类构建了一个形象的思维模式。

图像有多种含义，其中最常见的定义是指各种图形和影像的总称。一般来说，图像是当光辐射能量照在物体上，经过物体的反射或透射，或由发光物体本身发出的光能量，在人的视觉器官中所呈现出的物体的视觉信息。

1.2.1 图像信息的特点

人们经常接触的信息主要有三大类：图像信息、语音信息、文本信息。与语音、文本等信息相比，图像信息具有信息量大、直观形象等诸多显著的特点。

1. 图像的信息量大

俗语“百闻不如一见”、“一目了然”等表明图像带给我们的信息量是非常大的。用一幅图像可以直接说明很多问题，而说明同样的问题可能需要许多文字。“百闻不如一见”中的“一见”也表明人们接受图像信息的方式是一种“并行”的方式，一眼看去，图中的所有的像素尽收眼底，而不像看文字一样得一行一行地看。由此可知图像信息的直观性和便于并行接收的特点。

2. 图像的直观性强

一般情况下，图像的内容和我们用眼睛直接观察到的呈现在我们脑海中的图像非常接近。图像是外部世界的直接反映。图像信息我们一看就懂，直观性很强，不需要经过人的思维的特别转换，可以被人直接理解。不像语音或文本那样，存在语种的差别，造成交流的困难。如一幅风景画，不管中国人还是外国人都能一看就明白，不存在看不懂的问题。

3. 图像信息的模糊性

图像存在一定的模糊性。人们读解图像的能力与其所处的文化背景、年龄、性别以及民族习惯等有着密切的关系。来自不同文化背景的人，由于个人可能接触到的文化内容不同，对同样的视觉图像容易产生带分歧的观点。如对同一幅图像，不同的观察者可能会有不同的理解和感受，甚至有可能给出不同的解释，所以说对图像的理解具有很强的主观性。

4. 图像的实体化和形象化

图像比文字和语言更具有实体化和形象化的功能。实体化和形象化能够帮助人们更有效地理解、掌握和记忆学习内容。因此图像经常用于多媒体教学中，以提供在传统教育教学中语言和文字无法实现的实体化和具体化。

1.2.2 图像的分类

图像的分类方法有多种，这里分别按照图像的存在形式、亮度等级以及色调等对其作不同的划分。

1. 按图像的存在形式分类

按图像的存在形式分类，可分为实际图像与抽象图像。

(1) 实际图像：通常为二维分布，又可分为可见图像和不可见图像。

可见图像指人眼能够看到并能接受的图像，包括图片、照片、图、画、光图像等。

不可见图像如温度、压力、高度和人口密度分布图等。

(2) 抽象图像：如数学函数图像，包括连续函数和离散函数。

2. 按图像的亮度等级分类

按图像的亮度等级分类，可分为二值图像和灰度图像。

(1) 二值图像：只有黑白两种亮度等级的图像。

(2) 灰度图像：有多种亮度等级的图像。

3. 按图像的色调分类

按图像的色调分类，可分为有色调的彩色图像和无色调的黑白图像。

(1) 彩色图像：图像上的每个点有多于一个的局部性质，如在彩色摄影和彩色电视中重现的所谓三基色（红、绿、蓝）图像，每个像素点就有分别对应三个基色的三个值。

(2) 黑白图像：每个像素点只有一个亮度值，如黑白照片、黑白电视画面等。

4. 按图像是否随时间而变化分类

按图像是否随时间而变化分类，可分为静止图像与活动图像。

(1) 静止图像：又称静态图像，是指不随时间而变化的图像，如各类图片等。

(2) 活动图像：又称动态图像、视频图像，是指随时间而变化的图像，如电影和电视画面等。

5. 按图像所占空间的维数分类

按图像所占空间的维数分类，可分为二维图像和三维图像。

(1) 二维图像：平面图像，如照片等。

(2) 三维图像：空间分布的图像，一般使用两个或者多个摄像头来成像。

1.2.3 图像的顺序传送

根据人眼对细节分辨力有限的视觉特性，任何一幅平面图像都可以看成由许许多多密集的细小单元组成，如照片、图画、报纸上的画面等，若用放大镜仔细观察就会发现它们是紧密相邻的细小点子的集合体。这些细小单元（点子）是构成图像的基本单元，称为像素。像素越小，单位面积上的像素数目就越多，由其构成的图像就越清晰。

电视系统中，通常把一幅图像称为一帧图像。显然，每帧图像都是由许多像素组成的。

1. 图像的表达

对于一幅黑白平面图像而言，表征它的特征参量是亮度。也就是说，组成黑白画面的每个像素，不但有各自确定的几何位置，而且它们各自还呈现着不同的亮度。对于黑白的活动图像（即视频）而言，每一个在确定位置上的像素其亮度都会随时间不断地变化，即像素的亮度还是时间的函数。可见，像素的亮度既是空间的函数，同时又是时间的函数。

图像的亮度一般可以用多变量函数来表示：

$$I = f(x, y, z, \lambda, t) \quad (1-2)$$

式中， x 、 y 、 z ——空间某点坐标；

t ——时间轴坐标；

λ ——光的波长。

当取 $z = z_0$ 时，则表示二维图像；当取 $t = t_0$ 或 I 与 t 无关时，则表示静态图像；当 λ 取为定值时，则表示单色图像。

一般来说，由于表示的是物体的反射、透射或辐射能量，因此它是正的、有界的，即

$$0 \leq I \leq I_{\max} \quad (1-3)$$

式中， I_{\max} —— I 的最大值；

$I=0$ ——绝对黑色。

2. 图像的传送

传送一幅彩色图像时，须经过分色系统、摄像器件的光-电转换、电信号处理和传输、显像器件的电-光转换等主要工作过程。通常，把构成一幅图像的所有像素都传送一遍称为进行了一个帧处理，或称传送了一帧。根据人眼的视觉特性，传送一帧图像可以用同时传送或顺序传送来实现，这样给出的重现图像与原图像有等效的视觉效果。

同时传送又称并行传输，是指同时把不同位置上的像素转变成相应的电信号，再分别用各个相应通道把这些信号同时传送出去。例如，一幅黑白图像如果由 40 多万个像素组成，就需要 40 多万条通道；如果图像的像素数量增加，需要的通道数量便随之增加。显然，这样做既不经济，技术上也难以实现，因此，实际应用中并不采用同时传输方式。

顺序传送又称串行传送，是指将组成一帧图像的各个像素，按一定顺序一个一个地转换成相应的电信号并依次传送出去，接收端再按同样的顺序，将各个电信号在对应位置上转变成相应的像素。这样，只要有一个传输通道就可以了，且只要这种轮换进行得足够快，人眼的感觉就如同所有像素是同时发亮的。图 1-6 给出了顺序传送方式的示意图，图中的 K_1 和 K_2 是同步切换开关。

顺序传输必须满足以下要求：

(1) 传送速度要快。只有传送迅速，传送时间小于视觉暂留时间，重现图像才会给人以连续无跳动的感觉。

(2) 传送要准确。每个像素一定要在轮到它传送时才被转换、传送，并被接收方接收，即收、发双方应同步工作。

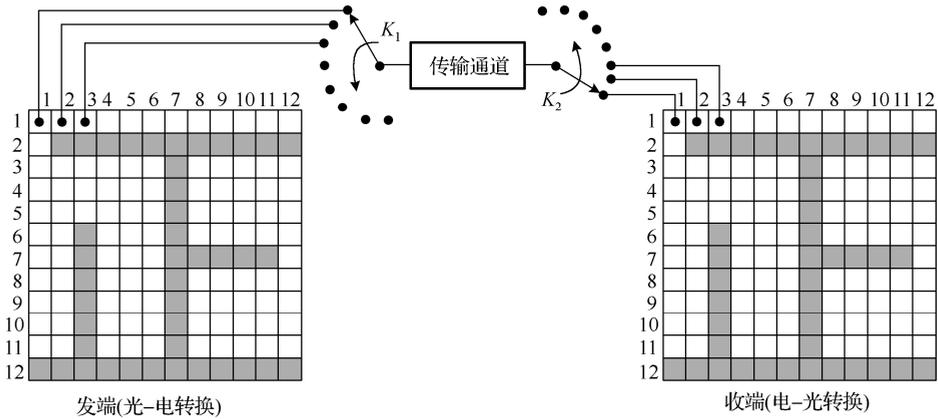


图 1-6 顺序传送方式示意图

3. 图像的扫描

将图像转变成顺序传送的电信号的过程，在电视技术中称为扫描。假设传送的是黑白平面图像，则通过扫描与光-电转换，就可以把图像的亮度信号表示为时间的函数：

$$B = f(t) \tag{1-4}$$

这就实现了平面图像亮度信号的顺序传送。当然，接收端重现图像时必须采用与发送端完全相同的扫描过程。

扫描可分为直线扫描、圆扫描、螺旋扫描等。在电视系统中，为了充分利用矩形屏幕，并使扫描设备简单可靠，均采用匀速直线扫描方式。图 1-6 中采用的就是匀速单向直线扫描方式，每个像素都是按从左到右、从上到下的顺序依次扫描的。从左到右（水平方向）的扫描称为行扫描，从上到下（垂直方向）的扫描称为场扫描。通常把完成一幅图像的扫描称为帧扫描。

一行紧跟一行、在一场时间内扫过一幅图像的扫描方式称为逐行扫描。显然，在逐行扫描方式下，场扫描频率与帧扫描频率是相等的。在电视系统中，把电子束在靶面或者屏幕上的扫描轨迹称为扫描光栅。逐行扫描的扫描光栅如图 1-7 所示，图中，实线表示扫描正程，虚线表示扫描逆程。为了使图像清晰而且均匀，在逆程期间不传送图像信号，称为消隐。逐行扫描方式中，每场的光栅都应该互相重叠。为了获得有效的扫描光栅，必须在整个扫描周期内都保证使正程扫描时间远大于逆程扫描时间。

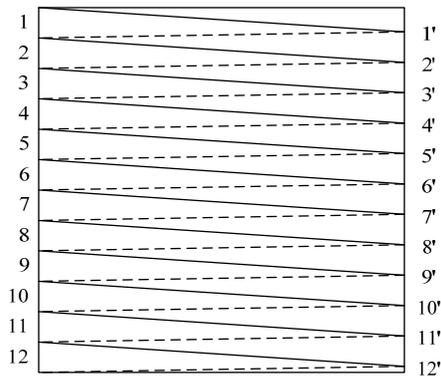


图 1-7 逐行扫描的扫描光栅示意图

当每场扫描行数增多时，光栅的倾斜度就会减小，而被近似地认为是水平直线光栅。由于扫描正程图像亮，扫描逆程图像暗，这样就容易产生闪烁感。能够消除闪烁感的临界频率称为融合频率，计算式为

$$f = 26.6 + 9.6 \log B = 45.8 \text{ (Hz)} \quad (1-5)$$

式中， B ——光通量，一般取中等亮度 $B=100\text{cd/m}^2$ 。

于是，将融合频率定为 $f=50\text{Hz}$ ，即为了保证电视图像不闪烁，要求场扫描频率至少为 50Hz 。要传送这样大的数据量（频带），对于早期的电视设备而言无疑是十分困难的。为保证图像不闪烁，传送的频带又合适，解决方案是采用隔行扫描技术。

隔行扫描是将一帧图像分成两场进行扫描，第一场扫出奇数行，第二场扫出偶数行，并相应地把第一场称为奇数场，第二场称为偶数场。隔行扫描的基本要求是两场光栅必须均匀镶嵌，各帧扫描光栅必须完全重叠。

隔行扫描重现图像的示意图如图 1-8 所示。

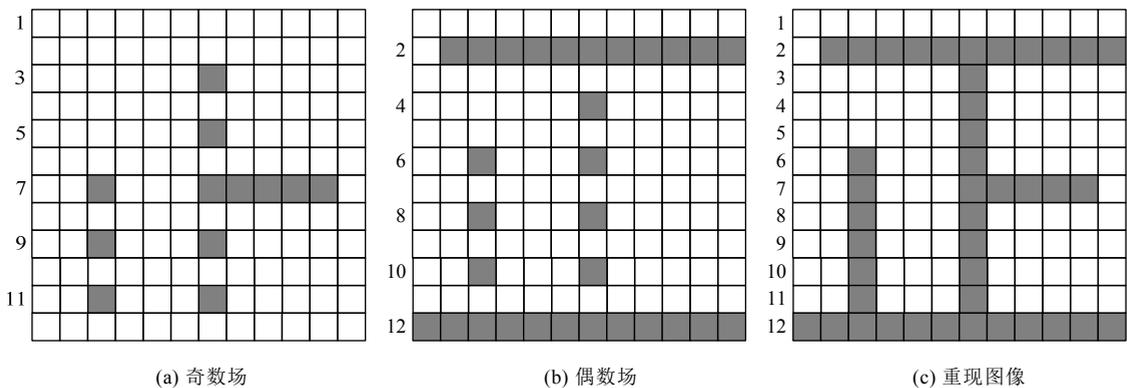


图 1-8 隔行扫描重现图像示意图

在电子电视系统中，每秒扫描行数称为行频，记为 f_H ；每秒扫描场数称为场频，记为 f_V ；每秒扫描帧数称为帧频，记为 f_F 。可见，在隔行扫描方式下，帧扫描周期是场扫描周期的 2 倍，即

$$f_V = 2f_F$$

这就是说，隔行扫描既保持了逐行扫描的清晰度，又达到了降低图像信号频带的目的。

电子束在扫完每一场的最后一行（下端）之后需要回到顶端开始下一场的扫描，称从下端回到顶端所用的时间为场扫描逆程时间。设 k_1 为场扫描正程时间与完成一场扫描（场正程+场逆程）的总时间之比，一幅图像由 n 行扫描光栅（即有效行数为 n ）组成，那么，把场逆程时间的扫描行数考虑在内，行扫描频率 f_H 可以表示为

$$f_H = \frac{nf_V}{2k_1}$$

4. 电视屏幕尺寸及扫描行数的确定

在头部不动、眼球转动情况下，人眼所能观察到的空间范围称为视野。人眼的综合视

野可分解为水平视野和垂直视野。通常，正常人眼的最大范围约为左右（水平夹角） 35° 、上下（垂直夹角） 40° ，最佳视野范围约为水平夹角 15° 、垂直夹角 15° ，最大固定视野范围约为水平夹角 90° 、垂直夹角 70° ，头部活动时视野可扩展到水平夹角 95° 、垂直夹角 90° 。实验表明，色觉视野还受背景色彩的影响，例如，黑色背景上的彩色视野范围小于白色背景上的彩色视野范围。

电视屏幕尺寸的设定与人眼的视觉特性有很大关系，人眼视觉最清楚的范围是水平夹角约 20° 、垂直夹角约 15° 的一个矩形区域。由此确定普通电视屏幕为矩形，其幅型比（即宽高比）为 $20:15=4:3$ 。为增强临场感与真实感，还可加大幅型比，例如高清晰度电视或大屏幕高质量电视要求加大水平视角，观看距离约为屏高的3倍，幅型比定为 $16:9$ （近似 $5:3$ ）。

前面已经介绍，对于具有正常视力的人而言，人眼的分辨角 θ 约为 $1' \sim 1.5'$ 。由于人眼的垂直清晰度视角为 15° ，因此扫描行数为

$$Z = 15 \times 60 / \theta = 600 \sim 900 \quad (\text{行}) \quad (1-6)$$

我国规定普通电视扫描行数 $Z = 625$ 行，采用隔行扫描方式，每场扫描 312.5 行。

1.2.4 彩色混合的三基色原理

根据人眼的彩色视觉特性，具有相同彩色感觉的光可能具有不同的光谱成分。因此，在彩色重现过程中，并不要求恢复与原景物辐射光（反射光或透射光）相同的光谱分布，其重点应该是再现与原景物相同的彩色视觉。人们在长期实践和对人眼视觉特性的研究中发现了三基色原理。

1. 三基色原理

三基色原理的基本内容是：

- (1) 相互独立的三种色光按一定比例混合可得到自然界中绝大多数的彩色。
- (2) 彩色的亮度由三种色光亮度之和决定。
- (3) 彩色的色度由三种色光分量的比例决定。

其中，“相互独立”指的是三种色光中任何一种色光不可能由其他两种混配出来。这三种色光称为三基色，或三原色。

三基色的光谱特性可以是谱色，也可以是非谱色，它的选择会影响到重现色的色域大小和亮度。在彩色电视中，比较恰当的是在红色、绿色和蓝色的光谱色区域内选择三个基色。

三基色原理是对彩色实行分解、混合的重要理论。根据这一理论，任何一种合成彩色的光谱都是由红、绿、蓝三基色光谱混合而成，但由于红、绿、蓝三基色的比例不同，导致视觉效果不同，从而被认为是不同的彩色。也就是说，根据三基色原理，自然界中绝大多数的彩色都可以通过混合调配的方法仿制出来，混配出的彩色与原彩色对人眼引起的彩色视觉是相同的。因此，在拍摄景物时，若用三个具有适当光谱响应曲线的摄像器件分别取得代表三个彩色光分量的信号，经过适当处理与传送，再通过重现设备转换成按原比例

混合的彩色光，那就可以实现彩色景物的正确重现了。这样一来，要传送千差万别的彩色光，根本不需要寻求各彩色光的真实光谱分布，而只要混合三个基色来达到相同色感即可。这大大简化了传送和重现彩色图像的技术措施，使近代的彩色电视成为现实。

2. 视觉系统模型

人眼类似于一个光学信息处理系统，但由于它具有生物调节的自适应能力，因此它不是一个普通的光学信息处理系统。人眼这种特殊的智能光学信息处理系统具有非常复杂的特性，根据视觉生理学的研究成果，可以建立视觉模型来模拟人类的某些视觉特性。建立视觉模型就是试图用光学系统的概念来模拟某些视觉特性。

1) 视觉信息处理模型

从物理结构看，人类视觉系统由光学系统、视网膜和视觉通路组成。图 1-9 给出了人类视觉系统的视觉信息处理模型，它简单模拟了人类视觉系统信息获取、传输和处理的基本过程。眼球包括屈光系统和感光系统，屈光系统由角膜、晶体和玻璃体等组成，感光系统即视网膜。视网膜可将输入的光信号转换为生物电脉冲信号，电脉冲信号沿着神经纤维传递到视神经中枢。由于各视细胞产生的电脉冲不同，从而使大脑形成了景象的感觉。

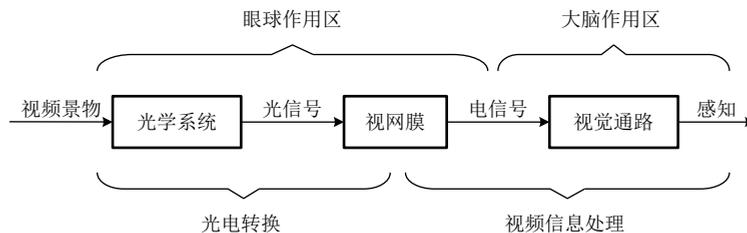


图 1-9 视觉信息处理模型

2) 黑白视觉模型

图 1-10 给出了黑白视觉模型。低通滤波器模拟人眼的光学系统，高通滤波器反映了侧抑制引起的马赫效应，对数运算器反映了视觉的亮度恒定现象。所谓亮度恒定现象是指当景物相对于背景的亮度和对比度保持一定时，即使景物和背景的亮度在很大的范围内变化，人眼对景物的亮度感觉也仍然保持不变。

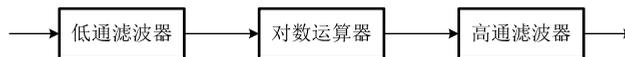


图 1-10 黑白视觉模型

3) 彩色视觉模型

图 1-11 给出了一个彩色视觉模型，其中， $I(x,y,\lambda)$ 为彩色图像， $S_R(\lambda)$ 、 $S_G(\lambda)$ 、 $S_B(\lambda)$ 为三个彩色滤波器， $R(x,y)$ 、 $G(x,y)$ 、 $B(x,y)$ 为输出的三种彩色。

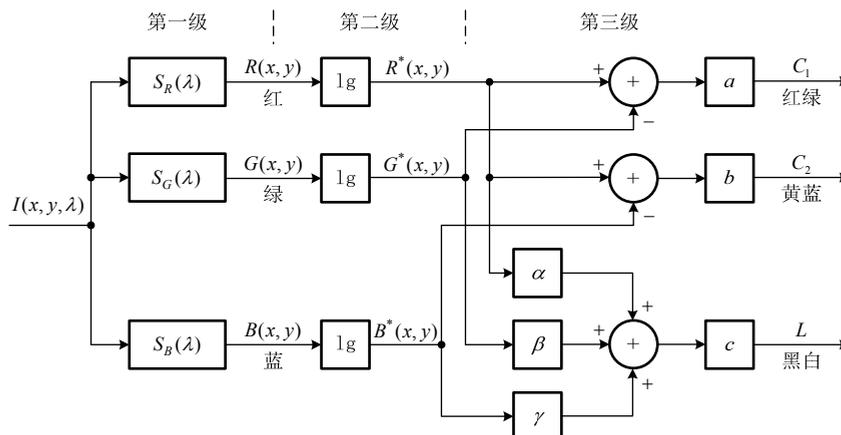


图 1-11 彩色视觉模型

该模型的第一级，反映了人类的三基色理论，即

$$\begin{cases} R(x, y) = \int_{\lambda} I(x, y, \lambda) S_R(\lambda) d\lambda \\ G(x, y) = \int_{\lambda} I(x, y, \lambda) S_G(\lambda) d\lambda \\ B(x, y) = \int_{\lambda} I(x, y, \lambda) S_B(\lambda) d\lambda \end{cases}$$

第二级反映了视细胞对光强的非线性响应，即

$$\begin{cases} R^*(x, y) = \lg R(x, y) \\ G^*(x, y) = \lg G(x, y) \\ B^*(x, y) = \lg B(x, y) \end{cases}$$

第三级输出三对相互对立的彩色对，分别为红绿对、黄白对和黑白对，反映了视觉通路响应。 L 为亮度输出， C_1 、 C_2 为彩色输出，即

$$\begin{cases} C_1 = a[R^*(x, y) - G^*(x, y)] = a \lg \frac{R(x, y)}{G(x, y)} \\ C_2 = b[R^*(x, y) - B^*(x, y)] = b \lg \frac{R(x, y)}{B(x, y)} \\ L = c[\alpha R^*(x, y) + \beta G^*(x, y) + \gamma B^*(x, y)] \\ = c[\alpha \lg R(x, y) + \beta \lg G(x, y) + \gamma \lg B(x, y)] \end{cases}$$

式中， a 、 b 、 c 、 α 、 β 、 γ ——常数。

3. 彩色模型

彩色模型又称彩色空间或彩色系统，其用途是在某些标准下用通常可接受的方式简化彩色规范。对应于不同的场合和应用，常常涉及用几种不同的色彩空间表示图形和图像的颜色，主要的彩色模型有：RGB 模型、CMY 模型、YUV 模型、YIQ 模型、YCrCb 模型、HSI 模型等。

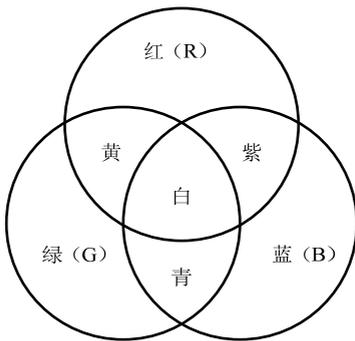


图 1-12 RGB 模型的相加混色规律示意图

1) RGB——加色混合彩色模型

彩色电视中将红、绿、蓝作为三基色，通常用 R、G、B 表示。在 RGB 彩色模型中，各种颜色都是由红、绿、蓝三基色以不同的比例相加混合而产生的，即任意一种颜色 (C) 均可表示为

$$C = aR + bG + cB \quad (1-7)$$

式中， a 、 b 、 c ——三基色 R、G、B 的权值。

RGB 模型的相加混色规律如图 1-12 所示。

由图 1-12 可见：

$$\text{红 (R)} + \text{绿 (G)} = \text{黄 (Y)}$$

$$\text{绿 (G)} + \text{蓝 (B)} = \text{青 (C)}$$

$$\text{蓝 (B)} + \text{红 (R)} = \text{紫 (M)}$$

$$\text{红 (R)} + \text{绿 (G)} + \text{蓝 (B)} = \text{白 (W)}$$

由此还可得出：

$$\text{黄 (Y)} + \text{蓝 (B)} = \text{白 (W)}$$

$$\text{红 (R)} + \text{青 (C)} = \text{白 (W)}$$

$$\text{紫 (M)} + \text{绿 (G)} = \text{白 (W)}$$

能相加形成白色的两种色称为互补色，例如：黄色是蓝色的补色，反过来说蓝色也是黄色的补色。

CRT 显示时，通常将 R、G、B 的值限制在一定的范围（如 0~1）内。

具体实现相加混色的方法有直接混色法和间接混色法。直接混色法就是将三基色光同时投射到一个全反射表面上，直接得到各种不同的彩色光。间接混色法利用了人眼的视觉特性，采用下列方法进行相加混色。

(1) 将三种基色光按一定顺序轮流投射到同一表面上，只要轮换速度足够快，由于视觉惰性，人眼产生的彩色感觉就与三种基色光直接混合时相同。这种方法称为时间混色法，这是顺序制彩色电视的基础。

(2) 将三种基色光分别投射到同一表面上邻近的三个点上，只要这些点相距足够近，由于人眼的分辨力有一定限度，就能产生与三种基色光直接混合时相同的彩色感觉。这种方法称为空间混色法，是同时制彩色电视的基础，彩色显像管的荧光屏就是根据这个原理制造的。

(3) 利用两只眼睛同时分别观看两种不同颜色的同一幅图像，也可以获得混色效果，这叫做生理混色法。

2) CMY——减色混合彩色模型

CMY 彩色模型就是利用青色 (C)、紫色 (M) 和黄色 (Y) 这三种彩色按一定比例来产生想要的彩色。CMY 是 RGB 三基色的补色，存在如下关系：

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

CMY 模型一般用在彩色印刷、彩色胶片和绘画中，多数打印机都采用 CMY 基色。与 RGB 模型不同，CMY 模型采用的是相减混色法（简称减色法），它是利用颜料、染料的吸色性质来实现的，其示意图如图 1-13 所示。例如，黄色颜料能吸收蓝色光，于是在白光照射下，反射光中因缺少蓝光成分而呈黄色；青色颜料因吸收红光成分，被白光照射时呈青色；紫色颜料因吸收绿光成分，被白光照射时呈紫色。若将黄、青颜料相配，则在白光照射下，因它们分别吸收了蓝、红光而呈现绿色。

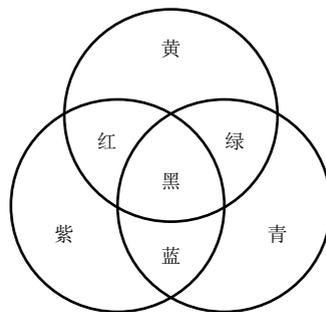


图 1-13 CMY 模型的相减混色规律示意图

由于彩色墨水、油墨的化学特性，色光反射和纸张对颜料的吸附程度等因素，用等量的 CMY 三色得不到真正的黑色，所以在 CMY 彩色中需要另加一个黑色（Black，用 K 表示），才能弥补这三个颜色混合不够黑的问题，这就是所谓的 CMYK 基色，它能更真实地再现黑色。在实际应用中，CMY 彩色模型也可称为 CMYK 彩色模型。

3) HSI 视觉彩色模型

前面讨论的彩色模型是从色度学的角度提出的，并不能很好地与人眼的视觉特性相匹配。HSI 彩色模型则是根据人眼的彩色视觉三要素即色调（Hue）、饱和度（Saturation）和亮度（Intensity）提出的，它能够把色调、饱和度和亮度的变化情形表现得很清楚。

从 RGB 到 HSI 模型的转换关系如下。

(1) 色调 H 分量为

$$H = \begin{cases} \theta, & B \leq G \\ 360 - \theta, & B > G \end{cases} \quad (1-9)$$

其中：

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{(R-G)^2 + (R-G)(G-B)}} \right\} \quad (1-10)$$

(2) 饱和度 S 分量为

$$S = 1 - \frac{3}{R+G+B} [\min(R, G, B)] \quad (1-11)$$

(3) 亮度 I 分量为

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B) \quad (1-12)$$

4. 视频的颜色模型

对于视频信号的传输, 为了减少所需要的带宽并与单色电视系统兼容, 采用亮度/色度坐标系模型。由于通常用于彩色显示的 RGB 基色混合了光的亮度与色度属性, 为此, 国际照明协会 (CIE) 于 1931 年规定了 XYZ 彩色坐标。XYZ 基色不能直接用于产生彩色, 它主要用于定义其他的基色和彩色的数字说明, 如用于传输彩色电视信号的 YIQ 和 YUV 彩色坐标。

在 XYZ 模型中, Y 表示亮度 (强度), 另外两个分量共同表示色度和饱和度。除了能分离亮度和色度信息, XYZ 的另一个优点是几乎所有的可见彩色都能由非负的激励值规定。XYZ 坐标系中 (X, Y, Z) 与 RGB 坐标系中 (R, G, B) 的关系如下式:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7517 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1-13)$$

1) YUV 模型

YUV 来源于 XYZ 彩色模型, 是应用于电视传播系统的彩色模型。根据美国国家电视制式委员会规定, 当白光的亮度用 Y 表示时, 它和红、绿、蓝三色光的关系可用下式描述:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1-14)$$

这就是常用的亮度公式。

色差 U 、 V 是由 $B-Y$ 、 $R-Y$ 按不同比例压缩而成的, 即

$$\begin{cases} U = \alpha(B-Y) \\ V = \gamma(R-Y) \end{cases} \quad (1-15)$$

式中, α 、 γ ——压缩系数。

取 $\alpha = 0.493$, $\gamma = 0.887$, 联合式 (1-13) 和式 (1-14), 便可得到 YUV 彩色空间与 RGB 彩色空间的转换关系式:

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

如果要由 YUV 空间转换成 RGB 空间, 只要进行式 (1-16) 的逆运算就可以了:

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

采用 YUV 彩色空间的重要性是它的亮度信号 Y 和色度信号 U 、 V 是分离的。如果只有 Y 信号分量而没有 U 、 V 分量, 那么这样表示的图像就是黑白灰度图像。彩色电视采用 YUV 空间正是为了用亮度信号 Y 解决彩色电视机与黑白电视机的兼容问题, 使黑白电视机也能接收彩色信号。