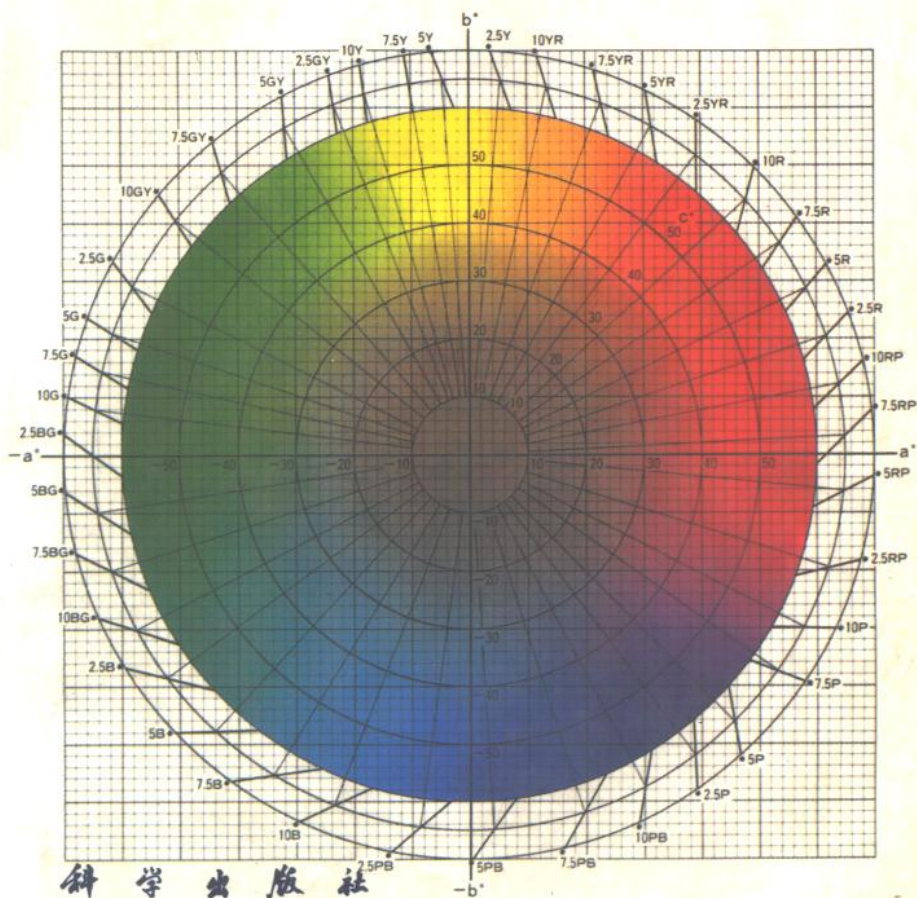


李 亨 著

颜色技术原理 及其应用



颜色技术原理及其应用

李 亨 著



科学出版社

1994

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

本书的目的是要在颜色技术原理和应用之间构筑一座桥梁,既要有一定的理论深度,又要强调实际应用,并尽量反映当前国内外在颜色技术领域取得的一些最新成果。在颜色技术原理方面介绍了光和施照体、颜色术语、颜色材料、颜色感知的心理物理过程、色度学等;在应用方面介绍了 CIE 色品图的应用、颜色测量、颜色技术在彩色摄影和彩色电视中的应用、计算机配色和色调整等;书中关于色序系统的较全面的介绍,既有重要的理论价值又有实用价值。在介绍颜色技术的科学原理的同时,作者也介绍了颜色在美学和艺术领域的应用。

本书对于从事颜色科学研究和技术应用的科学工作者、艺术家、工程技术人员及大专院校有关专业的师生将会是一部有用的工具书。

颜色技术原理及其应用

李 亨 著

责任编辑 巴建芬 张邦固

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994年4月第一版

开本: 850×1168 1/32

1994年4月第一次印刷

印张: 8 1/2 插页: 1

印数: 1—1270

字数: 219 000

ISBN 7-03-003611-5/O·640

定价: 11.00 元

82.23
3

序

作者编著本书的目的是在颜色技术的原理与应用之间构筑一座桥梁,为从事颜色科学和技术研究及应用的科学家、艺术家、工程技术人员和大专院校有关专业的师生提供一部有参考价值和使用价值的工具书。为此要求本书的内容既要有一定的理论深度,又要特别强调实际的应用,同时还要反映当代颜色技术领域的一些最新研究成果,为读者进一步研究和应用颜色技术提供一定的基础。

本书的主要特点:

1. 对于人感知颜色的全过程明确地划分为颜色刺激、颜色界、神经响应、颜色感知等四个阶段,以澄清目前人们在日常生活中的、甚至在从事颜色技术的研究和应用的专业人员中存在的一些模糊认识。作者在书中多次强调了颜色刺激与颜色感知的区别,以加深人们的理解。

2. 色度学是颜色技术的主要内容之一,但是对于色度学这一名词的定义至今尚不完全准确。作者在这里明确定义色度学为对于颜色刺激进行测量、计算和评价的学科。目前介绍色度学的书籍已较多,作者在介绍这一部分内容时采用了与其它书籍不同的编排方法,即将色度学的基本原理放在一章内作一较简单的介绍,而对于色度学的核心内容,即 CIE 色品图的应用及颜色刺激的测量等放到其它章节作较全面的介绍以突出颜色技术的应用。

3. 本书对于颜色刺激的测量作了比较全面的介绍,既介绍了常用的实验室测色技术,又介绍了对工业产品颜色的在线测量,同时也介绍了对与颜色有关的物体表面其它特性的测量。

近年来荧光材料获得了广泛的应用,本书尽量全面地介绍了目前有关荧光材料的测量方法。

4. 对于色序系统的研究具有非常重要的意义，它和建立未来的国际颜色标准紧密相关。作者在这里特别强调按主观色表属性定义的色序系统和由实际色样（色谱）代表的这一系统之间的区别。目前最有代表性的色序系统是美国的孟塞尔颜色系统和瑞典的自然色系统，未来的颜色国际标准很可能以这两个系统为基础。本书对于这两个系统以及它们之间的相互关系进行了比较全面的讨论，同时对于其它有一定影响的色序系统也进行了介绍。目前在这方面国内还没有比较全面的介绍资料，作者希望这里的讨论对于建立中国颜色体系的研究能有所帮助。

5. 在本书的有关章节介绍了我国科学工作者及本书作者在颜色科学领域所取得的一些具有国际水平的成绩，例如我国国家色度测量基准的建立、我国彩色电视白场标准的建立及彩色监视器在颜色科学研究中的应用等。

作者愿把这本书献给我国广大的颜色科学工作者、艺术家和工程技术人员，为我国颜色科学技术的发展尽一点绵薄之力。

限于本人的学识水平，错误和不当之处在所难免，望广大读者给予批评指正。

本书得到中国建筑科学研究院物理研究所所长肖辉乾教授和中国计量科学研究院陈遐举研究员的热情指导，还得到北京市技术监督局、华北国家计量测试中心和北京市计量科学研究所的同事们的大力支持，作者在这里一并表示感谢

李亨

于北京市计量科学研究所

1992年2月6日

目 录

第一章 颜色概论	(1)
§ 1.1 颜色科学发展简介.....	(1)
§ 1.2 颜色的视觉感知过程.....	(3)
§ 1.3 颜色术语.....	(8)
第二章 光和施照体	(15)
§ 2.1 光和色.....	(15)
§ 2.2 普朗克辐射体.....	(16)
§ 2.3 CIE 标准施照体.....	(18)
§ 2.4 日光与太阳模拟器.....	(19)
第三章 非荧光颜色材料	(22)
§ 3.1 颜料和染料.....	(22)
§ 3.2 不透明材料.....	(22)
§ 3.3 透明材料.....	(27)
§ 3.4 同色异谱与颜色匹配.....	(28)
第四章 荧光材料	(30)
§ 4.1 概述.....	(30)
§ 4.2 荧光增白剂.....	(30)
§ 4.3 荧光染料.....	(31)
§ 4.4 有关术语.....	(32)
第五章 颜色观察	(35)
§ 5.1 概述.....	(35)
§ 5.2 加法法混色和减法法混色.....	(36)
§ 5.3 平均法混色.....	(37)
§ 5.4 原色和颜色环.....	(38)
§ 5.5 色适应与色觉恒常.....	(39)

§ 5.6	适应水平·····	(41)
§ 5.7	记忆颜色·····	(41)
§ 5.8	孤立色·····	(42)
§ 5.9	后像互补色对·····	(43)
§ 5.10	同时对比·····	(43)
§ 5.11	边缘对比·····	(44)
§ 5.12	同化(反转对比)·····	(46)
§ 5.13	颜色的表现力·····	(46)
第六章	色度学·····	(50)
§ 6.1	概论·····	(50)
§ 6.2	色品图·····	(53)
§ 6.3	CIE 色品图·····	(57)
§ 6.4	CIE 主波长和纯度·····	(66)
§ 6.5	近似均匀的 CIE 色品图·····	(68)
§ 6.6	相对色度学·····	(70)
第七章	CIE 色品图的应用·····	(74)
§ 7.1	光的色名·····	(74)
§ 7.2	互补色对·····	(75)
§ 7.3	混光的颜色·····	(77)
§ 7.4	所谓“白光”·····	(78)
§ 7.5	材料的色域(颜料、染料、油墨等)·····	(79)
§ 7.6	荧光颜料和染料·····	(83)
§ 7.7	虹彩色: 液晶·····	(83)
§ 7.8	颜料混合·····	(86)
§ 7.9	电视、点彩画、四色印刷及摄影中的彩色图像 ·····	(88)
§ 7.10	色差·····	(91)
§ 7.11	高对比度颜色·····	(95)
§ 7.12	同色异谱刺激·····	(97)
§ 7.13	同色异谱照明·····	(100)

§ 7.14	显色性	(101)
§ 7.15	色温	(103)
第八章	颜色测量	(107)
§ 8.1	概述	(107)
§ 8.2	中国国家色度基准	(108)
§ 8.3	光谱光度测色法	(110)
§ 8.4	荧光材料的测量	(115)
§ 8.5	刺激值直读测色法	(123)
§ 8.6	三色密度法	(124)
§ 8.7	目视测色法	(126)
§ 8.8	我国彩色电视白场标准的建立	(130)
§ 8.9	半导体颜色传感器及其在色温测量中的应用	(131)
§ 8.10	颜色的在线测量	(133)
§ 8.11	白度测量	(136)
§ 8.12	光泽度测量	(141)
§ 8.13	朦胧度测量	(143)
第九章	色序系统	(145)
§ 9.1	概述	(145)
§ 9.2	CIE 颜色空间	(149)
§ 9.3	CIE LUV 和 CIE LAB 颜色系统	(150)
§ 9.4	孟塞尔系统	(154)
§ 9.5	自然色系统(NCS)	(161)
§ 9.6	孟塞尔系统与自然色系统的比较	(167)
§ 9.7	奥斯瓦尔德颜色系统与颜色和谐手册	(174)
§ 9.8	德国 DIN 系统与 DIN-6164 标准色卡	(177)
§ 9.9	颜色体(Coloroid) 系统	(180)
§ 9.10	美国光学学会-均匀色系统(OSA-UCS)	(181)

§ 9.11	亨特 Lab 系统	(183)
§ 9.12	日本实用颜色坐标系统和色彩大全 5000	(183)
§ 9.13	颜色样品系统与色谱	(186)
§ 9.14	彩色监视器在颜色研究中的应用	(189)
§ 9.15	关于色序系统的评述	(192)
第十章	颜色技术在彩色摄影中的应用	(195)
§ 10.1	减色法混色原理在彩色摄影中的应用	(195)
§ 10.2	反射型彩色像片	(202)
§ 10.3	利用彩色负像印制正像	(205)
第十一章	颜色技术在彩色电视摄像和显示装置中的应用	(210)
§ 11.1	电子摄像机	(210)
§ 11.2	彩色电视的显示装置	(217)
第十二章	配色和色调调整	(225)
§ 12.1	概述	(225)
§ 12.2	计算机配色	(226)
§ 12.3	透明介质和混浊介质理论	(229)
§ 12.4	配色和色调调整的计算方法	(242)
§ 12.5	先进技术简介	(249)
§ 12.6	特殊问题	(254)
结束语		(257)
参考文献		(259)

第一章 颜色概论

§ 1.1 颜色科学发展简介

我们中华民族有着光辉灿烂的历史文化，早在旧石器时代晚期的中国古代艺术中就可以发现祖先对于色彩的运用。到了春秋时期已形成了关于颜色的一些基本概念。例如《礼记》中说“设六色，东方青、南方赤、西方白、北方黑、上玄下黄。”这里和方位联系在一起的六种颜色，与今天我们所公认的六种基本色有着惊人的相似。现代颜色理论定义的六种基本色，有彩色是四种：黄、红、蓝、绿，无彩色是两种：黑和白。

自古以来有关颜色感知现象的科学原理吸引了众多科学家、艺术家、音乐家、作家等的注意力。伟大的物理学家牛顿在《光学：或关于光的反射、折射、弯曲和颜色的论文》(1721)中明确指出：“光线并没有颜色。……只有某种能激起这样或那样颜色感觉的本领或倾向”。“在光线里面它们不过是把这样或那样的运动传播到感觉中枢中去，而感觉中枢则以颜色形式再现这些运动的许多感觉”。简而言之，光线没有颜色，它只是某种功率分布，而颜色则是人对这种功率分布的心理响应。

长期以来人们一直都在研究用各种不同的方法对颜色的感知属性进行分类。德国生理学家 E. 赫林(Hering, 1834—1918)建立了他的对抗色理论，明确指出对颜色的研究属于现象学范畴，我们唯一关心的是颜色本身，而不考虑引起颜色感知的物理原因。

国际照明委员会(CIE)依据匹配一个颜色时混合三原色的相对量建立了 CIE 色度学参数(1931)，这些参数可以用于颜色标注，这种方法获得了广泛的应用。当几束色光混合时，可以用 CIE 色品图的图解法预计混合光的颜色；当混合颜料或颜色膜随时间老

化时,可以用色品图了解它们的色调和纯度的变化;图解法还对选择加法互补色提供了方便。更重要的是 CIE 色品图已成为联系各种色序系统的桥梁,因为许多色序系统的颜色标注可以通过换算为 CIE 的参数而互相联系起来。CIE 的三刺激值和色差公式广泛地应用在颜色测量的仪器中。

美国的美术教师 A. H. 孟塞尔 (Munsell, 1858—1918) 发展了以他的名字命名的色序系统,即孟塞尔系统。他指出:“音乐按照音符的音高、强度和节拍建立了自己的系统……颜色也应该按照人的色感知,即色调、光值和彩度建立自己的系统。”目前,孟塞尔系统已成为颜色识别的重要工具。

自本世纪 60 年代末以来颜色科学研究中的一个重要发展,是建立了瑞典颜色标准——自然色系统(NCS),它以赫林的理论为基础。NCS 的重要意义在于任何一个具有正常色视觉的人,都可以不必凭借颜色样品进行比较或用仪器测量而识别颜色。

此外,还有其它一些具有一定影响的色序系统,如奥斯瓦尔德系统、德国 DIN 系统、美国光学学会均匀色系统等等。但是,目前还没有一个色序系统完全适用于描述发光色。

颜色作为一门独立的学科已被广泛地用于艺术创作、工程设计、工业生产等各个领域。在实际应用中,经常需要将颜色样品和参考色样进行比较以对颜色样品进行标注,为此孟塞尔对他的系统仔细制备了许多颜色样品,相邻样品之间接近似等间隔的色调、光值和彩度变化,这被称为孟塞尔图册。其它获得广泛应用的参考色样还有 NCS 色谱、颜色和谐手册、DIN 色卡等等。图册中色样都被赋予不同的标注,因此与这些色样相匹配的颜色也就具有了相应的标注。这使得人们进行有关颜色信息的交流变得非常方便。

在日常生活中经常对不同的颜色使用相同的名称,这容易引起混乱,因此,美国颜色交流协会 (ISCC) 和原美国国家标准局 (NBS) 共同编制了 ISCC-NBS 色名词典,以统一颜色的命名。

颜色视觉的研究有着广阔的前景。它包括解剖学(由眼到大

脑的路径)、生理学(化学和电的机制)、物理学(由光源到达视网膜的光的传播)、心理学(视觉系统的全部响应)以及美学(和谐、美感)等,这里还有许多问题有待探讨。

对于设计和艺术领域,一些特定的心理学问题非常引人注目,如色彩适应、色觉恒常、后像、同时对比、同化等等,许多艺术家对此都非常熟悉,它们是颜色研究的基本问题之一。

我国对于现代颜色科学的研究起步较晚,目前正致力于建立符合中国人色视觉特性的中国颜色体系。

§ 1.2 颜色的视觉感知过程

人们要通过眼睛来感知五颜六色的世界,但有趣的是当人闭上眼时也能感知颜色,大概每个人都有过这种经历,例如做梦。可见颜色感知并不是单纯的物理或生理的过程,它还是心理等其它作用的过程。在进行深入讨论之前有必要简单介绍一下眼睛的构造,如图 1.1 所示。

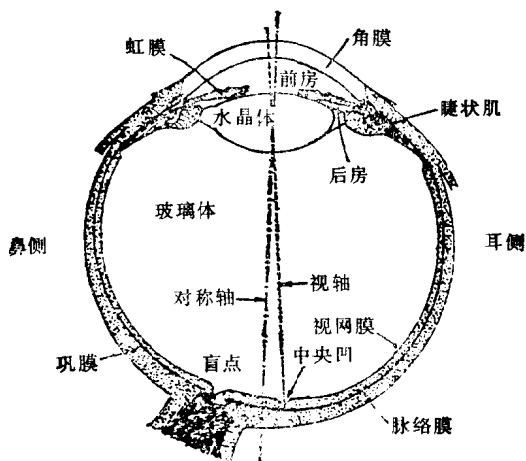


图 1.1 眼睛构造示意

视网膜是 10 层由神经细胞元、神经网络等组成的薄膜,光线

在被感光细胞接收以前至少必须穿透5层膜。被接收的光将引起感光细胞的某些化学变化,产生电信号。这个信号经过视神经传输到大脑的视觉中心,在大脑中即呈现所见物体的外貌,例如位置、形状、大小、颜色、表面质地、透明或不透明等等。在相邻的神经细胞之间存在着相互影响,使得落在视网膜上一部分的光会影响落在其上另一部分的光,这可用于解释颜色的同时对对比等现象。

在视网膜中存在两类感光细胞,即柱状细胞和锥状细胞。柱状细胞对光的亮暗敏感,甚至对非常暗的光也能响应。锥状细胞对颜色敏感,但是在非常低的照明水平时人不能识别颜色,因为锥状细胞的灵敏度不够高。这时的照明水平称为暗视觉水平(低于 10^{-3}cd/m^2 的亮度水平)。

当照明水平足够高时,锥状细胞产生响应,而柱状细胞的灵敏度随着照度增加逐渐趋于饱和,这时候的照明水平称为明视觉水平(几个 cd/m^2 亮度水平以上)。根据扬-亥姆霍兹(Young-Helmholtz)的三色理论,存在三种锥状细胞,即敏红、敏绿、敏蓝细胞。在明视觉照明水平,它们使人感知到所有的有彩色和无彩色。

在明视觉和暗视觉之间还存在一段过渡范围,在此范围内柱状细胞和锥状细胞都产生响应,它称为中间视觉。

当眼睛注视一个物体时,物体像落在视网膜表面的一个凹陷部位,即中心黄斑或中央凹。它和周围的视网膜不同,在这里光线在到达感光细胞之前穿过的膜层很薄。这个部位的细胞都是锥状细胞,其视场角为 1° 。这里的锥状细胞很密集,约有25000个,并且较之其它部位的锥状细胞长一些。在中央凹的周围,即视场角为 2° 或更大的范围内还存在柱状细胞,但是在小于 10° 的范围内柱状细胞较少。因此在明视觉范围内中央凹是视觉敏锐度最高的部位。当我们注视物体细节时,中央凹决定视觉定位轴的位置。

下面进一步讨论色视觉的过程。

照明体可以是自发光光源,也可以是被照明物体反射或透射的光。光是没有颜色的,它只是电磁波在可见辐射区的光谱功率

分布。在色度学中 CIE 推荐了三种照明体,即 A, C, D_{85} 。

被照明物体对不同波长光反射或透射的能力是物体的一种物理性质。当光线进入瞳孔并成像于视网膜上时,就已经不是物理过程而是生理过程了。

光对人眼的作用是一种刺激,它刺激我们的神经系统产生视觉反应,我们把向眼睛辐射光的照明体及所有色料,如颜料、染料或颜色样品等看成是色刺激源,是使观察者产生色感知的刺激源。色刺激是一个物理的过程,它并不是颜色,因此可以用仪器对其进行物理测量。而颜色是被眼睛接收到的色刺激经大脑翻译所产生的结果。色度学的测量并不能测量颜色而只能测量颜色刺激。因为相同的颜色刺激在不同的背景上往往会产生不同的色感知,即被我们感知成不同的颜色,但是如果用仪器测量它们时,得到的只能是相同的结果。

关于色刺激加法混合的格拉斯曼(Grassman, 1856)定律表明任何三原色刺激都可用于颜色匹配,并且不同原色刺激的组合可用数学方法进行相互转换。人的色视觉可以由颜色匹配实验来模拟,即由许多观察者用三原色混合进行颜色匹配,把其平均结果定义为 CIE 标准观察者,再结合 CIE 定义的标准照明体等,就可以得出颜色样品的三刺激值和色品坐标。定义三刺激值为色刺激的“颜色界(colour valance)”,这是由 M. 里奇特(Richter)教授定义的术语,来自德语“farbvalenz”。过去在英语中常称其为心理物理颜色(psychophysical colour),用以和感知颜色(perceived colour)相对应。然而心理物理颜色并不是指的颜色,它只是表示颜色刺激引起颜色感知的能力,而使用“颜色界”一词可以避免与“颜色”混淆。在色度学中用物理的方法测量色刺激的光谱功率分布。

对于标准观察者函数必须注意两点:

①标准观察者的基础是颜色匹配实验。在相同的照明观察条件下,具有相同颜色界的两个色刺激将引起相同的色感知,但是颜色界并没有告诉你颜色是什么样的。如果两个色刺激的照明观察条件不同,例如不同的环境,尽管它们的颜色界相同,颜色的感知

也会不同。因此这里再强调一次,色度学仅能用于描述色刺激,而不能用于描述颜色感知。

②标准观察者是许多观察者的平均。即使对于具有正常色视觉的个别观察者来说,其观察结果与标准观察者会有很大的不同。

对于上述心理物理实验结果进行标准化后,可以把色度学归结为对颜色刺激进行的物理测量、数学计算及评价。

下面讨论神经系统对于色刺激究竟如何响应进而在大脑内变成颜色感知。赫林(1878)研究了颜色本身的定义,并且发展了他的“颜色感知的自然系统”理论。他认为存在六种基本色感知,即黄、红、蓝、绿及黑和白,它们相互之间没有相似之处,由此可以不必凭借任何物理样品进行比较就能描述任何颜色。有些人误认为只有用物理仪器才能进行测量,实际上如果在我们头脑中存在某个想象中的参考物的话,那么用我们自己的大脑就可以进行测量,这时人脑的作用就相当于测量仪器。眼睛感光细胞产生的信号是组合形式的,除了红、绿、蓝信号外,红信号和绿信号结合还形成黄色信号,所有色信号的组合形成明度信号,并且形成对抗色对,即红-绿、黄-蓝及黑-白。它们由神经系统传导到大脑皮层,在这里对视觉信号进行最终处理。处理的结果不仅来自于视场内的物体,而且也受到大脑中已有记忆的影响。

我国清代学者博明早在赫林之前(1773)就提出了类似的对抗色理论,他在《西斋偶得》一书中指出:“五色相宣之理,以相反而成,如白之于黑,朱之于绿,黄之于蓝,乃天地间自然之对。待深则具深,浅则具浅,相杂而间色生矣。今试注目于白,久之目光为白所眩,则转目而成黑晕,注朱则成绿晕,注黄则成蓝晕。”在这里他还提出了后像的成因。

综上所述,即形成了现代颜色视觉的“阶段理论”。第一阶段为三色机制,三种不同的锥状细胞分别对三段可见光谱区敏感,并且同时产生亮暗感觉;第二阶段为四色机制,发生在颜色视觉信号向大脑的传输过程中,它同时传递了亮暗信号;第三阶段则是大脑中产生的心理反应,即感知各种不同的颜色。

自然色系统是目前唯一的完全按照心理学定义的颜色系统，系统的所有变量都是以颜色感知为基础的。

最后有必要对色视觉的过程进行总结：

①颜色刺激：刺激视觉系统产生颜色感知的光通量。任何光源、颜料、染料、有色物体等都产生颜色刺激。

这是颜色的物理方面。

②颜色界：颜色刺激引起观察者产生颜色感知的能力，用三刺激值等进行描述。

这是颜色的心理物理方面。

③神经响应：在锥状细胞中产生的电刺激被进行编码并经过神经系统由视网膜传导到大脑皮层。

这是颜色的生理学方面。

④颜色感知：使用红、黄、绿、蓝、灰等等进行描述的视觉感知。牛顿说过：“什么是颜色？颜色就是我们所看到的。”它是指被我们所看到、被眼所接收到的色刺激，经大脑翻译所产生的结果。这也就是我们所说的颜色感知的真实含义。

这是颜色的心理学方面。

图 1.2 为颜色感知过程的示意图。

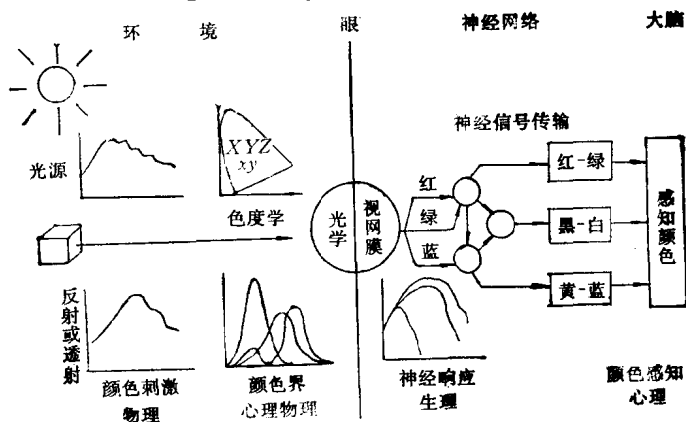


图 1.2 颜色感知过程示意

在日常生活中人们习惯于把颜色刺激称为颜色，我们无意去

改变人们的习惯,而且我们也乐于按照习惯去称呼,但是当我们谈论颜色时,要明确所指的是颜色刺激还是颜色感知.

§ 1.3 颜色术语

对于颜色,无论是观察者的响应(主观量)还是刺激的物理性质(客观量)都是很重要的,因此必须清楚地区分颜色的主观量和客观量.关于颜色术语可以参阅 CIE 词典《色度学》和我国国家标准 GB 5698《颜色术语》及其它文献,这里仅对某些主要内容进行必要的介绍、补充和评述.

一、描述主观量的颜色术语

这是描述光和颜色感知的重要属性的术语,任何对于这些属性的量度都必须表明视觉响应过程的主观程度.

①(感知)颜色(colour):目视感知的一种属性,它可以用一些颜色名称进行描述,例如白、黑、灰、黄、红、蓝、绿、桔红、紫等等.

②无彩(感知)色(achromatic colour):感知到的从白到黑的一系列中性灰色(包括白和黑).

③有彩(感知)色(chromatic colour):感知到的除无彩色以外的各种颜色.

④色调(hue):按照 CIE 的定义,色调是一个表面呈现近似红、黄、绿、蓝颜色的一种或两种色的一种目视感知属性(该定义与自然色系统关于色调的定义相同).按照我国国家标准 GB 5698,色调是“表示红、黄、绿、蓝、紫等颜色特性的,是颜色三属性之一.”应当指出这里的“紫”并不是基本色,因此这个定义不太恰当(关于基本色的定义将在 NCS 体系中介绍).

请注意,色调仅对于有彩色而言.

⑤色浓度(colorfulness):物体呈现彩色多少的一种目视感知属性.这是 R. W. G. 亨特(Hunt)于 1977 年提出的术语,后面将讨论它和原来的一些术语,例如饱和度(saturation)和彩度