

“十一五”国家级规划教材(本科)

染织色彩原理及配色

朱谱新 主 编

丁 颖 副主编



中国纺织出版社

第一章 颜色视觉原理

人们通过视觉、听觉、触觉、嗅觉及味觉来感知世界,其中超过 80% 由视觉来完成,可见视觉是人类感受外部世界的主要途径。人的视觉可分为颜色视觉(色彩视觉)和形象视觉。观察物体时,首先看到物体的颜色,其次才是它的形状、质感等细节。因此在知觉中,颜色视觉占有先导的地位。颜色既是一种感受,又是一种信息。在我们生活的这个多姿多彩的世界里,所有的物体都具有自己特定的色彩。

颜色与人的感觉(外界的刺激)和人的知觉(记忆、联想等)联系在一起。颜色感觉总是存在于颜色知觉之中。颜色视觉的产生不但与外界有关,还与人的眼睛和大脑有关。

白天,在阳光下,我们能够感觉到“色彩缤纷”的物质世界,如:红色的花朵、绿色的草地、橙黄的果实等,但是在夜晚,无论多么鲜艳的景物,都被夜幕吞没。在漆黑的夜晚,我们不但看不见物体的颜色,甚至连物体的外形也分辨不清。同样,在暗室里,我们也感觉不到色彩。这些事实说明:没有光就没有色,光是人们感知色彩的必要条件,色来源于光。因此,光是色的源泉,色是光的表现。光的存在是颜色产生的条件,世上有无色的光,而没有无光的色。

有了光的照射,物体还必须对照射于其表面的光线进行有选择的吸收和反射,由于组成物体的物质成分不同,物体的表面性质不一,决定了各种物体对光有特定的吸收、反射和透射特性,正是由于这些特性,形成了物体表面的各种颜色。因此物体颜色的产生还与物体的表面性质有关。没有物体的存在,也无法产生各种各样的颜色。

光线进入眼睛(感受器),到达并刺激视网膜,引起神经冲动,并将这种神经冲动传输到大脑,从而辨别出颜色。

由此可见,产生颜色视觉的途径为:光源发出光,照到物体表面,物体对入射光选择性地吸收、反射或透射之后作用于人眼,由人眼内的视细胞将光刺激转换为神经冲动,再经视神经传入大脑,最后由大脑判断出物体的颜色。因此产生颜色视觉(色觉)的四大要素为:光源,物体,眼睛和大脑。

美国光学学会(Optical Society of America)的色度学委员会曾经把颜色定义为:颜色是除了空间的和时间的不均匀性以外的光的一种特性,即光的辐射能刺激视网膜而引起观察者通过视觉而获得的景象。在我国的国家标准 GB 5698—85 中,颜色的定义为:色是光作用于人眼引起除形象以外的视觉特性。根据上述两种定义,颜色是一种作用于人眼视觉的物理刺激,而人的视觉又受大脑支配,也是一种心理反应。所以,色彩感觉不仅与物体本来的颜色特性有关,而且还受时间、空间、外表状态以及该物体的周围环境的影响,同时还受各人的经历、记忆力、看法和视觉灵敏度等各种因素的影响。

第一节 光的颜色特性

一、颜色的光本质

17 世纪,牛顿(Newton,1642~1772)对色现象的光本质进行了研究,1666 年,他用三棱镜对日光进行分色,并且投影在屏幕上,由上至下呈现出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的排列,说明此七种颜色光线的折射率不同(图 1-1)。

牛顿的这一实验揭示了自然光是由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种不同颜色的光线构成的自然现象,不但很好地说明了光与色的关系,而且成为光谱分析的基础。

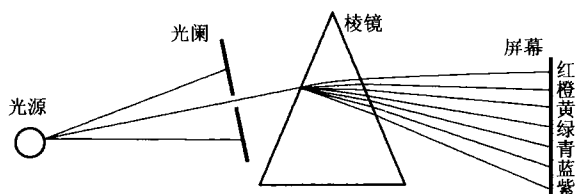


图 1-1 牛顿的三棱镜分光实验

对于光的本质,很早就存在着很多论述,其代表学说主要有牛顿的“粒子说”和惠更斯(Huygens,1629~1695)的“波动说”。牛顿从光的直线传播实验得出结论:光是光源发出的粒子的流动,这些粒子作用于人的眼睛而产生颜色的感觉。牛顿的“粒子说”可以对光线的直线传播、折射、反射等现象进行合理的解释。

惠更斯根据水平波纹传播的原理认为,光的传播是以波的形式振动传播的,光波对眼睛的刺激产生色感觉。1801 年,杨(Young)的干涉实验对“波动说”理论作出了有力的支持。杨的实验是在板 S2 上打两个小孔,见图 1-2,让单色光通过这两个小孔,由于光波的振动,两个小孔发出的光波是在同一个平面上,而且这些光波有相同的相位,这样当两个光波的峰和峰、谷和谷相交时,互相增强而明亮,而当光波的峰与谷相交时,互相减弱则暗,其明暗程度在屏幕上可以清楚地看到。

无论是光的“粒子说”还是“波动说”,都无法合理地解释所有的光现象,如“粒子说”无法对光的干涉、衍射及偏光等现象作出合理的解释;“波动说”无法对光在真空中的传播、光电效应以及颜色效应等方面作出令人满意的解释。爱因斯坦(Einstein)提出了“光电子”的假说:当光被物体吸收后变为具有一定能量的粒子。各种单色光的振动次数不相同,所以粒子的能量也不相同,但具有一定能量的各种粒子在真空中传播的速度(即光速)相同,这种粒子称为光子(亦称为光量子)。“光电子”学说能较好地解释光电效应现象:物体内部的电子吸收了光子的能量后,电子就会从物体内部脱离出来,可利用这种脱离出来的电子,使它转化为电能,即物体的光电效应,制造光电池的原理就是基于物质的这种光电效应。

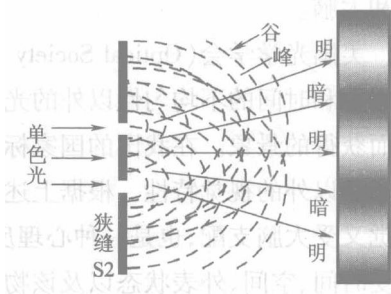


图 1-2 光的狭缝干涉原理

光的视觉现象的电磁说以及光与物质相互作用产生

光电效应的光子说,这两种学说说明了光具有波粒二象性,这就是光的本质^[1]。

二、可见光

光的物理性质由它的波长和能量来决定。能量决定了光的强度,波长决定了光的颜色。光入射到人眼时,光的波长决定了人眼看到的颜色。相同波长的光,如果辐射能量不同,则人眼将看到不同明暗程度的色彩。

麦克斯韦(Maxwell)已经证明,光是一种电磁波,电磁波的波长范围很广,最短的宇宙射线波长仅为 $10^{-15} \sim 10^{-14}\text{m}$,而最长的交流电波长可达数千公里。并非所有的电磁辐射均能引起人眼的视觉反应,其中波长仅为 $380 \sim 780\text{nm}$ 的电磁辐射能够刺激人眼并引起视觉反应,因此将波长为 $380 \sim 780\text{nm}$ 的电磁波称可见光辐射,或可见光,有时简称为光(如图1-3所示)。

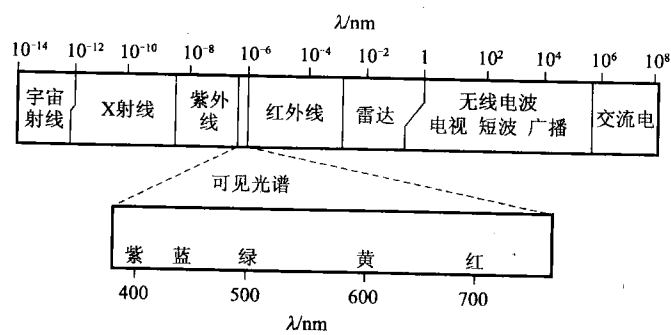


图1-3 电磁波及可见光波长范围

每一特定波长的光具有一个特定的颜色。牛顿的三棱镜分光实验中,在白色屏幕上出现了一条相邻色逐渐过渡的由红到紫的光带证实了光的这一特征。这是因为日光中包含不同波长的光辐射,当它们分别刺激人的眼睛时,会产生不同的色光,而当它们混合在一起同时刺激人的眼睛时,则令人产生白光的感觉,无法感觉出它们各自的颜色。我们把光谱中不能再分解的色光叫做单色光;由单色光混合而成的光叫做复色光。自然界中绝大多数的光(如太阳光、白炽灯和日光灯发出的光)都是复色光。在牛顿三棱镜实验中得到的依次排列的彩色光带称为光谱;而这种复色光被分解成不同颜色的光谱的现象称为色散。

白光经色散后,按波长顺序排列而成的彩色光带被称为可见光谱。组成光谱的各种色光,又称作光谱色。可见光谱的颜色感觉大致如表1-1所示:

表1-1 光谱的色彩波长与范围

颜 色	λ/nm	波长范围/nm	颜 色	λ/nm	波长范围/nm
红	700	649 ~ 750	绿	510	480 ~ 550
橙	620	600 ~ 640	蓝	470	450 ~ 480
黄	580	550 ~ 600	紫	420	400 ~ 450

三、光谱分布

一般光源(自然光源及人工光源)发出的光都是由不同波长的单色光混合而成的复色光,复色光的辐射能量取决于各单色光的辐射能量,即复色光的辐射能量与其组成有关。这一关系可以用函数关系来表示。复色光辐射能量按波长分布的规律称光谱分布。光谱分布是描述物体颜色的最基本方法。利用牛顿三棱镜原理测量各波长色光的辐射能量的仪器称为分光辐射度计^[1]。借助这种仪器可以把光谱中任意一种光谱色挑选出来,并采用光电接收器记录光谱中各种不同波长色光的辐射能。若以 ϕ_e 表示光的辐射能, λ 表示光谱色的波长,则光谱密度 $\phi_e(\lambda)$ (W/nm)可定义为:在以波长 λ 为中心的微小波长范围内的辐射能与该波长的宽度之比,其数学表示式为:

$$\phi_e(\lambda) = \frac{d\phi_e}{d\lambda} \tag{1-1}$$

光谱密度表示了单位波长区间内辐射能的大小。通常光源中不同波长色光的辐射能随波长的变化而变化,因此,光谱密度是波长的函数,称为光谱分布函数或光谱分布。

实际应用中,使用更多的是光谱密度的相对值,而非绝对值来描述光谱密度与波长之间的函数关系。令光谱分布函数的最大值为“1”,将函数的其他值与最大值进行归一化处理,经归一化处理后的光谱密度相对值与波长之间的函数关系称为相对光谱能量(功率)分布,记为 $S_{(\lambda)}$,以光谱波长 λ 为横坐标,相对光谱能量分布 $S_{(\lambda)}$ 为纵坐标,可绘制出光源的相对光谱能量分布曲线,如图1-4所示,是红宝石激光、日光、白炽灯光、荧光灯的光谱分布。

由相对光谱能量分布可以知道光源的颜色特性,这一特性取决于所发出的光线中,不同波长光的相对能量比例。而辐射能量绝对值的大小只反映光的强度,产生明暗的感觉,不会引起光颜色的变化。

常见光源的光谱分布有:线状光谱(激光低压钠灯、红宝石激光);带状光谱(碳弧和高压汞灯);连续光谱(一切热辐射光源如太阳、白炽灯光);混合光谱(前三种的组合,如荧光灯)。如图1-4所示,没有一种实际光源的能量分布是完全均匀一致的,也没有一种完全的

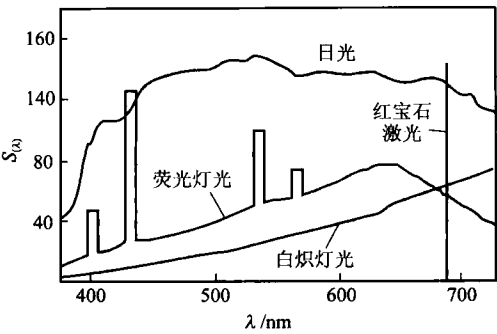


图1-4 一些常用光源的光谱分布

白光;然而,尽管某些光源(自然光或人造光)与完全白光在光谱分布上有很大的不同,在视觉上也有差别,但由于人眼有很大的适应性,便将这些光都称为“白光”。在色彩的定量研究中,国际照明委员会(CIE)于1931年建议,以等能光谱作为白光的定义。等能白光的含意是:可见光范围内,各个波长的电磁辐射相等的光。等能白光分解后得到的光谱称为等能光谱。

四、物体的光谱特性

物体在光线照射下呈现不同颜色,是因为物体具有对落在其表面的光谱成分有选择地透射、吸收和反射的特性,这种特性称为物体的光谱特性。透明体的颜色(滤色片,胶片)主要由透过光谱组成决定;不透明体的颜色主要由反射的光谱组成决定。

(一)透明物体的光谱特性

光照射在透明物体上,一部分光透过物体,另一部分光被物体吸收。从物体透射出的波长为 λ 的光辐射能 ϕ_τ 与入射于物体上的波长为 λ 的光辐射能 ϕ_0 之比,称为光谱透射率 τ :

$$\tau = \frac{\phi_\tau}{\phi_0} \quad (1-2)$$

而吸收度 D 亦称为光学密度 A :

$$A = \lg \frac{\phi_0}{\phi_\tau} = \lg \frac{1}{\tau} = -\lg \tau = D \quad (1-3)$$

吸收系数 α :

$$\alpha = \frac{A}{d} = \frac{D}{d} \quad (1-4)$$

式中: d ——透明体厚度。

(二)反射物体的光谱特性

光照射在非透明体上时,由于其表面分子的结构差异,形成选择性吸收,吸收了某些波长的辐射能,而将其余波长的光反射出来,其反射光辐射能 ϕ_ρ 与入射光辐射能 ϕ_0 之比称为光谱反射率 $\rho_{(\lambda)}$:

$$\rho_{(\lambda)} = \frac{\phi_\rho}{\phi_0} \quad (1-5)$$

其光学密度 A 为:

$$A = \lg \frac{\phi_0}{\phi_\rho} = \lg \frac{1}{\rho_{(\lambda)}} = -\lg \rho_{(\lambda)} \quad (1-6)$$

若一个表面对投射到它上面的光辐射在各个波长等比例地吸收,则反射光中各波长的辐射量均等量减少,照明光的反射强度发生改变,但光谱组成不改变,保持了照明光原来的颜色。当对白光的反射率由 0 到 1 逐渐变化时,物体表面将呈现出黑、灰色(由深到浅)直至白色。此现象称为非选择性吸收。当反射率 $< 10\%$ 时,物体看上去为黑色;反射率为 $10\% \sim 70\%$ 时,物体呈现出不同深浅的灰色;反射率 $> 70\%$ 的物体感觉是白色。

若物体选择性地吸收光源光中的部分光谱成分,反射(透射)其余的光谱成分时,则物体呈现不同的颜色。

第二节 视觉的生理基础

一、眼睛的生理结构

人眼是人对颜色的感受器,负担着成像和感觉颜色两大任务。人眼呈球体,直径约 24mm,眼球壁由里外三层膜组成,如图 1-5 所示。

(一)外层

外层前部的透明部分称为角膜,约占整个眼球表面的 1/6 左右,起到保护眼球内部和透光的作用。角膜的厚度约 0.8~1.1mm,折射率为 1.336,具有屈光的作用;外层后部约 5/6 的眼球表面是一层坚固的白色不透明膜,称为巩膜,巩膜的厚度为 0.4~1.1mm,起保护眼球的作用。

(二)中间层

中间层是血管膜,含有丰富的血管、神经和色素细胞。它又分为三层:

1. 脉络膜 紧贴在巩膜的内表面,厚约 0.4mm,含有大量的呈黑色的色素细胞,其作用是吸收眼球内的杂散光线,消除光线在眼球内的漫反射。

2. 睫状体 处于巩膜、角膜交界处的后方,由脉络膜增厚形成,内含平滑肌,其功能是支持晶状体的位置,调节晶状体的凸度(曲率)。

3. 虹膜 虹膜是睫状体向中央伸展而形成的环形膜,将角膜和晶状体之间的空隙分隔成两部分(眼前房和眼后房)。虹膜内缘形成瞳孔,瞳孔的大小由虹膜的收缩与伸展来调节,人眼的瞳孔最大时,直径可达 8mm,最小约 2mm,起着控制进入眼球内光线量的作用。

(三)内层

内层是视网膜,贴在脉络膜的内表面,是眼球的最里层,是眼球的感光部分。视网膜是一层透明的薄膜,厚度约 0.1~0.5mm,其上分布着视觉感光细胞。内层的最外层是视细胞层,包含视锥细胞和视杆细胞。视杆细胞的长度为 40~60 μm ,直径约 2 μm 。视锥细胞的长度为 28~

58 μm ,直径为 2.5~7.5 μm 。视锥细胞感光灵敏度低,只能在明亮的条件下发挥作用,具有精细的分辨率,能很好地分辨颜色与细节。视杆细胞感光灵敏度高,能在昏暗条件下发挥作用,分辨细节能力低,不能辨别颜色。视细胞层是构成视觉通路的第一级神经元;第二层为双极细胞层,起到联结视细胞与神经细胞的作用;第三层靠近玻璃体,为神经节细胞,它与视神经联结,视神经穿过眼球后壁进入脑内的视觉中枢^[2]。

人眼的视网膜上共有约 1.07 亿个视细胞,其中约 700 万个视锥细胞,约 1 亿个视杆细胞。视细

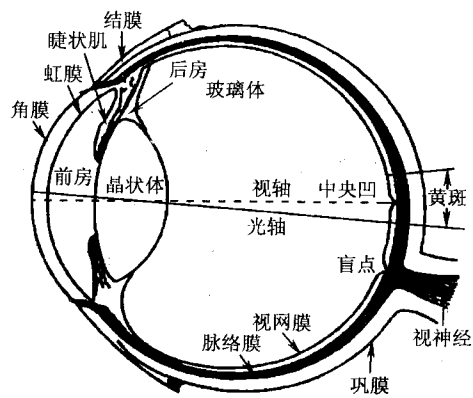


图 1-5 人眼横切面图

胞在视网膜上分布是不均匀的,在视网膜的中央部分有一个锥体细胞特别密集的分布区域,其颜色为黄色,故称之为黄斑,直径约 $2\sim 3\text{mm}$ 。黄斑中心有一小凹窝,称中央凹,是视觉最敏锐的地方,这里是视锥细胞密度最大的地方。在视网膜中央的黄斑部位和中央凹约 3° 视角范围内主要为视锥细胞,几乎没有视杆细胞。离开中央凹向外,视锥细胞数量急剧减少,而视杆细胞数量急剧增加;在中央凹 20° 的地方,视杆细胞数量最多。因此在视网膜上,由中央凹向外围部分过渡,人眼对色彩的分辨能力逐渐减弱,直到对色彩的感觉消失。即使在中央凹,人眼对色彩的感受性也不相同:在中央凹 $15'$ 的视角范围内,人眼对红色的感受性最高,但没有对蓝、黄色的感受性,即对小于 $15'$ 视角的小面积色彩,人眼会成为蓝—黄色盲,只能看到红与绿的各种混合色;如果观察面积再小,则对红、绿色的观察也会发生困难,但对各种色彩的明度感觉仍将保留。

此外,视网膜中央部位覆盖着一层黄色素,降低了人眼对光谱短波段(蓝色部分)的感受性,使色彩感觉发生变化。黄色素在中央凹的密度最大,由中央向边缘显著递减,这就造成了眼睛观察小面积色彩与大面积色彩的差异。因此,在实验室观察大于 4° 视场的色彩时,在视线正中会出现一个略带红色的圆斑(麦克斯韦圆斑)。

二、视觉器官的两重功能

视锥细胞(彩色视觉器官)对光的敏感性能小,必须在一定的光照条件下才能够分辨颜色和物体的细节,所以当光线暗淡时(如黄昏),视锥细胞就失去感觉色彩的能力,仅有明暗(黑、白)的感觉。视杆细胞(暗视觉器官)对光的敏感性能很高,能在光线很暗的情况下工作,但只能反映光的亮度差异,不能反映色光在颜色上的差异。视觉对色彩和光线数量的感觉功能称为视觉器官的两重功能。人眼对能量相同但波长不同的光线,所引起的亮度感觉不同。人眼在一定光照条件下对光线的感觉称明视觉;而在黑暗条件下对光线的感觉称暗视觉。明视觉、暗视觉条件下对相同波长光的感受性不一样。视觉正常的人由明亮环境到黑暗环境时,视觉对不同波长的光线的感受性会发生变化。在光亮条件下,眼睛可以看到光谱上不同明暗的各种颜色,当光谱亮度降低到一定程度时便感觉不到光谱上的各种颜色,而只是感觉到不同明暗的灰色。

在光亮条件下调节光谱不同单色光的强度,与一个固定的白灯光匹配直至达到视觉阈限水平(刚好能看到光亮);同样在黑暗条件下,调节光谱的不同单色光强度,直至视觉阈限水平,可得到明、暗视觉阈限与光谱波长的关系。实验表明,对于明视觉,用不同波长的单色光匹配一定亮度所需的相对辐射能量,在 400nm 附近需很大的能量,在 555nm (黄绿色)最小,至 700nm 后又增大;暗视觉在 400nm 处须较高能量方能达到视觉阈限,在 507nm 处最小, 700nm 处达到最大值。因此,明视觉与暗视觉对光的感受性不在光谱的同一部位,明视觉对光谱的黄绿色部位(555nm)最敏感,而暗视觉对光谱的蓝绿色部位(507nm)最敏感。

三、光谱光视效率

在等能光谱上(各波长的单色光辐射能量相等),人眼感受性最低的波长区域(用很大辐射

能量才能产生一定明亮感觉的区域)就是感觉到光谱最暗的部位,而人眼感受性最高的波段(用最小辐射能量就能产生一定明亮感觉的区域)就是光谱最亮的部位。人眼的这种灵敏度与光谱波长的依赖关系称光谱光视效率函数(或称视觉函数)。视觉函数也分为明、暗两种,即明视觉函数和暗视觉函数。

国际照明委员会(CIE)于1924年规定了明视觉的等能(辐射能量相等)光谱相对明亮度曲线,即明视觉光谱光视效率曲线,简称为明视觉曲线 $V_{(\lambda)}$ 。1951年又规定了暗视觉的等能光谱相对明亮度曲线,即暗视觉光谱光视效率曲线,简称为暗视觉曲线 $V'_{(\lambda)}$ 。

明、暗视觉曲线代表了光谱中不同波长的光的能量对眼睛产生光感觉的效率。为便于使用,国际照明委员会(CIE)将两条曲线的最大值统一为整数,明、暗视觉函数均成为相对值,因此波长为 λ 的单色辐射的相对光谱光效率 $V_{(\lambda)}$ 是在特定的光亮条件下,当波长 λ_m 和波长 λ 的单色光的明亮感觉相等时,两者辐射通量之比。 λ_m 选在最大比值等于1处,在引起明亮感觉相等的条件下,则有:

$$V_{(\lambda)} = \frac{\phi_{\lambda_m}}{\phi_{\lambda}} \quad (1-7)$$

式中: ϕ_{λ_m} ——波长为 λ_m 的辐射通量;

ϕ_{λ} ——波长为 λ 的辐射通量。

所谓 λ_m 选在最大比值为1处的含义是: λ_m 选取在人眼感受性最高的波段(用最小辐射能量便可达到视觉阈限水平),即光谱最亮处,故总有 $\phi_{\lambda_m} \leq \phi_{\lambda}$,所以 $V_{(\lambda)} \leq 1$ 。将明、暗视觉光谱光效率 $V_{(\lambda)}$ 、 $V'_{(\lambda)}$ 对波长作图,得到光谱光视效率曲线(图1-6),图中,明、暗视觉光谱光视效率 $V_{(\lambda)}$ 、 $V'_{(\lambda)}$ 的相对值表示等能光谱中波长为 λ 的单色光辐射所引起的明亮感觉程度。

由图1-6可以看出:明视觉曲线 $V_{(\lambda)}$ 的最大值大约在550nm处(黄绿色部位),趋向光谱两端, $V_{(\lambda)}$ 减小。表明在等能光谱中,黄绿色部位的光最亮,趋向光谱两端则变暗; $V'_{(\lambda)}$ 最大值大约在507nm处,整个 $V'_{(\lambda)}$ 曲线相对 $V_{(\lambda)}$ 曲线向短波方向推移,且长波端的可见范围缩小,短波端的

可见范围略有所扩大。明视觉 $V_{(\lambda)}$ 适用于1cd/m²以上亮度条件,暗视觉 $V'_{(\lambda)}$ 适用于0.001cd/m²以下的亮度条件。在明视觉、暗视觉之间的亮度,称中间视觉,中间视觉既有视锥细胞,又有视杆细胞工作。

国际照明委员会(CIE)明视觉和暗视觉光谱光视效率是光度学计算的重要依据。1931年,国际照明委员会(CIE)采用明视觉和暗视觉光谱光视效率函数 $V_{(\lambda)}$ 和 $V'_{(\lambda)}$ 作为光度计量的标准,代表人眼的平均(光)视觉特性。一个光源的某段波长的光辐射虽然客观存在,却无法为人眼所感受到(如紫外和红外光),所以它的光谱光视效率为0^[3,4]。

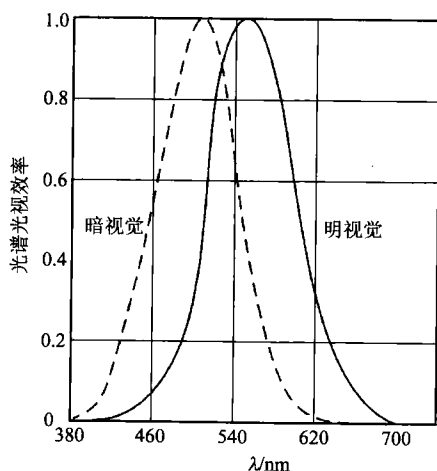


图1-6 明视觉、暗视觉的光谱光视效率曲线

第三节 颜色的分类特征

一、非彩色

非彩色就是黑、白及从最黑到最亮的各种灰色,它们可以排列成一个系列,称黑白系列(图 1-7)。

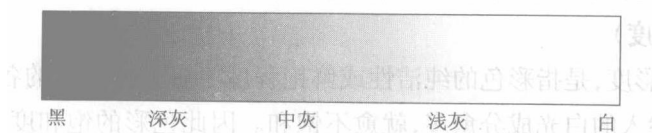


图 1-7 黑白系列

该系列中由黑到白的变化可由一条灰色的色带表示,一端是纯黑(该物质对一切光线都吸收,其反射率等于 0);另一端是纯白(该物质对一切光线都反射,其反射率等于 1)。黑白系列的非彩色只能反映物质对光反射率的变化,在视觉上的感觉是亮度的变化。

实际生活中无纯黑、纯白的物质(黑绒接近纯黑,氧化镁接近纯白),反射率达 80% ~ 90% 以上,视觉便是白色;反射率在 4% 以下,则是黑色。

黑色、白色和灰色物质对光谱各波长的反射无选择性,称为中性色。

二、彩色

黑、白系列以外的颜色称为彩色。黑白色只有一个特征,即明度,而彩色系列有三个彼此存在一定关联的特征:明度、色调(或称色相)、饱和度。可单独用其中的一个或几个来区分不同的色彩。

(一)色调(色相)

彩色彼此相互区分的特性称为色调,是色彩最重要的特征,也是最基本的特征。色调由物体表面反射到视神经的色光来确定。单色光以其波长来确定色调,复色光以各种波长的混合比例来确定色调。人们就是根据颜色的色调来命名某一种颜色的,如红色、绿色、黄色、紫色等。

色调可利用分光光谱反射率曲线的形状来表示,反射曲线不同,光谱分布范围不同,其色调亦不同。图 1-8 表示了两种不同颜色的色调。

(二)明度

人眼对物体的明亮感觉称明度。明度可用物体表面对可见光的反射率来表示,一般而言,彩色物体表面对光的反射率越高,其明度就越大。图 1-9 表示了同

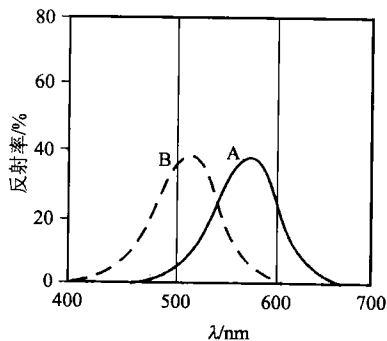


图 1-8 色调的差异

一种颜色的明度差异。

色度学中的明度概念与光度学中的亮度概念有所区别,其主要区别在于以下两点。

1. 概念不一 亮度是光度学概念,可用光度计测得,与人的视觉感受无关(属于“客观亮度”);而明度则强调颜色亮度在视觉上的反映,是从人眼的感受性来描述颜色的一种性质。

2. 描述手段不一 光度学上将颜色的亮度描述成光的数值(即辐射能量),而能量大小与视觉的感受性不一定成比例,人眼视觉对色光的能量判断不一定符合光度学的测量。如能量较大的蓝色光,其可见度(明度)反而低于比其能量小的绿色光。

(三) 饱和度(彩度)

饱和度,亦称为彩度,是指彩色的纯洁性或鲜艳程度。可见光谱中的各种单色光是最饱和的彩色。光谱色中掺入的白光成分愈多,就愈不饱和。因此色彩的饱和度,通常以色彩白度的倒数来表示。

物体色的饱和度取决于该物体表面对反射光谱辐射的选择性,物体对光谱某一较窄波段的反射率越高,而对其他波长的反射率很低或没有反射,则表明它有很高的光谱选择性,这一颜色的饱和度就高。即物体反射光的光谱带越窄,颜色的饱和度越高(色光越纯)。图 1-10 中,颜色 A 的分光反射率曲线高于颜色 B 的分光反射率曲线,表明颜色 A 的饱和度高于颜色 B 的饱和度。

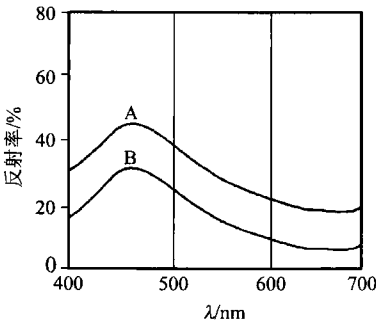


图 1-9 明度的差异

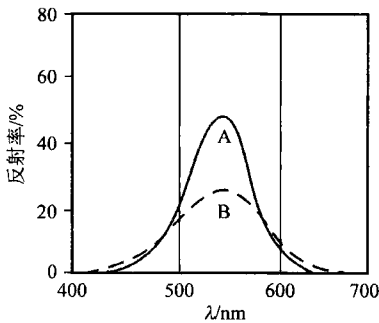


图 1-10 饱和度差异

三、颜色立体

在颜色的三种属性(色调、明度、饱和度)中,色调主要取决于光的波长;明度主要取决于物体对光的反射率;饱和度主要取决于物体对光反射的选择性。三者之间有着一定的关联,其相互之间的影响可由颜色立体(图 1-11)来形象地描述^[2]。颜色立体即用三维空间纺锤体可以把颜色的三个特征:色调、明度和饱和度表示出来。

在颜色立体中,用垂直轴表示黑、白系列明度的变化,上端是白色,下端是黑色,中间是过渡的各种灰色;水平的圆表示色调,圆上的各点代表可见光谱中各种不同的色调(红、橙、黄、绿、青、蓝和紫),圆形中心是中灰色,其明度和圆上的各种色调的明度相同;饱和度由色

点与垂直轴的距离来表示,从圆心向外颜色的饱和度逐渐增加,在圆周上的各种颜色饱和度最大。

圆周上的色点向上(白)或向下(黑)的方向变化时,颜色的明度发生变化,其饱和度也会发生变化(沿圆锥面降低),而颜色的色调并不发生变化;当颜色的色调与饱和度改变时,明度却不一定发生变化。因此可以得出这样的结论:对于圆周上的色点,当颜色的明度发生变化时,其饱和度也将发生变化;而饱和度或色调变化时,明度不一定变化。

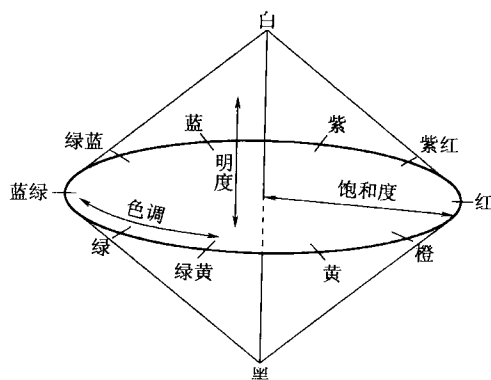


图 1-11 颜色立体^[4,5]

第四节 颜色视觉

一、颜色辨别

人眼所能看到的每一个波长的电磁波(可见光)都具有特定的颜色。在一定亮度条件下,正常人的视觉不但能看见可见光谱中的各种颜色,而且还能看到两个相邻颜色之间过渡区域的颜色,这些过渡区域常称为中间色彩(如黄绿,蓝紫等)。在可见光光谱内,人眼大致能够分辨的颜色有上百种。

某些波长的光,人们感觉到颜色与波长之间的关系不完全一致,因为除了波长外,光强度对颜色的感受性也有影响。随着光强度的变化,各种波长的色光在视觉感受上会向红色或向蓝色的方向变化(图 1-12)。但有三点基本不变,分别是黄(572nm)、绿(503nm)和青色(478nm),其他色彩在光强度增加时都略向红色或蓝色方向变化。

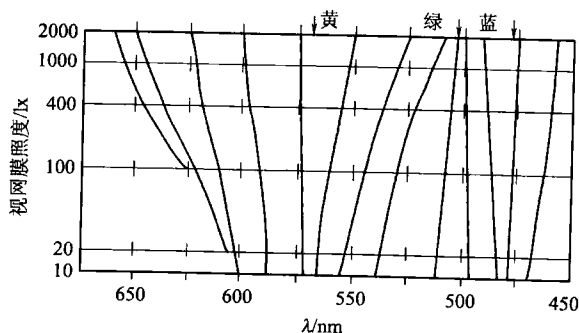


图 1-12 可见光谱中各种波长的恒定颜色线^[2]

例如 600nm 的色光,其照度由 100lx 增加到 2000lx 时,人眼感觉到的颜色是波长约为 625nm

光的色调(向红光方向偏移);而波长为 535nm 的色光,其照度由 100lx 增加到 2000lx 时,人眼感觉到的颜色是波长约为 505nm 光的色调(向蓝光方向偏移),亦即波长必须减少约 30nm,才能保持原来的色调不变。这种颜色的色调随光强度变化的现象,称为贝楚德—朴尔克效应。

在可见光谱中,从短波(400nm)到长波(770nm)之间有各种过渡色,人的视觉在各个波长范围内辨别波长微小变化的能力是不同的。在某些波长范围内(敏感部位),波长改变 1nm,人就可感觉到颜色变化,而大多数部位要改变 2nm 甚至 2nm 以上,人才能感觉到颜色有所变化(图 1-13)。对颜色最敏感的波长范围在 480nm 及 600nm 附近,而最迟钝的波长范围在 540nm 及光谱的两端。这种人的视觉辨认色光波长微小变化的能力称为颜色辨认阈限。

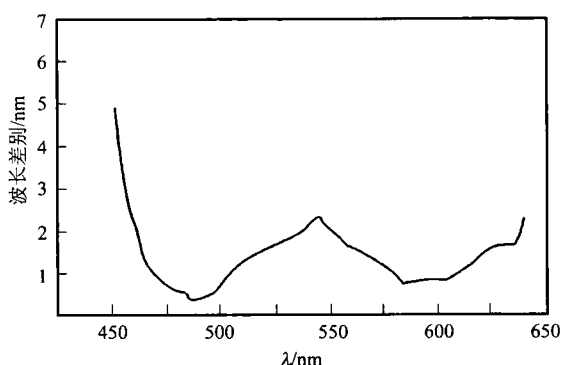


图 1-13 可见光光谱范围内的颜色辨认阈限^[1]

二、颜色对比

在同一视场中,不同色彩的相互影响称为颜色对比。颜色的对比现象有两种情况:一种是受视网膜上其他部位现有颜色刺激的影响,称为同时颜色对比;一种是视网膜受先前颜色刺激的影响,称为先后颜色对比。

(一)同时颜色对比

同时颜色对比是指视网膜同时受到两种及以上的颜色刺激,从而使观察到的色彩发生变化。例如,将一块灰色纸片置于白底色上观察,则感觉颜色较暗,而置于黑底色上则感觉较亮(亮度对比),如图 1-14 所示。同样,若将灰色纸片置于棕红色背景中,则灰色纸片带青色感觉;若置于绿色背景中,则带有红色感觉(颜色对比)。

颜色对比实际是一种对比错觉。眼睛观察两种或两种以上不同的但却是同时并列的颜色时,由于并列色彩之间所产生的相互影响,会使得它们的色调、明度或饱和度发生某种变化(称为同时

对比错觉)。

同时对比错觉以颜色的并列和对比为产生条件,以补色现象为基本原理。一般而言,在同时颜色对比中,色调、明度和饱和度会发生如下一些变化。

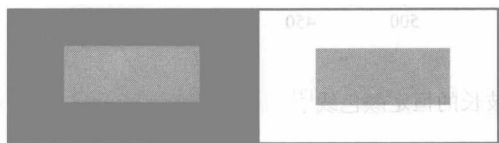


图 1-14 同时颜色对比

1. 色调对比变化 不同色调的色并列时,人观察到各色的色调趋向于对方的补色,也即色的相互排斥现象。互补两色同时对比,结果是各自的色调及饱和度更加突出,如红、绿色同时对比,红色更红,绿色更绿。

2. 明度对比变化 不同明度的色并列或包围与被包围时,由于相互排斥的结果,明度高者更明,明度低者更低。由于彩色具有特定的色调,在不同明度的同时对比中,色调以及饱和度也会发生一定的变化。例如,不同的彩色与黑色作同时对比,均趋向于明度更高的同种色,彩色趋向于比其自身明度更高的色彩,且纯度提高,更显得鲜明,而黑色则趋向于对方的补色。

黑色与彩色同时对比,其大致的变化规律如表 1-2 所示。

不同的彩色与白色作同时对比,白色趋向于对比色的补色,而彩色趋向于明度较低的同种色,其大致的变化规律如表 1-3 所示。

表 1-2 与黑色同时对比的色彩变化

黑色的变化	紫	橙	红	绿	青
与黑色进行同时对比的彩色	黄	青	绿	红	橙
与黑色对比色的色调变化	--	—	—	橙	黄
与黑色对比色的饱和度变化	更饱和(更鲜艳)				

表 1-3 与白色同时对比的色彩变化

白色的变化	橙	青	绿	红	紫	黄
与白色进行同时对比的彩色	青	橙	红	绿	黄	紫
与白色对比的色彩的色调变化	灰青	灰橙	灰红	灰绿	黄褐	灰紫

3. 饱和度对比变化 不同饱和度的彩色进行同时对比时,原先饱和度高的将更高,饱和度低的将更低(鲜艳的更加鲜艳,萎暗的更加萎暗)。在大面积的不鲜艳色中,如果加入少许鲜艳的色彩,会使得鲜艳的颜色更加鲜艳^[2]。

(二)先后颜色对比

先后颜色对比(亦称为连续对比错觉),是指视网膜受以前颜色刺激的影响而形成的颜色变化的现象(表 1-4)。

表 1-4 先后颜色对比结果中看到的各种颜色

眼睛刚才注视过的 表面颜色	眼睛现在所注视的表面颜色					
	红	黄	绿	蓝	紫	白
红	暗红	绿黄	饱和绿	绿青	蓝	翠绿
黄	紫红	灰黄	青绿	紫青	饱和蓝紫	紫
绿	饱和红	橙	灰绿	紫	红紫	品红
蓝	橙红	橙黄	黄绿	灰蓝	品红	浅橙
紫	橙	饱和柠檬黄	黄绿	绿	灰紫	浅黄

先后颜色对比现象的结果是先前注视过的那种颜色的补色,实际上是与补色调近似的颜色。例如,眼睛注视红色几分钟后,将视线移至白纸上,这时感觉白纸的颜色不是白的,而是浅绿色的。原因是视锥细胞被前一种红色刺激引起了兴奋,当视线移向白纸后,眼睛对红色光线的感受性降低,而现在注视的白色光中含有先前注视的红色光线的波长,由于白光中红色光线的刺激不如先前的红光强烈,不能引起视锥细胞的兴奋,于是对先前颜色(红色)的感受性下降,在白纸上诱导出与原来颜色(红色)的补色调相近似的浅绿色。这种诱导出的原来颜色的补色(实际上是与补色调近似的颜色),称负后像。

先后颜色对比引起的错视称为先后对比错视,其实质是一种视觉残留现象,是由于人的视神经受外来刺激而引起的兴奋或抑制过程不能立即恢复而造成的。

先后对比错视的感觉不如同时对比错视强烈,其原因是因为先后对比错视是一种颜色幻觉,在注视后一种颜色(次见色)时,先前的颜色(初见色)已经不在视野中了,而同时颜色对比时,两种颜色始终存在于同一个视野中^[3,4]。

三、颜色视觉理论

现代颜色视觉理论主要是由两种较为古老的学说发展而来的。其一是由颜色混合的物理学规律为出发点发展而得的,被称为是杨—赫姆霍尔兹(Young-Helmholtz)的三色学说,认为任何颜色都可以用三种颜色混合后得到,前提是这三种颜色(称为三原色)中的任意一种不能由其他两种颜色混合而成。在人眼的视网膜上有三种感光神经纤维,分别称为感红、感绿和感蓝神经纤维,每种神经纤维的兴奋均能引起相应原色的感觉,并且这三种神经纤维对不同波长光的照射所引起的兴奋程度不同,所产生的混合色是三种神经纤维按特定比例同时兴奋的结果。杨—赫姆霍尔兹三色学说的最大优点是能够解释各种颜色的混合现象,而最大缺点是不能解释色盲现象^[2-4]。

另一种是以人眼的视觉现象为基础发展而得的,被称为是赫林(Hering)的“对立”颜色学说(也称为四色学说)。他假定在人眼的视网膜中存在着三对视素:黑—白视素、红—绿视素、黄—蓝视素。这三对视素的代谢作用包括建设(同化)和破坏(异化)两种对立的过程。色彩感觉和各种色彩的混合现象是由三种视素的对立过程组合产生的。当两种颜色光互为补色,混合时则获得白色或灰色,这是因为互为补色的光对某一对视素的两种对立过程形成平衡,因而不产生与该视素有关的色彩感觉,但所有的色彩均有白色的成分,所以能引起黑—白视素的破坏作用而产生白色或灰色的感觉。如果所有的色彩都同时作用到各对视素,红—绿、黄—蓝视素的对立过程都达到了平衡,而只有黑—白视素的活动,也会引起白色或灰色的感觉。赫林学说能够有很好地解释色盲现象,但无法解释三原色能产生光谱中全部颜色的现象。而颜色的混合现象正是现代色度学的基础,这是赫林对立颜色学说的最大缺陷^[2-4]。

这两种理论虽然能对大量的颜色现象加以解释,但也存在一些无法解释的现象。近年来,随着医学、解剖学、神经生理学、材料科学和现代实验仪器的不断发展,人们发现杨—赫姆霍尔兹的三色学说与赫林的四色学说只是对颜色视觉的一个方面有了一些正确的认识,两者并不是互相对立的,而必须相互补充、完善,才能对颜色视觉现象有一个较为全面的认识。

现代颜色视觉理论认为,在视网膜上的视锥细胞是一个三色的机制(系统),而在视觉信息向大脑皮层视区的传导通路中则变成了四色机制(系统)。

第五节 颜色混合

两种或两种以上不同的色光混合,产生一种新的色光,称为色光混合。在一种颜料中加入另一种颜色的颜料,构成了第三种颜色,称为色料混合。色光混合与色料混合的概念不同。

一、色光混合

色光混合是指不同波长的光同时进入人的视觉感受器,在极短的时间内进行连续刺激,使人产生一种新的色彩感觉。从能量的观点来看,色光混合是亮度的叠加,因此色光的混合也称为“加色”混合,混合后的色光必然要亮于混合前的各个色光,只有亮度低的色光作为原色才能混合出数目比较多的色彩,否则,用亮度高的色光作为原色,相加后则更亮,这样就永远不能混合出那些亮度低的色光。如红光(R)与绿光(G)混合,得到黄色(Y)的光;红光与蓝光(B)混合,得到品红色光(M);蓝光与绿光混合,得到青色光(C);当所有波长的色光混合时,则得到白光(W)(图1-15)。

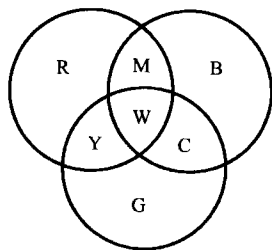


图1-15 色光的混合

自然界和现实生活中,存在很多色光混合加色的现象。例如太阳初升或降落时,一部分色光被较厚的大气层反射到太空中,一部分色光穿透大气层到地面,由于云层厚度及位置不同,人们有时可以看到透射的色光,有时可以看到部分透射和反射的混合色光,使天空出现了丰富的色彩变化。

色光混合的实现方法主要有两类:一类是视觉器官外的混合,另一类是视觉器官内的混合。

(一)视觉器官外的加色混合

视觉器官外的加色混合是指色光在进入人眼之前就已经混合成新的色光。色光的直接匹配就是视觉器官外的加色混合。光谱上各种单色光混合形成白光,是最典型的视觉器官外的加色混合。这种加色混合的特点是:在进入人眼之前各色光的能量就已经叠加在一起,混合色光中的各原色光对人眼的刺激是同时开始的,即色光是同时混合的。

(二)视觉器官内的加色混合

视觉器官内的加色混合是指参加混合的各单色光,分别刺激人眼的三种感光细胞,使人产生新的综合色彩感觉,它包括静态混合与动态混合。

1. 静态混合(空间混合) 静态混合也叫“空间混合”,是指各种颜色处于静态时,反射的色光同时刺激人眼而产生的混合,如细小色点的并列与各单色细线的纵横交错,所形成的颜色混合,均属静态混合,各色反射光是同时刺激人眼的,也是色光的的同时混合。细小色点并列的加色混合如图1-16(a)所示。

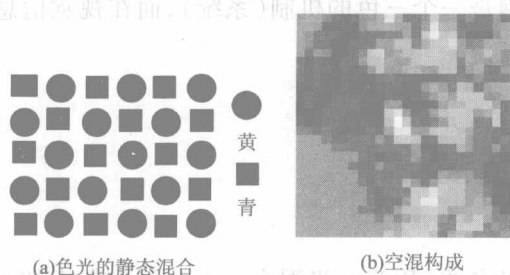


图 1-16 色光的静态混合

由于视锐度所限,人们不能将相隔太近,且面积又很小的色点或色线分辨开来,而将它们视为一种混合色。图 1-16(b)是几种色点并列时的放大图,例如黄色与青色的反射光同时刺激人眼的感色细胞,使人产生的色彩感觉既不是单纯的黄色,也不是单纯的青色,而是青色与黄色的混合色——绿色,这是由于色点相距太近,人眼的感色细胞无法区分开,从而产生了综合色觉。

2. 动态混合 动态混合是指各种颜色处于动态时,反射的色光在人眼中的混合,如彩色转盘的快速转动,各种色块的反射光不是同时在人眼中出现,而是一种色光消失,另一种色光出现,先后交替刺激人眼的感色细胞,由于人眼的视觉暂留现象,使人产生混合色觉。

人眼之所以能够看清一个物体的颜色,乃是由于该物体在光的照射下,物体所反射或透射的光进入人眼,刺激了视神经,引起了视觉反应。当这个物体从眼前移开,对人眼的刺激作用消失时,该物体的形状和颜色不会随着物体移开而立即消失,它在人眼还可以作一个短暂停留,时间大约为 $1/10\text{s}$ 。物体形状及颜色在人眼中这个短暂时间的停留,就称为视觉暂留现象。正因为有了这种视觉暂留现象,人们才能欣赏到电影、电视的连续画面。视觉暂留现象是视错觉的一种表现。

人眼的视觉暂留现象是色光动态混合呈色的生理基础,如图 1-17 所示的彩色转盘。在转盘上以 1:1 的比例间隔均匀地涂上红、绿两种颜色。快速转动转盘,可以看到转盘上已不再是红、绿两种颜色,而是一个黄色。

这是因为当转盘快速转动时,如果红色反射光进入人眼,就会刺激感红细胞。当红色转

过,绿色反射光进入人眼,就刺激了感绿细胞。此时,感红细胞所受刺激并没有消失,它继续停留 $1/10\text{s}$ 的时间。在这个瞬间,感红细胞与感绿细胞同时兴奋,就产生了混合的黄色感觉。彩色转盘转动得越快,这种混合就越彻底。

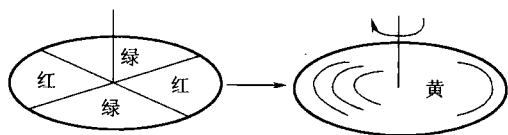


图 1-17 色光动态混合

动态混合是由参加混合的色光先后交替地连续刺激人眼,因此又称为色光的先后混合。通常情况下,人眼可以正确地观察及判断外界事物的状态,如大小、形状、颜色等,但如果商品包装的颜色分布太杂,颜色面积太小或多种颜色的交替速度过快,人眼的分辨能力则受到影响,就会使所观察到的颜色与实际有所差别。

二、色料混合

色料的色彩是由色料对白光(日光)选择性吸收和反射的结果。色料的混合必然增加了色光的吸收量,削弱了其反射光的能力。色料混合的结果是混合色的明度、纯度都将降低,混合色