



新世纪高等院校精品教材

YANSE XINXI GONGCHENG

颜色信息工程

徐海松 编著



浙江大学出版社

ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

颜色信息工程

徐海松 编著

浙江大學出版社

图书在版编目(CIP)数据

颜色信息工程 / 徐海松编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2005. 12

ISBN 7-308-04512-9

I. 颜... II. 徐... III. 颜色 - 信息系统

IV. TQ620.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 119873 号

内容简介

颜色信息是现代信息领域中的一个大类,颜色科学作为一门心理物理的综合性学科正在不断发展和完善,颜色技术在科研和工业中的应用日益重要和广泛。本书是作者根据多年的科研实践和教学经验并参考了国内外大量的科技文献,经过系统的整理和总结而写成的。

全书内容共分七章。第 1 章简要阐述了光与颜色的基本原理,包括光源、光度学基本概念、物体的光谱特性、颜色的感知、颜色视觉等。第 2 章系统介绍了各种 CIE 标准色度系统、色温、标准照明体和标准光源、CIE 色度计算方法、主波长和色纯度等。第 3 章主要介绍 CIE 均匀颜色空间,详细讨论了颜色差异评价的数学模型、同色异谱颜色及其评价方法、光源显色性的评价和计算方法等。第 4 章介绍了国内外现有的主要色序系统,着重讨论了孟塞尔颜色系统和自然色系统及其比较。第 5 章论述了颜色的混合、色适应、颜色视觉模型、加色法和减色法等颜色再现的方法、目标及其评价等颜色预测与再现的基本原理。第 6 章详细讲述了颜色测量的基本原理以及光电积分式和分光光度测色仪器的设计方法,同时分析了荧光材料的颜色测量和色温的测量技术。第 7 章主要介绍颜色信息技术的应用,涉及彩色电视、彩色摄影与彩色印刷、颜色灯光信号、计算机自动配色、颜色信息管理等工业和学术领域。

责任编辑 宋纪浔

封面设计 俞亚彤 姚燕鸣

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 德清县第二印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16

印 张 23.5

彩 插 4

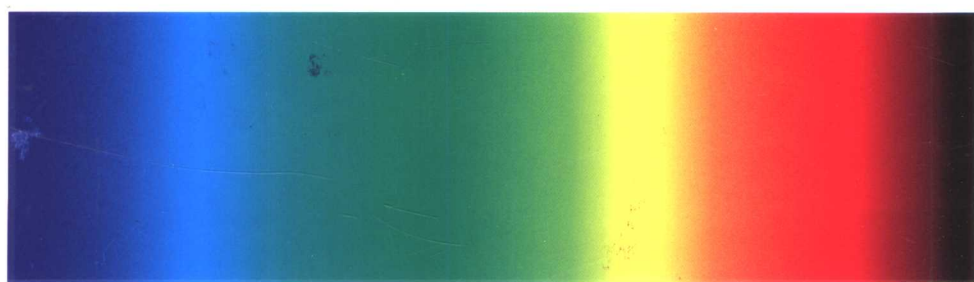
字 数 602 千

版 次 2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

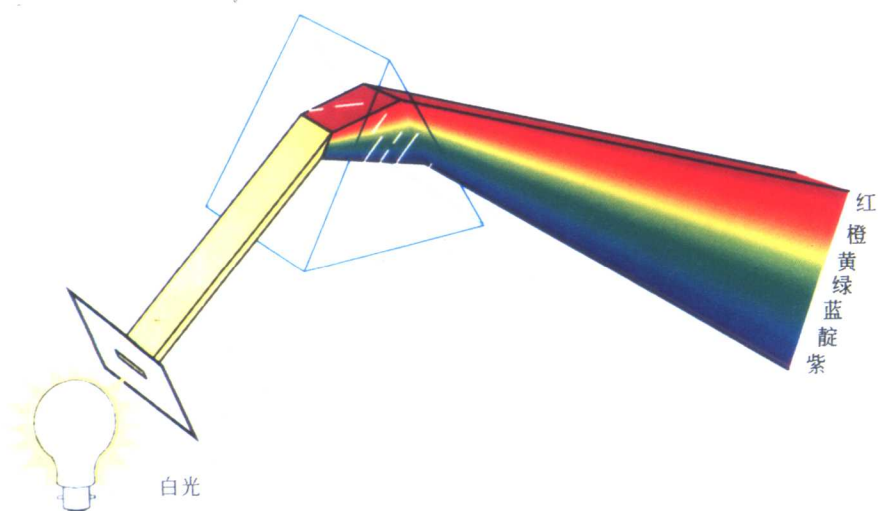
印 数 0001—2000

书 号 ISBN 7-308-04512-9/TQ · 030

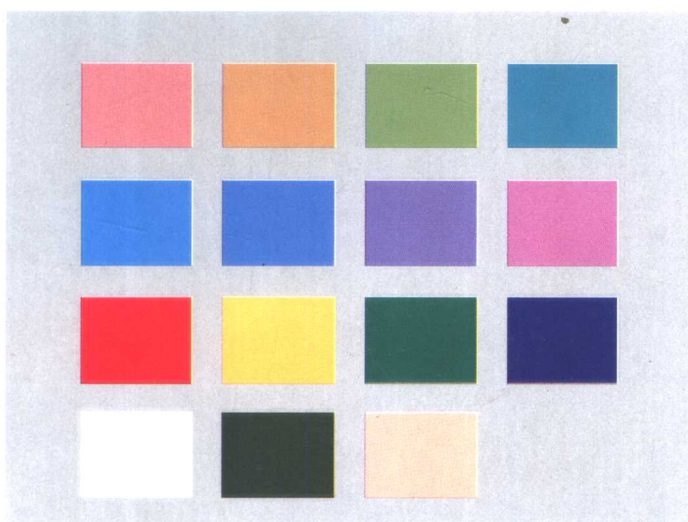
定 价 36.00 元



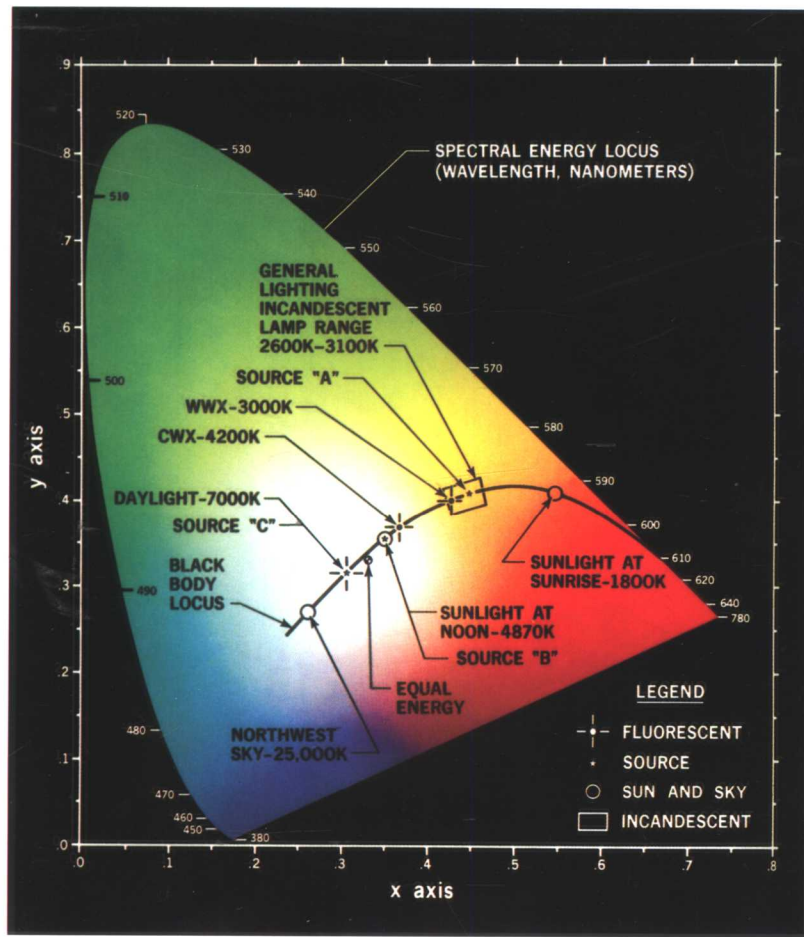
彩图1 可见光谱



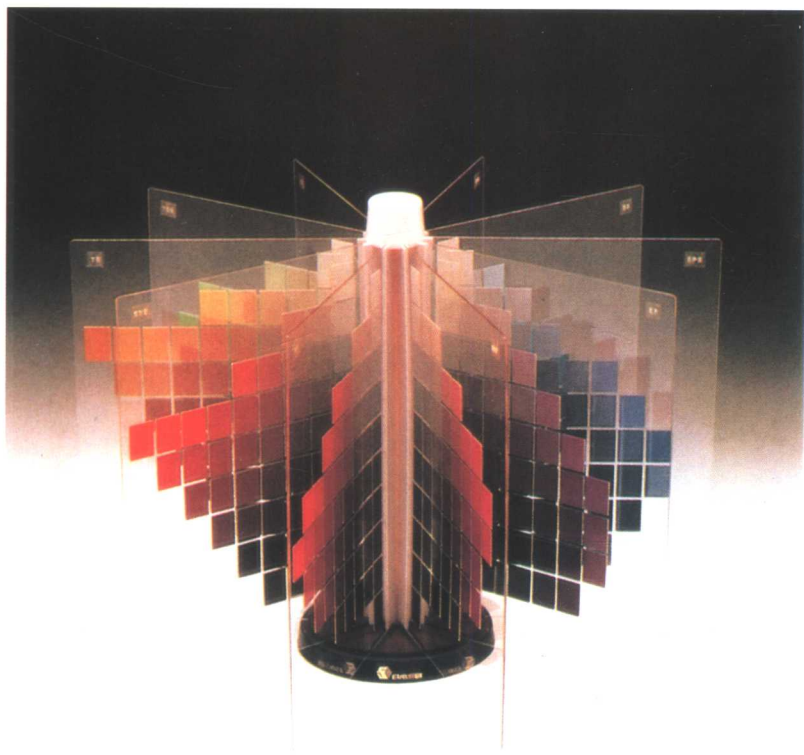
彩图2 棱镜的色散



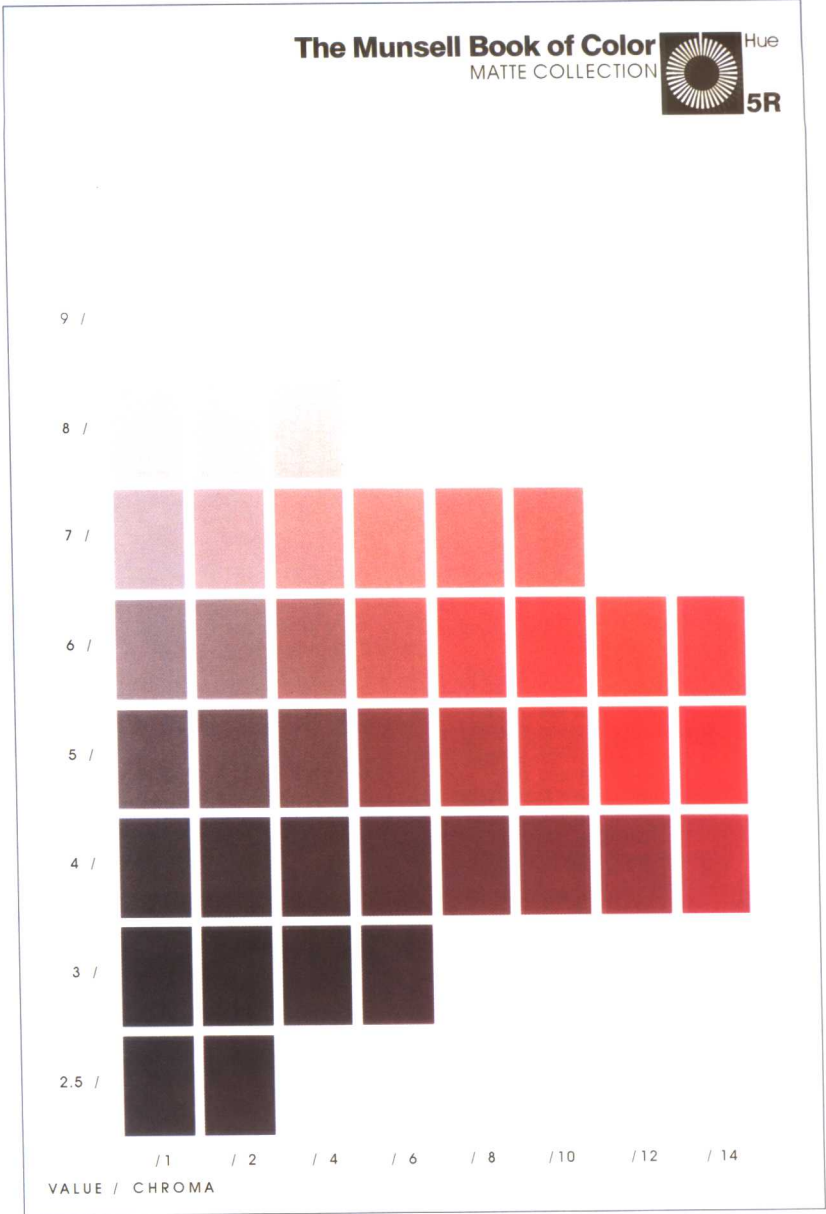
彩图4 CIE 光源显色性评价用试验色



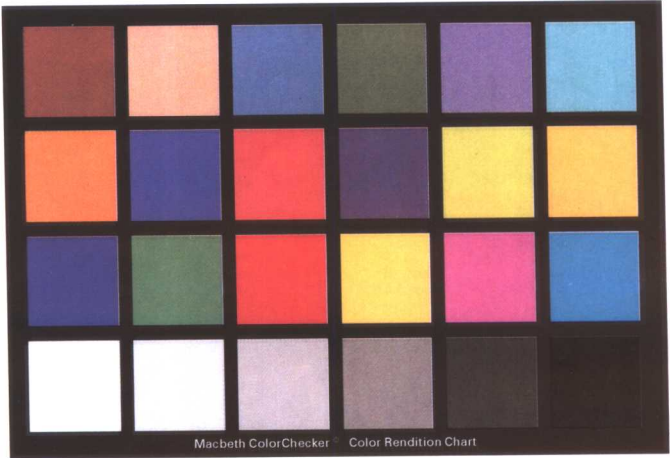
彩图3
CIE1931 XYZ 标准色度
系统色品图



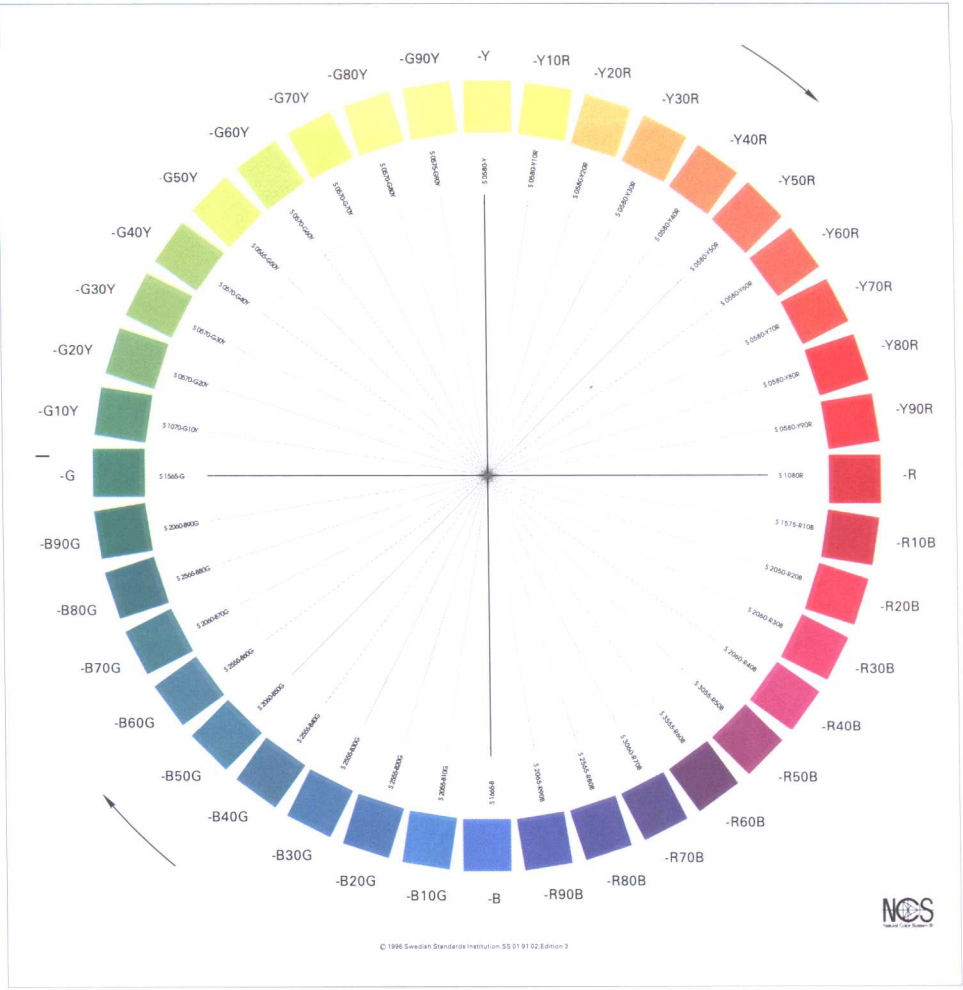
彩图5
孟塞尔颜色立体



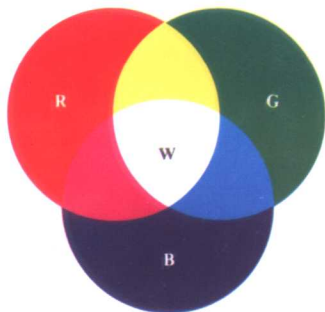
彩图6
孟塞尔色调页



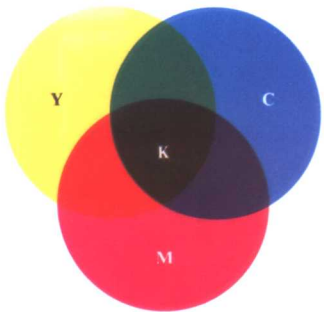
彩图8
Macbeth 色卡



彩图7 NCS 色调环



彩图9 加法混色



彩图10 减法混色

目 录

第1章 光与颜色

1.1 光与光源	(1)
1.1.1 可见光	(1)
1.1.2 光源及其光谱分布	(3)
1.1.3 黑体辐射及其光谱分布	(3)
1.2 光度学的基本概念	(5)
1.2.1 光度量的定义及其单位	(5)
1.2.2 光度基准及其发展	(9)
1.2.3 光度学基本定律	(11)
1.3 物体的光谱特性	(15)
1.3.1 光的透射和吸收	(15)
1.3.2 光的反射	(17)
1.3.3 光的散射	(21)
1.3.4 荧光	(22)
1.4 颜色的感知	(22)
1.4.1 眼睛的构造	(23)
1.4.2 人眼的适应性和光谱光视效率	(25)
1.4.3 光度量与辐射量之间的转换关系	(29)
1.5 颜色视觉	(29)
1.5.1 颜色视觉机理	(29)
1.5.2 颜色的表示与感知特性	(32)
1.5.3 颜色的对比	(35)
1.5.4 色适应与颜色恒常性	(37)
1.5.5 记忆色与喜好色	(38)
1.5.6 色觉异常	(39)

第2章 CIE 标准色度系统

2.1 颜色匹配	(40)
2.1.1 颜色匹配实验	(40)
2.1.2 颜色的矢量表示与匹配方程	(41)

2.1.3 格拉斯曼颜色混合定律	(42)
2.2 CIE1931 RGB 色度系统	(43)
2.3 CIE1931 XYZ 标准色度系统	(45)
2.3.1 色度系统的转换	(46)
2.3.2 CIE1931 RGB 系统向 CIE1931 XYZ 系统的转换	(49)
2.3.3 CIE1931 XYZ 色品图	(52)
2.4 CIE1964 补充标准色度系统	(53)
2.5 色温与相关色温	(56)
2.5.1 分布温度	(57)
2.5.2 色温	(57)
2.5.3 相关色温	(57)
2.6 标准照明体和标准光源	(59)
2.6.1 标准照明体	(59)
2.6.2 标准光源	(62)
2.7 CIE 色度计算方法	(65)
2.7.1 CIE 三刺激值和色品坐标的计算	(65)
2.7.2 物体色计算实例	(66)
2.7.3 光源色计算实例	(70)
2.7.4 颜色相加的计算	(71)
2.8 主波长和色纯度	(74)
2.8.1 主波长	(74)
2.8.2 兴奋纯度和色度纯度	(75)

第3章 均匀颜色空间及颜色差异的评价

3.1 均匀色品图	(77)
3.2 均匀明度标尺	(82)
3.3 均匀颜色空间	(84)
3.3.1 CIE1964 均匀颜色空间	(84)
3.3.2 CIE1976 均匀颜色空间	(85)
3.4 色差的评价	(88)
3.4.1 色差的视觉判断	(88)
3.4.2 色差研究的指导原则	(88)
3.4.3 色差公式	(90)
3.5 一维颜色标尺	(100)
3.5.1 黄度标尺	(100)
3.5.2 白度标尺	(101)
3.6 同色异谱颜色及其评价	(103)
3.6.1 同色异谱颜色的概念	(103)

3.6.2 同色异谱颜色的分析	(104)
3.6.3 照明体同色异谱程度的评价	(107)
3.6.4 观察者同色异谱程度的评价	(111)
3.7 光源显色性的评价	(114)
3.7.1 光源的显色性	(115)
3.7.2 CIE 光源显色性指数的计算方法	(115)
3.7.3 光源显色性指数计算流程	(119)

第4章 色序系统

4.1 颜色立体	(121)
4.2 孟塞尔颜色系统	(122)
4.2.1 孟塞尔颜色立体	(123)
4.2.2 孟塞尔新标系统	(125)
4.2.3 孟塞尔颜色图册的应用	(132)
4.3 自然色系统	(134)
4.3.1 自然色系统颜色立体	(134)
4.3.2 自然色系统的应用	(137)
4.3.3 孟塞尔颜色系统与自然色系统的评述及其比较	(138)
4.4 美国光学学会均匀颜色标尺系统	(141)
4.5 其他颜色系统	(142)
4.5.1 奥斯瓦尔德颜色系统	(142)
4.5.2 德国 DIN 系统	(145)
4.5.3 颜色体系统	(146)
4.5.4 亨特系统	(147)
4.5.5 颜色曲线系统	(148)
4.5.6 日本实用颜色坐标系统	(148)
4.5.7 中国颜色体系	(149)
4.5.8 “555”色调分类系统	(150)

第5章 颜色的预测与再现

5.1 颜色的混合	(151)
5.1.1 混色的种类	(151)
5.1.2 加法混色及其计算方法	(152)
5.1.3 减法混色及其计算方法	(155)
5.2 色适应	(159)
5.2.1 色适应过程	(159)
5.2.2 沃恩·克里斯色适应预测公式	(161)
5.2.3 CIE 色适应预测公式	(163)

5.3 颜色视觉模型	(166)
5.4 颜色再现的目标	(169)
5.5 基于加色法的颜色再现	(171)
5.6 基于减色法的颜色再现	(173)
5.7 颜色再现性的评价	(175)

第6章 颜色测量及测色仪器

6.1 颜色测量的基本原理	(179)
6.2 目视测色	(180)
6.3 仪器测色的色度基准及其量值传递	(182)
6.3.1 双球法原理	(182)
6.3.2 色度基准	(183)
6.4 仪器测色的几何条件	(184)
6.4.1 CIE 标准照明与观察几何条件	(184)
6.4.2 多角几何条件	(188)
6.5 分光光度测色仪器	(189)
6.5.1 机械扫描式分光光度测色仪	(190)
6.5.2 电子扫描式分光光度测色仪	(192)
6.5.3 分光光度测色仪器波长标尺的校正	(198)
6.6 光电积分式测色仪器	(199)
6.6.1 光电积分式色度计	(199)
6.6.2 彩色亮度计	(204)
6.6.3 色差计	(205)
6.6.4 光电积分式测色仪器的校正	(208)
6.7 其他测色仪器	(212)
6.7.1 扫描仪	(212)
6.7.2 数码相机	(215)
6.8 测量的精确性与准确度	(217)
6.8.1 校正与检验	(218)
6.8.2 精确度的评估	(218)
6.8.3 准确度的评估	(219)
6.9 荧光材料的颜色测量	(221)
6.10 色温的测量	(226)
6.10.1 光谱功率分布法	(226)
6.10.2 双色法	(229)

第7章 颜色信息技术的应用

7.1 彩色电视	(231)
----------------	-------

7.1.1	彩色电视系统的基本原理	(231)
7.1.2	彩色电视的白场选择与调试	(235)
7.1.3	彩色电视三原色的选择及其转换	(236)
7.1.4	彩色电视系统理想光谱特性的实现	(239)
7.1.5	彩色电视颜色复现质量的评价	(242)
7.2	彩色摄影与彩色印刷	(243)
7.2.1	彩色摄影	(243)
7.2.2	彩色印刷	(244)
7.3	颜色灯光信号	(245)
7.4	计算机自动配色	(248)
7.4.1	综述	(248)
7.4.2	计算机颜色匹配的理论基础	(249)
7.4.3	色料的配方预测	(252)
7.4.4	颜色匹配的技术条件	(257)
7.4.5	计算机配色在纺织印染工业中的应用	(258)
7.4.6	计算机配色在其他行业中的应用	(262)
7.5	颜色信息管理	(264)
7.5.1	图像的颜色匹配	(264)
7.5.2	设备无关色与设备相关色	(265)
7.5.3	颜色管理系统	(266)
附 表		(272)
参考文献		(354)

光与颜色

1.1 光与光源

1.1.1 可见光

光是一种电磁波。电磁波的波长范围从 1nm 以下一直延伸到 10^3km 以上,其辐射类型包括

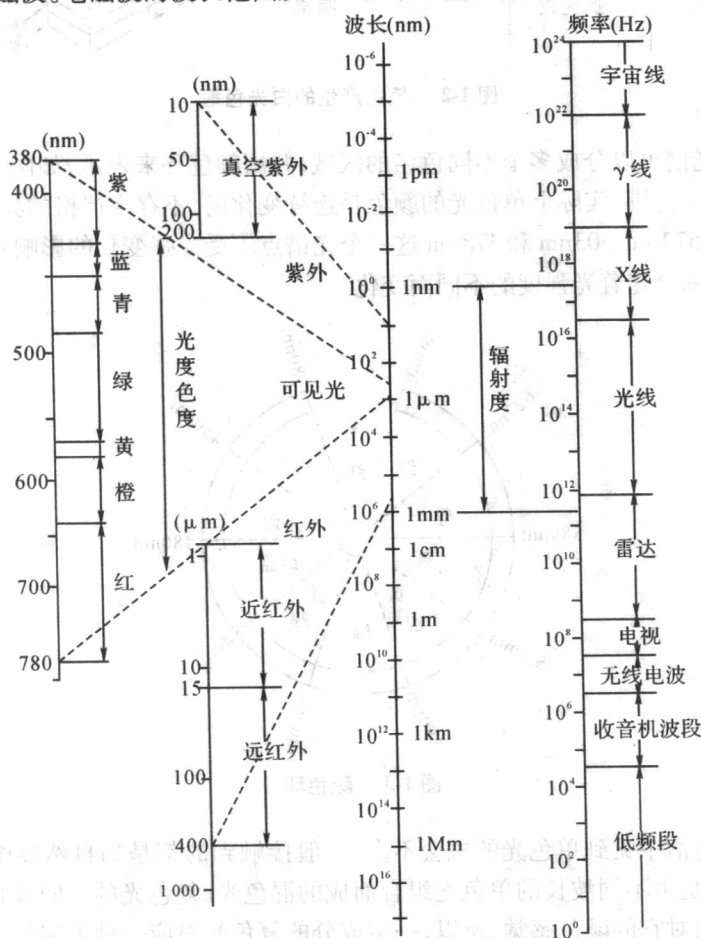


图 1-1 电磁辐射波谱及可见光谱

宇宙射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、雷达、电视广播和无线电、交流电等,如图1-1所示。在整个电磁波谱中,只有很小的一段进入人眼后能引起视觉感知,这部分光辐射称为可见光辐射,简称可见光(见彩页图1)。可见光谱的短波长端为 $360 \sim 400\text{nm}$,长波长端为 $760 \sim 830\text{nm}$,一般认为可见光的波长范围在 $380 \sim 780\text{nm}$ 。因此,广义上的光指的是包括X射线、紫外光、可见光、红外光等在内的光辐射,而狭义上的光通常就是指可见光。

不同波长的可见光辐射引起人们不同的颜色感觉,单一波长的光辐射表现为一种颜色,称为单色光或光谱色。牛顿(Newton, 1643 - 1727)通过如图1-2所示的对太阳光的色散实验表明,白色阳光可分解成由红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等光谱色组成的谱带(见彩页图2),反之这些单色光又可以合成原来的白光。因此,白光是各种单色光的集合。

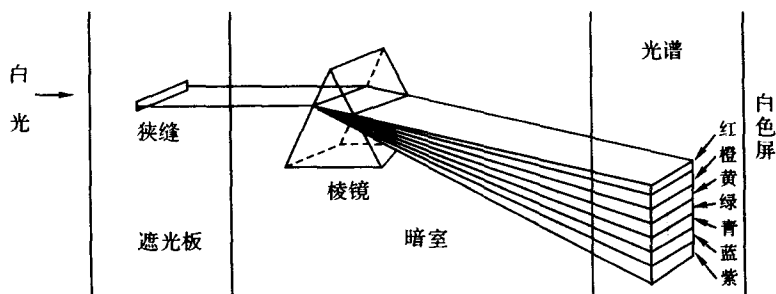


图1-2 棱镜产生的白光色散

一般,可见光谱可以分成多个不同色名的区域,并用颜色环来表示,如图1-3所示。这种划分只是给出大致的范围,实际上单色光的颜色是连续变化的,不存在严格的界限。同时,实验指出可见光区除了 572nm 、 503nm 和 478nm 这三个光谱点不受光强变化的影响外,其他各波长的单色光颜色感觉都会随着光强度的不同而变化。

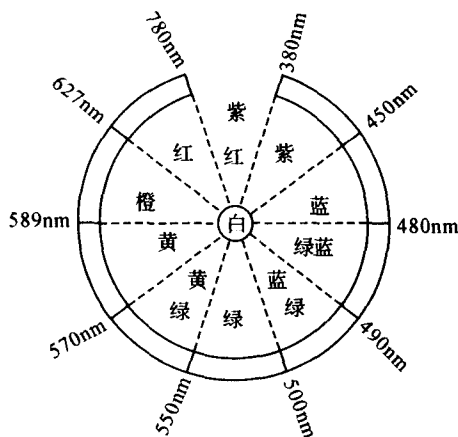


图1-3 颜色环

人们在日常生活中见到单色光的机会不多,一般接触到的都是如自然界中的太阳白光等所谓的复色光,这是由不同波长的单色光组合而成的混色光。复色光的不同波长辐射的相对功率分布决定了人们对它的颜色感觉。所以,一定成分的复色光对应一种确定的颜色;但是,一种颜色感觉并不只对应一种光谱组合,即两种成分完全不同的复色光有可能引起完全相同的颜色感觉,这就是颜色科学中很重要的同色异谱问题。

1.1.2 光源及其光谱分布

光是由光源发出的。凡能发射紫外线、可见光、红外线等各种电磁辐射的物质都可称为光源,其中又有自然光源和人造光源之分。常见的自然光源有太阳光、昼空、夜空、月和星等,人造光源的范围很广,包括热辐射或温度辐射光源、气体放电光源、固体发光光源、激光器等各种类型,还有蜡烛、油灯、火焰、电弧等也属于人造光源。

不管是自然光源还是人造光源大都是由单色光组成的复色光。光源的辐射能按波长分布的规律随着光源的不同而变化。设以波长 λ 为中心的微小波长宽度 $d\lambda$ 范围内的辐射量为 dX , 则单位波长间隔所对应的辐射量称为光谱密度 X_λ , 即

$$X_\lambda = \frac{dX}{d\lambda} \quad (1-1)$$

式中的辐射量可以是辐射通量、辐射强度、辐射亮度、辐射照度等。一般而言,波长不同,其对应的光谱密度也不同。将光源的光谱密度与波长之间的对应关系用函数来表示时,称此函数为该光源的光谱分布 $X_\lambda(\lambda)$ 。

光源的光谱能量分布或光谱功率分布常用直角坐标系的光谱功率分布曲线来表示。此时,横坐标表示波长 λ ,纵坐标表示单位波长间隔内的辐射功率。在色度学研究中,常常关心的是各波长辐射功率的相对比例而非光源的绝对光谱功率分布。这时,可令光谱分布函数的最大值为1,将函数的其他值进行归化,经过归化后的光谱分布称为相对光谱功率分布,其各波长对应值仍保持和绝对光谱功率分布相一致。

根据光谱功率分布的不同,光源的典型光谱大致可以分为以下几种情况,即线光谱、带状光谱、连续光谱和混合光谱,如图1-4所示。图1-4(a)只在某几个波长处发射狭窄的谱线,如低压汞灯和低压钠灯的光谱分布就是由若干条明显分隔的细线组成的,这种光谱称为线光谱。图1-4(b)则由一些分开的谱带构成,每个谱带又包含许多紧靠的细线,这种光谱称为带状光谱,如碳弧和高压汞灯的光谱就属于这种分布。图1-4(c)在整个光谱范围内,不同波长的光发射出强度不等的连续光谱,所有热辐射光源的光谱都是连续光谱,这是光源中最常见的一种光谱分布,如日光和白炽钨丝灯即属此类。图1-4(d)是前三种光谱的组合,称为混合光谱,如日常生活中常用的荧光灯就属于这种情况。

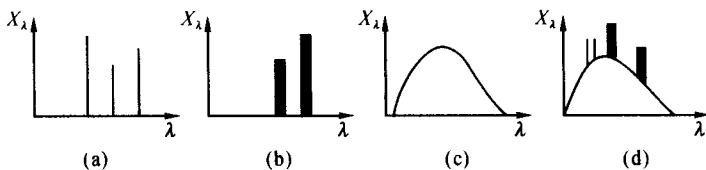


图1-4 几种典型的光谱分布

光源的光谱分布不仅决定了其本身的光色参数,还将影响在其照明下观察物体时的颜色外貌。

1.1.3 黑体辐射及其光谱分布

黑体又称为普朗克辐射体或完全辐射体,属于热辐射(thermal radiation)或温度辐射(temperature radiation)类型。能够完全吸收任何波长的入射辐射,并且具有最大发射率的物体称为绝对黑体,可见黑体的光谱吸收比恒等于1。

绝对黑体的光谱分布特性由普朗克公式给出：

$$M_{\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}$$

(1-2)

式中, M_{λ} 为绝对黑体的光谱辐射出射度, 单位为 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; λ 为波长, 单位为 μm ; T 为绝对黑体的绝对温度, 单位为 K (开尔文); $c_1 = 2\pi hc^2 = 3.741844 \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^2$ 为第一辐射常数; $c_2 = ch/k = 1.438833 \text{cm} \cdot \text{K}$ 为第二辐射常数; $h = 6.626196 \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数; $k = 1.380622 \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ 为玻尔兹曼常数; $c = 2.997925 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为真空中的光速。

图 1-5 是不同温度时黑体的光谱辐射出射度 M_{λ} 与波长 λ 的关系曲线。从这组曲线中可以看出: ① M_{λ} 随 λ 连续变化, 且只有一个极大值; ② 温度 T 越高, 黑体的 M_{λ} 也越大, 不同温度的曲线永不相交; ③ 随着温度 T 的升高, 辐射极大值所对应的峰值波长 λ_m 向短波方向移动; ④ 波长小于 λ_m 部分的能量占 25%, 波长大于 λ_m 部分的能量占 75%。可见, 黑体辐射的光谱分布完全取决于它的温度, 而与其材料、尺寸和表面状态等无关。只要温度一定, 黑体的光谱分布就可以计算出来。因此, 黑体在辐射度学、光度学和色度学中具有十分重要的意义。在光辐射测量中, 常用黑体作为原始标准来标定其他的辐射体, 以用作测量标准。

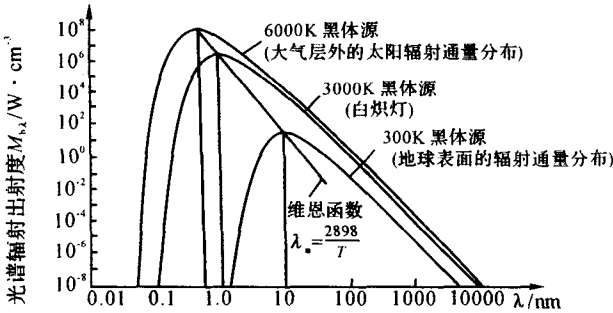


图 1-5 黑体辐射光谱能量分布曲线

绝对黑体是一个理想的概念, 在自然界中并不存在, 但是可以用人工的方法制造出接近于绝对黑体的人造黑体辐射源。如图 1-6 为开有小孔 B 的等温腔体 A , 经小孔 B 射入容器 A 的光线在多次反射后才能由 B 射出。设腔体内表面的反射比为 ρ , 当第 n 次反射时其反射的光能为入射光能的 ρ^n 倍。由于 ρ 小于 1, 所以当 n 足够大时, ρ^n 就很小, 即只有极少的光才能经过孔 B 反射出去, 因此孔 B 的吸收比几乎等于 1。这时, 孔 B 的辐射可以近似地看作一个绝对黑体的辐射。例如, 在 A 的内表面涂上一层吸收本领很强的黑色涂料, 设其吸收比为 90%, 反射比为 10%, 那么经过 3 次反射后, 它就吸收了入射光的 99.9%, 已非常接近于绝对黑体了。

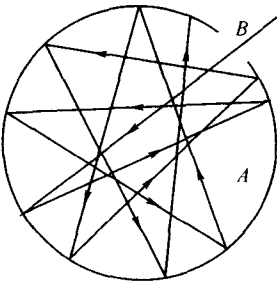


图 1-6 小孔黑体腔

温度为 T 的腔体 A 在吸收入射光辐射后,为了保持其温度 T 不变,根据能量守恒定律,它必然要从小孔 B 向外辐射出能量,这种辐射的波长分布就是处于温度 T 的普朗克辐射。但是,其入射辐射不一定是由温度为 T 的物体发出的,所以由小孔 B 辐射出的能量的波长分布就可能与入射辐射的分布不同。

1.2 光度学的基本概念

1.2.1 光度量的定义及其单位

日常生活中,所谓光的“明亮”这一用语是在不太严密的情况下使用的。如激光器发出的光很“亮”,但作为室内照明就不具有充足的明亮度;又如采用几支荧光灯作为室内照明可以得到明亮的环境,但用一支就不够亮。通常用单位体积的质量即密度来比较物质的轻重,同样光的明亮程度也有必要用立体角、面积等进行规格化后予以比较。我们把定量地测定光的明亮程度的科学称为光度学 (photometry),由光度学得到的规格化的明亮度量叫做光度量 (photometric quantity)。

光度量都是用对应的辐射量乘以光视效能得到的,所以辐射量是其单位为焦耳(J)、瓦特(W)等的物理量,而光度量是由视觉心理来评价物理量时得到的量,称为心理物理量 (psychophysical quantity)。在心理物理量中还有本书后面将要介绍的颜色三刺激值等色度量。光度量包括光能量、光通量、发光强度、照度、光出射度、亮度等,每个物理量都有确定的含义和单位,下面将分别加以说明。

1. 光能量 (luminous energy) Q

光能量定义为光通量与照射时间的乘积,其单位是流明秒 (lumen second),符号为 $\text{lm} \cdot \text{s}$ 。

如果光通量在照射时间之内是随时间而变化的,则其光能量为光通量对时间的积分,即

$$Q = \int \Phi(t) dt \quad (1-3a)$$

如果在照射时间之内光通量恒定不变,则光能量应为

$$Q = \Phi t \quad (1-3b)$$

2. 光通量 (luminous flux) Φ

光源在单位时间内发出的光能量称为光通量:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (1-4)$$

光通量是用光视效能评价辐射通量 (Φ_e) 时得到的量,即能够被人眼视觉系统所感受到的那部分辐射功率的大小的量度,单位是流明 (lumen),符号为 lm 。

3. 发光强度 (luminous intensity) I

光源在指定方向上单位立体角内所包含的光通量定义为光源在此方向上的发光强度,即

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1-5)$$

式中 Ω 为立体角,其单位是球面度 (steradian),符号为 sr ,规定在半径 r 的球面上面积为 r^2 的面元对球心的张角为 1sr 。因为球面的面积是 $4\pi r^2$,所以整个球面的立体角为 $4\pi\text{sr}$ 。

发光强度的单位是坎德拉 (candela),符号为 cd ,其定义的示意图如图 1-7 所示。