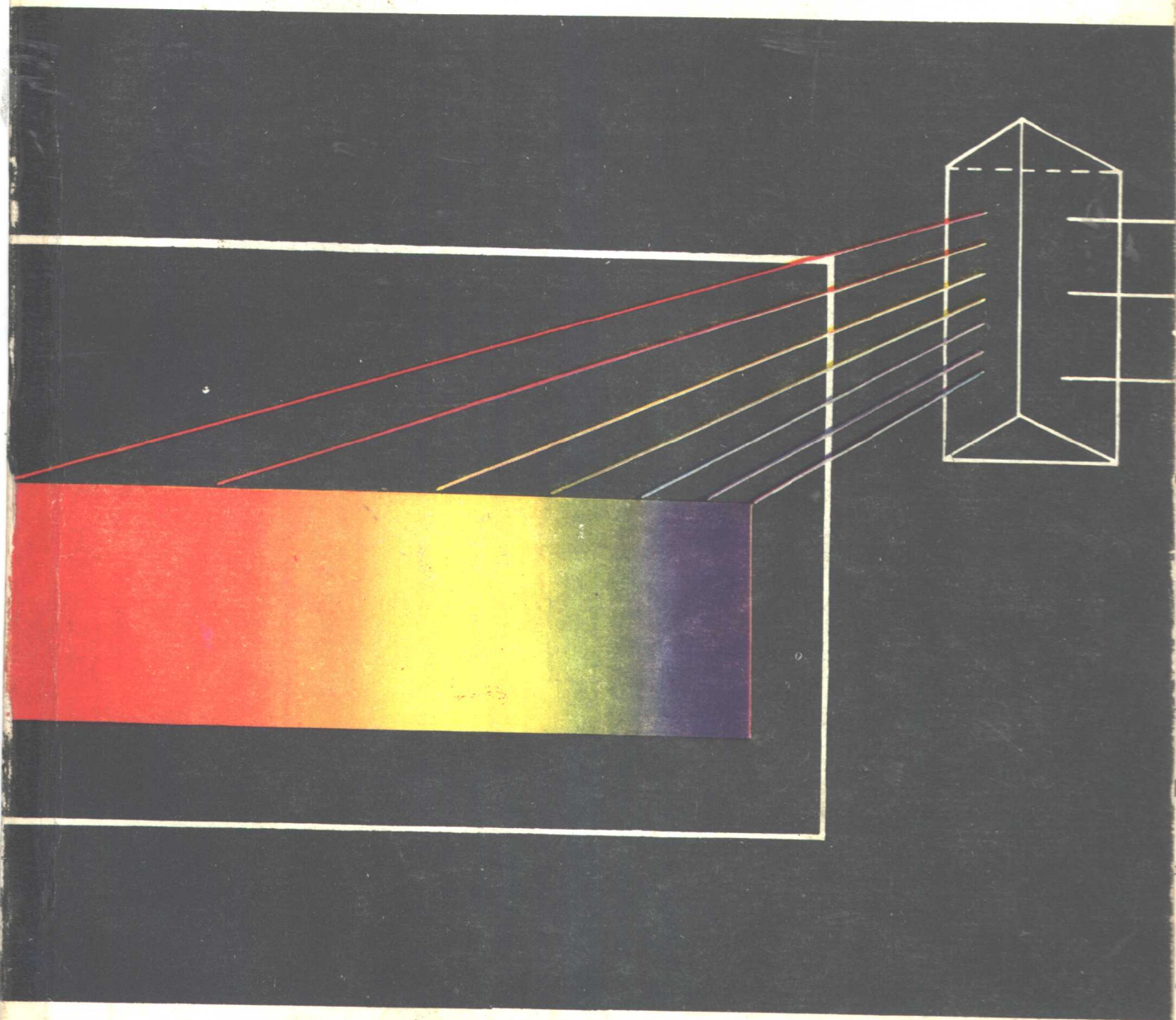


颜色光学基础理论

束越新 著



山东科学技术出版社

颜色光学基础理论

束越新 著

山东科学技术出版社

责任编辑 霍宝珍

颜色光学基础理论

束越新 著

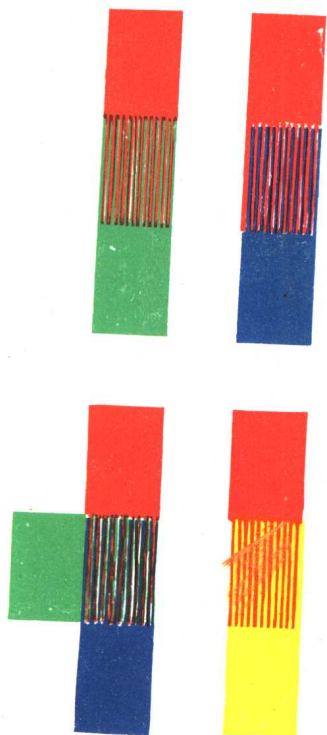
*

山东科学技术出版社出版
山东省新华书店发行
山东新华印刷厂德州厂印刷

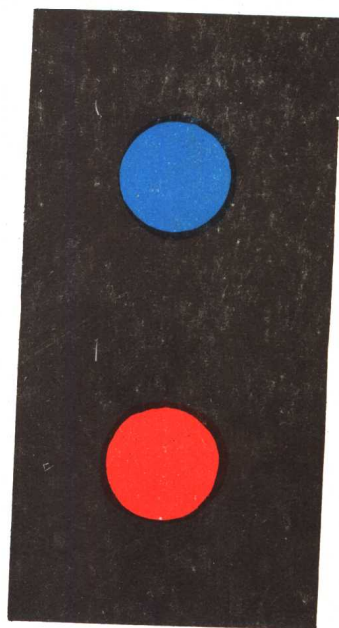
*

787×1092毫米16开本 45.5印张 5插图 807千字
1981年2月第1版 1981年2月第1次印刷
(精)定价 5.85 元 印数: 1—400
(平)定价 5.00 元 印数: 1—4,000

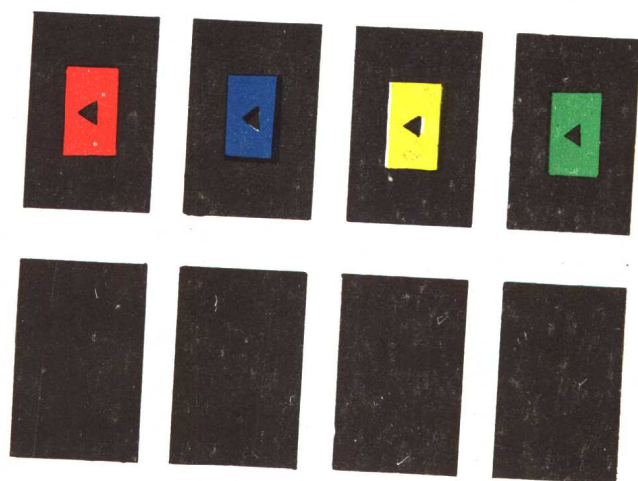
书号 15195·76



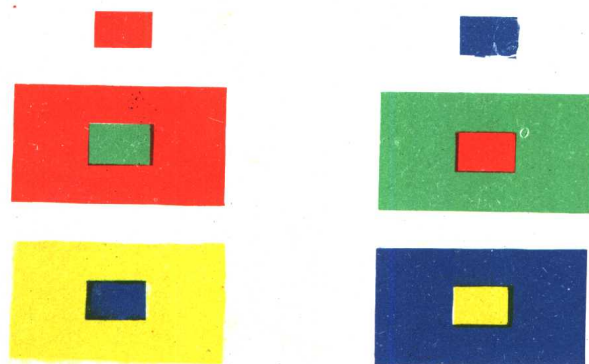
色光混合



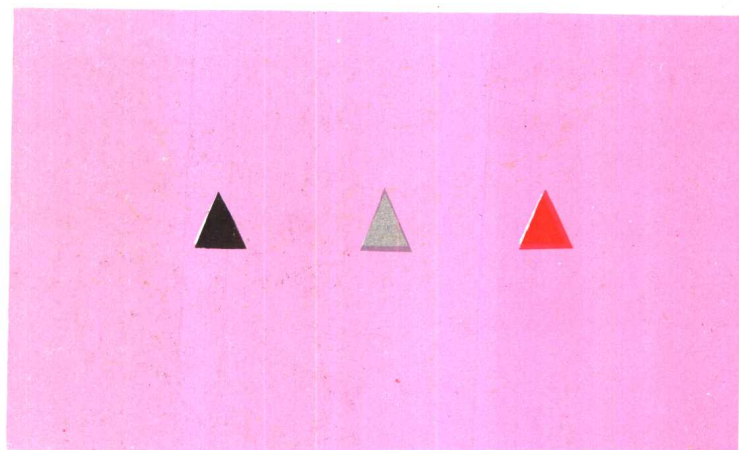
朴金耶效应



先后对比



同时对比



兰德实验

前 言

颜色光学是以物理学、光学为主体，结合心理学、生理学、生物物理学的边缘科学。经过半个世纪的发展，在理论上和应用上都趋于成熟，形成了一套独特的科学体系。

颜色光学研究的内容可分为生理光学 (Physiological Optics)、光度学 (Photometry)、色度学 (Colorimetry)、心理颜色〔包括适应与对比 (Adaptation and Contrast)〕、色差与颜色立体、颜色视觉 (Color Vision)，以及视觉研究中的应用数学与颜色光学在科学、工业、农业上的应用等。其中颜色视觉的空间效应 (Spatial Effect in Color Vision)、视觉中量子起伏 (Quantum fluctuation in Vision) 和适应与对比等，是近几年来研究较活跃的几个方面。

颜色光学的应用非常普遍，国外已广泛应用于彩色电视、彩色摄影、彩色印刷、彩色电影、纺织印染、化纤、染料、涂料、造纸、塑料、油墨光源研制、交通讯号和产品鉴定等工农业生产部门。随着遥感、光学信息处理和空间光学等新兴学科的发展，赋予颜色光学以新的使命。

研究颜色光学不仅促进了光学、心理学、生物物理学、生理学和仿生学的发展，也有助于遥感、军事伪装、信息处理等科学的研究。所以，它是实现四个现代化，促进工农业生产和国民经济发展不可缺少的一门应用科学。

本书在完成大量分析、推论和计算工作的同时，参考了国外的理论和经验，并系统地阐述了颜色光学的基础理论和应用。书中某些内容的理论基础，如颜色反应器理论和颜色适应对比理论是作者新提出的。

中国光学学会王大珩理事长、冯家璋理事和清华大学何增禄教授曾经审阅了初稿，并提出了指导性的意见，在此表示衷心感谢。

在建设“四化”的征途中，颜色光学这门学科已从基本空白的状态中开始逐步发展，山东纺织工学院对这门科学的发展极为重视和关心，并对本书的写作给予了极大的支持。

在写作过程中，山东纺织工学院颜色光学研究室的同志们，对书稿进行了校对、整理和绘制插图，在此一并表示感谢。

束 越 新

一九八〇年七月

绪 言

一、光度与生理光学的某些基础

颜色光学将光与人的大脑活动联系起来，电磁辐射不一定都能引起视觉，引起视觉的电磁波，频率大约每秒四百万亿次到八百万亿次（波长大约在380~780毫微米），即可见光范围。在可见光范围内，人眼对不同频率辐射的敏感程度也不同，接近可见光边缘的敏感度要比中间部分的敏感度差。第一章叙述人眼对辐射的敏感度、人眼内视神经的传导过程、辐射和光度学名词等。

在可见光范围内，能量按频率或波长的不同分布，引起不同颜色视觉。例如，均匀分布的色光引起白光的视觉，能量分布集中于高频率的色光会引起蓝色的视觉；能量分布集中于低频率的色光会引起红色的视觉。颜色的视觉感是由于能量分布的不同而引起的，然而有时能量分布虽然不同（甚至完全不同），但是引起的颜色视觉却完全一样。事实上，同一种色光存在着无数种不同的能量分布，如真正的黄光（即单色光）和由红绿适当混合而成的黄光，看起来完全一样。由此看出，人眼的分析能力比较差，但它还能看出红、橙、黄、绿、青、蓝、紫、白、黑、淡红或鲜红，并且还能看出亮红或暗红等。所以，人眼还具有一定的分析能力，只是没有分光光度计完备。

定量地研究人眼对辐射的分析能力和它的局限性，是颜色光学的主要内容。色度学的实验结果证明，人眼对色光的分析能力是三变数的（色盲除外），不论能量如何分布，只能分辨出色光中三种不同的差别。如果几种色光所给出的三个变数都相同，它们在人眼中产生的刺激就完全一样，即人眼对这几种色光的颜色感觉完全一样。

二、孔色和色度的三变数性质

人眼对颜色的判断，不完全相同，即使正常人眼也不相同，有时认为完全相同的两种颜色，换另一个人，就会认为有些差别；反之，后者认为完全相同的颜色，前者也可能会认为有些差别。这样，严格定义是有困难的。所以，1931年国际照明协会（Commission Internationale de l'Eclairage以下简称CIE）采用了近于平均颜色视觉的标准观察者，1964年又采用了补充标准观察者作为代表。本书采用标准观察者作为颜色的标志，特别采用CIE的X，Y，Z坐标制。

色度学既然研究的只是色光对人眼的刺激，而不研究由于发出色光的物体所引起的其他复杂心理作用，因此在色度学实验中，必须将发光体的形状、大小、位置和性质等因素除去，以便单独地观察色光本身。

物体反射的光，一般由于视角的不同而产生，如镜面反射、金属光泽、闪耀的宝石

光，以及其他与物体有联系的透明度等，都不属于色光本身，在研究时应当除去。色度学中的色光本身，除去辐射之外，应当再没有别的因素。

用一块不透明的黑薄金属板，遮盖着发光或反射光的物体，板上刺一小孔，让色光透出，使观察者看不见发光体，似乎色光只是从这个小孔发出的。用这种方法观察的色光，观察者看不见发光的物体，不会把色光和颜色之外的其他物质联系起来，这样才是真实的，仅是由辐射作用产生的色光，它不含有其他的心理因素。假如采用合适的光学系统，可以将设备做得更理想，丝毫看不出物体，只看见色光本身。色度学研究的色光就是这种孔色 (aperture color)，所以颜色的名称在色度学内和通常不同。通常用的金黄、银白、绿宝石或用动物、植物、矿物，以及其他与日常生活有联系的名词来叙述颜色，生动带来了一些不属于色光本身的含意，例如，乳白除去白以外，还存在漫射的性质；乳白玻璃与透明玻璃是两种不同的玻璃，但它们的颜色可能完全一样。所以，在色度学中对颜色的命名，应当避免用不属于颜色本身的形容词来表示颜色。

色度学基本上还是三变数的数学，这三变数的取法不一定一样，它们的任何函数都可以作为三变数，一般采用上述 X ， Y ， Z 作为三变数，同时也用色品与亮度和纯度与主波长作为三变数。这一套和那一套变数之间，可以相互转换。知道了这一套就可以推算出另一套，就好象需要三个变数决定质点在空间的位置，可以根据需要取直角坐标、球坐标还是其他曲面坐标。第二章将叙述其中的一些关系，并详细讨论参考系与参考系之间的坐标变换。为了研究和计算的便利，经常使用色品图，它将三维颜色空间的问题放在色品平面上来讨论。第三章和第九章详细叙述如何绘制色品图，利用色品图的优越性，色品图相互间的变换以及在色品图上演算的方法等。

三、心理颜色、颜色视觉与模拟

通常看颜色时，颜色总是附着在物体上，和周围的环境连在一起，不大会出现色度学中讨论的孔色。周围的环境映入大脑引起了心理的因素，一般称为心理颜色。例如回忆色、适应和对比、色差等都属于心理颜色。对颜色的命名如桃红、茄紫、橄榄绿等也都引入了心理因素。颜色光学的重要课题之一，就是要定量的解决这些心理颜色问题。首先遇到的是通常人们对颜色的命名。颜色的命名很多，也很乱，各行各业，有经验的和无经验的对颜色的命名都不一样，所以应该取个统一的标准，一般是取色彩图作为标准。色彩图有许多种，各自都有一些特点，一般可分为两大类，特别是孟塞尔色彩图，曾经过几百万人次的观察和修改，被公认为具有一定的成熟条件。它与 X ， Y ， Z 的全部关系被大量测出，绘制成图表。在讲心理颜色时，我们采用修正后的孟塞尔值，将 X ， Y ， Z 与色调、光值和彩度联系起来。

色光的同时或先后刺激，会产生不同的颜色感觉。第八章讨论在不同的环境下，同样的色光能产生不同的颜色感觉。作者修改了被人忽视或忘记的斯潘塞公式，修改后的公式比通常的几种公式能更好地解决颜色适应问题。

关于颜色视觉的数学模拟和颜色视觉理论，只从色度学的观点出发讨论到三色素的

阶段，将在第十章和第十三章中叙述。

四、颜色光学的应用

简要地讨论了色度计的基本原理、主要组成部分，以及几种典型色度计的构造。

第六章计算出反射光和透射光的最大光度。计算出最佳颜色的反射和透射曲线，为色料工作者提供了最佳理论值。第十二章叙述了色料的物理化学性质，并从皮尔定律出发，叙述库贝尔卡-芒克漫射理论，得出的公式不仅将常用的皮尔定律推广到含有反射微粒的介质中，而且已成功地应用在纸张、化纤、毛棉的反射，以及色料的混合上。这个理论为色料工作者开辟了新的方向。

最后，扼要叙述了彩色复制的原则，彩色印刷、彩色照相、彩色电视的基本原理和它们的基本计算公式。

五、定量探索大脑活动的一条重要途径

视觉、味觉、听觉、嗅觉、还有痛痒等触觉，都是外界刺激使人的感受器产生的感觉，唯独光对眼睛的刺激能够用数字表达出来。所以，颜色光学是人们第一次用数学定量地计算人类感受器，所受外界刺激传到大脑后的感觉，并用数学关系表达出这种感觉。目前，对于人类感受器这种肯定的定量计算，它是唯一的。正因为这样，所以颜色光学不仅是颜色工作者的一门重要科学，同时它在生物物理学、心理学、仿生学、生理学和医学上也同样占着极重要的地位，因为它是心理、生理与生物物理化学的边缘学科，人们在颜色光学的基础上，可以进一步了解大脑在受到外界刺激时的活动情况。

看来，视觉理论的视神经和大脑活动等问题，在短期内还不能定量解决，有待于人们进一步探索。

目 录

绪 言

第一章 视觉和光度	1
第一节 视觉生理	1
一、人眼光学系统	1
二、网膜上的感光神经细胞	7
三、视觉电生理	12
四、人眼的视觉敏锐度	15
第二节 异色光度学	17
一、异色光度的比较	17
二、CIE的标准相对发光效率	21
三、光度学基本物理量及其单位	25
四、CIE关于光度学名词的建议	30
第三节 网膜照度	34
一、瞳孔对入射光束的限制	34
二、斜射效应	35
三、麦克斯韦视域	38
第四节 明光与弱光视觉	39
一、明光与弱光视觉	39
二、 2° 视野和 10° 视野	44
第二章 色度学基础	47
第一节 色光匹配	47
一、白光	47
二、光谱能量分布图上的客观性与主观性	51
三、CIE的几个标准光源	54
四、色光颜色	58
五、视觉三变数的性质	61
六、格拉斯曼定律	64
第二节 三参考色原理	66
一、用三参考色匹配色光的优越性	66
二、三刺激比值和分布系数的测量(标准观察者)	68
三、三参考色坐标的理论根据	78
四、一些常见的误解	81
五、色度学中颜色标志及色光混合	86

第三节 坐标变换	91
一、坐标变换公式	91
二、三刺激值变换系数的物理和几何意义	93
三、国际坐标制	94
第三章 色品图	112
第一节 色品图上的色光混合	112
一、几种典型绘制色品图的方法	112
二、色品图上色光混合原理	118
三、色光混合的三个图解方法	121
四、多色光的混合	128
第二节 主波长、纯度及互补波长	137
一、主波长及纯度的定义	137
二、刺激纯与色度纯的比较	139
三、互补波长	141
四、色光的冲淡	150
第三节 两色品图的关系	154
一、刺激度的改变及交比的不变	154
二、求色品位置的几何方法	164
三、混合光色度计的定标	166
第四章 色度计算法	171
第一节 等波长间隔法	171
第二节 纵坐标选择法(波长选择法)	183
一、哈迪表	183
二、利用辅助波长决定纵坐标选择	193
第三节 正射影焦点法	196
第五章 黑体辐射及其他光源	209
第一节 黑体辐射	209
一、概述	209
二、黑体辐射及光子数分布	211
第二节 黑体色度学	220
一、黑体的权重分布系数	222
二、黑体的色品及近色温	222
三、黑体和其他光源的亮度及发光效率	222
四、黑体光源的选择纵坐标法	232
第三节 用滤色器改变黑体的色温	233
第四节 各种不同白昼光的分析—CIE的D光源	236

第五节 各种颜色光源最大发光效率的理论研究	243
第六章 非光源的颜色	252
第一节 非光源的理想颜色	252
一、理想颜色的吸收和透射的曲线	252
二、理想颜色色品和光度的计算	259
三、艳色	271
第二节 棱镜透射光	273
一、白片两边的颜色	273
二、透过窄缝的颜色	275
第三节 干涉光和旋光的颜色	278
一、两束光的干涉	278
二、薄膜的干涉光	280
三、旋光色散	284
第七章 心理颜色（色差和色彩图）	289
第一节 颜色分辨力	290
一、光度分辨力	290
二、波长和纯度的分辨力	291
三、色品分辨力	293
四、颜色分辨力	296
第二节 心理颜色标志	302
一、心理颜色和色度学	302
二、色调	304
三、明度	307
四、饱和度	317
第三节 色彩图	319
一、奥斯瓦尔德色彩图	320
二、孟塞尔色彩图	322
三、日本CC5000色彩图和美国光学学会匀色制OSA—UCS色彩图	333
第四节 匀色坐标制	348
一、线型匀色坐标制	348
二、线型匀色制的不可能性	360
三、非线性匀色坐标制	362
四、颜色空间的非欧性质	367
第八章 心理颜色（对比和适应）	374
第一节 实验根据	374
一、概述	374
二、对比的定量实验	376

第二节 斯潘塞颜色适应公式及修改	383
一、综合刺激定义	383
二、色品图上公式的表示及应用	386
三、颜色感觉的其他现象	391
第三节 其他常用颜色的适应公式	395
第四节 颜色适应公式的检验和建议	402
第五节 二色视觉实验	408
第九章 色品图上的三线坐标	411
第一节 坐标三角形	411
一、三线坐标制的点与直线	411
二、直线	414
第二节 三角坐标中刺激值	418
一、刺激比值	418
二、数学证明	426
三、零刺激线的图解法	429
四、两种刺激度的相互关系	431
第三节 新三原色对光度的分担轨迹	431
一、光度分担	431
二、从零光度线绘制光度分担轨迹	434
第四节 图解法小结	438
一、光度分担的轨迹	438
二、三刺激值	438
三、新坐标制中刺激度与旧刺激度的关系	439
四、刺激比例值和光度比例值轨迹	439
五、坐标光源光度 L_r , L_g , L_b 的比例	439
第五节 两个坐标制中图形的相互投影	439
一、图形的变化	439
二、仿射性的图形变化	442
三、射影性的图形变化	443
四、光谱迹线的变换性质	447
五、仿射变换与射影变换的关系	448
六、色品图上图形的一切可能变化的直观关系	448
第十章 颜色反应理论	456
第一节 颜色反应器	456
一、颜色反应器的定义	456
二、反应	457
第二节 线型颜色反应器	458

一、线型颜色反应器对光谱反应性质的充要条件	458
二、反应平面及反应矢量	460
三、反应系数的坐标变换性质	462
第三节 反应器判别颜色的本领	464
一、一个数值的反应器	464
二、三个数值的反应器	464
三、两个数值的反应器	466
四、三个以上数值的颜色反应器	467
第四节 线型反应器的图解法	468
一、单数值反应器	468
二、两数值反应器的分析能力	469
三、三数值反应器的分辨能力	478
第五节 非线性反应器	484
第十一章 色度仪器	486
第一节 主观色度计	486
一、混色盘	486
二、几种不同的颜色光源	487
三、光源光度的控制	489
四、色光混合	490
五、匹配场	492
六、几种典型的色度计	493
七、矢量色度计	496
八、减法色度计	497
第二节 客观色度计	499
第三节 分光光度计	500
第四节 滤色片	503
第十二章 色料和色料混合计算	505
第一节 色料的颜色	505
一、概述	505
二、多烯烃吸收波长和强度的粗略计算	509
三、无机色料	512
第二节 光的反射与漫反射	516
一、反射与漫反射	516
二、着色	519
第三节 单纯吸收的色料理论	520
一、皮尔定律	520
二、经过几种色料后的吸收和透射	527

第四节 包括漫射的色料理论	532
一、库贝尔卡——芒克 (Kubelka-Munk) 理论	532
二、色料混合公式	538
第五节 库贝尔卡——芒克公式的应用和补充	539
一、典型例题	539
二、边界反射对实验的影响	545
第六节 塑料颜色的典型计算	547
一、塑料、染料、色素的吸收和漫射系数的测定	547
二、塑料反射曲线的计算	549
三、配出反射曲线	550
四、计算时应注意的问题	551
第七节 纤维织物染色处方的计算及电子计算机配色	552
第十三章 颜色视觉理论	560
第一节 人眼的接收器	560
一、人眼接收器是性质不同的色素	560
二、中央凹内只有三种不同色感素的理论证明	561
三、三种色素敏感曲线的理论形式	563
四、理论的三色素吸收曲线	564
五、在色品图上研究颜色视觉	568
第二节 色盲	573
一、色盲的颜色视觉	573
二、色盲混淆线	577
三、从色盲记录推算三色素的性质	585
第三节 利用奇点寻找三色素敏感曲线的方法	590
一、奇点	590
二、实验分析	591
第四节 由颜色反应器理论推算人眼三色素敏感曲线和方程	595
一、颜色反应器的颜色混淆线及混淆中心	595
二、由混淆中心计算颜色反应器的光谱敏感曲线	597
三、寻求人眼三色素敏感曲线和方程	599
第五节 视觉学说的其他理论	600
第十四章 彩色复制	604
第一节 彩色印刷	605
第二节 彩色摄影	610
一、摄影原理	610
二、彩色摄影原理	613
第三节 彩色电视	619

附 录

表1 CIE1931标准色度观察者 (每隔1毫微米)	628
表2 CIE1964补充标准色度观察者 (每隔1毫微米)	637
表3 标准施照体A和D ₆₅ 的相对光谱能量分布 (每隔1毫微米)	646
表4 1~8号验色样的光谱辐亮度系数 (CIE1971)	651
表5 9~14号验色样的光谱辐亮度系数 (CIE1971)	653
表6 2,300K~25,000K参考施照体的CIE — UCS数值 (c _i 和d _i 值为考虑色漂移用的)	655
表7 孟塞尔色彩图的光度和色品	657
表8 孟塞尔值与CIE三刺激值的转换	671
表9 无限厚样品的反射比、吸收和漫射系数的比例 (R _s 用百分比表示)	680
参考文献	685