

Chromatology and Printing

北京电影学院摄影专业系列教材

吴 毅 著

色彩学 与印前印后

浙江摄影出版社

Chromatology and Printing

北京电影学院摄影专业系列教材

吴 毅 著

色彩学 与印前印后

浙江摄影出版社

责任编辑 余谦
装帧设计 郎水龙 薛蔚
责任校对 程翠华
责任出版 徐爱国

图书在版编目(CIP)数据

色彩学与印前印后 / 吴毅著. —杭州: 浙江摄影出版社,
2004.1(重印)
(北京电影学院摄影专业系列教材)
ISBN 7-80686-126-2

I. 色... II. 吴... III. ①摄影艺术—色彩学—高等
学校—教材②摄影—洗印—技术—高等学校—教材
IV. ① J406 ② TB88

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003) 第 112006 号

北京电影学院摄影专业系列教材

色彩学与印前印后

吴 毅 著

出版: 浙江摄影出版社
发行: 浙江摄影出版社发行部
(杭州市武林路 357 号 邮编: 310006)
经销: 全国新华书店
制版: 杭州富春电子印务有限公司
印刷: 杭州富春印务有限公司
开本: 787 × 1092 1/16
印张: 8.75 彩插: 16 页
印数: 1001-3000
2003 年 12 月第 1 版
2004 年 1 月第 2 次印刷
ISBN 7-80686-126-2/T · 15
定价: 25.00 元

(如有印、装质量问题, 请寄本社摄影编辑中心调换)

序言 1

1 光与颜色视觉 3

1. 光 /4
2. 视觉的生理基础 /5
3. 明视觉与暗视觉 /8
4. 颜色视觉 /10
5. 颜色的特征 /13
6. 颜色视觉理论
 - 颜色的混合 /14 三原色学说(trichromatic theory)/15
 - 对立颜色学说(opponent-colors theory)/16 颜色阶段学说 /17
 - 实践要求 /18
 - 习题 /18

» » » » »

2 色度学系统 19

1. CIE 标准色度学系统
 - 颜色的定量表示 /20 CIE1931 标准色度学系统 /22 CIE1964 补充色度学系统 /23
2. 均匀颜色空间 /24
3. 同色异谱、主波长 /26
4. 光源的色度学
 - 光源的色温 /27 CIE 标准照明体和标准光源 /28
 - 色光的舒适性 /29 光源的显色性 /30 摄影中的光源 /32
5. 孟塞尔表色系统
 - 孟塞尔色系统的色名规范 /34
 - 实践要求 /36
 - 习题 /36

» » » » »

3 色彩在摄影中的再现 37

1. 色彩在黑白摄影中的表现
 - 色彩在黑白照片上的呈现 /38 色彩在黑白摄影表现(反差)中的影响因素 /39
2. 色彩在彩色摄影中的再现
 - 彩色感光材料的成像原理 /41 彩色摄影色彩再现的影响因素 /43
 - 彩色摄影色彩再现质量的评价 /49
3. 色彩在数字摄影中的再现
 - 数字摄影基础 /51 数字影像色彩再现的影响因素 /53
 - 实践要求 /54
 - 习题 /54

» » » » »

4

印刷概述 55

1. 印刷的定义及要素

原稿 /56 印版 /56 承印物 /57 油墨 /57 印刷机械 /57

2. 印刷的分类 /58

3. 印刷工艺过程概述 /60

实践要求 /62

习题 /62

» » » » »

5

印前图像处理 63

1. 图形图像基础知识

图像的模式 /64 图像的分辨率 /66 图形的特点 /67 图形图像的文件格式 /67

2. 图像印刷复制的原理

阶调层次的再现 /68 清晰度的保证 /71 色彩的还原 /71

3. 印前处理系统

图文输入部分 /74 图文处理部分 /75 图文输出部分 /75

图文存储及传输部分 /77 软件 /77

4. 图像的扫描

扫描仪的分类 /79 扫描仪的主要技术参数 /80 扫描模式的选择 /81

分辨率和图像尺寸的设置 /81 扫描图像的定标和阶调设置 /82 扫描操作 /83

5. 图像的品质处理

图像调整的步骤 /84 图像阶调的调整 /84 图像的色彩调节 /86

图像的清晰度调整 /86 不同原稿的处理方法 /87

实践要求 /88

习题 /88

» » » » »

6

印后加工 89

1. 书刊印刷产品的分类及书籍的结构

书刊印刷产品的分类 /90 书籍的结构 /90

2. 书刊的装订

书刊加工工艺 /93 平装书籍的形式 /94

精装书籍的形式 /95

3. 印刷品的表面加工

覆膜 /97 上光 /98

实践要求 /98

习题 /98

» » » » »

1. 色彩系统

影响摄影色彩系统色彩再现的因素 / 100

影响印刷复制色彩系统色彩再现的因素 / 101

2. 色彩系统的建立与稳定

色彩管理 / 102 摄影色彩系统的建立 / 104 显示器的调校 / 105

印刷色彩系统的建立 / 105 色彩系统的稳定及应用 / 106

实践要求 / 106

习题 / 106

» » » » »

艺术中的色彩 107

1. 色彩的感受

色彩的“轻”与“重”/108 色彩的“前进”与“后退”/108

色彩的“冷”与“暖”/109 色彩的“节奏”与“旋律”/110

2. 艺术中的色彩

客观色彩的视觉纯化 / 111 色彩的造型作用 / 112

色彩的审美价值 / 114 色彩的视觉真实 / 114

3. 色彩的情感意义与象征意义

色彩的情感意义与象征意义 / 116 人们对色彩的喜好 / 119

4. 画面的色彩与影调

“调子”与“色调” / 120 “色彩”的情绪及审美意义 / 121

主观色调 / 125 色彩的地域和时代特征 / 125

5. 色彩的和谐

色彩的和谐与视觉的平衡 / 127 色彩的和谐——对比和统一 / 127

写实色彩的和谐 / 131

实践要求 / 131

习题 / 131

» » » » »

附录 133

附录一 1931 CIE-RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值/133

附录二 1931 CIE 标准色度观察者光谱三刺激值 / 134

附录三 CIE 1931 色度图光谱轨迹色度坐标 / 135

附录四 反转片色彩还原曝光实验范例 / 137

参考书目 / 141

彩页 / 142

» » » » »



序言

色 · 彩 · 学 · 与 · 印 · 前 · 印 · 后

》 》 》 》 》 》

我们的视觉不仅是一种与生俱来的可感知世界的生理机能，还有一种表达思维和交流的手段。我们的生活，正是靠着视觉才感受到了生命和活力。而色彩正是这生命和活力的象征。色彩是自然美的一种最生动的属性，是造型艺术中最基本的要素和主要的表现手段。摄影是一种融艺术和科学于一体的表达手段，无论是传统摄影，还是近年来飞速发展的数字摄影，都与色彩有着密不可分的关系。从社会发展来看，与摄影相关的出版、传媒行业也与色彩有着密切的联系，因而色彩学是摄影者必须具备的基础知识，是我们进行摄影创作的前提。为此，我们编写了这本关于摄影色彩学的教程。

对色彩的认识有着两种不同的方式：一种是运用科学的方法对色彩科学进行研究，也就是专门研究光与人眼相互作用产生一系列生理、心理反应的规律和对色彩进行定量研究的科学；另一种是通过感性的角度和人们长期的色彩经验对色彩进行审美的研究。前者对人们的生产、生活及科学研究有着重要的意义，而后者对人们的艺术创作和欣赏有着指导作用。

凡是有色彩介入的行业，就会有色彩学的应用。在摄影中，光源的色温、感光材料(元件)的性能、滤光镜的特性、曝光的控制等都会影响到影像的影调和色彩的再现。对色彩学知识灵活、恰当的运用，会对我们的摄影创作产生积极的作用。

在现代社会中，摄影与出版、传媒行业的联系越来越密切。本书还简单介绍了印刷以及印后加工等方面的知识，着重介绍了印前图像处理中的相关知识。

色彩在不同载体间的准确传递是现代社会中一个有待解决的问题，因此，我们有必要建立一个广泛的色彩系统，将摄影、印刷、数字化传媒都包括在内，通过这个系统在它们之间建立色彩准确传递的桥梁。

本书涉及到色彩学理论，以及色彩学在黑白摄影、彩色摄影、数字摄影、印刷、数字化传媒中的应用，包括摄影中的色彩心理学等众多内容，并试图建立“色彩系统”这一概念，并对其进行初步的探讨。

本书的第一、二章主要参考了《印刷色彩学》等书，第三章主要参考了《感光材料应用基础》、《摄影滤光镜的性能与使用》等书，第四章主要参考了《印刷概论》，第五、七章主要参考了《桌面出版系统制版工艺》、《电脑图像色彩处理Photoshop高级应用》等书，第六章主要参考了《印后原理与工艺》，第八章主要参考了《色彩学基础与银幕色彩》。本书在编写过程中，得到了北京电影学院摄影学院宿志刚老师和北京印刷学院刘浩学、金杨老师的大力支持。本书的图片由北京电影学院的邓宇燕、章晨同学以及北京电影学院摄影学院1998本科班和2001本科班的部分同学制作和提供。在此向上述所有给予本书帮助的老师 and 同学表示衷心的感谢。

由于本人的水平有限和参考资料的不足，在教材的内容安排上，在某些色彩理论观点的理解和阐述上难免有所纰漏，还请专家和广大读者指正。

吴毅

2003年8月



光与颜色视觉

色·彩·学·与·印·前·印·后

》 >> > >

光的存在是人类生存的一个基本条件。光不仅为人们带来了一切生存所必须的条件,而且为人们带来了一个丰富多彩、色彩斑斓的世界,从而使我们能够感受大自然的生命和活力。科学研究发现,在人们的眼、耳、鼻、舌、皮肤等感觉器官从外部接受的各种信息中,百分之八十以上是通过眼睛接受光而得到的视觉信息。

我们是如何感受到这色彩斑斓的世界呢?从物理学和生理学的观点来看,光作用到我们眼睛的视网膜上,刺激了视觉神经,从而产生了视觉感受。当物体被光线照明时,由于物体表面物理特性的差别,对投射到其上的光线进行有选择的反射,这些反射光作用到视网膜上刺激视神经,从而引起了相应的颜色感觉。因此,人们能够感觉到色彩的两个基本条件,一是光的存在,二是视觉器官的色彩感觉机能。

我们对颜色的视觉感受有一些特殊而有趣的现象,研究这些现象,对于我们从事与色彩有关的工作有着特殊的意义。

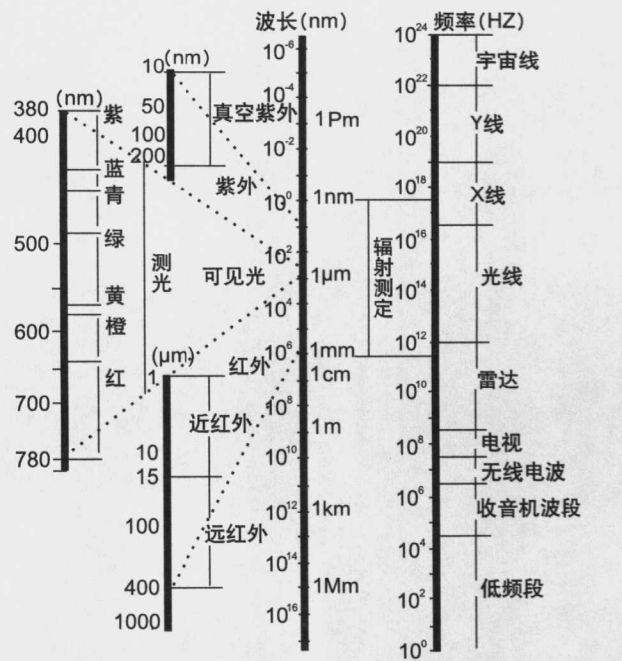
什么是光？光是能够作用于人们的视网膜，刺激视神经，引起视觉感受的电磁辐射。

在物理学中，电磁辐射也称为电磁波，是波的一种，因此它具有波动性和粒子性。我们可以用波长(λ)和频率(γ)来对电磁波进行描述。迄今为止，人们发现波长最长的电磁波是交流电，其波长可达数千公里；而波长最短的电磁波是宇宙射线，只有 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ 米。在这么广的波长范围内，只有波长为380~780纳米的电磁辐射能引起人们的视觉反应，如图1-1所示。我们将这段波长的光称为可见光。与可见光短波段相邻的光线(波长在300纳米以下者)称为紫外线，我们的

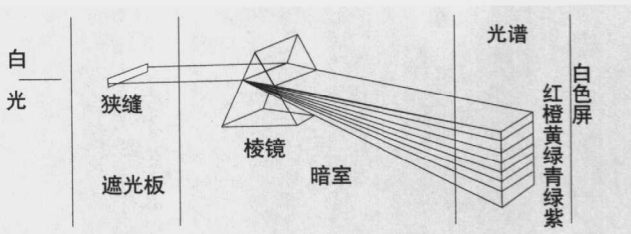
眼睛是看不见的，但它具有强烈的光化学作用。而与可见光长波段相邻的光线(波长在780纳米以上者)称为红外线，我们的眼睛也看不见，其光化学性能弱，但具有很强的发热性能。

1666年，英国物理学家牛顿做了一个实验，如图1-2所示。他让一束太阳光射进暗室，通过一个三棱镜后再投射到一块白色的屏幕上。实验结果表明：

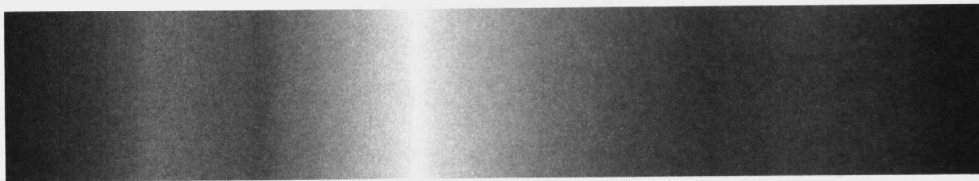
1. 白色的太阳光可以通过棱镜呈现出一条由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种颜色组成的光带。相邻的光波彼此的区别较小，颜色的变化是逐渐过渡的。但是有些部分变化显著，颜色差别也大，如图1-3所示。



δ 图 1-1 电磁波的波长



δ 图 1-2 电磁波的波长



δ 图 1-3 白色光谱(彩)

2. 如果将分出的七色光反向射入棱镜，可以再得到原来的白光。
3. 如果将分出的七色光中的一种色光射入棱镜，则不能分出其他色光。

这种透过棱镜再不能分出其他颜色光的色光称为单色光。阳光等白色光是单色光的集合。将白光分解为单色光，并按波长的顺序排列就形成光谱(Spectrum)。在光谱中，相邻颜色之间是有过渡的，因而光谱中各颜色的波长都只是一个相对的范围。牛顿的这一发现被称为光的色散现象。产生色散的原因是光源中不同波长的光的折射率不同所致。

在光谱中,不论减少哪一种单色光,再将其合成,得到的都不是原来的白光,而是带有颜色的光。而物体的表面物理特性是不同的,即对于不同波长的光波,其反射(或透射)的情况是不同的。特定的物体表面,总是对光谱中某些波长的光波吸收得多一些,对另一些光反射(或透射)得多一些,这种有选择性的吸收与反射(或透射)某些特定波长的光的情况被称为选择性吸收,也就是物体的反射率(reflectance)或透过率(transmittance)随波长而变化。由此可见,用白光照明物体时,由于选择性吸收的作用,我们看到的物体就会带有颜色。比如红色物体对除红光以外的单色光的反射率都是很小的,而对红光的反射率很大,也就是说它只反射红光,因而物体给我们的感觉是红色的。可以这样说,颜色是白光因为被物体反射或透射所“损坏”而造成的,可以说“色是被损坏的白光”。

视觉的生理基础

色·彩·学·与·前·印·后

人们的视觉感受是由于光的刺激而引起的,而产生视觉的生理基础则是人的眼睛。

人的眼睛是经过长期进化而形成的一个复杂且功能强大的视觉感受器。它是一个前极稍微凸出,前后直径约为24~25毫米,横向直径约为20毫米的近似球体。眼睛的结构很像一架装入胶片的照相机,其构造同照相机的比较如图1-4所示。各部分有表1-1中所列的对应关系。

人的眼睛	照相机
巩膜、脉络膜	暗盒
角膜、晶状体	镜头
眼皮	快门
虹膜	光圈
视网膜	胶片

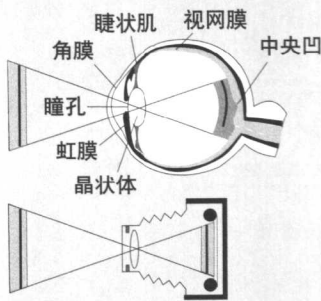


表 1-1 人眼和照相机的结构比较

图 1-4 人眼和照相机的构造

同照相机的结构相似,眼球由两大系统——屈光系统(角膜、房水、晶状体和玻璃体)与感光系统(视网膜)——组成。而眼球的后极偏向内侧的则是通过神经与大脑相连来传递视觉信息的部位。

从整体结构上看,眼球壁由三层膜组成。

最外层是纤维膜。其前部六分之一是角膜,是无色透明的,折射率为1.336,厚度约为0.8~1.1毫米,具有屈光功能,光线经过角膜后发生曲折再进入眼内。其作用相当于照相机镜头前安装的一片保护镜头的滤色镜,用于保护眼睛免受风沙、尘土的伤害。其后部的六分之五是巩膜,厚度约为0.4~1.1毫米,是一层坚固的、白色不透明的膜,起保护眼球和阻挡光线的作用。

中间层是血管膜,含有丰富的血管、神经和视色素细胞。它分为三部分:一是脉络膜,它紧贴于巩膜的内表面,厚度约为0.4毫米,含有丰富的色素细胞,呈现为黑色,它能吸收外来的散射光,消除光线在眼球内的漫反射。二是睫状体,它在巩膜和角膜交界处的后方,由脉络膜增厚而形成,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),使外界不同距离的物体都能在视网膜上清晰成像,类似于照相机镜头的调焦环。三是虹膜,它是睫状体向中央延伸而形成的环形膜,它将角膜和晶状体之间的空隙分隔成两部分,从而形成眼前房和眼后房。虹膜的内缘形成瞳孔,可以通过肌肉的收缩和伸展来改变瞳孔的大小,进而控制进入人眼内的光线的多少。人眼的瞳孔最小时,直径约为2毫米,最大时直径可达8毫米。瞳孔就相当于照相机的光圈,其变化范围相当于照相机的光圈 $f/2 \sim f/8$,用来调节进光量的多少,这种调节是适时的、自动的。当瞳孔呈现永久性的放大而无法收缩时,医学上就认定为死亡的征兆之一。

最内层是视网膜，紧贴在脉络膜的内表面上，是眼球的最内层，为一层透明薄膜，厚度约为0.1~0.5毫米，是眼球的感光部分。它相当于我们摄影用的感光材料——胶片，其不同之处在于胶片是有黑白和彩色之分的，而我们的视网膜能随着环境的明暗自动感知彩色或类似于黑白的单色调。

眼球的屈光系统由角膜、房水、晶状体和玻璃体组成。

房水是水一样透明的液体，折射率为1.336。房水是由睫状体产生的，充满在眼前房(角膜和虹膜之间)和眼后房(虹膜和晶状体之间)。其功能是维持角膜和晶状体无血管组织的新陈代谢，并维持眼内压。房水可以不断地分泌和被吸收，一般人约每4小时更新一次房水。这是眼睛特有的，照相机则没有。

晶状体是透明的、双凸形的弹性固体，位于虹膜和玻璃体之间，通过悬韧带与睫状体相连，相当于照相机的镜头。其折射率从外层到内层约为1.386~1.437，在未调节状态下，其前表面的曲率半径大于后表面的曲率半径。我们的眼睛可以通过睫状体韧带肌肉的伸缩来调节晶状体前后表面的曲率半径，以保证物像聚焦在视网膜上。当晶状体变厚时，我们可以看清楚近距离的物体；当晶状体变薄时，我们可以看到远处的物体。我们眼睛的焦距大约在19~21毫米之间变化。

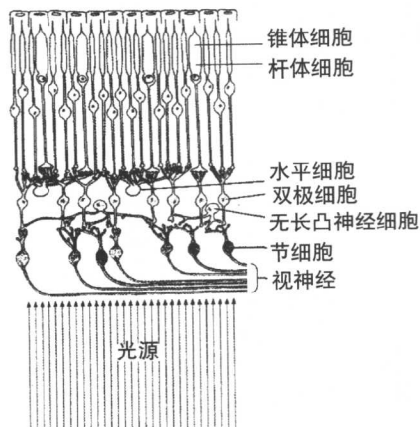


图1-5 视网膜的构造

其上没有感光细胞，因此也就没有感光能力，称为盲点。盲点存在于视线外侧 $15^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 的范围内，我们可以通过一个简单的视觉实验来验证。如图1-6所示，闭上左眼，用右眼注视十字，并使十字到眼睛的距离保持在20厘米左右，这时就会发现因圆点标记成像在盲点位置上而看不见了。

中间层是双极细胞，可分为侏儒型、杆状型和扁平型三种，双极细胞的两极凸起，一极与视觉细胞相连，另一极与神经细胞相连接，是视觉通路的第二级神经元。在中间层内，除了双极细胞外，靠近视觉细胞层还有少数水平细胞，它们的轴突在水平方向上伸展很远，靠近神经节细胞层则有无足细胞，这两种细胞在视觉通路横向上连接，形成复杂的神经网络。

最外层靠近玻璃体为神经节细胞，神经节细胞分为侏儒型和弥散型两种，它们是视觉通路的第三级神经元，神经节细胞的轴突组成视神经，穿过眼球后壁进入脑内视觉中枢。

眼睛的屈光系统所形成的影像是先经过复杂、透明的神经细胞网络，再到达视觉锥体细胞和视觉杆体细胞上的。在这里我们可以发现，视网膜像一个装反了的胶片(感光乳剂的药膜位于后方，而不感光的片基朝向镜头)。光线先通过外层的视觉神经纤维，再通过神经节细胞与双极

玻璃体是一种透明的半流体，呈胶状，内含星形细胞，外面包以致密的纤维层(玻璃膜)，位于晶状体和视网膜之间，其折射率约为1.336，主要成分是水。

眼球的感光系统是视网膜，是人类视觉系统中结构最精密的组织。它由三层细胞组成，如图1-5所示。光线经过眼球外围的角膜后，依次经过房水、瞳孔、晶状体和玻璃体到达视网膜外侧的神经细胞。

最内层由视觉锥体细胞(Cone)和视觉杆体细胞(Rod，也称视觉柱体细胞)组成，它们构成了视觉通路的第一级神经元。在眼球后极的中央部分，视网膜上有一个视觉细胞特别密集的区域，其颜色为黄色，称为黄斑，直径约2~3毫米。黄斑的中央有一小凹，叫中央凹，这里是视觉锥体细胞最密集的地方，因此是视觉最敏锐的地方，也是对色彩最敏感的地方。黄斑距离鼻侧约4毫米处，有一圆盘状为视神经乳头，

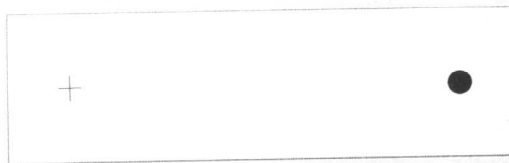
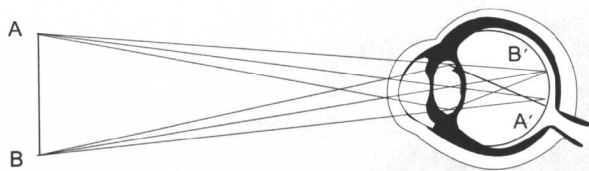


图1-6 盲点的确定

细胞，最后到达视觉锥体细胞和杆体细胞。视网膜上三层细胞之间，具有复杂的突触联系。人眼视网膜中央凹区视觉锥体细胞的传入是一对一的，即一个视觉锥体细胞对应一个侏儒型双极细胞，对应一个侏儒型神经节细胞，这种传入通路称为“专用通路”；视网膜其他部位的视觉锥体细胞，一般是6~7个与一个扁平型双极细胞相连接，几个扁平型双极细胞再与一个弥散型神经细胞相连接。视觉杆体细胞的传入通路与锥体细胞不同，一般是许多个视觉杆体细胞(约10~54个)与一个双极细胞连接。这样就能在黑暗的条件下，通过几个视觉杆体细胞对外界微弱光刺激的积累来增强感光能力，因此视觉杆体细胞的光敏感度很高，但是分辨力则相应地减小。这些神经细胞还对相邻的神经细胞起着重要的抑制和刺激作用，从而使感知的影像产生较好的边缘效果。神经节细胞的轴突，在视网膜乳头处聚集成束，穿过眼球后壁，形成视神经。这样光线对锥体细胞和杆体细胞产生的刺激先传达到双极细胞，再由双极细胞传递到神经节细胞，最后传递给视觉神经并导向大脑。

视网膜上的视觉细胞分为视觉锥体细胞和视觉杆体细胞，这是根据它们的形状命名的。视觉细胞一般呈单层，以镶嵌的形式排列在视网膜上。锥体细胞的总数约为700万个，直径约2~6微米，主要分布于视网膜的中央凹内，其密度由中央凹向四周急剧减少，到达锯齿边缘处，锥体细胞完全消失。杆体细胞的总数约为1亿个，直径约为1~2微米，其密度在距离视轴20°的地方最大，由此处向四周密度逐渐减小，如图1-7所示。锥体细胞和杆体细胞对一定范围的光波都能反应，但是对颜色的感受则完全依靠锥体细胞。锥体细胞内含有的对光敏感的物质，一般分为三种，即感红色、感绿色和感蓝色色素，而杆体细胞内含有视红紫质色素。锥体细胞具有精细的分辨力和很好的颜色分辨能力，但在光线暗淡时，就会失去工作能力；而杆体细胞具有很高的感光性能，能够在较暗的情况下工作，但不能分辨颜色的差异。当光线落到视觉细胞上，产生的最基本反应是通过漂白作用将色素分子转化为另一种形式，随后在神经细胞中产生一种相应的信号。与此同时，漂白分子得到再生，使漂白分子与未漂白分子保持平衡。

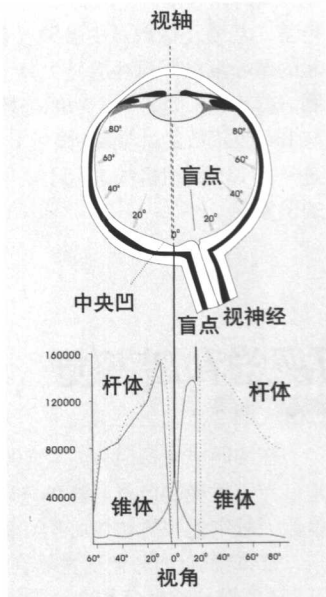
人的眼睛是如何成像的呢？和一个照相机成像的原理非常相似，如图1-8所示。来自外界物体的光线，经过角膜及晶状体折射后成像在视网膜上，形成左右换位、上下倒置的影像。但我们看到的并不是倒像，而是自然状态的正立影像，这是由于“心理的回到”的结果。



δ 图1-8 物体AB在眼睛的视网膜上成的像

“心理的回到”是一个被证明的心理自行调节问题。心理学家斯托顿做过一个实验，证明了“心理的回到”现象的存在。他用两片焦距很短的凸透镜装在一个管子的两端，做成一个小型室内望远镜，装在他的右眼上，使旁边不漏光，并将他的左眼遮起来，通过右眼上的望远镜来观察物体。因为望远镜所成的像是倒立的，所以在视网膜上的成像与物体相同，是正立的。但是大脑里的感觉则和平常完全相反，一切物体看起来都是颠倒的。在实验开始的时候，他很不习惯这种情形，视觉与触觉、动作之间经常是矛盾的。但是数天以后，混乱现象消失了，视觉与触觉、动作非常协调，行动自如，大脑已经适应这种新的空间关系。当他将右眼上的望远镜和左眼上的遮蔽物除去，恢复正常视觉时，又出现了整个环境倒转的现象，经过数天后才能恢复正常。

人们在用眼睛观察不同距离的物体时，与晶状体边缘带状纤维相连接的睫状体肌肉的张力



δ 图1-7 杆体细胞(点线)和锥体细胞(实线)的分布

“心理的回到”是一个被证明的心理自行调节问题。心理学家斯托顿做过一个实验，证明了“心理的回到”现象的存在。他用两片焦距很短的凸透镜装在一个管子的两端，做成一个小型室内望远镜，装在他的右眼上，使旁边不漏光，并将

会发生相应的改变,从而改变晶状体的厚度,即改变了晶状体前面的曲率半径,使来自物体的光线在视网膜上聚焦成像。对于视觉正常的人,当眼睛处于未调节的自然状态时,“无限远”的物体正好成像在视网膜上,即物体的像方焦平面与视网膜重合。当观察近距离物体时,晶状体周围的肌肉向内收缩,使晶状体前表面的半径变小,这时眼睛的焦距缩短,像方焦点由视网膜向前移,以便使有限距离上的物体在视网膜上成像。在一般情况下,人的眼睛能够从“无限远”到250毫米的范围进行调节。但人眼的调节能力会随着年龄的增大而衰退,因此能够看清楚物体的最近距离(称近点)逐渐变远,看清楚物体的最大距离(称远点)逐渐变近,这样眼睛的调节范围就逐渐变小。在适当的照明条件(照度为50~100勒克斯)下,正常的眼睛能不费力地看清楚眼前250毫米处的物体,这个距离称为明视距离。人眼的调节功能远远超过了照相机镜头,它不像照相机那样需要更换不同焦距的镜头,其本身就是一个具有一定焦距范围的变焦镜头。

瞳孔的大小主要根据景物亮度的不同而改变,但有时也会根据兴趣和情绪的不同而略有变化。同时,当眼睛对较近的物体聚焦时,瞳孔会变小。眼睛的视觉系统也有许多缺陷,如球差、色差、彗差及像散。由各种像差引起的清晰度的降低,会随着瞳孔的缩小而减少,但由衍射引起的清晰度的降低也会随之增大。瞳孔处于约4毫米大小时,所见的影像最清晰。同照相机的光圈一样,瞳孔的另一个功能是控制景物的景深。我们知道,由于视网膜的宽度大约接近24毫米,与135照相机的片幅(24毫米×36毫米)接近。和照相机比较,我们可以发现,眼睛的景深范围是一只135照相机的5~8倍,因此一般来说,人们的眼睛在正常条件下,不会产生景深范围小的现象。

3 明视觉和暗视觉

在黎明或黄昏时分,我们观看景物时,呈现在眼前的景物给我们的感觉是灰色调的,而不是日光下鲜艳的色彩。这种色彩在明暗环境中的色觉差异,不仅是由于照明光线的强弱,而且是因人眼中的视觉锥体细胞和视觉杆体细胞对光谱色相对明亮程度的感受性差异造成的。

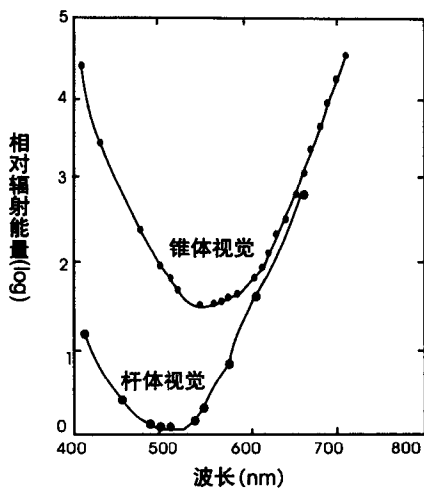
锥体细胞(即彩色视觉器官,又称为明视觉器官)对光的敏感性能低,必须在一定的光照条件下,才能够分辨颜色和物体的细节,所以当光线较弱的时候(如黎明和黄昏时),它就失去了工作能力。在明亮的条件下,只有锥体细胞起作用,这种视觉状态称为明视觉(photopic vision)。

杆体细胞(暗视觉器官)对光的敏感性能很高,但它只能反映光的亮度差异,不能反映光的颜色差异。在黑暗的条件下,只有杆体细胞起作用,这种视觉状态称为暗视觉(scotopic vision)。

在明视觉和暗视觉之间的照明条件下,锥体细胞和杆体细胞共同起作用,这种视觉状态称为介视觉(mesopic vision),也称中间视觉。

由于视觉的两重功能,在明亮的条件下,此时杆体细胞的光化学反应达到饱和,对光不再反应,成为“目眩”状态,只有锥体细胞处于工作状态,眼睛可以看见光谱上不同明暗的各种颜色;当亮度降低到一定程度时,锥体细胞失去工作能力,杆体细胞处于工作状态,眼睛便感觉不到光谱上的各种颜色,而只感觉到不同明暗的灰色。

人的眼睛对于能量相同而波长不同的光,所引起的亮度感觉是不同的。我们可以让视觉正常的人来做观察匹配实验:在明亮的条件下调节光谱的不同单色光的强度,去匹配一个固定亮度的白灯光;在黑暗的条件下调节不同单色光的强度,直至达到视觉阈限水平,即刚刚可以看到光亮的程度。将实验结果的相对辐射能量与波长对应作图,就可以得到如图1-9所示的两条曲线。上面的一条曲线表示在明视觉条件下不同波长单色光匹配一定亮度所需的相对辐射能量。在400纳米附近需要很大的能量,在555纳米为黄绿色处降低到最小值,到700纳米以后又增大到很大的能量。即明视觉对波长为400纳米和700纳米的色光感受性很低,而对555纳米的色光感受性最高。这一曲线代表了明视觉条件下锥体细胞的颜色视觉功能,明视觉对光谱的黄绿色部位(555纳米)最敏感。同理,另一条曲线表示在暗视觉条件下杆体细胞的视觉功



δ 图 1-9 引起锥体细胞和杆体细胞视觉感受的能量分布

亮度曲线。1924年,国际照明委员会(简称CIE)采用了吉布逊和廷德尔推荐的材料,规定了明视觉的等能(辐射能量相等)光谱相对明亮度曲线,简称明视觉曲线。它代表了300多位观察者视觉的平均光谱感受性。1951年,CIE又根据沃尔德和格芝福德的实验结果,规定了暗视觉的等能光谱相对明亮度曲线,简称暗视觉曲线。CIE对上述两条曲线进行处理后,推出CIE推荐的明视觉光谱光效率曲线 $[V(\lambda)]$ 和暗视觉光谱光效率曲线 $[V'(\lambda)]$,如图1-10所示。

从明视觉与暗视觉光谱光效率曲线图可以看出,明视觉曲线 $[V(\lambda)]$ 的最大值在可见光谱上的波长为555纳米处,这里的黄绿部位最明亮,趋向光谱的两端的光则显得发暗;暗视觉曲线 $[V'(\lambda)]$ 的最大值在507纳米,即在507纳米处最亮,整个 $[V'(\lambda)]$ 曲线相对于 $[V(\lambda)]$ 曲线向短波方向移动,而且长波端的可见范围缩小,短波端的可见范围略有扩大。这种人眼对于光的感受性随着照明条件变化而变化的明视觉和暗视觉的现象称为普金耶(J.E.Purkinje)现象。这种现象对于色彩环境的设计和写生色彩等对不同明暗光线下的物体色彩明度的把握,有着重要的意义。

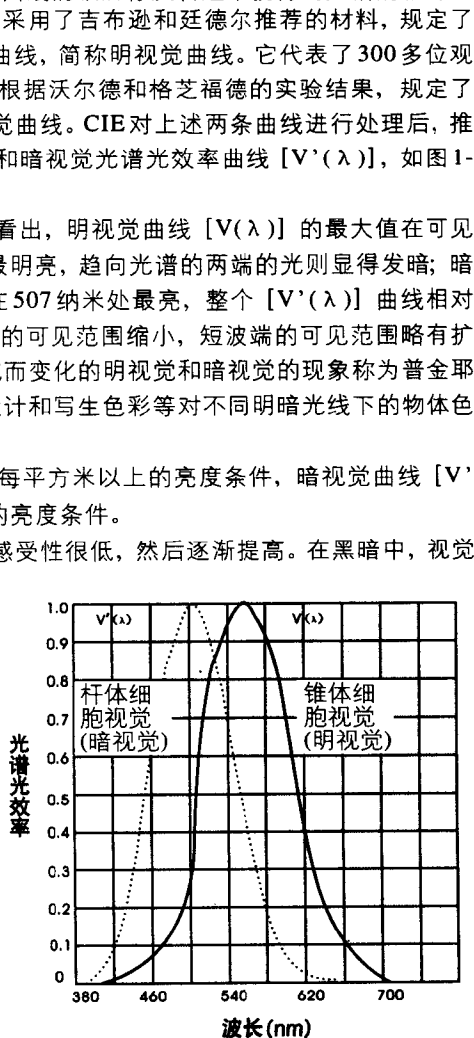
明视觉曲线 $[V(\lambda)]$ 适用于大约1坎德拉每平方米以上的亮度条件,暗视觉曲线 $[V'(\lambda)]$ 适用于大约0.001坎德拉每平方米以下的亮度条件。

当人们由明亮处进入黑暗处时,起初视觉感受性很低,然后逐渐提高。在黑暗中,视觉的感受性逐渐提高的过程称为暗适应。

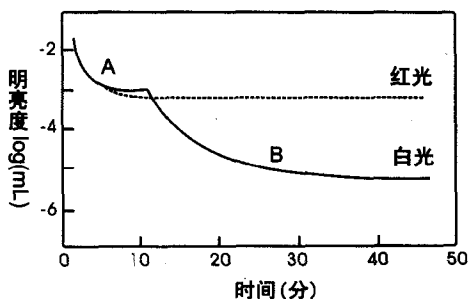
暗适应包括两种生理过程:瞳孔大小的变化和视网膜上感光化学物质的变化。从亮处进入暗处,瞳孔的直径可以从2毫米扩大到8毫米,使进入眼睛的光线增加16倍,但这一适应范围是有限的。暗适应的主要特性是视觉的两种功能的作用,即在黑暗中由中央视觉转变为边缘视觉的结果。在黑暗中,视网膜边缘部分的杆体细胞的感受性逐渐提高,视觉能力也逐渐提高。在杆体细胞内有一种称为视紫红质的感光化学物质,受到光刺激时被“漂白”,当进入黑暗环境时,视紫红质又重新合成而恢复为紫红色。视觉暗适应的程度是与视紫红质重新合成的程度对应的。图1-11是暗适应的时间曲线,在黑暗中停留的初期,暗适应进行得

能(无颜色的感觉)。曲线表明在400纳米处需要较高的能量才能达到视觉阈限,然后随着波长的增加能量降低,最低值在510纳米附近,在此波长之后能量需要再度增加,在700纳米处达到最大值。暗视觉对光谱的蓝绿色部位(510纳米)最敏感。实际上,每个人的明视觉和暗视觉对光谱的感受性是有差异的。

在一个等能光谱上,即在一个光谱上各个波长的单色光辐射能量都是相等的,人眼感受性最低的波段(用最大的辐射能量才能产生一定明亮感觉的波段)就是感觉到光谱最暗的部位,而人眼感受性最高的波段(用最小的辐射能量就能产生一定明亮感觉的波段)就是感觉到光谱最亮的部位。因此将图1-9上的



δ 图 1-10 明视觉和暗视觉的光谱光效率



δ 图 1-11 暗适应的时间(Chapanis,1947)

采用红灯的目的也是为了有利于暗适应。我们在感光材料中所使用的正色片也是利用了红光不影响暗适应过程的原理,从而使我们可以在红灯光下进行照片的印制工作。

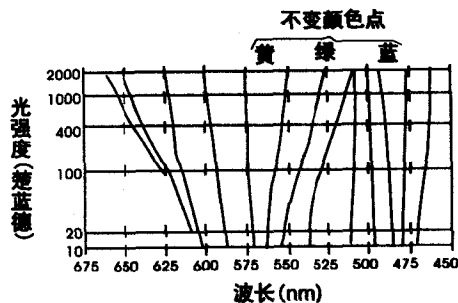
由于较强的光线连续作用于人的眼睛,引起视网膜对光刺激的敏感度下降,称为明适应。明适应较暗适应的过程要快得多,一般只需要1分钟左右就可以基本完成。因为明适应的过程比较快,所以人们从暗室走到户外阳光下时,起初会感到光线刺目,但很快就能看清周围的景物。

在低照度下已经适应的眼睛,如果突然处在极亮的环境中,虽然可以迅速地获得完全的明适应,但由于在强光刺激下,人眼处于非常高的明适应状态,若再返回到低亮度的环境下工作,视觉功能将大大降低,以致会短暂丧失其敏感度,恢复到完全正常一般需要30分钟以上时间。这种在高强度的光线刺激作用下进入暗环境引起的暂时性的眼睛敏感度下降,称为闪光盲。

4 颜色视觉

据统计,一个视力正常的人大约可以分辨出700万种不同的颜色。人们对颜色的感觉是丰富多彩的,同时由于人眼的一些特性,对颜色的感觉又产生出一些有趣的视觉现象。

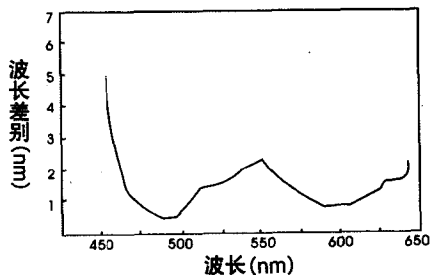
在辨别颜色方面,人们不仅能看到可见光谱中的各种颜色,而且还可以在两个相邻颜色范围的过渡区域看到各种“间色”。但是对于某些波长的光,人们的颜色感觉和波长之间的关系不是完全一致的,这些颜色受到光的强度的影响,随着光的强度而变化。颜色随着光



δ 图 1-12 各种波长的恒定颜色线

强度而变化的现象称为贝楚德-朴尔克效应。如图1-12所示,随着光强度的变化,各种波长的光在视觉上向红色或蓝色的方向变化,只有黄色(572纳米)、绿色(503纳米)和青色(478纳米)这三个波长的光不变。

在可见光光谱中,从红色端到紫色端,中间有各种过渡颜色,人的视觉在辨认波长的微小变化方面的能力



δ 图 1-13 光谱各部位的颜色辨认阈限

称为辨认阈限。图 1-13 为不同波长的颜色辨认曲线。由曲线可以看出，人眼的这种视觉辨认功能在不同波长部分是有差别的，在 480 纳米及 600 纳米处是最敏感的，而在 540 纳米处是最迟钝的。在一些部分，波长只要改变 1 纳米，便能发觉颜色的差别，而在大多部分，要改变 2 纳米，才能感觉到颜色发生变化。

变化着的物体表面的颜色根据所给的条件不同，也会在颜色感觉上引起非常微妙的变化。对物体的颜色感觉，不仅与其表面的反射率有关，同时还受到在此以前看到的颜色的影响，或与该物体同时看到的周围颜色的影响。两种颜色互相影响，引起颜色感觉上的变化，这种现象称为颜色对比。颜色对比的变化，一般涉及颜色的三个方面(即明度、饱和度和色相)，也有的仅涉及明度、饱和度和色相中的一两个方面。

颜色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。

实验一：将一个灰色的色块置于白色的底色上观察，再将它置于黑色的底色上观察，如图 1-14 所示。再将这个灰色块分别置于红色、绿色和蓝色的底色上进行观察，如图 1-15 所示。

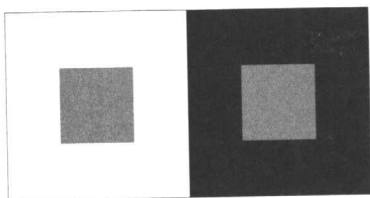


图 1-14

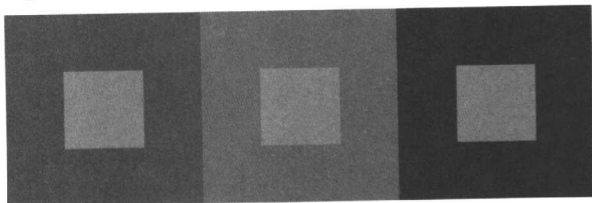


图 1-15(彩)

实验二：将一个黄色的色块置于蓝色的底色上进行观察，再将一个红色的色块置于绿色的底色上进行观察，如图 1-16 所示。

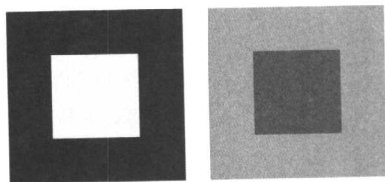


图 1-16(彩)

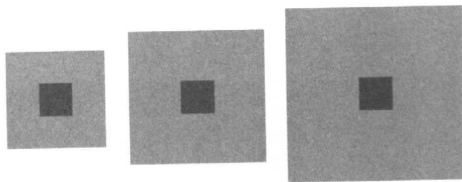


图 1-17(彩)

实验三：将一个红色块分别置于大小不同的绿色底色上进行观察，如图 1-17 所示。再将这一色块置于与其相近的底色上进行观察，如图 1-18。

通过上述实验，我们可以得出以下关于同时颜色对比的结论：

1. 一色被亮色包围，这一色就会显得暗一些，反之则显得亮一些。这种现象称为色的明度对比。

2. 一色被其他色包围，这一色的色相就会转向包围色的补色。

3. 一色以其补色或近补色为背景，这一色就会显出更高的饱和度，当两纯色明度接近时，色相的对比效果就会更强烈。

4. 一色被饱和度高的色包围，被包围色的饱和度将会减弱，且包围色的饱和度越高，效果越明显。反之，置于低饱和度背景色前的纯色，其饱和度会提高。

5. 包围色的面积越大，对被包围色的影响越大。当包围色的面积远远大于被包围色的面积时，就会产生同化效应。

6. 当两色明度差别很大时，色的明度对比就会占主导地位，色的同时对对比效果就会削弱。

7. 在同时颜色对比中，蓝、绿背景要比红、黄背景对前景色的影响更大一些；灰色在红背景前只是微带绿色，而在绿背景前则明显地带有淡红色。

8. 两种不同的色并列时，在它们的交界处会产生边缘对比，这个区域无论在明度对比或饱和度对比上，都比其他部位变化明显。

另一种是受以前颜色刺激的影响，称为先后颜色对比，即当看到某种颜色后立即去看另一

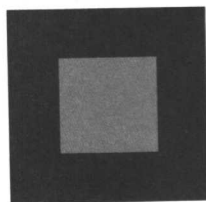


图 1-18(彩)