

国 外 科 技 文 献 选 编

颜 色 测 量 基 础

李在清 喻柏林 焦书兰 编译

技 术 标 准 出 版 社

国外科技文献选编

颜色测量基础

李在清 喻柏林 焦书兰 编译

技术标准出版社出版

(北京复外三里河)

技术标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 850×1168 1/16 印张 12³/₄ 字数 350,000

1980年2月第一版 1980年2月第一次印刷

印数 1—7,000

书号: 15169·3-113 定价 1.90 元

前 言

空间技术和电子光学带动了色测量科学的蓬勃发展。自动扫描光谱光度计和电子计算机为色度学的广泛应用开辟了道路。近年来,有关国际性学术组织推荐了色度学的一系列标准,某些作者对色度学的计量问题做了概述,这些国外文献对于促进我国的色度学发展是有益处的。

国际照明委员会(CIE)是照明工程界的国际性学术组织,负责协调和组织有关光度学、色度学、光源、照明设计等方面的研究工作。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。这些标准和规定虽然以“推荐”的形式促使各国专业工作者遵守和执行,而事实上已成为有关学科的国际通用准则。例如 CIE 标准光度观察者的光谱光效率函数 $V(\lambda)$ 和 CIE 标准色度观察者的光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 和 $\bar{z}(\lambda)$ 已成为光度学和色度学不可缺少的基本数据。特别是 CIE 的各种推荐材料对于发展照明工程起着重要作用。

本选编着重介绍色测量的标准及与标准化有关的资料,为了便于阅读,选编分为三部分:

第一部分《色度学的现代发展》简述了色度学的内容、研究方法及其发展前景。

第二部分“色度学标准”,收集了最近 CIE 出版的四篇色度学标准和规定,这几篇正式推荐标准介绍了颜色测量的规程和方法,光源现色指数的计算方法,以及灯光信号可靠辨认的颜色规定。

第三部分“颜色测量”,收集了《颜色测量的标准化》等七篇文章,评述了色度计量的任务、色度标准化的基本方法、进展与存在的问题。

本选编可供彩色电影电视、建筑照明、光源研制、交通信号、纺织印染、染料、涂料、玻璃、陶瓷、造纸、印刷、光辐射计量和遥感技术等科研生产部门参考。

本选编由中国计量科学研究院和中国科学院心理研究所有关同志翻译。最后请中国科学院心理研究所荆其诚同志对全书进行了审校。由于编译者业务水平的限制,对选编中的缺点和错误希望读者批评指正。

编 译 者

一九七九年二月

目 录

色度学的现代发展.....	(1)
---------------	-------

色 度 学 标 准

色度学——国际照明委员会 (CIE) 的正式推荐书—CIE第 15 号出版物	(21)
特殊同色异谱指数: 改变施照体—CIE 第 15 号出版物附件	(76)
光源现色性的测量和规定方法—CIE 第 13.2 号出版物	(78)
灯光信号的颜色—CIE (TC-16) 第 2.2 号出版物	(110)

颜 色 测 量

颜色测量的标准化.....	(129)
反射比标准的校准.....	(132)
可见和紫外光谱区透射光谱光度学的标准化.....	(146)
白度的光度规定和色度评价.....	(152)
不透明材料目视评价的标准方法.....	(179)
孟塞尔颜色系统及其应用.....	(185)
CIE1976 色差公式.....	(189)

色度学的现代发展

维泽斯基 (G. Wyszecki)

导 言

随着技术、标准、理论上的迅猛进展，色测量——色度学——正在发展成为计量学中的一个多学科领域。

回顾色度学，最早开创于牛顿 (Newton, 1642—1727)、格拉斯曼 (Grassmann, 1809—1877)、麦克斯韦尔 (Maxwell, 1831—1871)、赫姆霍兹 (Helmholtz, 1821—1894) 和薛定谔 (Schrodinger, 1887—1961)，而奠定现代色度学基础的科学家有：吉尔德 (Guild)、贾德 (Judd)、麦克亚当 (Mac Adam)、里克特 (Richter)、司梯鲁斯 (Stiles) 和莱特 (Wright)。

现代色度学是颜色科学的极为广阔领域里的一个重要部分。颜色科学涉及可见辐射能的所有方面及其对引起颜色感觉的视觉机制的影响。

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。这种预测，是借助于确定这两种视觉刺激的三刺激值来进行的。假如一种刺激的三刺激值与另一刺激的三刺激值相等，具有正常颜色视觉的普通观察者就观察到相匹配的颜色。我们将在“基础色度学”的标题下，讨论狭义色度学。

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。这被看作是色度学的最终目标，但是，由于它极为复杂，离到达这个目标的距离还很远。另一方面，预测刺激色貌这一整体问题中的某些较为局部的方面，看起来并不是难以捉摸的。突出的例事如色差、白度和彩色适应的测量，尽管这些问题实质上尚未解决，但该领域中的发展是极有意思的，在应用上是重要的。在本文中，我们将在“高等色度学”的标题下，讨论广义的色度学。但是我们将把这种讨论主要限于测量色差的问题上。

基 础 色 度 学

基础色度学是由颜色匹配实验规律支配的，这种颜色匹配规律对一切具有正常颜色视觉的观察者都适用。从这些实验规律中引出三个方程式，它们表示两个给定的颜色刺激之间颜色匹配的条件。

我们有：

$$\begin{aligned} \int_{\lambda} S_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} S_2(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \int_{\lambda} S_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} S_2(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \int_{\lambda} S_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int_{\lambda} S_2(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

在这些方程中， $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 这三个函数规定了观察者颜色匹配的特性，并且常被叫做颜色匹配函数。函数 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 是观察者进行比较的两种颜色刺激的光谱功率分布。所有这些函数都是波长 λ 的函数。正是这些相应积分的相等关系，才构成了两种刺激的颜色匹配条件。

λ 的主要光谱范围大约是从 380 毫微米到 780 毫微米，在这个光谱范围内，眼睛对颜色刺激发生反应。通常，这叫做“可见光谱”。方程 (1) 中的每一个积分，是在全部可见光谱范围内确定出来的。

而且, 它们所得的值是与给定刺激的三刺激值成比例的。具体讲, 对刺激 $S_1(\lambda)$, 它的三刺激值是:

$$\begin{aligned} X_1 &= k \int S_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y_1 &= k \int S_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z_1 &= k \int S_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

刺激 $S_2(\lambda)$ 的三刺激值是:

$$\begin{aligned} X_2 &= k \int S_2(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y_2 &= k \int S_2(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z_2 &= k \int S_2(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

方程 (2) 和 (3) 中的常数仅是一个归一化常数, 可以给它以任何一个正数值。以后, 我们还将专门来规定它。

方程 (1) 所表示的颜色匹配条件, 现在可以改写成:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_2 \\ Y_1 &= Y_2 \\ Z_1 &= Z_2 \end{aligned} \quad (4)$$

如果 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 是相同的函数, 也就是说, 这两个刺激有相同的光谱功率分布, 这样方程 (1) 和 (4), 就成为无意义的完全等同的情况, 没有色度学的含义。然而一般来说, $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 的光谱成分是显著不同的, 那时考查方程 (1) 是否仍然得到满足, 才有意义。如果它们得到满足, 我们就称 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 为“同色异谱刺激” (metameric stimuli)。也就是光谱成分不同, 但三刺激值相等的刺激。

方程 (1) 到 (3), 反映某些支配颜色匹配的基本实验规律。

一个给定的颜色刺激 $S(\lambda)$ 的色度学特性, 唯一地由三个参数, 即三刺激值 X 、 Y 、 Z 所确定。

在颜色匹配中, 在相应广泛的观察条件范围内, 都严格的保持着直线性和可加性。直线性和可加性要求任何两个刺激, 如果以同一恒定倍数在量上增加或减少, 而它们各自的相对光谱功率分布不变, 则它们始终保持着颜色匹配。而且, 直线性和可加性要求, 如果刺激 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$ 在颜色上匹配, 刺激 $S_3(\lambda)$ 和 $S_4(\lambda)$ 在颜色上也匹配, 那么, 加法混合的 $[S_1(\lambda) + S_3(\lambda)]$ 和 $[S_2(\lambda) + S_4(\lambda)]$ 在颜色上也必定是匹配的。

方程 (1) 至 (3) 没有考虑颜色匹配依赖于比较两种刺激时的观察条件。它们也没有考虑眼睛的不同的预先曝光对颜色匹配的影响和不同观察者作颜色匹配的个体间的差别。所有这些, 都影响着颜色匹配规律, 把它们的有效性限制在一定范围内。

通常, 呈现给观察者的两个刺激是形状和面积相似的两个相邻光斑。如果在正对两光斑分界线的中心观察到一对同色异谱的匹配, 则当观察者朝旁边看一下时, 匹配就可能被破坏。改变两个光斑的张角 (例如, 通过改变眼睛和光斑之间的距离就可以做到), 匹配也可能被破坏。失匹配的程度, 依赖于两个刺激之间光谱分布差别的大小, 以及这些差别是发生在光谱的哪些区域。

通常, 颜色匹配不因为眼睛先经白光或色光的照射而受到影响, 也不因为眼睛观看两个同色异谱刺激时光适应的变化受到影响。如果在两个匹配刺激的周围有不同颜色的其他刺激, 两个刺激之间的颜色匹配通常也不受影响。这种经验事实, 一般叫做“颜色匹配恒常律”。这条规律的有效性, 对于方程 (1) 所表述的匹配条件的实用价值是极为重要的, 因而对于作为应用工具的基础色度学也是极为重要的。先经中等亮度或相当高亮度曝光的眼睛, 仍然保持着颜色匹配恒常律, 但是, 对非常高亮度的曝光, 这条规律就失效。

对超过 4° 张角的大面积的刺激, 在其颜色匹配中也出现局限性。在这种情况下, 不仅涉及到锥体

集聚的网膜中央凹,而且也涉及到杆体集聚的区域。如果两个刺激的亮度减弱到杆体机制参与决定匹配时,原来的同色异谱就会破坏。这类匹配破坏被认为是杆体的参与而造成的。我们知道,给定的一对同色异谱刺激的亮度和它们的相对光谱功率分布,是决定在大视场中杆体是否参与颜色匹配的关键参数。然而,迄今为止,我们还不能在量上预测由于杆体参与而引起失匹配的方向和程度。

为了使基础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。国际照明委员会(CIE)已经推荐了所需要的标准和方法。它们已有文件公布,并在工业和科学中得到广泛的采用。这里不必要给出 CIE 推荐的详细材料,只把重要的列出来,并讨论一下它们与基础色度学的关系。

CIE 为色度学确立了两种标准观察者:由颜色匹配函数 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 规定的“CIE 1931 标准色度观察者”和由颜色匹配函数 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ 规定的“CIE 1964 补充标准色度观察者”。CIE 1931 标准色度观察者适用于 $1^\circ \sim 4^\circ$ 张角视场的颜色匹配,而 CIE 1964 补充标准色度观察者适用于大于 4° 张角的大视场颜色匹配。在这两种情况中,为了使颜色匹配函数能用,要求刺激亮度达到明视觉水平。当应用大视场数据时,就得假定杆体机制被充分地抑制不影响同色异谱匹配。

CIE 推荐了四种标准光源。光源 A 代表钨丝灯光,规定为绝对温度 2856 开的普朗克(Planckian)辐射体的相对光谱功率分布。

光源 B 和 C 原定分别代表直射阳光(4870 开)和平均日光(6770 开)。但预计二者将很快过时,不再作为标准光源,而用标准光源 D_{65} 来代表日光的平均状态(6500 开)。

标准光源 D_{65} 是一系列光谱功率分布之一,它们能很好的代表 300 毫微米到 830 毫微米光谱范围内自然日光的各种状态(4000 开到 25000 开)。 D_{55} (5500 开)和 D_{75} (7500 开)被看作是补充 D_{65} 的有实用价值的光源。

所有标准光源都是用表格列出的相对光谱功率分布来规定的。它们的主要用途在于进行色度学计算。

实际上,不存在能严格复制出标准光源相对光谱功率分布的人造光源。甚至色温 2856 开的钨丝灯的相对光谱功率分布,也是偏离标准光源 A 的,因为灯丝发射和灯泡透射都有选择性。然而,这些偏离通常可以忽略不计,而 CIE 实际上推荐钨丝灯为标准光源 A。

在 CIE 标准光源 A 前,放置特制的双槽液体戴维斯-吉伯逊(Davis-Gibson)滤光器,就能产生 CIE 标准光源 B 和 C。很遗憾,重要的 CIE 标准光源 D_{65} 及所有其他 D 光源,还不能简易地用滤光的或非滤光的光源来仿制,以提供一个实验室用的标准日光光源。以后我们将更多的谈到这一点。

在大多数色度学实践中,涉及的是物体颜色刺激,也就是被照明的和看到的是不透明的物体(染料样品、纺织品等)。某一给定物体的光谱反射系数 $\rho(\lambda)$ 或辐亮度系数 $\beta(\lambda)$,是用光谱光度计测定的。各个波长 λ 的 $\rho(\lambda)$ 或 $\beta(\lambda)$ 是与反射系数基准相比较而获得的。这种基准被规定为在所有波长上的反射系数和辐亮度系数等于 1 的理想均匀漫射体。

当然,无法获得物质状态的反射系数基准,必须寻找一种工作标准,这种工作标准是用特殊技术,依照理想的、即绝对反射系数加以标定的。获得一个令人满意的工作标准(通常叫做“标准白”),是一个长期性的问题。目前,纯氧化镁粉末或硫酸钡粉末,经常被压成板(片)来使用。在市场上能买到瓶装的粉末和压成的小板(片),很容易在实验室里把他们做成合适的板(片)。

在光谱光度计中,物体表面和工作标准反射板都是沿着某一相同方向被照明和观测的。这一点及实际采用的照明和观测条件是非常重要的,特别是当测试的物体表面有光泽的时候。为了尽可能地把应用色度学统一起来,CIE 推荐了几种照明和观测条件作为标准。它们是 45° 照明,法线(0°)观测;漫射照明,接近法线观测以及与这两者相反的条件。

依据照明和观测物体采用的几何关系,物体颜色刺激可以方便地表示为:

$$\beta(\lambda)S(\lambda) \text{ 或 } \rho(\lambda)S(\lambda)$$

$S(\lambda)$ 代表一种 CIE 标准光源的相对光谱功率分布,如 D_{65} 。例如,由 $\beta(\lambda)S(\lambda)$ 所规定的物体颜色刺激的三刺激值,就从下式获得:

$$X = k \int_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d(\lambda)$$

$$Y = k \int_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

(5)

$$Z = k \int_{\lambda} \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d(\lambda)$$

这是直接从方程 (2) 中引伸出来的。在此, 归一化系数 k 规定为:

$$k = 100 / \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d(\lambda)$$

它使完全漫射体的 Y 值等于 100。

为了便于计算, 方程 (5) 的积分, 通常用求和 (Σ) 来代替。函数乘积值 $[\beta(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda)]$ 等, 是按一定波长间隔 $\Delta\lambda$ (如从 380 毫微米到 780 毫微米每隔 5 毫微米, $\Delta\lambda = 5$ 毫微米确定的) 然后连加在一起。

图 1 是上面概述的基础色度学 CIE 标准和处理方法的梗概。更详细的说明和解释, 在文献中很容易找到。

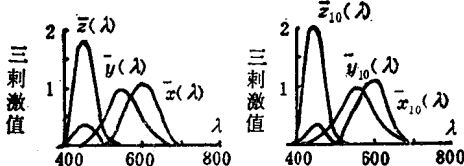
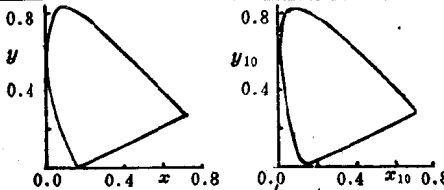
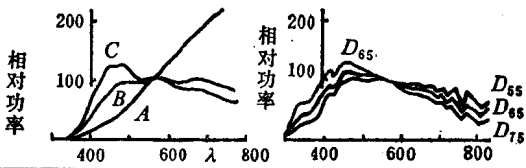
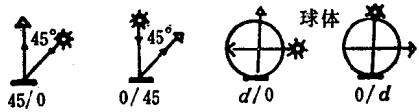
观 察 者	
色 品 图	
施 照 体 $S(\lambda)$	
光 源	“A”、“B”、“C” “D” 没有实现
$\beta(\lambda)\rho(\lambda)$ 不同	以完全反射漫射体为基础
因素的测量	$[\beta(\lambda) = \rho(\lambda) = 1]$
照明体和观察 方 向	
三刺激值	$X = k \Sigma \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{x}(\lambda)$ $Y = k \Sigma \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{y}(\lambda)$ $Z = k \Sigma \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{z}(\lambda)$ $k = 100 / \Sigma S(\lambda) \bar{y}(\lambda)$
	$X_{10} = k_{10} \Sigma \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda)$ $Y_{10} = k_{10} \Sigma \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda)$ $Z_{10} = k_{10} \Sigma \beta(\lambda) S(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda)$ $k_{10} = 100 / \Sigma S(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda)$
色度坐标	$x = X / (X + Y + Z)$ $y = Y / (X + Y + Z)$
	$x_{10} = X_{10} / (X_{10} + Y_{10} + Z_{10})$ $y_{10} = Y_{10} / (X_{10} + Y_{10} + Z_{10})$

图 1 基础色度学 CIE 标准和处理方法梗概

基础色度学发展近况

尽管基础色度学的主要标准和方法已经规定好了, 并且已经证明在许多应用中是有用的, 但仍然需要加以改善和发展。

颜色匹配规律的局限性

基础色度学中的基本研究是关于颜色匹配规律的局限性。颜色匹配规律支配着基础色度学, 关于这一方面, 我们上面已经讨论过了。

颜色匹配函数对视场大小的明显依赖性, 已经通过建立两套颜色匹配函数而加以处理。第一套规定, CIE 1931标准色度观察者, 指定用于 1° 到 4° 张角视场的颜色匹配。第二套规定, CIE 1964补充标准色度观察者, 指定应用于大于 4° 张角视场的颜色匹配。对于大多数应用色度学来说, 这两套颜色匹配函数也算是满足需要了。但是, 总是希望在颜色匹配函数和视场大小之间建立起一种函数关系, 以此作为对基础色度学的一种改进。理想的情况将是, 这样一种关系将对任何给定的大小视场, 特别是小于 1° 和近于点大小的视场, 提供一套合适的颜色匹配函数。极小的物体及点光源的色度学, 用我们现在的系统, 原物加以适应处理。

我们已经看到, 大视场颜色匹配可能由于杆体的参加而受到影响。在这方面, 或许沿着崔卓纳(Trezona)、司梯鲁斯和维泽斯基所报导的研究方向需要做更多的工作, 大家希望能创造一种方法测杆体参予的程度和它对大视场颜色匹配的影响。

颜色匹配持续定律和颜色匹配的直线性和可加性等的有效性, 对于奠定基础色度学基础的方程(1)具有决定性意义。对于某些观察条件和对于低亮度、极高亮度的颜色刺激来说, 这些规律就失效, 这已由不同的研究者观察到。在这个领域中, 特别是关于这种失效对应用色度学的意义, 需要更多的工作。

同色异谱性指数

方程(1)表述的颜色匹配条件, 规定了二个同色异谱刺激 $S_1(\lambda)$ 和 $S_2(\lambda)$, 也就是二个具有不同光谱分布, 但三刺激值相同的刺激。在这两个刺激之间光谱差别的程度, 在某些应用场合, 可能有重要的影响。

例如取两个同色异谱物体颜色刺激的情况:

$$\beta_1(\lambda)S(\lambda) \quad \beta_2(\lambda)S(\lambda)$$

这里 $\beta_1(\lambda)$ 和 $\beta_2(\lambda)$ 代表两个物体的光谱辐射亮度系数, $S(\lambda)$ 是照射这些物体的光源 D_{65} 的相对光谱功率分布。当由标准观察者观看时, 这两个物体被判断为具有相同的颜色。但是, 在实践上, 色度学计算中所规定的条件并不总是得到满足, 光源或观察者(或两者)总是与所采用的标准有所偏离。这可能在颜色匹配中立刻造成失匹配, 也就是两个刺激的三刺激值将不象预测那样相同。一般来说, 失匹配的程度依赖于光源或观察者与既定标准偏离的程度, 也依赖于 $\beta_1(\lambda)$ 和 $\beta_2(\lambda)$ 之间光谱差别的程度。如果 $\beta_1(\lambda)$ 和 $\beta_2(\lambda)$ 之间的差别小, 那么, 光源或观察者与所采用的标准的偏离就不太要紧。当然, 在 $\beta_1(\lambda) = \beta_2(\lambda)$ 这样极端的情况, 不管在任何光源下, 对任何观察者来说, 颜色总是匹配的。

由于同色异谱的物体颜色刺激具有明显的实用意义, 已经有很多研究者从事于同色异谱性的研究。许多关于同色异谱性的新近研究, 已经汇集在关于“同色异谱性的特殊指标: 照明的变化”的CIE建议内。这指标是用来评定光源相对光谱功率分布变化时同色异谱程度的一种尺度。其他的特殊指标也是可以想象的, 例如, 以观察者的变化为基础的指标。这里提出了进一步应做的工作, 它们应该遵循爱伦(Allen)所建议的方向进行。

有人曾提出建议, 例如, 沿着尼麦诺夫(Nimeroff)和于罗夫(Yurow)提出的途径, 创立一种

同色异谱性一般指标”。但是，如果要成为一种在色度学中有实用价值的指标，那么，作为这种指标基础的概念则难于设想出来。

颜色匹配函数的变异性

CIE 1931 标准色度观察者和 CIE 1964 补充标准色度观察者两套颜色匹配函数，是从 360 毫微米到 830 毫微米以 1 毫微米间隔加以规定的。颜色匹配函数值给到七位有效数字。初看起来，与由个别观察者和一组观察者用实验确定的实际颜色匹配函数的变异性相比较，这样高精度是多余的。然而，标准颜色匹配函数主要目的是用于计算，并且可能出现这样的情况，即要求函数达到高度平滑，从而要求在小波长间隔上给定的这些函数值达到高度精确性。

另一方面，也有人赞成定出标准颜色匹配函数的变异性而辩护。在运用视觉颜色匹配，并与标准颜色匹配函数预测的颜色匹配相比较的时候，人们时常想要知道，具有正常颜色视觉的不同观察者，将允许在多大程度上偏离标准观察者预测的平均数。了解个别观察者在相继的实验中将在多大程度上倾向作出不同的颜色匹配，这也是有益的。

尼麦诺夫、罗森布拉特 (Rosenblat) 和丹尼米兰 (Dannemiller) 已经提出了一种使标准观察者系统完善化的方法。它是将给定的平均颜色匹配函数补充上方差和协方差。所有这些数值，都是波长的函数，并且是由实验确定的。这种方法是值得进一步研究的，并且需要有关颜色匹配函数，特别是个别观察者的颜色匹配函数的变异性的更多实验材料。

色度学的标准光源

CIE 色度学委员会正在积极地考虑发展标准光源的问题，即模拟 CIE 标准光源 D，特别是 D_{65} 。已经研究了三种光源：滤光高压氙弧灯、滤光钨丝灯和荧光灯。到目前为止，所制造的这些光源，没有一种能完善地复制 CIE 标准光源 D 的相对光谱功率分布。事实上，这样的光源在可以预见的将来，似乎未必能出现。但是，大家也知道，在实践上很少要求丝毫不差地模拟日光的光谱功率分布。对标准光源的某些光谱偏离是容许的。但要确定在色度学实践中多大的偏离量是容许的，这是一个难题。如何评价用于一定用途的光源的特性，已经提出了一些建议。这些建议正由 CIE 色度学委员会加以研究。可以预料，能够建立一种“评价指标”，这一指标将指明，某一已知相对光谱功率分布的光源，是否完善地模拟出用于一定色度学用途的标准光源，如 D_{65} 。

已经出现三种光源：滤光高压氙弧灯、滤光钨丝灯和荧光灯，它们有希望成为标准光源。图 2、3 和 4 表明这些光源的相对光谱功率分布与 D_{65} 的目标光谱分布相比所达到的符合程度。

除了这三类光源以外，曾建议采用荧光灯和滤光钨丝灯的结合。它所提供的相对光谱功率分布见图 5。这种特殊的光源，不是用来模拟 D_{65} ，而是用来模拟 D_{75} 。

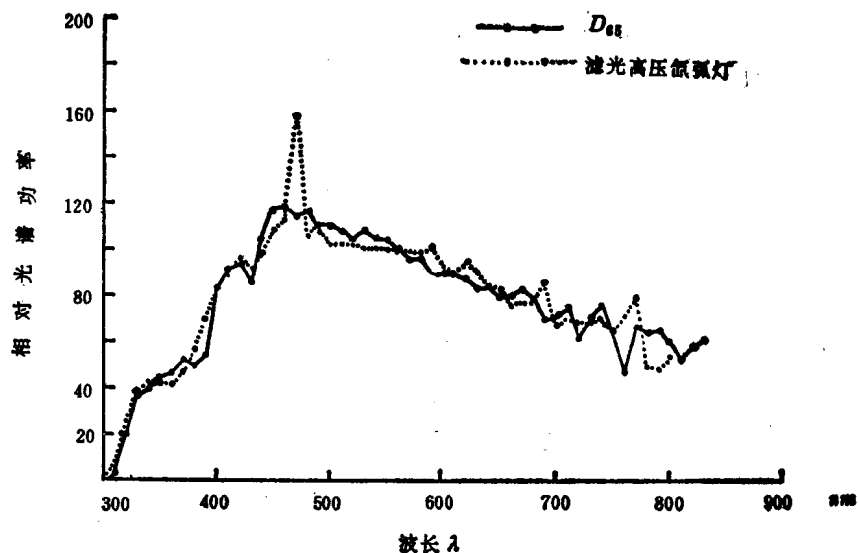


图 2 模拟 CIE 标准光源 D_{65} 相对光谱功率分布的滤光高压氙弧灯的相对光谱功率分布

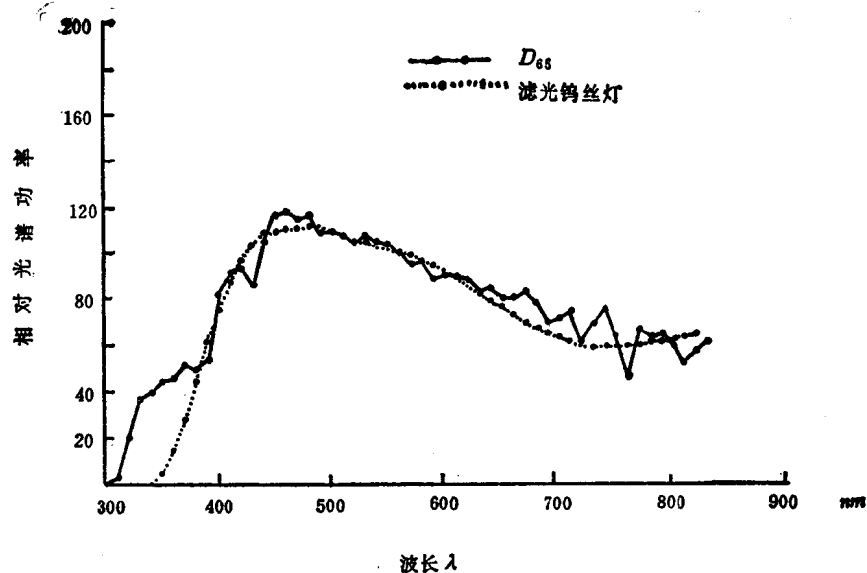


图 3 模拟 CIE 标准光源 D_{65} 相对光谱功率分布的滤光钨丝灯的相对光谱功率分布

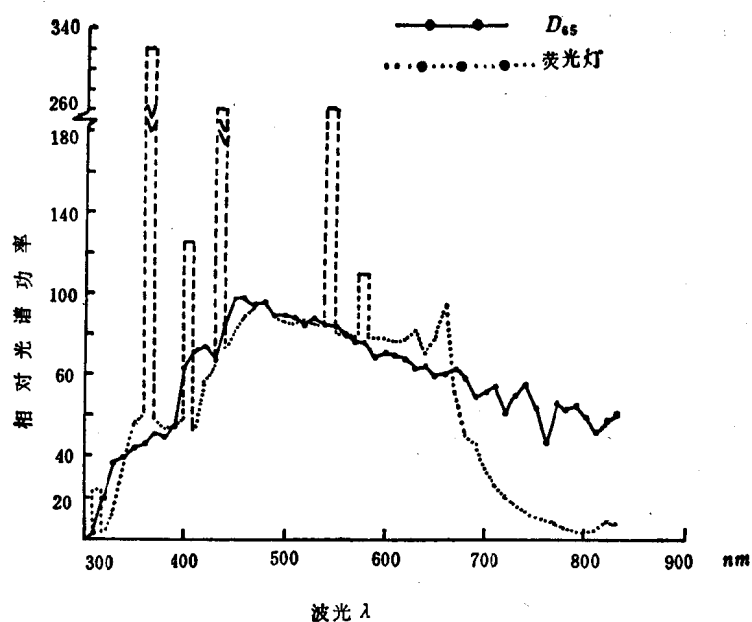


图 4 模拟 CIE 标准光源 D_{65} 相对光谱功率分布的荧光灯的相对光谱功率分布

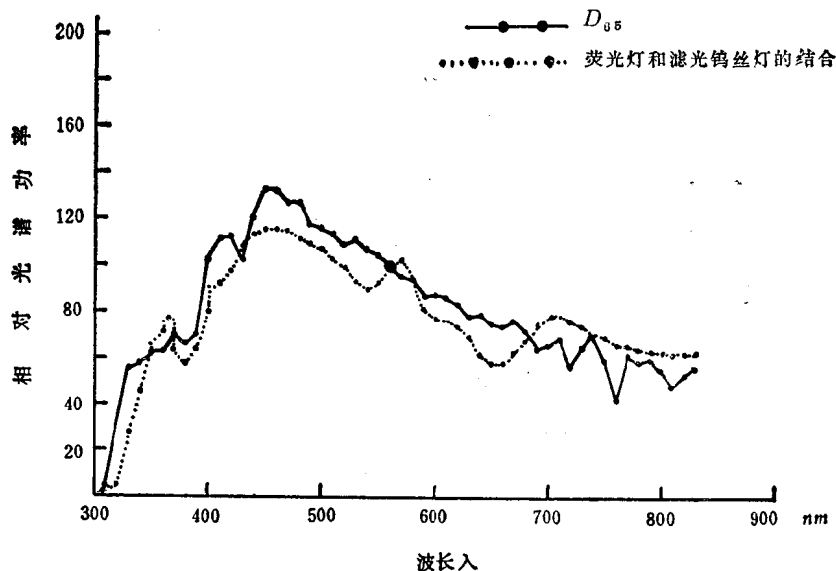


图 5 模拟 CIE 标准光源 D_{75} 相对光谱功率分布的
荧光灯和滤光钨丝灯结合的相对光谱功率分布

图 2~5 表明的相对标准光源的模拟,对每一类型来说,都可以看作是现时所能达到的最佳情况。滤光氙弧灯提供最好的模拟,但可以想象,在视觉颜色匹配不严格依赖于光源光谱分布的场合,例如,匹配在光谱反射上彼此没有多大差别的物体颜色时,其他几种光源对于许多用途来说,仍然是有用的标准光源。

反射系数测量的工作标准 (标准反射板)

对反射材料进行精确的光谱光度测量,就需要有反射系数工作标准。这种工作标准,是依据理想漫射体,即完全漫反射体而精确标定的。最好在整个可见光谱和近紫外部分,要求工作标准有尽量高的反射系数(超过 0.8)。它们必须是不透明的,并且在很长时间里能保持着它们的反射特性。尽管有些材料接近于具备工作标准所要求的特性,但它们并不被认为是十全十美的。压制的硫酸钡或氧化镁粉板(片)的反射率,依制作它们所用的技术不同而有变化。由于紫外辐射曝光和温度变化,都会改变它们的反射特性。瓷砖或乳白玻璃,难于保持清洁。乳白玻璃是半透明的,这一点常常是不理想的。

难以预见选择其他材料,是否能获得性能好的工作标准。可以对材料制造过程及随后作成工作标准所作的处理作很好的控制,以获得改善。

当然,标定工作标准问题与上述问题有密切的联系。绝对反射系数的测量,仍然被认为是难于做到的。在基本计量部门,特别是全世界的国家标准化实验室,迫切地需要作出更大的努力。

除了工作标准“白”以外,还常常需要用“灰”或“彩色”材料制作的其他反射系数标准。这种工作标准用于定期地校正光谱光度计的光度和波长标尺以及在色空间的不同区域中校正光电色度计的三刺激值读数。

在英国有关单位已协作在这方向上工作。市场上也已出现一套十二个陶器颜色标准板,它们经过英国国家物理实验室标定。

荧光材料色度学

不管刺激是怎样产生的,基础色度学的概念方程(5),均适用于任何给定的刺激 $\beta(\lambda)S(\lambda)$ 。特别是,如果观察者视见的物体发荧光,对方程(5)是没有影响的。然而,为了避免违反色度学原则,在测量刺激的光谱分布的技术方面,必须采取一定的措施。

我们观察一个物体（荧光的或非荧光的）时，可能是如图 6 的照明和观察条件。来自物体并进入观察者眼睛的辐射通量表征这一颜色刺激。图 7 是在给定光谱功率分布 $S(\lambda)$ 的光源下的测量物体辐亮度系数 $\beta(\lambda)$ 所要求的相应光谱光度设置。

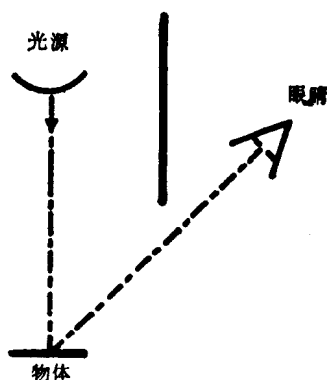


图 6 照明和观察物体的图解
物体可能发荧光，也可能不发荧光。

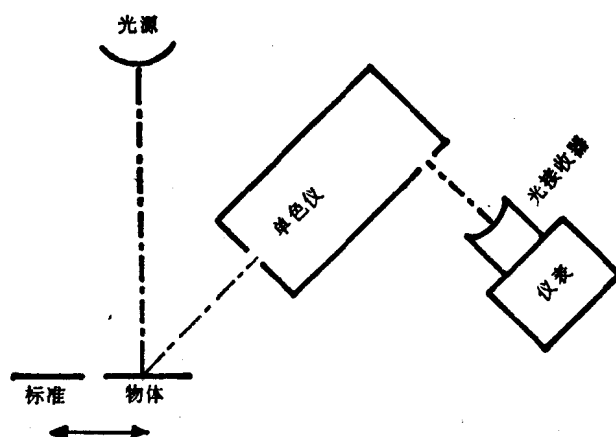


图 7 用光谱光度计测量在给定光源下一个可能是发荧光的
也可能不是发荧光物体的辐亮度系数

图 8 表明对一个非荧光物体所作的光谱光度测量的结果。图 9 表明对一个荧光物体所获得的结果。对非荧光物体 $\beta(\lambda)$ 的测量，不依赖于所用的光源，也就不依赖于 $S(\lambda)$ 。但是，对于荧光物体，当物体是用不同光源照明时，就会得出不同的辐亮度系数函数 $\beta(\lambda)$ 。图 9 所举的例子是荧光物体最初用光源 A 照明，而后用近似地复制光源 D_{65} 光谱功率分布的光源照明。所获得的两个函数 $\beta(\lambda)$ 的差别，是由两种光源（A 和 D_{65} ）光谱功率分布的差别造成的。这些差别发生在物体产生荧光的波段内，其中心点是 610 毫微米。

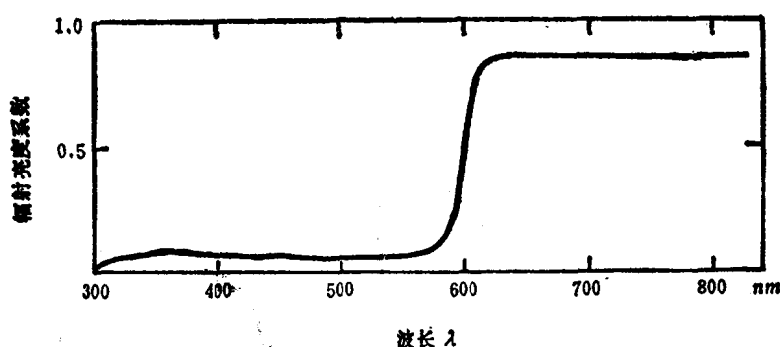


图 8 光谱光度计测量的一个非荧光材料光谱辐亮度系数分布的例子
这个分布不依赖照明材料所用的光源

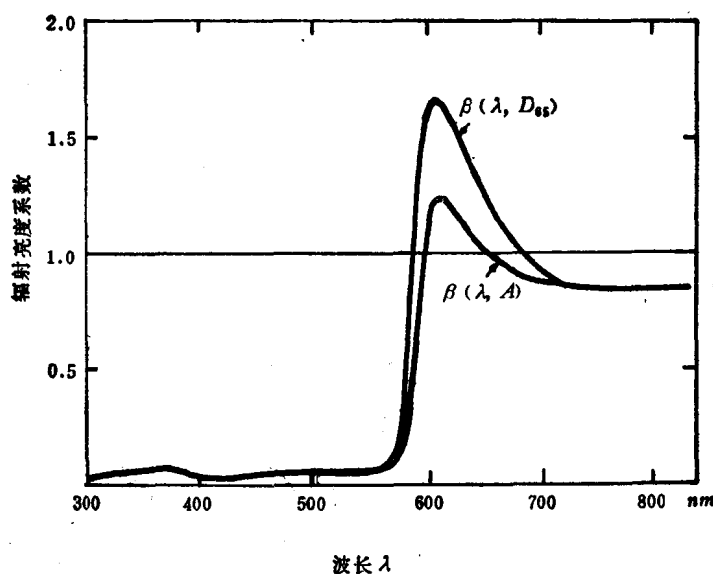


图 9 光谱光度计测量的一个荧光材料光谱辐亮度系数分布的例子

- (i) 用标准光源 A 的光谱功率分布的光源照明
- (ii) 用标准光源 D_{65} 的光谱功率分布的光源照明

对于一个非荧光物体的颜色刺激 $[\beta(\lambda) S(\lambda)]$ ，辐亮度系数 $\beta(\lambda)$ 和光源的光谱功率分布 $S(\lambda)$ ，可以分别地加以测量，然后把这两个函数代入方程 (5)，计算三刺激值。但是，当涉及荧光物体时，就不能这样做了。明显的困难是，在一种光源如 A 光源下所作的测量，不能用来预计另一种光源如 D_{65} 光源下将要作的测量。

为了全面地描述一个荧光物体的反射和发射特性，就需要确定一个光谱辐亮度系数的矩阵。它的元素 $\beta(\lambda, \mu)$ 既是照射物体的辐射能波长 μ 的函数，又是被物体反射和发射的辐射能波长 λ 的函数。然后，用这种矩阵记录就可以计算任何一个具有光谱功率分布 $S(\lambda)$ 的给定光源“S”的光谱辐亮度系数 $\beta(\lambda, "S")$ 。

可惜，这种矩阵方法极其累赘，并且是不实用的。因此，就致力于发展其他用起来不太麻烦并且足够精确的方法。为了使荧光材料色度学成为一个提供足够精确资料的应用工具，在这个领域里应作进一步的研究。

色 度 学 仪 器

在色度学实践中最常使用的仪器是光谱光度计、光电三刺激色度计。用于视觉色度学的测试仪器几乎只为研究目的使用。但这并不是说视觉观察在实践中不再使用了。事实是视觉观察仍用得很多并且常常要用它来检验所作的仪器和数值的预测。

光谱光度计和光电色度计在过去十年中有很大的改进，主要是在精密度和操作方便方面。

由于先进的电子学和更好的光接收器的发展，有可能制造更精确的光谱光度计和三刺激色度计。某些最现代的光谱光度计通常测量密度不太高或者不太暗的材料的光谱透射率和辐亮度系数时都能达到很满意的 0.01% 的精密度。这就是说，如果 $\beta(\lambda)$ 是用光谱光度计在波长 λ 处测得的材料的平均光谱辐亮度系数，那么，反复测量将给出的读数均落在 $\beta(\lambda) - 0.0001 \leq \beta(\lambda) \leq \beta(\lambda) + 0.0001$ 范围内。 $\beta(\lambda)$ 具有的数值在 0.1 和 1.0 之间。当 $\beta(\lambda)$ 低于 0.1 时测量 $\beta(\lambda)$ 的精密度就降低了。

某些型号的光电三刺激色度计已达到同样高的精密度，用以测量在 10 与 100 之间变化的平均三刺激值，反复测量均落在 $(X, Y, Z) - 0.01 \leq (X, Y, Z) \leq (X, Y, Z) + 0.01$ 范围内。同样，凡是三刺激值之一低于 10，对这个三刺激值反复测量的误差就大些。

虽然精密度得到了满意的改善，准确度方面有多大改进却是困难的。如果色度学的仪器能给出与 CIE 推荐标准完全相一致的三刺激值，这个仪器就是准确的。然而，要对准确度作实际的定量评价是很困难的。看来很需要在这个领域中作出一些基础工作。

对光谱光度计来说准确度意味着光度标尺、波长标尺和反射系数的标准都必须要有准确的标定。仪器中的照明和观测条件必须是标准条件。当测定荧光材料在 CIE 标准光源 D_{65} 下的三刺激值时，就进一步要求光源的光谱功率分布等于 D_{65} 的光谱功率分布。

对三刺激色度计来说，准确度意味着光接收器所具有的光谱灵敏性必须等于 CIE 标准观察者的颜色匹配函数，接收器必须是线性的，必须具备标准照明和观测条件，并且在测量待测的样品时必须有一个或更多的标准光源。

看来主要在下列各方面需要改进准确度：反射系数的工作标准，测量荧光材料的光源，照明和观测条件，以及对三刺激色度计来说，用光接收器模拟标准颜色匹配函数。

除了改进准确度以外，仪器制造者为得到更好的精密度正在努力。但为达到更高准确度，一些基础工作必须由国家标准实验室提供，它们必须对光度学及色度学测量所固有的计量基本标准继续负责改进。

仪器制造者为色度仪器的更自动化及高速操作也正在努力。通过把光谱光度计或三刺激色度计与数字计算机结合起来，这方面已取得了重要的进展。这样的仪器是高度完善的色度学工具，它对分析光谱光度计或三刺激色度计所测量的数据提供了几乎不受限制的灵活性。在某些情况下，这个分析包括一个定量的预测公式，用以混合染料或颜料以产生某一给定三刺激值的颜色材料。

高 等 色 度 学

高等色度学涉及对颜色外貌的评定。它的最终目的是预测在我们日常生活中所遇见的复杂环境中呈现给观察者的颜色刺激的外貌。

颜色外貌我们一般指的是所感觉的颜色，它是我们所注视的可见物体所具有的。有两种不同的外貌形式，它们影响到选用什么术语来描述感觉色。颜色可以“物体色的形式”被感知，就是说可见物体不是本身发光的。当被注视的可见物体同周围的其他可见物体一起被观察时，就可能看到这种形式。因此按“物体色形式”感知的颜色称为“相关色”。用来描述相关色的常用术语是色调、明度和彩度（或饱和度）。

当按“自发光形式”(或光源形式)感知可见物体时,我们就说“自发光色”。用来说明这些颜色的一般术语是色调、亮度和彩度(或饱和度)。总是使可见物体的周围视场是完全暗的时候去观察自发光形式。在这些特殊情况下我们就常常说“非相关色”。然而,自发光形式也可能在与周围其他可见物体有关的情况下观察到,但通常这些其他物体的亮度必须较低。

分别按物体色形式或自发光形式看到的颜色的两个三维空间区域不能做到完全相等。存在某些颜色,它们按一种形式是被感知的,按另一种形式却决不能被感知。重要的例子是褐色(棕色)、橄榄色、灰色,只有当可见物体以物体色形式出现时才能产生这些感觉。

不管刺激以哪种形式出现,一种刺激的颜色外貌均取决于四类参数:第一是照明视场的光源的光谱功率分布。第二是观察者注视的物体及在视场中的所有其它物体的光谱透射率或光谱反射率。第三是物体在视场中的空间排列、大小和形状。第四是当观察者注视他所要判断色外貌的物体时,他的对整个视场范围的可见光谱响应特性。

当我们想到日常生活中视场里可能出现的情况千变万化,这个问题的复杂性也就显而易见了。尽管如此,经验告诉我们,即使在最复杂的视场中,物体的色外貌仍稳定于一个“平衡”状态,观察者能重复判断他所知觉的色。困难在于建立一个可以用来对他的判断作适当预测的方法。

用光谱功率分布,光谱透射率,光谱反射系数,大小、形状和空间排列,给构成视场的刺激定标不是一件容易的事情。但这样一个定标是可以设想的。主要的未知参数是,在一个复杂视场前面的观察者的可见光谱响应特性。视觉现象如颜色适应、同时对比和相继对比,都被认为是决定可见光谱响应特性的重要因素。关于这些视觉现象已做了大量的工作,但是这些研究几乎完全限于简单的视场,要把这些结果用到复杂的视场是困难的。

对颜色感觉属性,例如:相关色的色调、明度和彩度确定适当的标尺是建立预测色外貌方法的基础。

如果情况简单,涉及到的仅仅是由具有正常颜色视觉的观察者在以中灰为背景和日光下观察平面不透明的物体,则可以用孟塞尔颜色系统找到色调、明度、彩度相当近似的标尺。在这个标尺的基础上,只要细心遵守观察条件,根据一定的物体颜色刺激的三刺激值,预测它的色外貌是可能的。

颜色外貌另一个重要的方面是色差的评定。色差的测量对于确定感觉上均匀的色标尺有直接关系,并在工业上当必须确定和控制色宽容度时是相当重要的。由于它的重要性,以及至今尚未发现一个满意的测量色差的方法,所以近年来在解决这个问题方面做了许多工作。

要确定一个能适当地说明色差的量,取决于观察者观察两对颜色刺激时对他可能感觉到的两个颜色差别的相对大小进行判断的能力。观察者的判断随着观察条件和呈现给他的刺激种类会有很大变化。正如对颜色外貌进行测量的情况一样,被检验的刺激及其周围的刺激的大小、形状、亮度和相对光谱能量分布是影响观察者的判断的重要参数。观察者色差判断的精密性与严格的颜色匹配的精密性比较起来,一般较差。

评定最小可觉色差到中大程度的色差,被认为具有重要的意义。为了求得一个方法来预测观察者在一定的观察条件下观看两个特定的刺激时的色差判断,已作了各种努力。然而,所有的研究的特点都有这样一个共同的概念:所感觉的颜色可以用三维空间中的点来代表。因此,问题就是在这个空间里测量与感觉的色差相应的距离。这就产生了线元和色差公式这些数学概念。

直到目前所提出的所有线元都被假定具有黎曼几何形式,它是用最小可觉色差 ds 或 ds 的常数分数所确定的正二次方程来规定的。

如果第一个颜色由三个变量 U_1 、 U_2 、 U_3 表示,第二个颜色由 $(U_1 + dU_1)$ 、 $(U_2 + dU_2)$ 、 $(U_3 + dU_3)$ 表示,其中 dU_1 、 dU_2 、 dU_3 分别是 U_1 、 U_2 、 U_3 的(+或-)微小增量,那么这对色的可觉色差的必要和充分的条件是: ds 对所有这样的色都具有同样的常数值,我们有:

$$\begin{aligned}(ds)^2 = & g_{11}(dU_1)^2 + 2g_{12}(dU_1)(dU_2) \\ & + g_{22}(dU_2)^2 + 2g_{23}(dU_2)(dU_3) \\ & + g_{33}(dU_3)^2 + 2g_{31}(dU_3)(dU_1)\end{aligned}\quad (6)$$

式中系数 g_{ik} 是 U_1 、 U_2 、 U_3 的连续函数，它们使得在 U_1 、 U_2 、 U_3 所有点上对 dU_1 、 dU_2 、 dU_3 作任意选择时都使 $ds > 0$ 。

对于两个色差超过最小可觉色差的色度 P_1 和 P_2 ，线元仍可用于评价它们的差别的大小。这个大小被假定相当于在 U_1 、 U_2 、 U_3 空间 P_1 和 P_2 两点之间的最小距离。黎曼空间的最小距离是测量沿着连接 P_1 与 P_2 的短程线（通常是曲线）而获得的。

一般来说， U_1 、 U_2 、 U_3 这三个变量是 CIE 三刺激 X 、 Y 、 Z 或这些变量的某种线性变换。在建立方程式（6）所表示的那种线元时，突出的问题是确定米制系数 g_{ik} 。

为确定米制系数，采用过两种不同的方法。一种方法是根据视觉机制功能理论的考虑，结合某些实验性视觉阈限数据。这种方法可称为“归纳法”。

另一方法可称为“经验法”，它是对阈值色差的大批测量结果作经验分析，或是对被认为与阈值色差紧密相关的色匹配“标准偏差”作经验分析得出米制系数。这种色匹配的“标准偏差”是对遍布色空间广大区域的各种颜色得到的。

在这两种方法中，确定米制系数的归纳法较好，但是由于我们缺乏有关视觉机制功能的知识，这一方法就比较复杂而困难。

色差公式在原则上不同于线元，因为几乎所有各种情况，都是假设颜色感觉空间是欧几里德（Euclidean）空间。而且，色差公式主要与小色差，而不是与实际的阈值色差有关，而且大小色差都同样应用。

有几个重要的色差公式都是以颜色次序系统为基础的，而这些系统又是根据色感觉原则构成的。孟塞尔颜色系统就是这样一个颜色次序系统的杰出例子。

一些以白色或灰色为背景用日光照明的颜色片，被选来代表孟塞尔的色调、彩度、明度的恒定标度，打算用它们作例子来说明色感觉的基本标度：色调、彩度、明度。每一标度对具有正常颜色感觉的观察者的感觉来说是等间隔的。

能表示孟塞尔系统感觉标度分级的颜色片，曾根据 CIE 三刺激值和色度坐标标定，后者所根据的是 CIE 1931 标准色度观察者和代表昼光的光源。在 CIE (x 、 y 、 Y) 空间中，由此导出一个由许多点组成的网络，它们在色品图中对不同的孟塞尔明度值（即 $Y = \text{常数}$ ），代表恒定的彩度线和恒定的色调线。正如所料，点的网络没有表现出间距的均匀性，恒定彩度线呈椭圆形，恒定色调线是曲线，沿着这些线的点的间距表现出系统性的变化。然而，可以找到一个解析表达式，它把 CIE (x 、 y 、 Y) 空间转换为一个新的空间，使点的网络变成几乎均匀的网络。在这个新空间里，恒定彩度线很类似于同心圆，恒定色调线是发源于一个中心点的近似直线，所有的线都间距均匀。解析表达式都是通过数值最优化技术（曲线拟合）靠经验得出的，一般比较复杂。

另一个与此有些不同的求得感觉上均匀的尺度的方法是，对 CIE (x 、 y) 色品度进行投影转换，产生一个新的色品图。在这个色品图中，相等的距离就等于感觉上相等的色差。在这种色品图中，所考虑的仅是恒定亮度的颜色刺激，称此图为“均匀色品图”，即 UCS 图。已证明它只能提供色变差感觉大致的预测，但是由于从 (x 、 y) 色品坐标转换到一个新的，例如 (u 、 v) 色品坐标的方法简便，在某些实际应用中是很有价值的。UCS 图限于应用在恒定亮度颜色刺激，但如果把它和明度指数结合起来，这个局限性就可以克服。

现在创造了许多线元和色差公式，有些在工业上已应用到色—生产—控制问题方面，然而，没有一种能够通用于不同的工业实验室中。

高等色度学的最新发展

基础色度学已经有了共同采纳的标准和方法，今后发展和没解决的问题似乎是十分显然的和明确的。与此相反，高等色度学看起来还有大量非常复杂和基本没有解决的问题。