



中国轻工业“十三五”规划立项教材
“十三五”普通高等教育印刷工程专业规划教材

颜色科学 与技术

COLOR SCIENCE
AND TECHNOLOGY



林茂海 吴光远 郑元林 李治江 李文育 编著



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

中国轻工业“十三五”规划立项教材
“十三五”普通高等教育印刷工程专业规划教材

颜色科学与技术

林茂海 吴光远 郑元林 李治江 李文育 编 著



 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

颜色科学与技术/林茂海等编著. —北京: 中国轻工业出版社, 2019.5

“十三五”普通高等教育印刷工程专业规划教材

ISBN 978-7-5184-2281-4

I. ①颜… II. ①林… III. ①颜色-高等学校-教材
IV. ①TS193.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 041031 号

责任编辑: 杜宇芳

策划编辑: 杜宇芳 责任终审: 劳国强 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 宋振全 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 三河市国英印务有限公司

经销: 各地新华书店

版次: 2019 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 12.25

字数: 300 千字 插页: 2

书号: ISBN 978-7-5184-2281-4 定价: 45.00 元

邮购电话: 010-65241695

发行电话: 010-85119835 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请与我社邮购联系调换

180406J1X101ZBW

前言

颜色在日常生活中,对于信息的传递与交流起到非常重要的作用,尤其在印刷包装、纺织印染、艺术设计、建筑装潢等领域。在人们对物体辨别过程中,除了利用触觉以外,主要是通过人眼观察物体的形状和颜色;而一切物体的形状,是通过颜色的差别和组合来体现的。颜色比形状更直观、更强烈,能先于形状影响人的感官。对于颜色科学,自古以来就受到人们广泛研究。冰河时期和石器时代,人们已经开始使用矿物质颜料和草木胶汁绘制颜色图案,逐渐形成了“红”“绿”“黄”等定性描述颜色的方式,但描述模糊;随着显色系统表示法和混色系统表示法的出现,颜色进入到定量描述阶段。这为颜色信息的分解、转换、传递、再现过程提供了非常重要的依据。

颜色科学与技术是学习印刷工程、包装工程、光学工程、艺术设计等与颜色科学有关专业的基础课程之一,它涉及生理学、光学、心理学、色度学、美学、物理学等多学科交叉融合的内容;其主要研究内容包括颜色产生机制与颜色现象、颜色的定性和定量描述、光源的色度学、颜色测量、色彩管理和色貌理论等。通过本门课程的学习,可以了解颜色的描述方式,包括定性描述和定量描述的基本理论和方法,掌握颜色计算、测量、传递的基本方法,熟悉运用各种测色仪器设备,为进一步学习其他图像领域的课程奠定基础。

全书共分为11章,可分为4部分。第一章和第二章讲解现代颜色科学的起源、人眼视觉现象、光与颜色视觉的关系,是构成颜色科学与技术最基本的概念;第三章到第五章讲解定量描述颜色的方法,包括混色系统表示法和显色系统表示法,是本课程的核心内容之一;第六章和第七章讲解光源的色度学、颜色测量原理及几何条件、测量设备的分类与结构;第八章到第十一章讲解色彩管理工作流程及计算方法、三维色域及其可视化技术、色貌理论,这些都是颜色科学与技术领域较为前沿的内容。

为了体现颜色科学与技术的最新发展和应用,加入了三维色域及其可视化技术,对于正确理解色彩管理技术是非常有用的,具体涉及三维可视化技术、色域类型、色域边界描述及评价。编者之所以强调三维色域及其可视化技术,是为了实现不同色域在映射过程中直观的比对与匹配,达到真正的“所见即所得”的颜色最终匹配目标,是色域观测、匹配与交互的必不可缺的载体。

本书在编写过程中参阅了大量经典著作和参考文献,苦于数量众多无法一一致谢,敬请谅解。本书可作为高等院校印刷工程、包装工程及其相关学科颜色学科与技术课程的教材,也可作为相关领域技术人员的参考书。

本书的编写由齐鲁工业大学(山东省科学院)林茂海、吴光远,西安理工大学郑元林,武汉大学李治江以及陕西科技大学李文育共同完成,由齐鲁工业大学教材建设基金资助出版。由于编者理论知识与实践经验的局限性,本书存在的不足与疏漏之处,恳请各位专家和读者批评指正。

编著者

2018年12月

目 录

第 1 章 现代颜色科学的起源	1
1.1 牛顿光色理论	1
1.2 混色的三色视觉	1
1.3 紫外线、红外线、光谱灵敏度	2
1.3.1 紫外线	2
1.3.2 红外线	4
1.3.3 光谱灵敏度	5
1.4 颜色恒常性、色彩对比	6
1.4.1 颜色恒常性	6
1.4.2 色彩对比	6
1.5 色彩缺失	7
1.5.1 色盲的发现	7
1.5.2 先天性色盲或色弱	8
1.5.3 后天色盲或色弱	8
第 2 章 光与颜色视觉	9
2.1 可见光	9
2.2 光度学基本概念	10
2.2.1 光度学定义	10
2.2.2 光度学单位	10
2.3 物体的光谱特性	12
2.3.1 物体与光的相互作用	12
2.3.2 光的反射	13
2.3.3 光的透射	14
2.3.4 光的吸收	15
2.4 颜色的感知	16
2.4.1 人眼的机制	16
2.4.2 人眼的适应性	17
2.4.3 光谱光视效率	18
2.5 颜色视觉理论	20
2.5.1 三色学说	20
2.5.2 四色学说	22
2.5.3 现代颜色视觉理论	22
2.6 颜色的分类与视觉属性	23
2.6.1 颜色的分类	23
2.6.2 颜色的视觉属性	24
2.7 颜色视觉现象	26

2.7.1 颜色对比	26
2.7.2 色适应	26
2.7.3 颜色恒常性	27
2.7.4 负后像	27
2.8 颜色混合理论	28
第3章 CIE 标准色度系统	29
3.1 颜色匹配	29
3.1.1 颜色匹配实验	29
3.1.2 颜色的矢量表示与匹配方程	30
3.1.3 格拉斯曼颜色混合定律	30
3.2 CIE 标准色度系统	31
3.2.1 CIE 1931 RGB 标准色度系统	31
3.2.2 CIE 1931 XYZ 标准色度系统	33
3.2.3 CIE 1931 RGB 系统向 CIE 1931 XYZ 系统的转换	33
3.2.4 CIE 1964 $X_{10} Y_{10} Z_{10}$ 标准色度系统	34
3.3 三刺激值和色度坐标计算	35
3.4 同色异谱	37
3.5 主波长和纯度	38
第4章 均匀颜色空间及颜色评价	40
4.1 颜色空间的均匀性	40
4.2 均匀颜色空间	41
4.3 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 均匀颜色空间	42
4.3.1 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 模型	42
4.3.2 色差及其计算公式	44
4.3.3 色差单位的提出与意义	45
4.4 CIE1976 $L^* u^* v^*$ 均匀颜色空间	46
4.4.1 CIE 1976 $L^* u^* v^*$ 模型	46
4.4.2 色差及其计算公式	47
4.4.3 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 与 $L^* u^* v^*$ 匀色空间的选择和使用	48
4.5 色差及色差公式	48
4.5.1 CMC (1:c) 色差公式	50
4.5.2 CIE94 色差公式	51
4.5.3 CIEDE2000 色差公式	52
第5章 色序系统	55
5.1 色序系统的概念	55
5.2 孟塞尔颜色系统	55
5.3 NCS 颜色系统	58
5.4 RGB 颜色空间	60
5.5 CMYK 颜色空间	61
5.6 其他表色系统	64
5.6.1 潘通 (PANTONE) 色卡颜色系统	64

5.6.2	TILO 颜色管理系统	64
第 6 章	光源的色度学	66
6.1	黑体与色温	66
6.1.1	黑体	66
6.1.2	色温	69
6.1.3	相关色温	70
6.2	光源的显色性	71
6.3	标准照明体与标准光源	73
6.4	印刷行业标准照明条件和观察条件	75
第 7 章	颜色测量	77
7.1	色测量的原理及几何条件	77
7.1.1	色测量的原理	77
7.1.2	色测量的几何条件	77
7.2	色测量仪器的分类与构造	81
7.2.1	分光光度计	81
7.2.2	光电色度计	85
7.2.3	分光辐射亮度计	85
7.2.4	目视比色计与彩色密度计	87
7.3	密度与密度测量	88
7.3.1	减色法原理与减色法三原色	88
7.3.2	光学密度的定义	88
7.3.3	彩色密度计原理与结构	90
7.3.4	颜色的密度表示法	93
7.3.5	密度与网点面积	95
第 8 章	色彩管理原理	98
8.1	色彩管理发展背景	98
8.2	色彩管理的作用	99
8.3	色彩管理的分类	100
8.4	色彩管理的基本要素	101
8.4.1	特性文件	101
8.4.2	设备文件连接色空间 PCS	103
8.4.3	再现意图	104
8.4.4	颜色转换模块	106
8.5	色彩管理的基本工作过程	106
8.5.1	色彩管理工作流程	106
8.5.2	设备校准	107
8.5.3	设备特征化	108
8.5.4	色彩转换	108
第 9 章	色彩管理计算方法	110
9.1	设备校准	110
9.1.1	设备校准的原理与过程	110

9.1.2	输入设备的校准	110
9.1.3	显示设备的校准	111
9.1.4	输出设备的校准	112
9.2	设备特性文件的建立	113
9.2.1	输入设备特性文件的建立	113
9.2.2	显示设备特性文件的建立	114
9.2.3	输出设备特性文件的建立	115
9.3	色彩转换	116
9.3.1	色域的数学表达	116
9.3.2	色域映射方法	118
9.3.3	颜色转换的算法	119
第 10 章	三维色域及其可视化技术	125
10.1	三维可视化技术	125
10.1.1	可视化技术的发展与应用	125
10.1.2	基于表面重建的三维可视化	126
10.1.3	色域的二维模型与三维模型	128
10.2	色域的类型	129
10.2.1	颜色空间色域	129
10.2.2	设备色域	133
10.2.3	图像色域	134
10.3	色域边界及色域边界描述	135
10.3.1	凸壳算法	136
10.3.2	改进的凸壳算法	137
10.3.3	分区最大化算法	138
10.3.4	USV 算法	139
10.4	基于色域匹配度的色域边界评价	140
10.4.1	色域边界评价算法的发展	140
10.4.2	基于色域匹配度模型的色域评价	141
第 11 章	色貌理论	146
11.1	色貌属性及色貌现象	146
11.1.1	色貌属性	146
11.1.2	色貌现象	147
11.2	色适应及色适应变换	155
11.2.1	色适应 (chromatic adaptation)	155
11.2.2	色适应模型和色适应变换	156
11.3	色貌模型	164
11.3.1	色貌模型的框架	164
11.3.2	色貌模型	165
11.3.3	CIE CAM97s 色貌模型	167
11.3.4	CIE CAM02 色貌模型	171
11.4	图貌模型 (iCAM)	177
11.4.1	iCAM 模型框架	177

11.4.2 计算步骤	179
11.4.3 iCAM 模型的应用	181
参考文献	183

第 1 章 现代颜色科学的起源

每一位来到颜色科学神秘殿堂的人必将对这个学科的发展进程产生浓厚兴趣，并进行深入探索，因此在这一章节主要对现代颜色科学的起源进行综述。由于颜色科学的发展和其他科学一样，都是在不断纠正错误过程中前行的。这就比如，在过去的一个多世纪里，人类都是用物理学来解释色光的混合现象，并没有利用人类的视觉特性和心理特性等方面对此进行解释。同样地，现在我们仍无法对一些颜色科学现象形成统一认识，在认识颜色科学的道路上还有很漫长的路要走。

1.1 牛顿光色理论

现代颜色科学起源于 17 世纪，牛顿（Newton，1643—1727 年）曾致力于颜色的视觉现象和光的本性的研究。1666 年，他进行了著名的色散实验，发现了白光是由不同颜色（即不同波长）的光混合而成的，且不同波长的光有不同折射率的特性。牛顿的这一重要发现成为了光谱与色分析的基础，揭示了光色的秘密。此后牛顿研究了光的折射，表明棱镜可以将白光发散为彩色光谱，而透镜和第二个棱镜可以将彩色光谱重组为白光。另外，他进行了将分离出的单色光束照射到不同物体上的实验，发现了色光不会改变自身的性质。牛顿还注意到，无论是反射、散射或透射，色光都会保持同样的颜色。因此，我们观察到的颜色是物体与特有色光相结合的结果，而不是物体产生颜色的结果。

牛顿在做色光合成实验的时候发现，红色和绿色可以合成黄色，绿色和蓝色可以合成青色，而红色和蓝色却合成一种在彩虹中找不到的颜色——品红色。为了表示上述合成规律，牛顿把六种典型颜色放在一个圆盘上，构成牛顿色环，如图 1-1 所示（见彩色插图）。

为什么会产生品红色，这在当时是令人困惑的。因为牛顿当时并没有认为合成的黄色光同单色光中的黄色光有什么不同。现在我们知道，合成的黄色光仅仅在人看来和单色光中的黄色光相同，而物理上并不相同。当时人们也想找出单色光中的品红色，而实际上找不到。



图 1-1 牛顿色环

1.2 混色的三色视觉

1802 年英国物理学家托马斯·杨（Thomas Young，1773—1829 年）提出假设：所有颜色都可以通过红、绿、蓝三色的混合产生，三者比例不同，颜色就不同。这一假设的

革命意义在于“肯定一种颜色不是一种色光，而是许多能产生同样主观感觉的多种色光”。或者说“肯定一种颜色并不反映一种色光，而是反映多种在人看来相同的色光”。托马斯·杨早年学医，很年轻时就研究了眼睛的调节机理，21岁就被选为英国皇家学会会员，他出版的著作涉及非常广泛的课题，有生理光学、虹的理论、流体动力学、毛细作用、造船工程、用摆测量引力、潮汐理论等，其最有名的贡献是在光的波动理论方面。关于光的双缝干涉实验就被称之为杨氏双缝干涉实验，这一实验对近代光学和量子力学有着重大影响。

一个世纪后，托马斯·杨的创造性见解被德国物理学家和生理心理学家赫尔姆霍兹（Hermann von Helmholtz, 1821—1894年）进行了进一步研究。赫尔姆霍兹假设人眼中存在三种接收器（按现在的说法是三种视锥细胞），分别对应不同波长的色光敏感或吸收不同波长的色光。三种接收器受到的刺激比例不同，色觉就不同。他还假设了每一种接收器的敏感特性曲线，由此计算出具有任何一种能量分布的色光所引起的三种接收器输出信号大小。赫尔姆霍兹发展和量化了托马斯·杨的三原色理论，因而这一理论现在被称为杨-赫尔姆霍兹三原色说（或三色素说）。假设一种物体反射的色光能量分布是 $s(\lambda)$ ，三种色敏感细胞的敏感特性曲线是 $r(\lambda)$ ， $g(\lambda)$ ， $b(\lambda)$ ，那么三种细胞输出信号大小就是三者输入的加权积分。 $s(\lambda)$ 和 $r(\lambda)$ 越重合，并且 $s(\lambda)$ 越大，则 R 越大。 G 和 B 同理，任何一种颜色都可以用矢量 (R, G, B) 表示。比如 $(R, G, B) = (1, 0.5, 0)$ ，表示 $R=1$ ， $G=0.5$ ， $B=0$ 的颜色，即橘黄色。我们用 $s(\lambda)$ 表示一种色光，用 (R, G, B) 表示相应的颜色。注意：色光 $s(\lambda)$ 不同，颜色 (R, G, B) 可能相同，这就叫作同色异谱。比如黄色单色光和红绿两种单色光等比例混合的混色光，两者光谱（即能量分布）不同，但是颜色 (R, G, B) 是相同的。

三原色理论为彩色电视显示系统设计奠定了理论基础。摄像系统中：每一像素上的色光 $s_i(\lambda)$ 被转换为颜色矢量 (R_i, G_i, B_i) ， $i=1, 2, \dots$ ， i = 屏幕像素数目。颜色信号经过编码后被发射，电视机则通过解码得到 (R_i, G_i, B_i) ， $i=1, 2, \dots$ 。彩色显示屏上每个像素点上有红、绿、蓝三种发光点，电子发射到蓝点上，蓝点就发出蓝光。每个点受到电子打击的强度不同，发光强度就不同。由于人眼视细胞数量有限，因而分辨率有限，当人眼距离屏幕达到一定距离时，它就不能区分每个像素中的三点，于是相应一个像素产生一种色觉。但是当人眼接近屏幕时，他就会发现屏幕上每个点只有一种颜色，即分别是红色、绿色或蓝色。

继赫尔姆霍兹的研究之后，物理学家麦克斯韦（Maxwell, 1831—1879年）于19世纪60年代研究了三原色理论，发现三原色的选择可以不同，适当的三原色可以增加所能配出颜色的范围。为了表达某些颜色，比如 (R', G', B') ，红色分量需要是负的。在 (R, G, B) 一边加上适当的颜色 $(-R^*, 0, 0)$ ，另一边加上适当的颜色 $(0, G^*, B^*)$ ，那么就有 $(R', G', B') = (R + (-R^*), G + G^*, B + B^*)$ 。另外他还提出用色调、饱和度、明度表示一种颜色，这三者分别反映色光的波长、彩色相对白色的比例以及色光的强度。麦克斯韦的研究为现代色度学作出了巨大贡献。

1.3 紫外线、红外线、光谱灵敏度

1.3.1 紫 外 线

(1) 紫外线的基本介绍 紫外线（Ultraviolet rays）指的是电磁波谱中波长从 $10 \sim$

400nm 辐射的总称,且不能引起人们的视觉。1800年,英国物理学家霍胥尔在三棱镜光谱的红光端外发现了不可见的热射线——红外线。德国物理学家里特(Johann Wilhelm Ritter, 1776—1810年)对这一发现极感兴趣,他坚信物理学事物具有两极对称性,认为既然可见光谱红端之外有不可见的辐射,那么在可见光谱的紫端之外也一定可以发现不可见的辐射。1801年德国物理学家里特发现在日光光谱的紫端外侧一段能够使含有溴化银的照相底片感光,因而发现了紫外线的存在。紫外线可以用来灭菌,过多的紫外线进入体内会导致皮肤癌。

紫外线位于光谱中紫色光之外,为不可见光。它能使许多物质激发荧光,很容易让照相底片感光。当紫外线照射人体时,能促使人体合成维生素D,以防止患佝偻病,经常让小孩晒太阳就是这个道理。紫外线还具有杀菌作用,医院里的病房就利用紫外线消毒。但过强的紫外线会伤害人体,应注意防护。玻璃、大气中的氧气和高空中的臭氧层,对紫外线都有很强的吸收作用,能吸收掉太阳光中的大部分紫外线,因此能保护地球上的生物,使它们免受紫外线伤害。

(2) 紫外线的生理效应 当紫外线照射人体或生物体后,会发生生理变化。不同波长的紫外线的生理作用不同。根据紫外线对生物作用,在医疗上把紫外线划分为不同的波段:黑斑紫外线在320~400nm波段;红斑紫外线或保健射线在280~320nm波段;灭菌紫外线在200~320nm波段;致臭氧紫外线在180~200nm波段。

紫外线的致黑斑作用:波长在320~400nm的紫外线又叫长波紫外线。该波段的紫外线生物作用较弱,但它对人体照射后会使得皮肤变黑,皮肤有明显的色素沉着,这就是紫外线的黑斑作用。该波段的紫外线可强烈地刺激皮肤,使皮肤新陈代谢加快、皮肤生长力加强,使皮肤加厚。长波紫外线是治疗皮肤病的重要波段,如牛皮癣、白癜风等疾病。

(3) 紫外线的主要危害 紫外线照射时,眼睛受伤的程度和时间成正比,与照射源的距离平方成反比,并和光线的投射角度有关。

紫外线强烈作用于皮肤时,可发生光照性皮炎,皮肤上出现红斑、痒、水疱、水肿、眼痛、流泪等,严重的还可引起皮肤癌。

紫外线作用于中枢神经系统,可出现头痛、头晕、体温升高等。作用于眼部,可引起结膜炎、角膜炎,称为光照性眼炎,还有可能诱发白内障,在焊接过程中产生的紫外线会使焊工患上电光性眼炎(可以治愈)。

虽然紫外线在一年四季都存在,冬季太阳光显得比较温和且北方多雾,但紫外线仅仅比夏天弱约20%,仍然会对人体皮肤和眼睛等部位造成很大危害,所以冬季仍需避免紫外线照射。长期紫外线照射最易造成皮肤产生各种色斑。所以,即使是在寒冷的冬天,户外活动时也应涂抹隔离霜或防晒霜。当然,SPF指数在15就足够了。如果是外出进行滑雪运动或在雪地里长时间停留时,最好还是戴上护眼镜,以防止紫外线和雪地强白光对眼睛的刺激。

大量化学物质破坏了大气层中的臭氧层,破坏了这道保护人类健康的天然屏障。据国家气象中心提供的报告显示,1979年以来中国大气臭氧层总量逐年减少,在20年间臭氧层减少了14%。而臭氧层每递减1%,皮肤癌的发病率就会上升3%。北京市气象局发布了北京市的紫外线指数,以帮助人们适当预防紫外线辐射。

北京市气象局提醒人们当紫外线为最弱(0~2级)时对人体无太大影响,外出时戴

上太阳帽即可；紫外线达到 3~4 级时，外出时除戴上太阳帽外还需备太阳镜，并在身上涂上防晒霜，以避免皮肤受到太阳辐射的危害；当紫外线强度达到 5~6 级时，外出时必须选择在阴凉处行走；紫外线达 7~9 级时，在上午 10 时至下午 4 时这段时间最好不要到沙滩场地上晒太阳；当紫外线指数大于等于 10 级时，应尽量避免外出，因为此时的紫外线辐射极具有伤害性。

紫外线具有一定的杀菌作用，但过度照射紫外线对人体是有害的。由于人工化学物质 CFC（氟利昂）等持续破坏着臭氧层，紫外线对人类的威胁日益增加。即使在阴天紫外线的含量也高达晴天时的 90%。为了给孩子们打造更加美好的生活环境，我们强烈建议家里对紫外线进行遮蔽。根据最新知识，我们体内一天所需的维生素 D，使脸部和手暴露在紫外线下 10 分钟就可以满足，所以我们日常出门照射的已经足够了。

紫外线对健康的危害：免疫功能下降；对遗传因子的深度伤害；皮肤癌、白内障发病率增加；后背和手脚的色斑癌的发病率增加；造成皮肤暗沉、老化、斑点、皱纹；癌前病变状态的日光角化症的增加；长期照射短波紫外线可能会引起牙齿痛；紫外线也会促使家具及陈设加速老化褪色。

1.3.2 红 外 线

(1) 红外线的基本介绍 红外线 (Infrared ray) 是波长介于微波与可见光之间的电磁波，波长在 750nm~1mm，比红光长的非可见光。我们把红光之外的辐射叫做红外线（紫光之外是紫外线），肉眼不可见。

高于绝对零度（-273.15℃）的物质都可以产生红外线，现代物理学称之为热射线。其含热能，太阳的热量主要通过红外线传到地球。医用红外线可分为两类：近红外线与远红外线。

(2) 红外线的发展历史 公元 1800 年英国科学家威廉·赫歇尔 (Wilhelm Herschel, 1738—1822 年) 发现太阳光中的红光外侧所围绕着一一种用肉眼无法看见的光源，波长介于 5.6~1000 μm 的远红外线，经过这种光源照射时，会对有机体产生放射、穿透、吸收、共振的效果。美国太空总部 (NASA) 研究报告指出，在红外线内，对人体有帮助的是 4~14 μm 的远红外线，从内部发热，从体内作用促进微血管的扩张，使血液循环顺畅，达到新陈代谢的目的，进而增加身体的免疫力及治愈率。但是根据黑体辐射理论，一般的材料要产生足够强度的远红外线并不容易，通常必须借助特殊物质作为能量的转换，将它所吸收的热量经由内部分子的振动再将较长波长的远红外线释放出来。

(3) 红外线的特点 红外线波长较长，波长按由长到短顺序，包括无线电、微波、红外线、可见光，给人的感觉是热的感觉，产生的效应是热效应，那么红外线在穿透的过程中穿透达到的范围是在一个什么样的层次？如果红外线能穿透到原子、分子内部，那么会引起原子、分子的膨大而导致原子、分子的解体吗？而事实上是红外线频率较低，能量不够，远远达不到原子、分子解体的效果。因此，红外线只能穿透到原子分子的间隙中，而不能穿透到原子、分子的内部，由于红外线只能穿透到原子、分子的间隙，会使原子、分子的振动加快，间距拉大，即增加热运动能量。从宏观上看，当物质在融化、沸腾、气化时，物质的本质（原子、分子本身）并没有发生改变，这就是红外线的热效应。

因此我们可以利用红外线的这种激发机制来烧烤食物，使有机高分子发生变性，但不

能利用红外线产生光电效应，更不能使原子核内部发生改变。同样的道理，我们不能用无线电波来烧烤食物，无线电波的波长实在太长无法穿透到有机高分子间隙更不用说使其变性达到食物烤熟的目的。

通过上述我们知道：波长越短，频率越高，能量越大的波穿透达到的范围越大；波长越长，频率越低，能量越小的波穿透达到的范围越小。

(4) 红外线的应用 在室外下物体所发出的热辐射波段，穿透云雾能力比可见光强，在通讯、探测、医疗、军事等方面有广泛的用途，俗称红外光。真正的红外线夜视仪是光电倍增管成像，与望远镜原理完全不同，白天不能使用，价格昂贵且需外部电源才能工作。

医用治疗红外线主要为近红外线（NIR，IR-A DIN）、短波红外线（SWIR，IR-B DIN）、中波长红外线（MWIR，IR-C DIN）、长波长红外线（LWIR，IR-C DIN）。近红外线或称短波红外线，波长 $0.76\sim 1.5\mu\text{m}$ ，穿入人体组织较深，约 $5\sim 10\text{mm}$ ；远红外线或称长波红外线，波长 $1.5\sim 400\mu\text{m}$ ，多被表层皮肤吸收，穿透组织深度小于 2mm 。

1.3.3 光谱灵敏度

光谱灵敏度（Spectral sensitivity）是作为信号频率或波长的检测函数，光或其他信号的相对效率。

在视觉神经科学中，光谱灵敏度用于描述眼睛视网膜中视锥细胞和视杆细胞中光色素的不同特征。人眼知觉颜色的过程为：对包含不同波长的光经过人眼各部分到达后背的视网膜上，被视网膜上的视锥细胞吸收，形成了三种原始的颜色感知。人眼中三种视锥细胞将照射到其上面的所有波长的光谱统一融合成为三种信号：红色感知（L）、绿色感知（M）和蓝色感知（S）锥细胞来适应明视觉，并且它们对不同波长的光的敏感性不同，人眼的视锥细胞光谱灵敏度曲线如图 1-2。

现已证明，在日光条件下人眼的最大光谱灵敏度是在 555nm 的波长处，而在夜间，峰值移动到 507nm 。然而，视网膜的视杆细胞和视锥细胞的反应非常依赖于对光线的非线性响应，这使得从实验数据分析其光谱灵敏度变得复杂。尽管存在这些复杂性，但是光谱灵敏度在描述色觉的许多性质时非常有用。

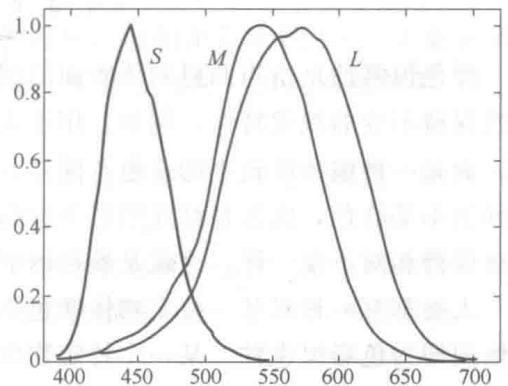


图 1-2 人眼的光谱灵敏度曲线

在摄影中，电影和传感器通常用光谱灵敏度来描述，以补充描述其响应度的特征曲线。创建相机光谱灵敏度数据库并分析其空间。对于 X 射线胶片，光谱灵敏度被选择为适合于响应 X 射线的荧光粉，而不是与人类视觉有关。

光电器件所产生的光电流不仅与被照表面吸收的光通量有关系，而且还与照射光的波长有关。在正常条件下，对于同一波长的光，光电器件所产生的光电流（或电压）与被照表面吸收的光通量成正比；但它对不同波长的光的响应值不同。如果不考虑照射光的波长，则单位辐射通量引起的光电流的大小称为响应率或者积分灵敏度，简称灵敏度。如果

仅对单色光而言，其响应灵敏度则被称为光谱灵敏度。

对某一单色光，当被测光电器件表面所吸收的光通量为 $\phi(\lambda)$ ，该器件由此而产生的光电流为 $i(\lambda)$ ， $i(\lambda)$ 与照射到该器件表面上的光通量 $\phi(\lambda)$ 成正比，其比例值即为光灵敏度，可以用 $S(\lambda)$ 表示：

$$S(\lambda) = \frac{i(\lambda)}{\phi(\lambda)} \quad (1-1)$$

各种光电器件的光谱灵敏度分布情况与它们采用的材料有关，即各种光电器件的光谱

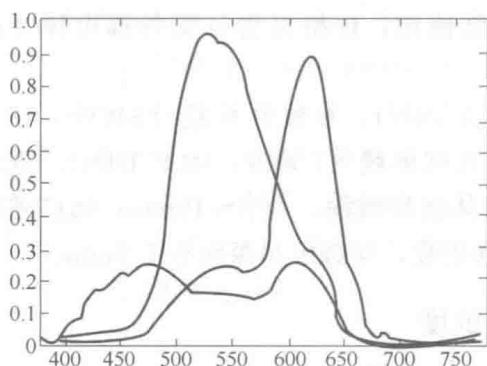


图 1-3 某品牌相机的光谱灵敏度曲线

灵敏度的分布有所不同。通常定义当光谱灵敏度 $S(\lambda)$ 的数值下降至灵敏度最大值 S_m 的 $1/10$ 时所对应的波长，为光电器件的探测极限波长， S_m 所对应的波长值为光电器件的峰值波长。因此，测定出光电器件光谱灵敏度的分布曲线，就可确定其器件探测光波的工作范围，即该器件的探测范围，这在实际应用中具有重要的指导意义。

图 1-3 表示了某相机光谱的响应曲线，可见其与人眼的响应曲线有较大的区别。

1.4 颜色恒常性、色彩对比

1.4.1 颜色恒常性

颜色恒常性是指当照射物体表面的颜色光发生变化时，人们对该物体表面颜色的知觉仍然保持不变的视觉特性。例如，用不太饱和的黄色光照射蓝色色盘，我们看到的不是灰色，而是一种饱和度较小的蓝色。同样，用不太饱和的红色光照射白色的物体表面，我们看到的不是红色，而是在红光照射下的白色。正如室内的家具在不同的灯光照射下，它的颜色保持相对不变一样，这就是颜色的恒常性。

人类都有一种对某一特定物体颜色不因光源或者外界环境变化而改变的心理倾向，这种倾向即为色彩恒常性。某一个特定物体，由于环境（尤其特指光照环境）的变化，该物体表面的反射光谱将会有所不同。人类的视觉识别系统能够识别出这种变化，并能够判断出该变化是由光照环境的变化而产生的。当光照变化在一定范围内变动时，人类识别机制会在这一变化范围内认为该物体表面颜色是恒定不变的。

颜色知觉的恒常性与人的生活经验密切相关。一个由于眼疾从未见过红旗的人，在痊愈后的光亮中初次见到红旗，可能确定它是红色的。但是如果他在黑暗处初次见到红旗，就不一定能把它确定为红色的。因此，颜色恒常性是指人对物体颜色的知觉，与人的知识经验、心理倾向有关，不是指物体本身颜色的恒定不变。

1.4.2 色彩对比

色彩对比，主要指色彩的冷暖对比。画面从色调上划分，可分为冷调、暖调和中性色

调两大类。红、橙、黄为暖调，青、蓝、紫为冷调，绿、黑白、灰色为中间调，不冷也不暖。色彩对比的规律是：在暖色调的环境中，冷色调的主体醒目，在冷调的环境中，暖调主体最突出。色彩对比除了冷暖对比之外，还有色别对比、明度对比、饱和度对比等。

在摄影中，色彩对比有色相对比、明度对比、纯度对比、补色对比、冷暖对比、面积对比、黑白灰对比、同时对比、空间效果和空间混合等的对比等。

两种以上色彩组合后，由于色相差别而形成的色彩对比效果称为色相对比。它是色彩对比的关键因素，其对比强弱程度取决于色相之间在色相环上的距离（角度），距离（角度）越小对比越弱，反之则对比越强。

色彩对比的基本类型有以下几种：

（1）零度对比

① 无彩色对比。无彩色对比虽然无色相，但它们的组合在实用方面很有价值。如黑与白、黑与灰、中灰与浅灰等。对比效果感觉大方、庄重、高雅而富有现代感，但也易产生过于素净的单调感。

② 无彩色与有彩色对比。如黑与红、灰与紫，白与黄、白与灰和蓝等。对比效果感觉既大方又活泼，无彩色面积大时，偏于高雅、庄重，有彩色面积大时则活泼感加强。

③ 同类色相对比。一种色相的不同明度或不同纯度变化的对比，俗称同类色组合。如蓝与浅蓝（蓝+白）色对比，粉绿（绿+白）与墨绿（绿+黑）色等对比。对比效果统一、文静、雅致、含蓄、稳重，但也易产生单调、呆板的弊病。

④ 无彩色与同类色相。比如白与深蓝和浅蓝、黑与桔和咖啡色等对比，其效果综合了②和③类型的优点。感觉既有一定层次，又显大方、活泼、稳定。

（2）调和对比

① 邻近色相对比。色相环上相邻的二至三色对比，色相距离大约 30° ，为弱对比类型。如红橙与黄橙色对比等。效果感觉柔和、和谐、雅致、文静，但也感觉单调、模糊、乏味、无力，必须调节明度差来加强效果。

② 类似色相对比。色相对比距离约 60° ，为较弱对比类型，如红与黄橙色对比等。效果较丰富、活泼，但又不失统一、雅致、和谐的感觉。

③ 中度色相对比。色相对比距离约 90° ，为中度对比类型，如黄与绿色对比等，效果明快、活泼、饱满、使人兴奋，感觉有兴趣，对比既有相当力度，又不失调和之感。

1.5 色彩缺失

通常，色盲是不能辨别某些颜色或全部颜色，色弱则是指辨别颜色的能力降低。色盲以红绿色盲为多见，红色盲者不能分辨红光，绿色盲者不能感受绿色，这对生活和工作无疑会带来影响。色弱主要是辨色功能低下，比色盲的表现程度轻，也分红色弱、绿色弱等。色弱者虽然能看到正常人所看到的颜色，但辨认颜色的能力迟缓或很差，在光线较暗时，有的几乎和色盲差不多或表现为色觉疲劳。色盲与色弱多因先天性因素所导致。

1.5.1 色盲的发现

18 世纪英国著名的化学家兼物理学家约翰·道尔顿（John Dalton，1766—1844 年），

在圣诞节前夕买了一件礼物——一双“棕灰色”的袜子送给妈妈。妈妈看到袜子后，感到袜子的颜色过于鲜艳，就对道尔顿说：“你买的这双樱桃红色的袜子，让我怎么穿呢？”道尔顿感到非常奇怪，袜子明明是棕灰色的，为什么妈妈说是樱桃红色的呢？疑惑不解的道尔顿又去问弟弟和周围的人，除了弟弟与自己的看法相同以外，被问的其他人都说袜子是樱桃红色的。道尔顿对这件小事没有轻易地放过，他经过认真的分析比较，发现他和弟弟的色觉与别人不同，原来自己和弟弟都是色盲。道尔顿虽然不是生物学家和医学家，却成了第一个发现色盲症的人，也是第一个被发现的色盲症患者。为此他写了篇论文《论色盲》，成为世界上第一个提出色盲问题的人。后来，人们为了纪念他，又把色盲症称为道尔顿症。

1.5.2 先天性色盲或色弱

人类的视网膜有两种细胞，一种为杆状细胞，负责夜间视力；另一种为锥状细胞，负责白昼视力和色觉。同时，锥状细胞有三种色觉细胞，分别是感红、感绿和感蓝色觉细胞，这些细胞90%以上分布在眼底“黄斑部”。经由这三种色觉细胞的交互作用，可感受由深靛蓝紫色到鲜红色各种不同的颜色。

当然，颜色的感受及分辨需要由眼睛和大脑复杂的光化学反应才能产生。锥状细胞的色素形成则是由遗传基因来控制，当遗传基因发生异常时，就会丧失或改变某一种或所有的色觉，形成所谓的“部分色盲”或“全色盲”。这种因为先天基因异常引起的色盲称为先天性色盲。

先天性色盲或色弱是遗传性疾病，且与性别有关。临床调查显示，男性色盲占4.9%，女性色盲仅占0.18%，男性患者人数大大超过女性，这是因为色盲遗传基因存在于性染色体的X染色体上，而且采取伴性隐性遗传方式。通常男性表现为色盲，而女性却为外表正常的色盲基因携带者，因此色盲患者男性多于女性。

1.5.3 后天色盲或色弱

少数色觉异常亦见于后天性者，后天性色盲的发生原因可能与视网膜、视神经病变有关，例如外伤、青光眼。这类眼病引起的色觉障碍程度较轻，且随着原发性眼病的恢复而消失，所以多未引起患者的注意。但是，后天色盲目前尚缺乏特效治疗，可以针对性地戴用红或绿色软接触眼镜来矫正。有人试用针灸或中药治疗，据称有一定效果，但仍处于临床研究阶段。