

Yanse Celiang Jishu
Yanse Celiang Jishu
Yanse Celiang Jishu

颜色测量技术

滕秀金 邱迦易 曾晓栋 编著



中国计量出版社
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

图书在版编目 (CIP) 数据

颜色测量技术/滕秀金等编著. —北京: 中国计量出版社, 2007. 5
ISBN 978 - 7 - 5026 - 2611 - 2

I. 颜… II. 滕… III. 颜色—测量 IV. 0432. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 047235 号

内 容 提 要

本书主要根据国际照明委员会 (CIE) 推荐的基础色度学原理和作者长期实际工作经验编写。全书共分 13 章, 内容包括: 色度学基础理论, 色度、白度和色差测量的规范条件, 色度学标准光源, 测色仪器及其调校技术等。书中特别介绍了中国颜色体系。书后的附录收入了基础色度学国家标准, 以及主要的颜色测量用国家计量检定规程, 极方便颜色工作者的实际操作。

本书可供从事颜色科学研究、颜色 (色差) 测量、计量检定、色彩管理和控制的工程技术人员、大专院校相关专业的师生参考或作工具书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

北京市密东印刷有限公司印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 22 字数 532 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 48.00 元

序

目视所见，这个世界无处没有颜色。换言之，凡物都有颜色，连人本身也有颜色，有黄、白、红、黑人种之分。也因此，颜色不仅成为物体的特定标志，而且又是该物体品质的评比表征。五谷由青至黄的色变，就可知其已成熟否；肉类表面色若有些微差异，就可评出其新鲜程度；同一衣料在染色上如稍有不同，就会有损美观；在人体上出现的异常肤色又是诊断疾病的依据；而军事上的迷彩色和有些动物及昆虫的变色本能，更是利用颜色来保护自己的一项巧夺天工的举措！颜色之为用可谓大矣。

在这个世界里，如果只有一种颜色，那人们的生活将是无比的单调、平淡，甚至无法进行社会活动。例如在现代城市里，十字路口如果没有红绿灯指挥交通，城市就会瘫痪。在茫茫浓雾里，在一片全白的雪地里，在一望无垠的黄沙荒漠里，在伸手不见五指的黑夜里，由于整个客观世界充满着无色和单色的气氛，不得不使人的心理上出现了恐惧、孤独、无所适从的情绪，多么希望在视线所及之处出现一个与环境不同颜色的物体，来增强自己的透视感、方向感和依托感。所以，世界不能没有颜色，人也不能没有颜色。

事实上，从“混沌初开”的无色、单色世界进入有色世界后，人就一直与颜色为伍，在人的视觉里总是有五彩缤纷的物体供人欣赏和认知，从而决定自己应给予的应答。

颜色又能影响人的情绪和对客观世界的感悟。马克思在《政治经济学批判》一书中曾对颜色对人的影响写下了这样的定义：“一般讲来，色彩的感觉是美感的普及的形式。”故此人们对客观事物的认识和情感体验，常与色彩联系在一起。由于人们的习惯和联想的审美指向性，不仅使色彩带上了一定的感情意义，而且由此产生了色彩的象征性。我国现代著名诗人闻一多（1899～1946年）在一首题为《色彩》的诗中写道：“生命是没有价值的白纸，/自从绿给了我以发展，/红给了我以热情，/黄教我以忠义，/蓝教我以高洁，/粉赐我以希望，/灰白赠我以悲哀，/再完成这帧彩图，/黑还要加我以死。/从此以后，/我便溺爱我的生命，/因为我爱它的色彩。”历代大文豪、大诗人在作品中，以色彩描述人物的心理和作者的情感的，更是难以计数。

在对颜色的认识和研究上，我国早在公元前七世纪的典籍中，已明确所有颜色都可归纳成青、赤、黄、白、黑五种“正色”（正色即现代色度学中的基色），而与此时代相近的希腊学者恩贝多克利（Empedocles，公元前492～431年）曾宣称颜色的四种基色是白、黑、红、黄绿。这显然是与现代学说中的三基色红、绿、蓝是有差距的，而我国古代五色中的青、赤、黄则是与1866年杨-霍（Young-Helmholtz）提出的红（=赤）、绿（=黄）、蓝（=青）三基色学说相近，只不过截止波段有前后不同而已。我国古代的著名军事家孙子（约公元前四世纪人）更对美不胜收的颜色认为“色不过五，五色之变，不可胜观也。”这样的色度学见解，在世界上可说是慧眼独具、前所未有的。

世界上究竟有多少种颜色，在化学工业日益发展的今天，实在是难以估定的。有人估计可作如下乘积：色调数 $180 \times$ 亮度等级数 $600 \times$ 平均彩度（饱和度）数 $10 = 1\,080\,000$ 种；也有人按波长每有 $2 \sim 3 \text{ \AA}$ 的变化就会出现一种新的颜色作计算，则颜色数目将是个天文数字。

事实上，虽不需这样多品种的染料、颜料、涂料和印刷油墨就可调出这么多颜色，即使调成后也不是一般人的眼力所能如此细分的。这就涉及颜色的测量科学——色度学了。

颜色的测量，可分为两类——定性测量和定量测量。定性测量以比较法为主，即以试样色与标准色在一定条件下由目视评定它们在颜色三属性（明度、色调、彩度）上的差异，其中带有一定的主观性。定量测量则是用仪器对试样颜色具体的参数进行测定，做出可比的评价，它的结果，除仪器因素外，是客观的。

经过近一个世纪的发展，色度学已日臻完备，但测量工作在操作上既有其科学性，又有其技术性。特别是在颜色测量工作尚待全面开展我国，更需慎重将事，树立严格的制度。

本书的编著者都是长期从事颜色测量的专家，具有丰富的经验；其中更有自新中国成立以来为开创我国颜色测量和制订多种颜色测量国家标准的专家。因此，本书内容不仅是理论与实际并重，而且具有缜密的操作性。故本书之出版，定会使读者对色度测量有进一步的认识和获得理想的结果。特书此序，为之作介。

浙江大学光学系教授、博导
全国颜色标准化技委会顾问
全国白度标准化工作组组长
国际颜色学会八届国际顾问委员会成员
董太和 敬序

2007 年 5 月于杭州

目 录

第一章 色觉与颜色	(1)
第一节 光谱与颜色	(1)
第二节 人眼的色觉特性	(2)
第三节 颜色的分类和特性	(9)
第二章 标准色度学系统	(11)
第一节 暗视觉与明视觉	(11)
第二节 色匹配函数	(15)
第三节 $RGB-XYZ$ 的变换	(20)
第四节 CIE 色匹配函数	(20)
第五节 CIE 1931 标准色度系统	(24)
第六节 CIE 1964 补充标准色度系统	(26)
第三章 色度计算方法	(28)
第一节 颜色的三刺激值	(28)
第二节 色品坐标	(30)
第三节 主波长和色纯度	(33)
第四章 均匀色空间和色差公式	(35)
第一节 明度的均匀分度	(36)
第二节 色品坐标的均匀化	(37)
第三节 CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 均匀颜色空间	(38)
第四节 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 均匀颜色空间	(40)
第五节 CIE 色差公式	(42)
第六节 CMC 色差公式	(45)
第五章 物体色的测量条件	(47)
第一节 标准照明体和标准光源	(47)
第二节 标准照明和观测条件	(52)

第三节	反射比因数的标准	(55)
第六章	物体色的测量方法	(56)
第一节	反射比的绝对测量	(56)
第二节	标准白板和标准色板	(60)
第三节	物体色的测量方法	(64)
第七章	白度测量	(67)
第一节	白度的概念	(67)
第二节	白度的测量方法	(68)
第三节	白度公式	(70)
第四节	白度测量对比与结果分析	(73)
第八章	光谱测色仪	(79)
第一节	光谱测色仪的组成	(79)
第二节	光谱测色仪举例	(84)
第三节	光谱测色仪的波长标尺	(88)
第四节	光谱测色仪的光度标尺	(90)
第九章	光电积分测色仪器	(94)
第一节	色差计	(94)
第二节	白度计	(107)
第三节	光电色度计	(117)
第十章	目视色度计	(122)
第一节	加色法目视色度计	(122)
第二节	减色法目视色度计	(123)
第三节	石油产品比色计	(130)
第四节	啤酒比色计	(135)
第十一章	荧光色的测量	(139)
第一节	双单色仪法	(139)
第二节	光谱光度法	(140)
第三节	色度计法	(141)
第十二章	光源色	(143)
第一节	光源色的测量	(143)
第二节	D 光源的评价方法	(148)
第三节	安全色光	(162)

第十三章 中国颜色体系	(168)
第一节 国外主要颜色体系	(168)
第二节 中国颜色体系	(175)
附录1 GB/T 3977—1997 颜色的表示方法	(187)
附录2 GB/T 3978—1994 标准照明体及照明观测条件	(196)
附录3 GB/T 3979—1997 物体色的测量方法	(203)
附录4 GB/T 5698—2001 颜色术语	(227)
附录5 GB/T 7921—1997 均匀色空间和色差公式	(253)
附录6 GB/T 15608—1995 中国颜色体系.....	(265)
附录7 JJG 2029—1989 色度计量器具检定系统	(289)
附录8 JJG 453—2002 标准色板检定规程	(292)
附录9 JJG 512—2002 白度计检定规程	(308)
附录10 JJG 595—2002 测色色差计检定规程	(318)
附录11 JJG 867—1994 光谱测色仪检定规程	(328)
主要参考文献	(342)

第一章 色觉与颜色

第一节 光谱与颜色

人类能识别各种颜色，但对颜色本质的认识是模糊的。1666年牛顿（Newton）所做的著名实验，发现了光谱是颜色的基础，打开了对颜色实验研究的大门：牛顿在一面墙上钻了一个直径为8.5 mm的小洞，墙的另一面是完全黑暗的房间。通过这个洞，阳光直射在房间的另一面墙上，形成太阳的盘状像，类似小孔像机。然后，将一个玻璃棱镜放在靠近小洞处，发现光被扩散成扇形的光谱。光被分离成大约长254 mm，沿着长度方向，呈现出红、橙、黄、绿、蓝、青、紫的颜色。牛顿很快得出结论：白光并非通常所认为的均匀单一体，而是由全部光谱色混合组成的。接着提出的问题是，这些红、黄、绿等光谱色本身是否也是混和的，能否分解成更进一步的颜色？为此，他又做了另一个实验：用一个上面有一狭缝的卡片，只留一条窄带，挡住光谱中的其他光。这一窄带光，或黄或绿。使其再通过一个棱镜，但是此光通过棱镜后并没有进一步分解，而仍具有通过卡片狭缝前相同的颜色。由此可得出结论：光谱色是白光的基本组成。

图1-1表示了对应于光波长的主要光谱色带。光是一种电磁辐射，就像X射线、雷达波等。决定其特有性质的是它们的波长（ λ ）。无线电波具有相当长的波长，典型的范围是从大约一米到几千米；而X射线则有非常短的波长，仅为百万分之一毫米，甚至更短。光波所具有的波长范围约为1纳米到1毫米之间，波长的单位采用“纳米”（nm），即 10^{-6} mm，或 10^{-9} m。需要强调的是，图1-1中所给出的颜色名称和波长界限只是一种粗略的说明，每种颜色都是渐变至下一种颜色的，所以没有真正的边界，而且给定波长的光所呈现的颜色依赖于观察条件，对不同的观察者也略有不同。尽管如此，在记录作为波长函数的数据时，这些名称还是有用的。光辐射中能引起人的视觉的波谱称可见光谱，可见光谱的波长范

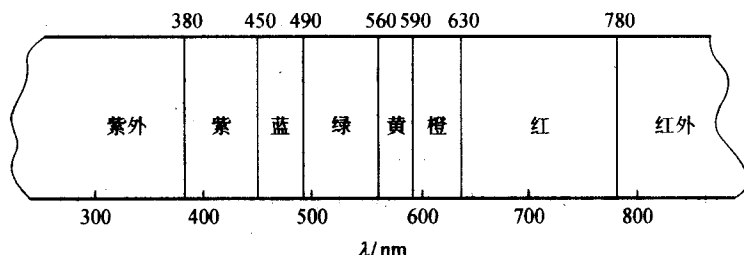


图 1-1 可见光谱区的颜色名称

围为 380 ~ 780 nm，这正是人眼工作的范围。太阳光辐射到地球表面的过程中，也正是这个波谱段最丰富。这个事实说明人的视觉器官和功能与自然条件有着密切的关系。比可见光谱波长更短的光辐射，称为紫外线；比可见光谱波长更长的光辐射，称为红外线，人们能够感到它们所提供的辐射能，可以晒黑皮肤或者温暖身体，但它们通常是看不见的。

第二节 人眼的色觉特性

人类生活在大自然和阳光下。光是人眼视觉的物理基础。人类的视觉器官有光感、形象感和色觉等功能。色觉的研究，涉及很多学科，诸如物理光学、生理学、心理学以及生物学、生物化学、解剖学和临床眼科学等。色觉或称颜色视觉，是指眼睛这个视觉器官，不仅能感觉外界景物的形状、大小和物体的运动情况，而且还能识别红、绿、黄、蓝、白、黑等千差万别的各种颜色。眼睛是人类认识世界最主要的器官。

一、眼睛的构造

人的眼睛可看作是一个天然的光学仪器，而且相当精密。眼睛近似球形，最前面是球形的透明角膜，其后是相当于透镜的水晶体和玻璃体。晶体透镜的折射率为 1.40，通过周围随意肌的收缩，改变晶状体的屈光度，使眼睛本身得到调节。如看远处物体时，晶体变薄一些；看近处物体时则变厚一些。角膜和晶状体共同作用，将一个外部世界形成小的倒置像呈现在视网膜上。这是眼睛的光感表面。眼球内部玻璃体的折射率为 1.34，与水的折射率

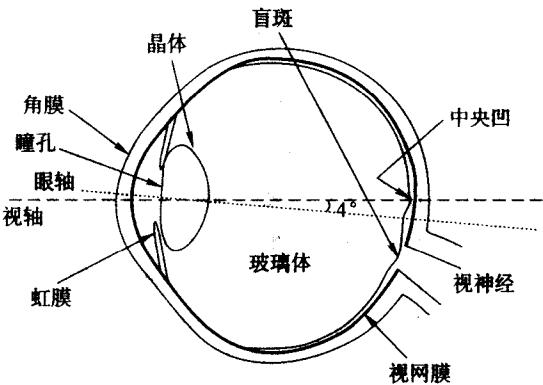


图 1-2 眼球构造简图

相同。在水晶体前面有一虹膜，从外面看是眼睛中的环状有色部分。虹膜中央有一称作瞳孔的小孔，是光通过的光孔。虹膜可以使瞳孔缩小或扩大，像照相机中的光圈，可以调节射入眼内的光量。如在亮光下小孔的直径仅为 2 mm，而在暗光下小孔会变大，最大直径为 8 mm。然而这种调整比例只能达到大约 8 比 1，而不是直径平方比所得的 16 比 1。这是因为通过瞳孔边缘的光量对视网膜的刺激不如通过中心的光量有效。视网膜中正对着水晶体的地方是视觉最敏感的中央凹和视神经（图 1-2）。

视网膜是人体所有组织中最活跃、新陈代谢最旺盛的组织之一。视网膜分布在近似球形的眼球内壁的大部分，从而使眼睛具有很宽的视野。视网膜的结构很复杂，而视网膜在其面积内的敏感性远非均匀的。色觉被限制在刺激源位于视觉坐标轴的约 40°之内。在此之外，视觉实际上是单色的，主要是察觉运动。在眼睛坐标轴任一边的 40°以内，识别颜色和细节的能力随着靠近眼睛坐标轴而逐渐提高。最敏锐的视觉区称为“中央凹”，它包括大约在中心 1.5°直径的视觉区域。这其中的一部分称作“中心小凹”，对应于大约 1°的区域。

生理学实验表明，在中央凹中心很小的视角区域内，对红色的感受最灵敏，而对蓝色和

黄色却失去了敏感而不能辨别，是蓝、黄色盲区，也可说是蓝黄色弱区，只能辨别红和绿。因而对远距离的颜色信号，因为视角小，往往要看错，尤其对蓝、黄色不能分辨。如果亮度较低，则蓝和黄色容易与其他颜色混淆。根据人眼的这种色觉特点，人们在确定交通信号灯时，首先选择了红色和绿色，而不是蓝色和黄色。对这个小小的蓝黄色盲区，过去曾认为是由于黄斑的黄色素吸收了短波和长波光谱所造成的，现在则认为是此中央小凹区缺乏蓝色感受体，因而存在着一个蓝色暗点，这样就使颜色感觉发生了变化。由于中央凹黄色素密度最大，到视网膜边缘显著降低，视网膜中央部位和边缘部位结构的差异，造成不同视网膜区域的颜色感受性亦不一样，所以造成观察大面积和小面积颜色会有差异。

中央凹的一个奇怪特点是，它不以眼睛的光学轴（眼轴）为中心，而是以位于该轴一侧大约 4° 的位置为中心，如图 1-2 所示，恰好在视觉轴（视轴）上。光学轴的另一侧大约 10° （相当于凹处约 14° ）是“盲点”，在此处连结视网膜至大脑的神经纤维穿过眼睛表面，这一区域对光完全无感觉。凹处的一部分区域包含有黄色的色素，称为“黄斑”。除了视网膜的这些空间分布变化外，在不同区域，分布着不同类型的光感细胞——杆体细胞和锥体细胞。它们对光能产生响应。中央凹黄斑处集中了锥体细胞，在中央凹大约 3° 视角范围内，差不多没有杆体细胞。杆体细胞分布在视网膜四周。锥体细胞和杆体细胞的比例，从中央凹全是锥体细胞到视觉轴 40° 之外几乎全是杆体细胞是连续改变的。单独的锥体细胞和杆体细胞由神经纤维连于脑。其方式根据其位置很不相同：在中央凹内，神经纤维和锥体细胞的数目几乎相等；但是，随着对视觉轴的角度增大，神经纤维的数目连续减少，直到差不多一根神经纤维对几百杆体细胞和锥体细胞。

二、视网膜光感细胞

视网膜中杆体细胞的功能是在低照度下给出单色视觉。这个微光视觉形式也称“暗视觉”。刺激源的亮度有时低于几百分之一 cd/m^2 （如在黑夜的星光或月光下），这时，杆体细胞不能分辨颜色和物体的细节。而在强光下它反而也不起作用。

视网膜中锥体细胞的功能是在正常照度下给出色觉。在明亮照明条件下，如刺激源的亮度为几个 cd/m^2 或更多，锥体细胞能够分辨物体的颜色和它的细节。

随着照度的降低，从明视觉到暗视觉逐渐变化，锥体细胞和杆体细胞对视觉有明显不同的作用。杆体细胞最敏感的波长短于锥体细胞，约在 510 nm 左右；而锥体细胞最敏感的波长是在 555 nm 处。因而当照度降低至一定光照范围时，红色和蓝色的相对亮度会发生变化。这一现象经常可在花园里看到：在阳光充足时红花比蓝花看起来明亮；太阳落下时则红花比蓝花暗。这种现象叫珀金杰（Purkinje）现象。

杆体细胞的形状呈圆柱形，而锥体细胞的形状呈圆锥形，因而得名。它们都很小，典型的大约直径为 $1/500\text{ mm}$ ，长约 $1/25\text{ mm}$ 。它们彼此平行排列着，面向瞳孔。这样光沿其长度经过时被吸收。它们借助于一个非常复杂的细胞网同神经纤维相连。神经纤维穿过瞳孔边至盲点，连在一起形成视神经，并将眼睛和大脑皮层连接起来。在一只眼睛中，有大约 600 万个锥体细胞，1 亿个杆体细胞和 100 万神经纤维。

三、视网膜接收体的光谱敏感性

杆体细胞和锥体细胞不是对所有波长的光同样敏感的。杆体细胞对光谱的蓝绿部分吸收

最强烈，波长增加或减少，吸收均降低。图 1-3 中的虚线表示眼睛暗视觉的光谱敏感性。此曲线图是通过如下的实验得到的：让观察者调节一种波长光束的强度，直至它产生的感觉同强度固定的参考波长的光束一样强。例如，变化光束的强度至固定光束的两倍，那么，在变化光束波长处的微光敏感性就是在固定光束波长处的一半。这些相对敏感性与波长的关系表示在图 1-3 中为一虚线。为方便起见，将最大值定为 1.0。要得到一条微光视觉的敏感性曲线，必须使用强度足够低，完全属于微光范围的光束，图 1-3 的虚线就是这样得到的。它基于 72 位观察者的实验结果，其中 22 位由沃尔德（Wald）于 1945 年研究，50 位由格劳福德（Crawford）于 1949 年研究。代表年龄在 30 岁以下的观察者的眼睛视觉。大于这个年龄，眼睛晶状体逐渐变黄，使得实验结果很不确定。曲线代表光射到角膜上的微光敏感性，包括在眼睛介质中的某些吸收效应。光束强度可用多种方式度量。较方便的方式是用窄带波长间隔的功率（单位时间的能量）。假如所用光束在整个光谱范围内具有相同的波长宽度，那么所需知道的只是每一光束的相对功率。但如果光束具有不同的波长宽度，则应确定每一光束单位波长间隔的相对功率。

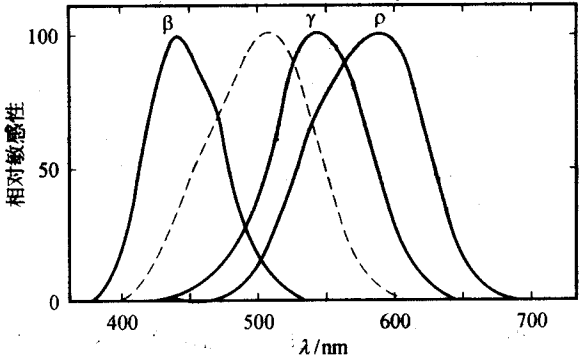


图 1-3 微光视觉（虚线）和视网膜锥体细胞 ρ , γ , β 的光谱敏感性曲线

一个具有单一光谱敏感性函数的系统（如暗视觉光谱敏感曲线），不能单独形成色觉。例如，虽然 500 nm 波长的光产生的反应大约是同样强度的 600 nm 波长光的 30 倍，但可以通过简单的方法将 600 nm 波长光的强度增加约 30 倍，而使两者的反应相同。然而此系统不能区分是波长的变化还是强度的变化，但这又是形成色觉所必需的。

就人类视网膜的锥体细胞而言，还不可能分开和确定那些光敏色素。有关它们的知识，不得不依靠间接途径来获得。如：对单独的锥体细胞的研究，仔细测量其对光谱各波长光的吸收情况（Dartnall, Bowmaker & Mollon 1983 年），由颜色匹配实验推断色觉缺陷的程度（Estevez 1979 年）等。研究的结果在图 1-3 中以实线表示。

描述锥体细胞光谱敏感性的确切曲线形状仍然是个有争议的问题，不过图 1-3 中的曲线表示了其可能具有的重要特点。这些曲线代表光射在角膜上的光谱敏感性，考虑了眼介质中的吸收。为方便起见，绘制时使曲线的最大值都相等。图中分别标明 ρ , γ 和 β 的曲线并和图 1-1 对照。很显然， ρ 曲线在光谱的黄—橙部分有一最大值； γ 曲线的最大值在绿的部分；而 β 曲线的最大值在蓝—紫部分。按照三种曲线所对应的三种类型的锥体细胞的特点，研究者使用了各种设计方案，包括 L, M, S（长、中、短波长）； π_5 , π_2 , π_1 ；以及 R, G, B

(主要对光谱中的红、绿、蓝部分敏感)等。其中 R, G, B 方案应用最广,用这些符号代表红、绿、蓝的光和颜色非常方便。这里采用了希腊字母 ρ , γ , β 。

显然,三种类型的锥体细胞有三种不同的曲线,每种锥体细胞包含一种不同的光敏色素。现在我们有讨论色觉的基础。若考虑 500 nm 和 600 nm 的光,很清楚,图中 500 nm 的光将产生的 γ 反应两倍于 ρ 反应;而 600 nm 的光将产生的 ρ 反应两倍于 γ 反应。如果改变光束强度, ρ 反应和 γ 反应也会改变,但它们相应的比例保持不变。因此,在这种情况下,信号的强度可反映光强度和光波长的比例。于是,我们能够分辨出光的强度改变和光谱组成的改变,从而形成色觉。很多颜色包含光谱的许多波长,并非所考虑的单一波长。复色光谱组成的改变会引起锥体细胞反应比的改变,光量多少的改变会引起反应强度的改变。当然,随着光谱组成的改变, β 与 γ , β 与 ρ 反应的比例也要改变。这些更有助于对颜色的分辨。

就目前所知,不同类型的锥体细胞 ρ , γ 和 β 在光照射处的光感细胞中是近乎随机分布的,但 β 锥体细胞比 ρ 和 γ 要少得多。据估计, ρ , γ , β 三种细胞的比例是 40 : 20 : 1 (Walraven & Bouman, 1966 年)。其实,这种相当不平衡的分布是很好理解的,因为色差使眼睛不够准确,它不能自动聚焦于 ρ , γ 和 β 锥体细胞最敏感的三个区域,即波长 580 nm, 540 nm 和 440 nm 左右。 ρ 和 γ 的峰值波长比 γ 和 β 的要近一些,假如眼睛聚焦于大约 560 nm 的光, ρ 和 γ 锥体细胞会反应强烈,而 β 锥体细胞的反应则差得多。

四、视觉信号传递

眼睛观察物体时,光辐射经瞳孔—水晶体—玻璃体—到视网膜,被视网膜的光感细胞吸收,即引起杆体细胞和锥体细胞的结构、化学和电学变化,光敏色素分子受激发,视网膜电位发生变化,此变化经过一系列的中继细胞,最后产生一系列电压脉冲,该脉冲经视神经传到外侧膝状体,再进一步传到大脑枕叶皮层的高级视中枢。通过大脑皮层的分析综合就产生了物体的大小、形状和颜色的感觉。上述这些脉冲产生的速度成为信号调制。较高速度意味着较强信号;较低速度则为较弱信号。零信号可由静态表示,低于这一速度则指反向信号。脉冲本身幅度相同,只有其频率传送信息。典型的频率范围是几 Hz 至 400 Hz 左右。

一般认为 4 种不同类型的光感细胞(一种杆体细胞和三种锥体细胞)将会产生 4 种信号,沿 4 种神经纤维传送。这 4 种信号分别代表 4 种光感细胞的反应强度。然而,有力的证据证明并非如此(Mollon 1982 年)。脉冲信号传送的编码方式很多方面还是未知的。图 1-4 表示一个简单模型,它把一些确知的显著特点溶于一体,是个可能的框架。锥体细胞的信号强度用符号 ρ , γ 和 β 表示。其强度取决于 3 种不同类型锥体细胞吸收的有用辐射及各种其他因素。

杆体细胞和锥体细胞同神经元(神经细胞)相连,最终在神经纤维中产生 3 种(不是 4 种)不同的信号。信号之一通常指消色差(或称非彩色)信号;其神经元接收的输入来自杆体细胞和全部 3 种锥体细胞。由于 ρ , γ 和 β 锥体细胞的不同比例,锥体细胞的信号部分表示为:

$$2\rho + \gamma + \beta/20$$

假设由 S 提供微光,则全部消色差信号是:

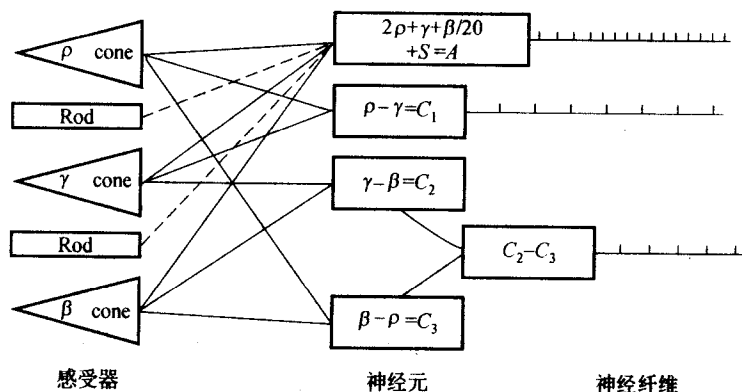


图 1-4 视网膜细胞与神经纤维相连的可能类型假想示意图

$$2\rho + \gamma + \beta/20 + S = A$$

另外的两种神经纤维中的信号通常指“色差”信号。在锥体细胞间可能的 3 种基本信号为：

$$\rho - \gamma = C_1$$

$$\gamma - \beta = C_2$$

$$\beta - \rho = C_3$$

可以看出， $C_1 + C_2 + C_3 = 0$ ，所以传递全部 3 种信号是多余的，只要知道其中两个信号，第 3 个信号就可得到。实际上各种证据说明传递的信号类似于：

$$C_1 = \rho - \gamma$$

$$C_2 - C_3 = \gamma - \beta - (\beta - \rho) = \rho + \gamma - 2\beta$$

许多生理学的实验揭示出三种信号与上面所述的信号 A ， C_1 和 $C_2 - C_3$ 很相似。

五、颜色的基本知觉特征和相对知觉特征

在上述视觉信号中的颜色知觉有 3 个基本特征：亮度、色调和彩度，这是颜色的基本知觉特征。为了用数值表示这些颜色特征，并便于分度，采用了相对值概念，并引入了参考白色，下面我们加以说明。

1. 颜色的基本知觉特征

亮度：表示一个表面明暗程度的视觉特征（亮或暗）；

色调：表示一个表面看来似红、黄、绿或蓝的一种颜色，或两种颜色混合的视觉特征；

彩度：表示一个表面所显示色调浓淡程度的视觉特征。

消色差通道对亮度起主要作用：所有颜色都有亮度，在此通道收集各种类型细胞的反应时，形成对所有颜色的总的反应强度。因此得到：

反应强度 (A) 大 亮色

反应强度 (A) 小 暗色

对白、灰、黑色，假设 $\beta = \gamma = \rho$ ，则对这 3 种颜色色差信号 C_1 ， C_2 ， C_3 为 0。颜色的色

调可表示为:

C_1	正	浅红色
C_1	负	浅绿色
$C_2 - C_3$	正	浅黄色
$C_2 - C_3$	负	浅蓝色

某种颜色的特定色调可以用 C_1 与 $C_2 - C_3$ 之比表示, 彩度可用信号 C_1 和 $C_2 - C_3$ 的强度表示。0 表示零色度, 即白、灰或黑 (消色差颜色)。

2. 颜色的相对知觉特征

现在我们来观察一块白板和一块灰板。当把它们并排放在纸上置于明亮的阳光下时, 白板和灰板都很亮; 当把它们放到阴处或室内时, 就没有那么亮了。但是所看到的是, 白板仍是白的, 灰板仍是灰的。眼睛和大脑潜意识地认为明亮度的降低不是由于物体的变化, 而是由于照明的变化。在钨灯下观看, 两板也仍是白的和灰的。

“明度”用来描述在相同照明条件下物体相对于白色物体的亮度。亮度决定于消色差信号 (如 A) 的强度。明度则决定于信号 A/A_n 。下标 n 是表示所选用的参考白色的反应信号。照明程度的变化使 A 和 A_n 以相同的比例改变, 从而保持 A/A_n 为常数。所以, 对于一种给定的颜色, 它的明度是一定的。

彩色的判断也可类似于白色。众所周知, 随着照明程度的下降, 物体的色彩也降低。所以在明亮阳光下看起来非常鲜艳的景物, 在满天乌云时就不那么鲜艳了; 在夜晚光照减弱到微光程度时, 色彩也降到了 0。但在一般光照条件下, 物体的颜色被认为是几乎不变的。如把西红柿放在白瓷盘中, 在明亮的阳光下, 红色西红柿非常鲜艳, 它的红色调很强; 若放到室内较暗照明条件下观看, 就没有那么鲜艳了。于是视觉系统潜意识地断定, 暗光下色彩的降低是由于白色亮度的降低, 这是由照明程度的降低而引起的。可见, 色彩判断是正比于白色亮度的。这种相对色彩即为彩度。色彩取决于信号的强度, 如 C_1 和 $C_2 - C_3$; 彩度取决于 C_1/A_n 和 $(C_2 - C_3)/A_n$ 。下标 n 是指参考白色的反应。

明度和彩度可定义如下:

明度: 在相同照明条件下, 相对于白色或高透射表面亮度的亮度。表示为 A/A_n 。

彩度: 在相同照明条件下, 同白色或高透射表面亮度成正比的色彩。表示为 C_1/A_n 和 $(C_2 - C_3)/A_n$ 。

由于这两个特征的定义是在相同照明条件下对参考表面而言的, 因而仅适用于相关色, 而不适用于看起来分离的无关色。如光源等自发光色通常是无关色。由物体反射产生的颜色通常是相关色。电视显示是发光的, 但在图像区域, 如果画面是被照明物体的, 则可视作相关色。若同其他表面关联下观察, 透射色可成为相关色。

再考察一下白瓷盘中西红柿的情况。由于西红柿是立体的, 在他表面的照明情况变化很大, 光垂直照射处亮度高, 侧面亮度降低, 阴影部分亮度更低。对同样照明条件下的白色盘的亮度, 可以较容易地分为几个表面。因此, 明度和彩度只需在这几个表面测定。也可以相对于表面的亮度来判定色彩, 而不是相对于同样照明条件下的白色, 这样得到的特征称“饱和度”。这一特征在西红柿的所有部位都可容易地判定; 因而饱和度和色调一起, 可用来判定西红柿全表面颜色的均匀性。饱和度取决于信号 C_1/A 或 $(C_2 - C_3)/A$ 。

饱和度定义为：某一表面与其亮度成正比的色彩。表示为： C_1/A 或 $(C_2 - C_3)/A$ 。

因为饱和度的判定不需要具有相同照明条件的参考白色，所以它对相关色和无关色都是适用的。如一个红色交通信号灯，它是无关色。当直接观看时，红色信号灯非常明亮鲜艳；如果经过商店的橱窗玻璃等平面反射后再看，就没有原来那么明亮鲜艳了，但它还是红色的。因为它的色彩降低同其亮度的降低成正比，即饱和度还是相同的。所以对信号灯颜色的识别取决于它的色调和饱和度，而不是其色彩。

在明亮的光照条件下，杆体细胞的反应 S 常常很小。此时，当 ρ 、 γ 和 β 之间的比例不变时， $C_1/(C_2 - C_3)$ 、 C_1/A 和 $(C_2 - C_3)/A$ 都不变。由此得到色调和饱和度恒定，而不是亮度恒定。

六、色恒常和颜色的伪立体观察

颜色最重要的用途之一是识别物体。但物体被照明的情况很多，尤其是照明的程度和颜色变化相当大。明亮阳光的照明程度大约是起居室内照明程度的 1 000 倍；钨丝灯光比日光灯更黄一些。然而人的视觉系统是相当好的，完全可以适应光的照明程度和颜色的变化。由于有这种调节功能，使得在许多情况下，物体被看作具有几乎相同的颜色。此现象称作“色恒常”。色恒常只是近似的，有时色貌会发生许多变化。如：日光下的紫色在钨灯下看会显得更红一些。然而，色恒常在颜色感觉中是非常重要的效应。

目前，我们可以认为色恒常同 ρ 、 γ 、 β 的反应相对应，因为不管照明程度和颜色如何，它们对白、灰、黑的反应差不多是一样的。

另有一种颜色的伪立体观察现象：当写有深红和蓝色字的纸放在暗处或黑色背景中观察时，多数观察者会感到红色字凸现于纸面上，而蓝色字凹进去；但少数观察者看到的却是相反的现象，即红字凹进去而蓝字凸出来；还有个别人，看到的是所有的字都在同一纸平面上。产生这种现象的原因，是由于眼睛对颜色的色差和眼睛瞳孔并不总是以光学轴为中心而导致的。如图 1-5 所示，(1) 图中瞳孔位于光学轴 A 之外，使来自 O 点物体的光线被散射，在两只眼中，蓝光的像 (B) 比红光的像 (R) 要靠近一些。因而，红光看起来比蓝光更近一些；(3) 图中瞳孔位于光学轴 A 之内，结果，看到的是蓝光比红光更近一些；(2) 图中两瞳孔均以光学轴为中心，所以没有发生远和近的现象。

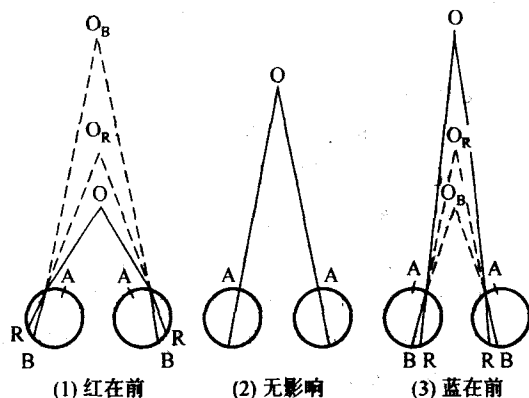


图 1-5 伪立体视觉示意图

第三节 颜色的分类和特性

大家已经知道,颜色是个心理、生理和物理量。下面我们要用物理方法进一步研究和表示颜色。

一、颜色的分类

颜色可分为彩色和非彩色两大类。

非彩色又称无彩色,在有些领域又称消色。非彩色是指白色、各种深浅不同的中性灰色和黑色。它们可以从白到黑排成一个非彩色系列。纯白是理想的完全反射漫射体,其反射比等于1;纯黑是理想的全吸收黑体,其反射比等于0。在现实生活中是没有绝对的纯白和纯黑的物体的,但是可以达到很接近。有人认为寒冬大地披盖的一片白雪是理想的完全反射体。

彩色又称有彩色。除了上述非彩色外的所有颜色都属彩色。

二、颜色的特性

所有的物体颜色,不论是发光色或表面色,都有三个共同的特性,又叫颜色的三属性:色调、明度和彩度。

1. 色调 (hue)

又称色相。色调表示红、黄、绿、蓝、紫等颜色特性。在可见光谱范围,不同波长的光辐射刺激人眼,就引起不同色调的感觉。如氦氖激光发射波长为632.8 nm的红光,它是红色调;树叶在阳光下吸收短波和长波的辐射,而反射480~580 nm波长的辐射,呈现绿色调。因而色调是区分颜色的重要特性。

2. 明度 (Lightness)

表示物体表面相对明暗的特性。明度与光亮度成正比,明度与反射比成正比,即光亮度越高明度越高,物体表面反射比越高明度越高。定量的描述是在同样的照明条件下,以完全反射漫射体为基准,对物体表面色的视知觉特性给予的分度。

3. 彩度 (chroma) (又称饱和度)

是表示颜色的纯度,即具有相同明度值的颜色离开中性灰色的程度。光谱色是最饱和的颜色。当光谱色中掺入白光时,它的饱和度就变小,掺入白光的成分越多,越不饱和。定量描述彩度,是用距离等明度无彩点的视知觉特性来表示物体表面颜色的浓淡,并给予分度。

4. 色调、明度和彩度的关系

色调、明度和彩度是颜色的三个独立特性,但它们也有一定的关系。

颜色三属性可以用颜色立体示意模型来形象地表示。图1-6是一个三维空间橄榄形的色立体,图中把颜色的三种基本特性——色调、明度和彩度全部表示了出来。在此色立体中,中央垂直轴从上到下代表白(W)—黑(BL)系列明度(L)的变化。连接上下的垂线代表各种由浅到深的灰色,都是非彩色。腰部水平面的圆周表示色调(H)的变化,圆周上每个点代表红(R)、黄(Y)、绿(G)、蓝绿(BG)、蓝(B)和紫(P)等各种不同的

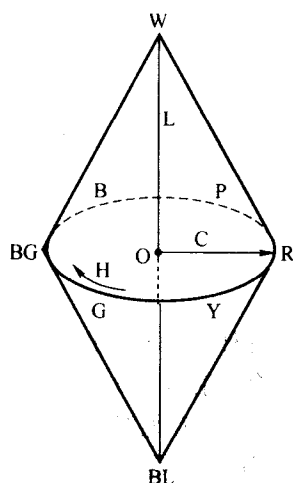


图 1-6 颜色立体

光谱色色调。圆心是中心灰色。整个水平面上的各种色调明度相同。圆心的饱和度 $C = 0$ ，从圆心向圆周过渡表示饱和度 (C) 逐渐增大，到圆周上的光谱色饱和度为最大。由圆周向上 (白) 方向或向下 (黑) 方向变化，颜色饱和度逐渐降低。可以看到，白—黑系列的饱和度为 0。

实验发现人眼能分辨光谱色色调约 150 种，加上光谱色中没有的紫色约 30 种，共 180 种色调；能辨别各种饱和度级数约有黄色 4 种，红色 25 种，平均约 10 种；能辨别各种明度约为 600 种。因此，人眼能辨别的颜色 (包括色调、明度和饱和度各自变化而得的颜色)，总数约为：

$$180 (\text{色调}) \times 600 (\text{明度}) \times 10 (\text{饱和度}) = 1\,080\,000 (\text{种})$$

也就是说，从理论上人眼能区分约 100 万种颜色。但实际上这是不可能的。因为颜色的三属性往往不是独立变化，而是相互关联，相互影响的，而眼睛能够辨别色调也是随着饱和度与明度的改变而变化的。

比如当饱和度极小，明度极大时，人眼对颜色的辨别能力就极不灵敏。当各种颜色与白色或黑色很接近时，颜色层次变得很小，人们能够分辨颜色的数目也就少了。因此，人眼能分辨的颜色大约有 13 000 种，而实际应用的颜色仅仅只有几千种，但这已经足够丰富了。