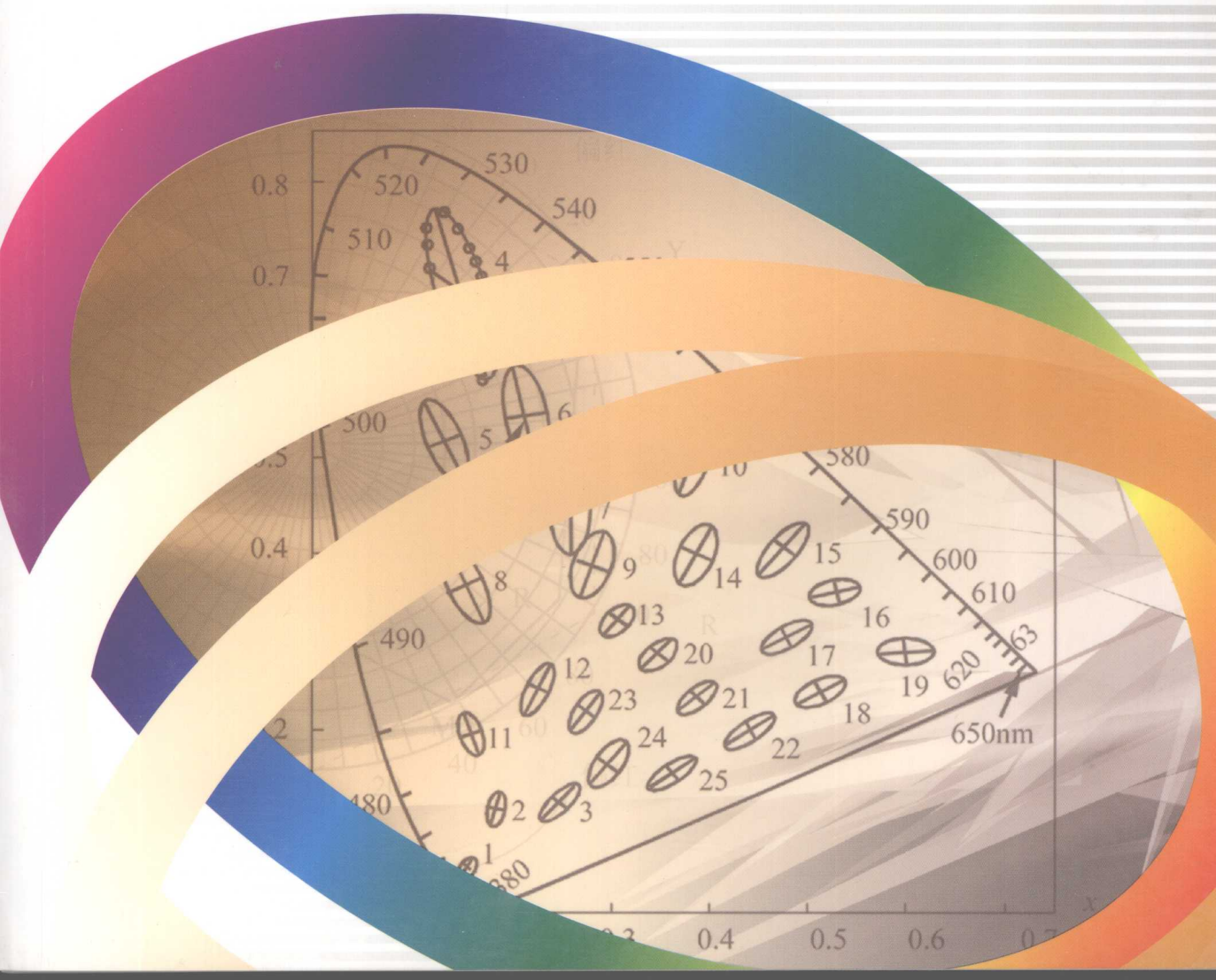


■ 现代印刷工程系列教程

印刷色彩学

■ 田全慧 编

上海交通大学出版社



现代印刷工程系列教程

印刷色彩学

田全慧 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书以理解色彩、描述色彩、复制色彩、量测色彩为主题展开。全书共分四章,第一章重点介绍色彩学的发展,并系统地说明了色彩形成的基本原理,颜色感觉的形成与特点;第二章详细阐述色彩基础理论,包括色彩混合理论,色彩的描述与表达方式,以及以 CIE 色度系统为代表的一些典型色度系统;第三章重点论述彩色印刷复制原理,影响色彩再现的基本因素,以及彩色图像分色原理与色彩校正等印刷工艺对色彩的应用知识;第四章根据印刷色彩学领域的最新发展,讲述新型色彩测量技术、印刷色彩管理技术、印刷色彩质量检测与控制技术等新技术。

本书注重内容的系统性与实用性,尽可能使理论深入浅出,易于理解,既可作为高等专业院校相关课程教材,又可供从事广告、印刷、包装的设计人员、技术人员与管理人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

印刷色彩学/田全慧编. —上海:上海交通大学出版社,
2008

(现代印刷工程系列教程)

ISBN978-7-313-04996-4

I. 印... II. 田... III. 印刷色彩学—高等学校—教材 IV. TS801.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 158061 号

印刷色彩学

田全慧 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:9 字数:215 千字

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~2050

ISBN978-7-313-04996-4/TS·063 定价:14.00 元

版权所有 侵权必究

前言

色彩是人类认识与改造自然的重要信息手段。色彩研究的成果表明人们在观察物体时,视觉神经对色彩反映最快,其次是形状,最后才是表面质感和细节。

人类长期生活在丰富多彩的大自然环境中,产生了对色彩应用的兴趣。实用美术中“远看色彩近看花、先看颜色后看花、七分颜色三分花”就生动描述了色彩在现实生活中的重要意义。随着时代的进步,人们精神生活和物质生活的不断提高,人们将越来越追求色彩的美感。色彩美感已成为人们物质和精神上的一种享受。

印刷色彩学是在自 20 世纪 20 年代对颜色系列研究基础上发展起来的,以色彩复制与再现为目标的色彩科学,是以色彩理论应用于印刷出版领域为重点研究对象的学科。本书从色彩学的发展展开介绍,系统地说明了色彩形成的基本原理,颜色感觉的形成与特点,色彩混合理论,色彩的描述与表达方式,以及以 CIE 色度系统为代表的一些典型色度系统等色彩基础理论。同时重点说明彩色印刷复制原理,影响色彩再现的基本因素以及彩色图像分色原理与色彩校正等印刷工艺对色彩的应用知识。同时,还引入了印刷色彩学领域新型色彩测量技术,印刷色彩管理技术,印刷色彩质量检测与控制技术等最新技术。全书注重内容的系统性与实用性,尽可能使所写内容深入浅出,易于理解,能够帮助印刷专业人才提高对色彩科学的理解,增强其彩色复制的技能。本书既可作为高等学校印刷专业印刷色彩学课程的教材,也可供印刷技术专业人士参考。

在编写本书过程中,特别感谢王强教授细心地审阅了全稿,并提出许多宝贵的意见。此外,谨向给予本书编写极大支持与帮助的程杰铭老师等同事与家人们表示衷心感谢!

由于本人知识水平所限,书中不足之处欢迎各位读者提出宝贵意见和建议,以便修订时补充更正!

编者

2007 年 11 月

目 录

第一章 现代色彩科学的起源.....	1
第一节 现代色彩学起源.....	1
第二节 色彩视觉.....	5
第三节 色彩理论及其发展	10
第二章 色彩描述	15
第一节 色彩的分类	15
第二节 色彩的三属性	18
第三节 色彩的定性描述	22
第四节 色彩的定量描述	23
第五节 典型色彩描述系统	24
第三章 色彩的复制	48
第一节 光源及其标定	48
第二节 色彩模式	57
第三节 彩色图像分色	58
第四节 彩色图像的校色	65
第五节 印刷色彩及其再现	68
第四章 印刷色彩的测量与控制	84
第一节 色彩测量与测色仪器	84
第二节 色彩测量标准与标准色彩测量色表	88
第三节 印刷色彩的数字控制	92
第四节 色彩管理及其实现.....	105
第五节 典型印刷色彩控制系统.....	108
第六节 印刷色彩管理系统.....	115
附表一 1931 CIE-RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值	125
附表二 CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值	127
附表三 CIE 1931 色度图光谱轨迹色度坐标	129

附表四 CIE 1960 UCS 图标准色度观察者光谱三刺激值	131
附表五 CIE 1960 UCS 图光谱轨迹色度坐标	133
参考文献.....	135

第一章 现代色彩科学的起源

在人类发展的漫长岁月里,色彩作为自然界的客观存在,反映着大千世界的万般变化,无限变幻,并在人类对客观世界的认识和改造过程中,逐步形成了人们不同的心理感受,产生了冷暖、软硬、远近、轻重以及由色彩所产生的种种联想,创造出的“日出江花红胜火,春来江水绿如蓝”的绚烂美景,畅想出画家、摄影师、设计师大胆泼墨的彩色诗篇,生活中色彩无处不在。

人们面对大自然鬼斧神工的色彩变化,生活中红色即火焰、蓝色即大海的联想,促使人们感知色彩的概念,并科学认识色彩,了解色彩、控制色彩与应用色彩,建立了色彩的科学体系与应用方法。

第一节 现代色彩学起源

色彩无时无刻都在影响人类的生活。在日常生活里,无论是衣、食、住、行或是工作等等方面面都与色彩有密切的关系。在生活与装潢中,设计家采用新奇的颜色来表达自我、创造个性,表现自己拥有的独特品味;在商业领域中,商家常用各种不同的色彩吸引顾客,达到宣传商品、推销商品的目的;在艺术领域,艺术家利用色彩塑造人物、美化环境,供人们欣赏,达到美化生活的目的;在科研领域,科学家、军事家利用色彩传输信息,发布信号……。总之,色彩的应用与人类的一切活动都密不可分,其起源主要有以下几个时期。

一、早期的色彩应用时期

从古代遗迹中可以了解到,人类很早就开始应用色彩。人类从认识色彩到有目的地使用色彩于制造石器或图腾等,并在漫长的社会发展中逐渐将色彩应用于纺织印染、陶瓷等服装工艺品的生产,以及应用于建筑、绘画等。

洞穴是人类最早的房屋,1879年一位西班牙人在西班牙北部的阿尔塔米拉的洞穴中考察,他五岁的女儿也跟来看热闹。正当他在洞底挖掘的时候,小女孩突然喊起来:“公牛!公牛!”父亲抬起头来,看见洞壁上画着一只中了投枪的野牛,是用黑红两色画的,栩栩如生,十分逼真。西班牙东南部一个山洞中,也发现了两个射手用弓箭对准两头鹿的精美壁画。

撒哈拉是世界上最大的沙漠,总面积达940万平方公里,几乎占整个非洲大陆的三分之一。1850年的一天,德国探险家因里希·巴思在撒哈拉的塔西亚高原惊奇地发现,当地砂岩的表面满是野牛、鸵鸟和人的画像,画面色彩雅致和谐,栩栩如生。后来人们又陆续发现了更多的岩画,这些画面表现了人们当时的生活情景,如朴素的家庭生活、狩猎队伍、吹号角赶牛群等。起初,人们都不相信,这些漂亮的图画竟然会是原始人画的。但是,画上的有些动物是早就灭绝的种类,这使人们不得不承认,壁画的作者大约生活在公元前1万年。这些绘画反映了人类祖先的生活,称得上是地球这本历史书上最吸引人的彩色插图。

此后,15世纪早期起源于画家的经验和直觉,从美学欣赏角度研究色彩与色彩搭配效果的理论在欧洲风靡一时,当时发表了大量的色彩系统、色彩视觉等理论文章,这些研究后来成

为绘画的色彩科学理论基础。

二、光与色彩的定性描述时期

虽然人类对于颜色的运用可以追溯到史前的洞穴壁画,但对于其物理根源的认识却是随着光学的发展而达到的,在 17 世纪,关于颜色的概念还像意大利艺术家、科学家——达·芬奇(Leonardo da Vinci)那样,是在混合颜料的基础上的理解,但颜料混合的经验难以用于光的颜色混合,棱镜色散的观察与研究解释了光的颜色混合经验,从而确立了光与色彩密不可分的相互关系。

白天,在阳光的照耀下,各种色彩争妍斗奇,并随着照射光的改变而变化无穷。每当黄昏,大地上的景物,无论多么鲜艳,都将被夜幕缓缓吞没。在漆黑的夜晚,人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,人们也感觉不到色彩。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。光是色的源泉,色是光的表现。

光学的历史可以追溯到中国的春秋战国时期和古希腊时代。在中国的《墨经》中就记载了小孔成像实验,而最早对光现象做出数学描述的是亚历山大时期的希腊哲学家们。但光学的真正发展始于 17 世纪,透镜、望远镜、显微镜等光学仪器相继被发明,特别是三棱镜的分光实验,引发了颜色成因的争论,从而使光学理论得于发展,并产生了两种对立的假说——光粒子说与光波动说。

光束通过三棱镜分散成彩色光带的现象,自中世纪以来常被人观察和思考。在中国唐代道教的书中已有阳光通过透明的石英石而分成五色谱的记载。相传英国哲学家弗朗西斯·培根(Francis Bacon)曾经做过棱镜分光实验。来中国传教的法国教士金尼阁(Pate Trigautius)也记载了棱镜显色如何为中国的达官贵人们所惊喜。但是没有谁像英国物理学家牛顿(Newton)那样,进行过周密地、系统地观察,更没有谁真正地根据观察推论出关于光的颜色理论,因此直到他发现太阳光通过三棱镜能发出彩色光谱后,对色彩的研究才迈入了新纪元。

牛顿于 1642 年圣诞节出生在英格兰伍尔斯索蒲村,这一年正值伽利略与世长辞。童年时代的牛顿就显示出巨大的力学天赋,他有一双非常灵巧的小手。他聪明伶俐,但对功课却总是粗心大意,在学校并未引起特别的重视。十几岁时,母亲让他辍学,希望他能成为一位像样的农民。幸亏他的母亲被说服了,她相信了儿子的主要天赋不在于务农,而是另有所为。18 岁的牛顿进入剑桥大学后,迅速地掌握了当时的科学和数学知识,很快就开始进行独立的研究工作。他在 21 到 27 岁期间为科学理论奠定了基础,使随后的世界发生了革命性的变化。

牛顿公布的第一个发现是有关光的性质的一项突破性的贡献。牛顿经过一系列认真的试验,发现普通光是彩虹所有的不同色光的混合光。他还对光的反射和折射定律的结果做了认真的分析,根据这两个定律,1668 年他设计并真正制造出了第一台反射望远镜,如今大多数天文台都使用这类望远镜。

牛顿 29 岁时把他的这些发现及其许多其他光学试验结果呈交给英国皇家学会。送交皇家学会的信中报告说:“我在 1666 年初做了一个三角形的玻璃棱镜,以便试验那著名的颜色现象。为此,我弄暗我的房间……”接着详细叙述了他开小孔、引阳光进行的棱镜色散实验。关于光的颜色理论从亚里士多德到笛卡儿都认为白光纯洁均匀,乃是光的本色,“色光乃是白光的变种。牛顿细致地注意到阳光不是像过去人们所说的五色而是在红、黄、绿、蓝、紫色之间还

有橙、靛青等中间色共七色。奇怪的还有棱镜分光后形成的不是圆形而是长条椭圆形,接着他又试验“玻璃的不同厚度部分”、“不同大小的窗孔”、“将棱镜放在外边再通过孔”、“玻璃的不平或偶然不规则”等的影响;用两个棱镜正倒放置以“消除第一棱镜的效应”;取“来自太阳不同部分的光线,看其不同的入射方向会产生什么样的影响”;并“计算各色光线的折射率”,“观察光线经棱镜后会不会沿曲线运动”;最后才做了“判决性试验”:在棱镜所形成的彩色带中通过屏幕上的小孔取出单色光,再投射到第二棱镜后,得出该色光的折射率(当时叫“折射程度”),这样就得出“白光本身是由折射程度不同的各种彩色光所组成的非均匀的混合体”。这个惊人的结论推翻了前人的学说,是牛顿细致观察和多项反复实验与思考的结果。

1666 年他用三棱镜分析日光(见图 1-1),发现白光是由不同颜色的光构成的,成为光谱分析的基础。他创立了光的“微粒说”。牛顿的《光学》是他的另一本科学经典著作(1704 年)。该书用标副标题是“关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文”,集中反映了他的光学成就。

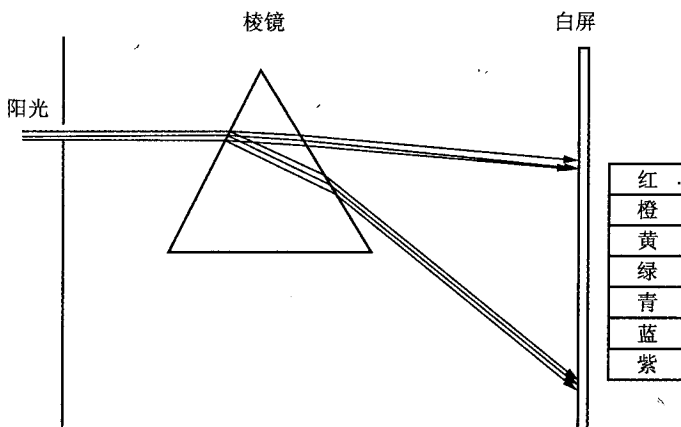


图 1-1 色散实验

三、光谱与色彩的定量描述时期

太阳从地平线上升起,大地便一片光明。沉睡了一夜的城市和乡村开始喧闹。一天的活动开始了,人类的活动需要光,动物和植物需要光。一切有生命的物种只有在阳光的抚育下才能生长、发育、成熟和繁衍。有了阳光,这个世界变得生气勃勃五彩缤纷。人类不仅享受阳光的恩惠,还要通过阳光的光谱了解颜色的秘密。

正如牛顿分光实验所发现的,当白光经过三棱镜时,由于不同波长的折射系数不同,折射后投影在屏上的位置也不同,所以一束白光通过三棱镜便分解为上述七种不同的颜色,这种现象称为色散。红色光的折射率最小,紫色最大。这条依次排列的彩色光带称为光谱。这种被分解过的色光,即使再一次通过三棱镜也不会再分解为其他的色光称为单色光,即光谱中不能再分解的色光。由单色光混合而成的光叫做复色光,自然界的太阳光,白炽灯和日光灯发出的光都是复色光。

在牛顿分光实验之后的两个世纪里,光谱研究得到了长足的发展,其中三项研究具有标志性的意义。

第一项重要的进展是 1752 年苏格梅尔维尔(Thomas Melvill)发现元素光谱中的明线。

他把卤砂、钾碱、明矾、硝石和食盐放进酒精灯的火焰中烧,用玻璃镜分析它们的光组成。他发现黄光比同时产生的其他一些光要明亮得多,红光比绿光和蓝光更弱,并且各种颜色的光的过渡是不连续的。

第二项重要进展是 1814 年法国夫琅和费(Joseph Fraunhofer)发现了太阳光谱中的暗线。他让太阳光通过窄缝照射在火石玻璃棱镜上,用望远镜观察其色散光谱,发现了大量强弱不等的暗黑线,比光谱其他部分暗得多,有些线几乎是全黑的。

第三项重要进展是 1854 年美国物理学家阿尔特(David Alter)发现每一种元素都有其特征光谱。在发现光谱明线与暗线的基础上,人们通过一系列的研究认识到,明线是元素的发射光谱,暗线是元素的吸收光谱。1855 年通过原子放电实验拍摄的氢原子光谱,包含 14 条不连续的光谱线,它们分布在可见光和紫外光区域里。正确的物质发光机制必须对光谱的不连续性给出合理的解释。图 1-2 所示的是科学家经过研究所得到的自然界所存在的各种光谱。

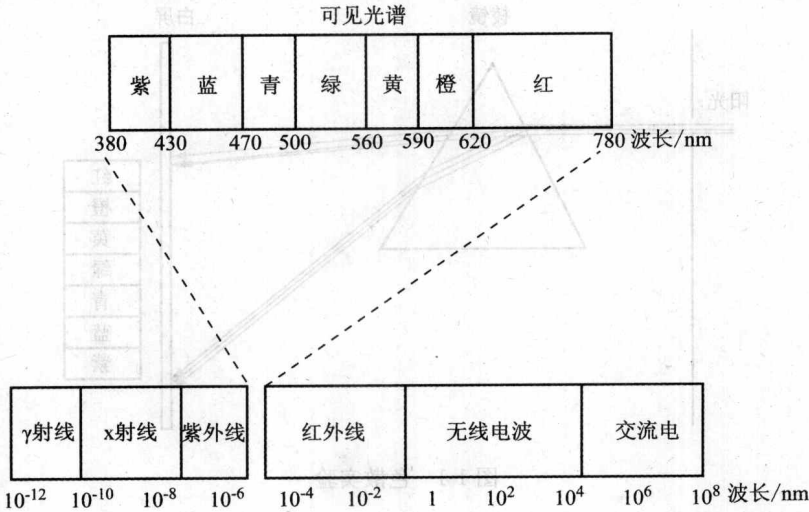


图 1-2 电磁波谱线特征

到了 20 世纪初原子的有核结构被发现以后,人们开始按照经典电动力学把发光理解为电子绕核运动的电磁辐射,后来人们又按照量子论把它理解为伴随原子能量状态的跃迁而发生的辐射。比较细致地解决发光问题,还是要靠在量子力学基础上发展起来的量子电动力学。

光谱的研究,第一次正确解释了光对色彩的决定作用,并且真正揭示了物体发光的特征与原理。

牛顿进行了著名的色散实验,科学地揭示了色彩的客观本质之后,科学家格拉斯曼(Grassmann)、麦克斯韦(Maxwell)、赫姆霍尔兹(Helmholtz)、薛定谔(Schrodinger)、吉尔德(Guild)、贾德(Judd)、麦克亚当(Macadam)、司梯鲁斯(Stiles)、莱特(Wright)和维泽斯基(Wyszcki)等对色彩学的进一步发展作出了巨大贡献。在研究色彩客观规律的科学理论中,首先发展起来的是关于光的反射、折射与混合的研究。接着,物理学家、化学家、生理学家和心理学家开始从不同的角度研究色彩。物理学家研究光与色彩的关系,化学家研究染料、颜料的分子结构,生理学家研究光、色对人的视觉器官的作用,心理学家则考虑色彩对人精神思维的影响。

19 世纪,科学家格拉斯曼(Grassmann)、麦克斯韦(Maxwell)、赫姆霍尔兹(Helmholtz)和

薛定谔(Schrodinger)等对色彩学测量的进一步发展做出了巨大贡献。奠定现代色彩测量科学基础的科学家有吉尔德(Guild)、贾德(Judd)、麦克亚当(Macadam)、司梯鲁斯(Stiles)、莱特(Wright)和维泽斯基(Wyszcki)。从德国物理学家奥斯华德(Ostwald)的色彩论,到20世纪美国孟塞尔(Munsell)颜色立体的出现,色彩学理论不断发展。色彩学是研究人的颜色视觉规律、颜色测量理论与技术的科学,随着科学技术的进一步发展,色彩学将进一步得到广泛的利用和普及。

第二节 色彩视觉

在太阳光照射下,人通过眼睛、发达的视神经网络以及超级信息处理的大脑,感受到五彩缤纷的世界处处呈现出赤橙黄绿青蓝紫的色彩。在科学家的努力下,色彩的秘密被一点点揭开。实验证明,色彩的产生并不是上天的安排,而是来自于物体对光线的反射,反射光进入人眼并刺激视细胞产生色觉,是一种心理现象。色彩是自然界的客观存在,是一种物理现象,是光线作用于物体后所产生的不同吸收、反射的结果。

一、色彩的产生

美国光学学会(Optical Society of America)的色度学委员会曾经把色彩定义为:色彩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。在我国国家标准 GB5698—85 中,色彩的定义为:色是光作用于人眼引起除形象以外的视觉特性。根据这一定义,色是一种物理刺激作用于人眼的视觉特性,而人的视觉特性是受大脑支配的,也是一种心理反映。

色彩是一种视觉现象,是通过眼睛和大脑传导的一种感受。光源、物体、眼睛、大脑是颜色视觉(色觉)产生的四大要素。这四个要素不仅使人产生颜色感觉,而且也是人能正确判断颜色的条件。在这四个要素中,如果有一个不存在,就不能产生颜色视觉;如果四个要素其中之一发生了变化,所得到的颜色视觉效果也会发生变化。

具体来说,物体颜色的形成过程(见图1-3)为,光源发出的光线照射到彩色物体的表面,彩色物体根据自身表面的化学特性对光线进行选择性的(或非选择性)的吸收后,再将其余的光线反射或透射出来,这部分光线传播,最后到达人眼,在人眼的视网膜上成像并给人眼中感觉细胞刺激,视觉神经再将这些刺激信号传输到大脑中,从而产生颜色感觉。

色彩的感觉是受大脑支配的,是人类在漫长的岁月中为适应自然而逐步形成并且不断完善的一种感觉机能,是人类认识颜色和辨别颜色的能力。色彩感觉并不是客观存在的,其不仅与物体本身的颜色特性有关,而且还受时间、空间、周围环境的影响。也就是说,色彩感觉必须同时具备三个条件时才能实现,即光线的照射、呈现颜色的物体、功能正常的视觉器官及大脑。

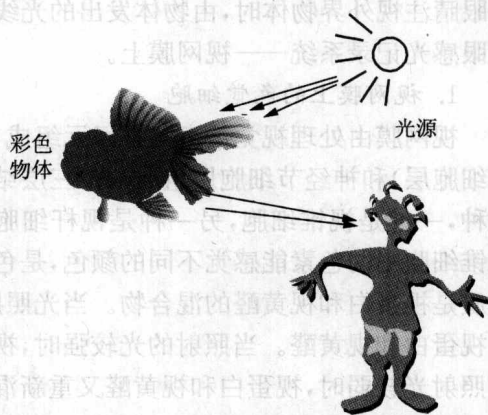


图 1-3 颜色感觉的形成

二、眼睛的构造与分辨率

有关视觉问题,古希腊人曾精心推测并提出过一些理论。按照毕达哥拉斯、德谟克利特和其他人的说法,视觉是由物体发射出的微粒流进入眼睛瞳孔引起的。另一方面,恩培多克勒、柏拉图主义者和欧几里得则主张奇怪的眼睛发射说,认为眼睛本身发出的一些东西碰到别的东西就产生了视觉。阿拉伯科学家阿尔哈增是详细叙述和描绘人眼的第一个物理学家。他根据解剖学著作对视觉机理给出他的解释,提出角膜、玻璃体、网膜和前房液等术语。他像他的前辈一样坚决反对欧几里得的视觉源于眼睛发出光线的理论,赞成德谟克利特和亚里士多德的视觉源于被看见的物体的观点。

眼睛主要有成像和感光记录两大作用,它不但能对光的强弱产生感应,也能对特定波长的光产生迅速的响应。

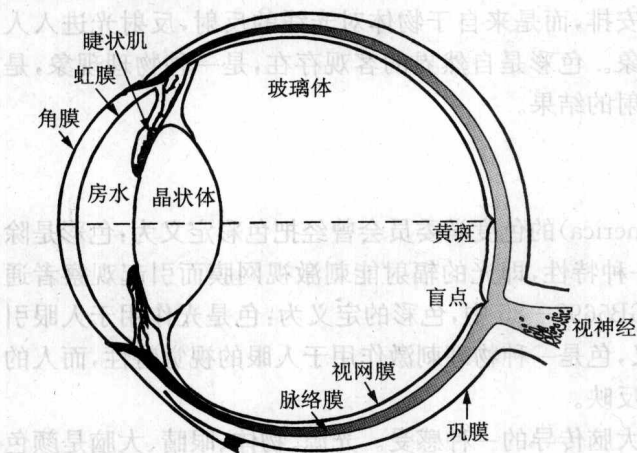


图 1-4 眼睛的结构

人眼是一个直径大约为 23mm 的近似球状体,眼球的外壳层包括三层(见图 1-4),最外层叫巩膜,其正前方的一部分透明组织,为角膜。中间层为脉络膜,其含有极丰富的呈黑色的色素细胞,能吸收眼球内的散射光,并将营养素和氧输送到视网膜。脉络膜的前方是虹膜,虹膜中心的圆孔便是瞳孔。虹膜的肌肉控制了瞳孔的大小伸缩。瞳孔强光缩小而弱光放大,以控制进入眼内的光量大小。在眼球内,前面是弹性的晶状体。晶状体的周围附有睫状肌。睫状肌收缩控制晶状体的屈光能力,使

远近不同的物体影像都能恰好聚焦于视网膜上。在角膜和晶状体之间、以及虹膜与晶状体之间的空隙处充满着水样液,称做房水。在晶状体后面、视网膜前,占眼球内容物 4/5 的胶状透明体叫玻璃体。角膜、瞳孔、房水、晶状体和玻璃体等组成了人体接受影像的成像光学系统。当眼睛注视外界物体时,由物体发出的光线通过角膜、房水、晶状体及玻璃体折射,聚焦成像于人眼感光记录系统——视网膜上。

1. 视网膜上的色觉细胞

视网膜由处理视觉信息的神经元组成,由外核层(也称感受细胞层)、内核层(也称中间联系细胞层)和神经节细胞层组成一个三层结构。外核层含有光受纳器细胞。光受纳器细胞有两种,一种是视锥细胞,另一种是视杆细胞,它们都包含大量的光敏色素(也称视觉色素)。视锥细胞中的色素能感觉不同的颜色,是色觉的基础。视杆细胞中的色素叫视紫红质。视紫红质是视蛋白和视黄醛的混合物。当光照射到视网膜上被视紫红质吸收后,视紫红质便分解为视蛋白和视黄醛。当照射的光较强时,视紫红质遭到破坏,视杆细胞不能对光线作出反应。当照射光较弱时,视蛋白和视黄醛又重新混合在一起,使视杆细胞恢复它对光的敏感性。视紫红质的分解与合成是可逆的。视紫红质的合成需要借助于维生素 A。维生素 A 缺乏会降低视杆细胞中的视紫红质水平,从而降低视杆细胞对光的敏感性,以至在昏暗的光线下丧失视

觉,也就是发生所谓的“夜盲”。如果及时补充维生素 A,视杆细胞的视觉还可以恢复。如果长时间缺乏维生素 A,导致视杆细胞受到损伤,则会造成不可治愈的夜盲症。

在人眼视网膜中心区分布着大约 700 万个视锥细胞,在视网膜其他区域分布着 13 000 万个视杆细胞。视锥细胞和视杆细胞(见图 1-5)执行着不同的视觉功能,视锥细胞是感觉动作并对明暗之间的差别特别敏感,当亮度减弱时,视杆细胞便会发挥功能。而在较亮的情况下,视网膜中的视锥细胞产生反应,能让人们看见物体的色彩。

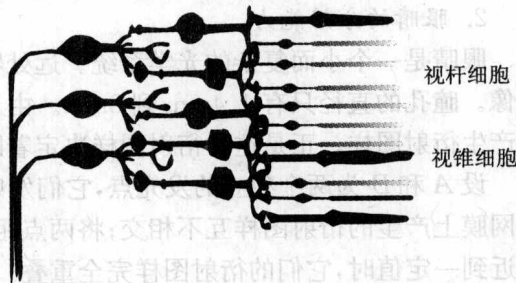


图 1-5 视细胞

1) 视杆细胞

视杆细胞形状细长(见图 1-5),它对光有高敏感性,能接受微弱光刺激,但不能分辨物体的细节和颜色。因此,在比较暗的条件下,视杆细胞作用形成暗视觉。暗视觉只能分辨出物体的形状和明暗,不能分辨物体的颜色特征。当人们由亮处进入暗处时,比如进入一个已经关灯的电影院,刚进入时什么也看不见,过一会儿才看到座位。视觉系统在从亮处到暗处时,对光和敏感性是随时间逐步升高的,这个过程叫做暗适应。

2) 视锥细胞

在常规的照明状况下,人眼通过视锥细胞区分颜色的差别。视锥细胞有三种类型,分别对应不同颜色的视觉感应,红视锥细胞感受红颜色刺激;绿视锥细胞感受绿颜色刺激;蓝视锥细胞感受蓝颜色刺激。不同的视锥细胞感受不同的刺激后向大脑传送一个信号,之后大脑便形成一个与之相对应的颜色感觉。眼睛看见物体上的色彩取决于有多少数量的红、绿或蓝色光射入眼睛,若无任何光线射入眼睛时则感觉为黑色,当红、绿和蓝光以等量射入眼睛时则感觉为白色。

在整个可见光谱上,人眼一般可以分辨出 100 多种不同的颜色,最敏感的部位是在 490nm 及 590nm 附近,最迟钝的部分是在光谱的两端。对于从事色彩复制和色彩工作部门的人来说,主要研究视锥细胞的功能与作用。

3) 明视觉与暗视觉

在视网膜中心区及黄斑区分布着大约 700 万个视锥细胞,在视网膜其他区域分布着 13 000 万个杆细胞。视锥细胞和视杆细胞执行着不同的视觉功能。前者是明视觉器官,后者是暗视觉器官。

视杆细胞形状细长,往往几十个连在一起向视神经输送信息。它对光有高敏感性,能接受微弱光刺激,但不能分辨物体的细节和颜色。因此,在比较暗的条件下,由视杆细胞作用而形成了暗视觉。暗视觉只能分辨出物体的形状和明暗。

在明亮条件下,视杆细胞不起作用。而锥细胞与视神经是一对一连接的,能在明亮条件下精细地接受外界的刺激,能分辨物体的细节与颜色。视锥细胞的活动只有当亮度达到一定水平才能被激发起来,称为明视觉。

在明亮条件下,具有明视觉的眼睛可以看到太阳光谱上不同明暗的各种颜色。当亮度减低到一定程度时,只有暗视觉的眼睛便感觉不到各种颜色,只能感觉到不同深浅的灰色。

暗视觉和明视觉称为视觉器官的两重功能。由于视觉的两重功能,视觉正常的人由明亮

环境到黑暗环境时,视锥细胞失去了工作能力,这时视觉对不同波长光的感受性也会发生变化。对于从事图像颜色工作的人来说,主要关心的是视锥细胞的功能和明视觉的作用。

2. 眼睛的分辨能力

眼睛是一个小而复杂的光学系统。远处物体的反射光射向眼睛,经过瞳孔后在视网膜上成像。瞳孔的直径只有 1.4mm 到 8mm。由于光波的衍射作用,物体的反射光在视网膜上也会产生衍射图样。正是这种衍射图样决定着眼睛的分辨力。

设 A 和 B 为两个独立的发光点,它们发射强度相等的光。当 A 与 B 相距较远时,它们在视网膜上产生的衍射图样互不相交;将两点距离移近,它们的衍射图样开始相交;当两点距离接近到一定值时,它们的衍射图样完全重叠。当两个衍射图样分离时,眼睛能够很容易地分辨出两个物体;当两个衍射图样开始重叠,眼睛还能勉强分辨出两个物体;当两个衍射图样重叠得较多时,眼睛就无法分辨两个物体的存在,而会认为其为一个物体。对于大多数人而言,如果两衍射图样的中心光强约为重叠后的中心光强的 80%,人的视觉就很难分辨了。由于生理条件的限制,不同的人眼睛的分辨能力不同。对于大多数人而言,假定人的瞳孔的直径为 2mm,在正常光照条件下,对于波长为 550nm 的光,眼睛有一个最小分辨角。也就是说,一个视力正常的人,在正常的光照条件下,能够分辨 25cm 处相隔 0.075mm 的两条刻线;或者说,能够分辨 10m 远处相隔 3mm 的两条刻线。

人们借助视觉器官完成一定的视觉任务,通常以视觉区别物体细节的能力和辨认对比的能力来衡量。

1) 视角

物体的大小对眼睛形成的张角叫做视角。视角的大小决定了视网膜上成像的大小,而视网膜上成像的大小又决定了人的视觉清晰度。

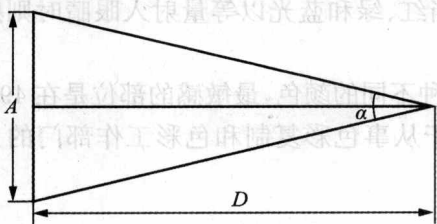


图 1-6 视角

图 1-6 中 A 为物体的大小, D 为眼睛角膜到该物体的距离(称为视距),视角可用下列公式计算:

$$\tan \alpha = \frac{A}{2D}$$

当 α 很小时, $\tan \alpha$ 近似于 α , 即

$$\alpha = \frac{A}{2D} (\text{弧度})$$

因此视角的大小与视距成反比。当物体大小不变时,视距减小,视角增大;反之则视角减小。同时,视角的大小与物体的大小成正比。当视距不变时,物体越大,视角越大。具有正常视觉的人能够分辨物体空间两点间所形成的最小视角 α 为 $1'$ 。视角可用弧度和度($^\circ$)、分($'$)、秒($''$)来表示, $1' = 0.00029$ 弧度, $1^\circ = 60'$, $1' = 60''$ 。

2) 视觉敏锐度

人们使用视觉器官辨认外界物体的敏锐程度,称为视角敏锐度。视觉敏锐程度表示视觉辨认物体细节的能力,在医学上称为视力。视觉辨认物体细节的能力与观察距离有很大关系。一个原来看不清楚的细小物体移到离眼睛较近时便可看清楚了。这是因为物体对眼睛形成的视角比原来增大了,视网膜上的像也相应地增大,所以人眼分辨能力提高。视觉敏锐度(V)以视角进行计算,是视觉所能分辨的以角度为单位的视角的倒数,即

$$V = \frac{1}{\alpha} [(\cdot)^{-1}]$$

当人的视觉能够分辨 1 分的视角所对应的物体细节时,则视觉敏锐度(视力)便为 1.0。

3. 颜色视觉

1) 颜色辨认

在一定的光亮条件下,正常人的视觉能分辨可见光谱中的各种颜色。但随着光强度的变化,人眼感觉的颜色将向长波或短波的方面变化,其中只有黄色(572nm)、绿色(503nm)和蓝色(478nm)这三点颜色感觉不变。在整个可见光谱上,人眼一般可以分辨出 100 多种不同的颜色,最敏感的部位是在 490nm 及 590nm 附近,最迟钝的部分是在光谱的两端。

2) 颜色对比

在视场中,相邻区域的不同颜色的相互影响叫做颜色对比。颜色对比有两种情形:一种是同时对比;另一种是连续对比。

所谓同时对比,就是同时看到两种颜色所产生的对比现象。在产生对比时,两色彩的对应属性间都分别出现相反倾向上加强刺激强度的现象。也就是说,当色相各异的颜色对比时,每一颜色的视觉感受向另一颜色的补色方向变化。例如将几块同样大小的灰色纸片分别置于不同颜色的背景上,在红色背景下灰色偏绿色的感觉,而在黄色背景上则偏蓝色的感觉。如果两种颜色是互补色,则感觉饱和度增加,颜色对比更加强烈,如绿叶中的红花显得更红。明度不同的色彩匹配时,明者更明,暗者更暗。饱和度不同的两个色彩匹配时,原来饱和度高的将显得更鲜艳,原来饱和度低的则更暗淡。

连续对比是先看某种颜色,然后又看到第二种颜色时产生的对比现象。连续对比最显著的特征是,对比的两色具有颜色的不稳定性。连续对比与同时对比的区别是时间条件的不同。同时对比是在同一时间内进行的对比,而连续对比则是在时间运动的过程中发生的颜色间的对比。值得注意的是,由颜色对比而产生的色彩变化,只是发生在观察者的眼睛中,并非色彩的真正变化。

3) 颜色适应

颜色适应指人眼在颜色刺激作用下所产生的颜色视觉变化。

当眼睛注视绿色几分钟之后,再将视线移至白纸背景上,这时感觉到白纸并不是白色,而是绿色的互补色——浅红色,但经过一段时间后又逐渐恢复白色感觉。这一过程称为颜色适应。在此适应过程中,在背景上的颜色消失的瞬间,会留下一个与背景色互补,且明暗程度也相反的颜色像,这个颜色像时隐时现,最后消失。

4) 颜色恒定

由物体的呈色机理可知,物体在不同光谱成分的光源照射下,会呈现出不同的色彩。一些人们经常看到的颜色如天空的蓝色、雪花的白色、树叶的绿色等,即使光源的光谱成分发生了变化,人们对这些颜色的感觉在一定程度上看起来仍是十分稳定的。颜色视觉的这种特性称为颜色恒定。

颜色恒定表明物体颜色并不完全决定于物理特性上视网膜的感光细胞特性,还受人们的视觉经验的影响。通常把这些具有颜色恒定性的颜色称为记忆色。

颜色恒定说明,用目测的方法精确评价颜色是不可能的。

第三节 色彩理论及其发展

色彩是一种物理刺激作用于人眼的视觉特性。颜色科学涉及的范围非常广泛,既包括数学、物理学、化学、生理学、心理学、艺术学等基础学科,又包括光学、色度学、电子学、机械学等工程学科。色彩理论主要包括物体呈色原理,色度学理论,色彩的测量与描述,色彩视觉机制解析,色彩应用等几个方面。

一、物体呈色原理

自然之美是不假人力的造化之功。中国南朝的文学理论家刘勰说:“云霞雕色,有逾画之妙;草木贲华,无待锦匠之奇;夫岂外饰?盖自然耳。”宋代理学大师和思想家朱熹说:“自然触目成佳句,云锦无劳更剪裁。”天空的流光异彩、地上的奇花异草、涂料和染料的万紫千红,无一不是自然本身的光彩。天空为什么是蓝色,雨过天晴为什么会出现彩虹……这些美丽的自然色彩让人们感叹的同时,也成为科学家们研究的重点,因此在科学家们不断的探索与发现中,色彩的秘密被慢慢解开。

天为什么是蓝的?这个小孩子的问题,在一百多年前也困扰着科学家。1871年英国物理学家瑞利(Third Baron Rayleigh)提出光的分子散射定律,才科学地解开了这个旷日持久之谜。原来天空的蓝色是太阳光被大气分子散射的结果。美丽的朝阳和晚霞又是如何形成的呢?清晨和傍晚,太阳斜射地面,太阳光比中午穿过更厚的大气层。太阳光中的紫光、蓝光和绿光被清洁的大气分子多次散射,减少了太阳光中的紫、蓝和绿成分。相比之下,红光、橙光和黄光的成分增加,天空呈现红、橙色,成为美丽的朝阳和晚霞。

为什么不同的物体会具有不同的颜色?当白光照射在物体上,物体对不同波长的光具有不同的吸收率,对某些波长的光吸收多些,对另一些吸收少些,这种吸收称为选择性吸收。具有选择性吸收的物体呈现彩色,因为经过选择性吸收以后,其反射或透射的光与入射光比较,不仅能量(光强)上有所减弱,光谱成分也发生了改变,从而形成了物体的颜色(见图1-7)。

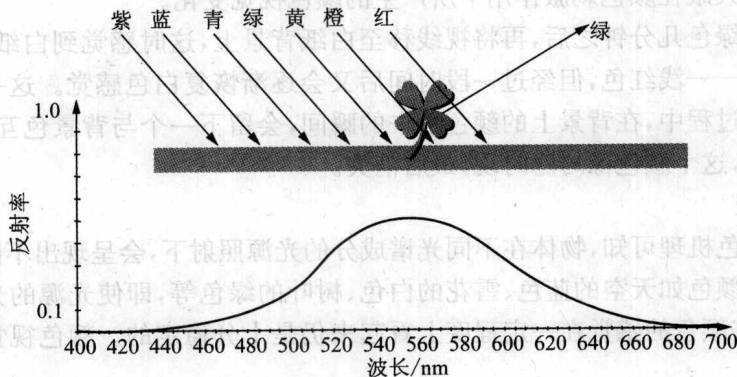


图 1-7 物体呈色原理

物体本身没有色彩,光才是色彩的来源。如果红色物体表面用绿光来照射,那么会呈现黑色,因为绿光波长的辐射能被全部吸收了,而照射光又不包含可反射的红光波长。所以物体在

不同光谱组成的光照射下,会呈现出不同的色彩。可以这样认为,一切物体本身都是无色的,只是由于它们对光谱中不同波长光的选择性吸收,才形成了它的颜色。

二、色光混合理论

通过对太阳光谱的研究,人们了解到可见光谱中占据面积最大的是蓝紫(B, 420~470nm)、绿(G, 500~570nm)、红(R, 630~700nm)三种颜色的光。而橙、黄、青、紫等色光只是上述三色光的过渡区域,占有很狭窄的一段位置。另外,通过大量的实验发现,如果用红、绿、蓝三种色光以不同比例进行混合,几乎可以得到自然界中所有的色彩,而且这三种色光中的任何一种色光都不能由其他两种原色光混合得到,因此,称红、绿、蓝三种颜色为三原色光。

通过对三原色的实验,人们揭示了光的特征,色光合成的理论,形成了色光混合理论(此部分内容将在后续章节中加以详述),并由此发展形成色度学理论。

三、色度学理论

20 世纪 20 年代出现了综合性研究色彩的科学理论——色度学。这门学科以物理光学、视觉生理、视觉心理等学科为基础,研究人的颜色视觉规律、颜色测量的理论与技术。现在,以色度学为基础结合各个应用工程领域开展视觉色彩的研究,出现了各种色彩学科。

狭义地说,色度学是一种工具。它用来预测两种光谱功率分布不同的光(视觉刺激),在一定的观察条件下,在颜色上能否匹配。广义地说,色度学包括对日常生活中经常可能发生的在复杂环境中呈现给观察者的色刺激外貌的测定方法。为了使色度学成为一个实用工具,就需要统一色度学标准和运用方法。CIE 国际照明委员会已经推荐了所需要的标准和方法。

CIE 成立于 1913 年,现已发展成有 40 个成员的国际学术团体,CIE 的大多数成员国来自欧洲,CIE 是一个非盈利性国际组织,主要致力于关于光源的研究和国际间的颜色信息交流与合作。它的任务是,为各成员国提供关于光源和照明的国际论坛;在光源和照明领域开发基本标准和度量程序;为开发关于光源的国际、国家标准及其应用提供帮助;发布标准、报告和其他出版物;和其他相关的国家组织保持联系和技术交流。该组织每隔四年召开一次国际会议,开展学术活动,公布各种技术标准和规定。

CIE 分为八个分部,各种技术活动是在各个分部中展开的。这八个分部为视觉和颜色、光线和辐射的测量、内部环境和照明设计、交流信号照明、外部照明及其他应用、光生物和光化学、光源的外貌(1999 年撤销)、图像技术。在各分部内,根据具体的技术问题还成立了技术委员会,比如在第一分部(视觉和颜色)成立了 TC1-55 委员会,主要研究“用于工业色差评价的均匀颜色空间(Uniform Color Space for Industrial Color Difference Evaluation)”。现在工业中作为标准应用的颜色空间如 CIE1931XYZ、CIE1976L*a*b* 等都是 CIE 发布的。

有关色度学标准的第一个主要推荐书是在 1931 年由 CIE 制定的,并且以此形成了现代色度学的基础。CIE1931RGB 真实三原色表色系统是 CIE 根据莱特和吉尔德两人的研究成果公布的第一个颜色空间,为颜色的定量描述作出了重要贡献。为了克服该颜色空间的负刺激值问题和考虑到颜色工业的应用实际,CIE 提出了 CIE1931XYZ 颜色空间、CIE196410°XYZ 颜色空间以及 CIE1976L*a*b*、CIE1976L*u*v* 等颜色空间。其中,CIE1976L*a*b* 颜色空间作为具有良好等视觉特性的均匀颜色空间得到世界各国颜色工业的广泛使用。