

色 度 学 发 展 近 况

中国科学院心理所

导 言

随着技术、标准、理论上的迅猛进展，颜色测量—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 Newton (1642—1727)，Grassmann (1809—77) Maxwell (1831—71)，Helmholtz (1821—94) 和 Schxödinger (1887—1961)，而奠定现代色度学基础的科学家有，Guild, Judd, Mae Adam, Richter, Sfiles 和 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颜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。突出的例子如色度差、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度差的问题上。

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：

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

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：

$$X_1 = k \int_{\lambda} S_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y_1 = k \int_{\lambda} S_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z_1 = k \int_{\lambda} S_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

刺激 $S_2(\lambda)$ 的三刺激值是:

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

方程(2)和(3)中的常数 k 是一个规格化常数, 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 $S_2(\lambda)$ 的光谱成份是显著不同的, 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“异谱同色刺激”(metameric stimuli)。也就是光谱成份不同, 但三刺激值相等的刺激。

方程(1)和(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人间的差别。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异谱同色的匹配, 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异谱同色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围膜中央凹, 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预决定匹配时, 原来的异谱同色匹配就会破坏。这类匹配破坏被认为是杆体的参预而造成的。我们知道, 给定的一对异谱同色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预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加而引起失去匹配的方向和程度。

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。国际照明协会[CIE]已经推荐了所需要的标准和办法。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 年标准色度学观察者”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 年补充标准色度观察者。” CIE 1931 年标准观察者适用于 $1^\circ \sim 4^\circ$ 张角视场的颜色匹配，而 CIE 1964 年补充标准观察者适用于大于 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。应当用大视场数据时，就得假定杆体机制被充分地抑制不影响异谱同色颜色匹配。

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 K 的普朗克 (Planckian) 辐射体的相对光谱功率分布。

光源 B 和 C 原定分别代表直接阳光 (4870 K) 和平均日光 (6770 K)。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 K)。

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 K 到 25000 K)。 D_{55} (5500 K) 和 D_{75} (7500 K) 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 K 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滤光器 (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，涉及的是客体颜色刺激，也就是被照明的和看到的是不透明的客体(染料样品纺织品等)。某一给定客体的光谱反射系数 $\rho(\lambda)$ 或辐射亮度系数 $\beta(\lambda)$ ，是用分光光度计测定的。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射亮度系数等于 1 的理想均匀漫射散体。

当然，无法获得物质形态的反射系数基准，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)。

在分光光度计中，客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察的。这一点及实际采用的照明和观察条件是非常重要的，特别是当测试的客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察条件作为标准。它们是 45° 照明，法线 (0°) 观察；漫射照明，接近法线观察以及与这两者相反的条件。

依据照明和观察客体采用的几何关系，客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 $\beta(\lambda)S(\lambda)$ 所规定的客体颜色刺激的三刺激值,就从下式获得:

$$\begin{aligned} X &= k \int_{\lambda} \beta(\lambda)S(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= k \int_{\lambda} \beta(\lambda)S(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= k \int_{\lambda} \beta(\lambda)S(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

这是直接从方程(2)中引伸出来的。规格化因子规定为:

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

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。

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 年标准观察者,指定用于 1° 到 4° 张角视场的颜色匹配。第二套规定, CIE 1964 年补充标准观察者,

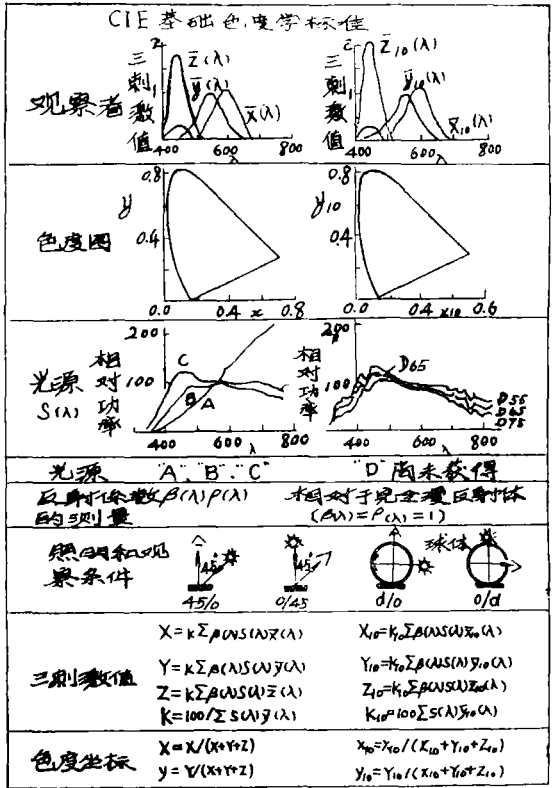


图 1 基础色度学 CIE 标准和处理方法梗概

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° 和近于点大小视场,提供一套合适的颜色匹配函数。极小客体及点光源的色度学,用我们现在的系统,无法加以适应处理。

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 Trezona 和 Stiles, Wyszecki 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预的程度和它对大视场颜色和匹配的影响。

颜色匹配恒常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, 需要做更多的工作。

异谱同色性指标数

方程(1)表述的颜色匹配条件, 规定了二个异谱同色刺激 $S_1(\lambda)$ 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。

例如取两个异谱同色客体颜色刺激的情况:

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

这里 $\beta_1(\lambda)$ 和 $\beta_2(\lambda)$ 代表两个客体的光谱辐射亮度系数, $S(\lambda)$ 是照射这些客体的光源 D_{65} 的相对光谱功率分布。当由标准观察者观看时, 这两个客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的那样相同。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 $\beta_1(\lambda) \equiv \beta_2(\lambda)$ 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。

由于异谱同色的客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异谱同色性的研究。许多关于异谱同色性的新近研究, 已经汇集在关于“异谱同色性的特殊指标: 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异谱同色程度的一种尺度。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 Allen 所建议的方向进行。

有人曾提出建议, 例如, 沿着 Nimeroff 和 Yurow 提出的途径, 创立一种“异谱同色性一般指标”。但是, 如果要成为是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的难于设想出来。

颜色匹配函数的变异性

CIE 1931 年标准观察者和 CIE 1964 年补充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, 这样高精度是多于的。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, 从而要求在小的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。

Nimeroff, Rosenblat 和 Dannemillen 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_{75} ，而是用来模拟 D_{75} 。

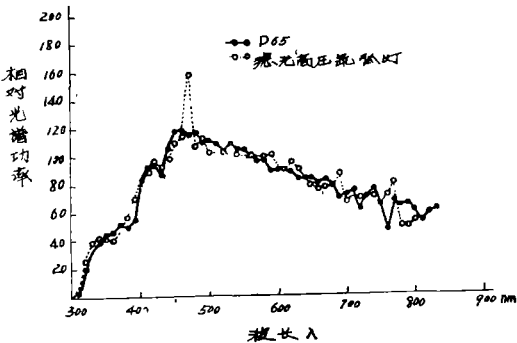


图 2 模拟 CIE 标准光源 D_{65} 相对光谱功率分布的滤光高压氙弧灯的相对光谱功率分布

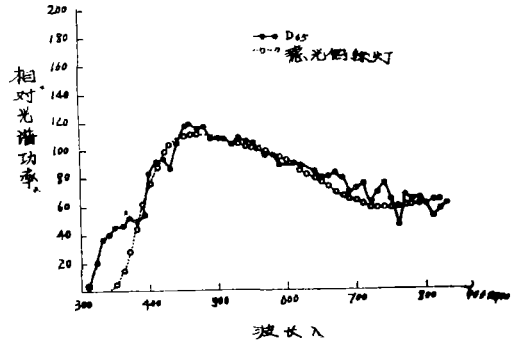


图 3 模拟 CIE 标准光源 D_{65} 相对光谱功率分布的滤光钨丝灯的相对光谱功率分布

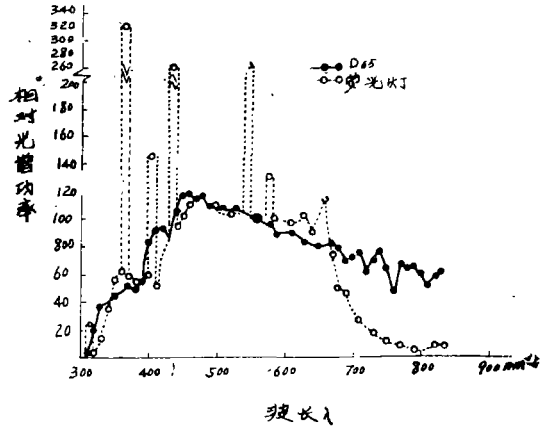


图 4 模拟 CIE 标准光源 D_{65} 相对光谱功率分布的荧光灯的相对光谱功率分布

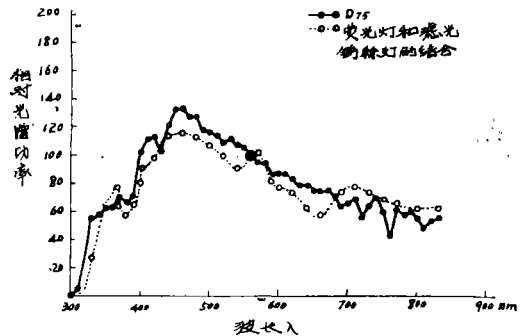


图 5 模拟 CIE 标准光源 D_{75} 相对光谱功率分布的荧光灯和滤光钨丝灯结合的相对光谱功率分布

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客体颜色时，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分光光度测量，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。对紫外辐射曝光和温度变化，都会改变它们的反射特性。瓷砖或浓乳白玻璃，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分光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，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，如果观察者视见的客体发荧光，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。

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

图 8 表明对一个非荧光客体所作的分光光度测量的结果。图 9 表明对一个荧光客体所获得的结果。对非荧光客体 $\beta(\lambda)$ 的测量，不依赖于所用的光源，也就不依赖于 $S(\lambda)$ 。但是，对于荧光客体，当客体是用不同光源照明时，就会得出不同的辐射亮度系数函数 $\beta(\lambda)$ 。图 9 所举的例子是荧光客体最初用光源 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。这些差别发生在客体产生荧光的波段内，其中心点是 610 毫微米。

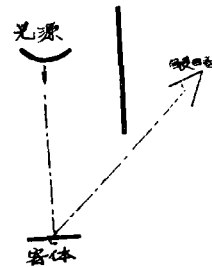


图 6 照明和观察客体的图解。客体可能发荧光，也可能不发荧光。

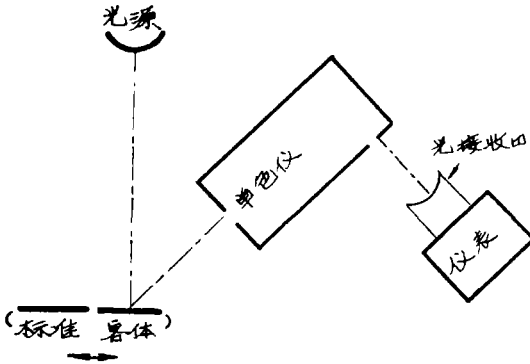


图7 用分光光度计测量在给定光源下一个可能是发荧光的也可能不是发荧光客体的辐射亮度系数。

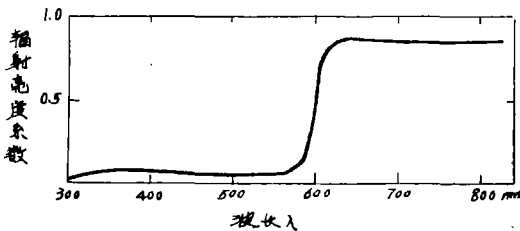


图8 分光光度计测量的一个非荧光材料光谱辐射亮度系数分布的例子。这个分布不依赖照明该材料所用的光源。

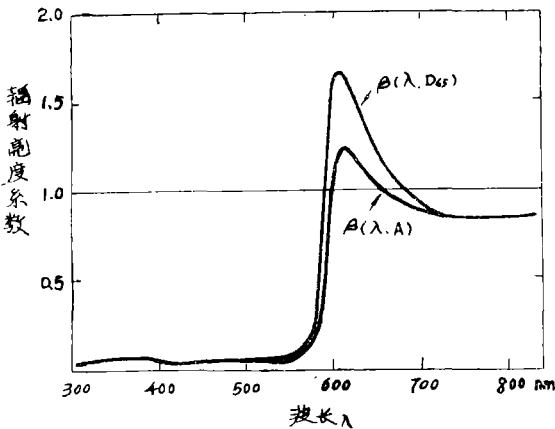


图9 分光光度计测量的一个荧光材料光谱辐射亮度系数分布的例子。(i)是用标准光源A的光谱功率分布的光源照明；(ii)是用标准光源D₆₅的光谱功率分布的光源照明。

对于一个非荧光客体的颜色刺激 $[\beta(\lambda) S(\lambda)]$, 辐射亮度系数 $\beta(\lambda)$ 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, 当涉及荧光客体时, 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D₆₅光源下将要作的测量。

为了全面地描述一个荧光客体的反射和发射特性, 就需要确定一个光谱辐射亮度系数的矩阵。它的元素 $\beta(\lambda, \mu)$ 既是照射客体的辐射能波长 μ 的函数, 又是被客体反射和(或)发射的辐射能波长 λ 的函数。然后, 这种矩阵记录就可以用于计算任何一个具有给定光谱功率分布 $S(\lambda)$ 的给定光源“S”的光谱辐射亮度系数 $\beta(\lambda)$, “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分光光度计, 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而用。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。

分光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。

由于先进电子学和更好的光接收器的发展, 有可能制造更精确的分光光度计和三刺激色度计。某些最现代的分光光度计通常测量不太密或者不太暗的材料的光谱透射率和辐射亮度系数时都能达到很满意的0.01%的精密性。这就是说, 如果 $\beta(\lambda)$ 是用分光光度计在波长 λ 处测得的材料的平均光谱辐射亮度系数, 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 $\beta(\lambda)$ 的精密性就降低了。

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。

对分光光度计来说准确度意味着光度刻度，波长刻度和反射系数的标准都必须要有准确的标定。仪器中的照明和观察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察条件，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，照明和观察条件，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。通过把分光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，它对分析分光光度计或三

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，这种分析包括预计着色方程中为产生一给定三刺激值的颜色材料而混合的染料或颜料的数字。

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客体所具有的。有两种不同的外貌样式，它们影响到选用什么术语来描述感觉颜色。颜色可以“物体色的样式”被感知，就是说可见客体不是本身发光的。当被注视的可见客体同周围的其他可见客体一起被观察时，就可能看到这种样式。因此按“物体色样式”感知的颜色称为“相对色”。用来描述相对色的常用术语是色调，明度和色浓度（或饱和度或彩度）。

当按“自发光样式”感知可见客体时，我们就说“自发光色”。用来说明这些颜色的一般术语的色调、亮度和色浓度（饱和度彩度）。总是使可见客体的周围视场是完全暗的时候去观察自发光样式。在这些特殊情况下我们就常常说“非相对色”。然而，自发光样式也可能在与周围其他可见客体有关的情况下观察到，但通常这些其他客体的亮度必须较低。

分别按物体色样式或自发光样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，它们按一种样式是被感知的，按另一种样式却决不能被感知。重要的例子是褐色（棕色）、橄榄色、灰色，只有当可见客体以物体色样式出现时才能产生这些感觉。

不管刺激以哪种样式出现，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，物体在视场中的空间排列、大小和形状，第四，当观察者注视他所要判断颜色外貌的物体时，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，物体的颜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颜色。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、光谱透过率、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能的。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：相对色的色调明度和色浓度确定适当的尺度是建立预测颜色外貌方法的基础。

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，则可以用孟氏颜色系统找到色调、明度、色浓度相当近似的尺度。在这个尺度的基础上，只要细心遵守视察条件，根据一定的物体颜色刺激的三刺激值，预测它的颜色外貌是可能的。

颜色外貌另一个重要的方面是色度差的评定。色度差的测量对于确定感觉上均匀的颜色尺度有直接关系，并在工业上当必须确定和控制颜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度差的方法，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度差的量，

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。视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。观察者色度差判断的精密性，与严格的颜色匹配的精密性比较起来，一般较差。

评定最小可觉色度差到中大程度的色度差，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度差判断，已作了各种努力。然而，所有的研究的特点都有一个共同的概念：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度差相应的距离。这就产生了线素和色度差公式这些数学概念。

直到目前所提出的所有线素都被假定具有黎曼几何 (Riemannian) 形式，它是用最小可觉色度差 ds 或 ds 的固定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 -) 小增量，那么这对颜色的最小可觉色度差的必要和充分的条件是： ds 对所有这样的颜色都具有同样的常数值，我们有：

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

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 $ds > 0$

对于两个色度差超过最小可觉色度差的颜色 P_1 和 P_2 ，线素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， $U_1U_2U_3$ 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)所表示的那种线素时，突出的问题是确定度量系数 g_{ik} 。

为确定度量系数，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”，它是对阈值色度差的大批测量结果作经验分析，或是对被认为与阈值色度差紧密相关的色匹配“标准偏差”作经验分析得出度量系数。这种色匹配的“标准偏差”是对遍布颜色空间广大区域的各种颜色得到的。

在这两种方法中，确定度量系数的归纳法较好，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。

色度差公式在原则上不同于线素，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，色度差公式主要与小的，但不是实际的阈值色度差有关，而且大小差别都可应用。

有几个重要的色度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颜色感觉原则构成的。孟氏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，被选来代表孟氏的色调、色浓度、明度的恒定标度，打算用它们作例子来说明颜色感觉的基本标度：色调、色浓度、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。

能表示孟氏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年标准观察者和代表日光的光源。在CIE(x, y, Y)空间中，由此导出一个由许多点组成的网络，它们在色度图中对不同的孟氏明度值(即 $Y =$ 常数)，代表恒定的色浓度线和恒定的色调

线。正如所料，点的网络没有表现出间距的均匀性，恒定色浓度线呈椭圆形，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，恒定色浓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)色度图进行投影转换，产生一个新的色度图。在这个色度图中，相等的距离就等于感觉上相等的色度差。在这种色度图中，所考虑的仅是恒定亮度的颜色刺激，称此图为“均匀色度图”，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)色度坐标转换到一个新的、例如(u, v)色度坐标的方法简便，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标尺度结合起来，这个局限性就可以克服。

现在创造了许多线素和色差公式，有些在工业上已应用到颜色——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解决的问题。

色度差公式

创造一种为了预测两种给定的颜色刺激之间的感觉色变差大小的令人满意的色度差

公式（或线素）的问题，已经长期被认为是一个迫切的工业上的问题。但是，一直到二十世纪五十年代后期才把这个问题提到 CIE 色度学委员会的工作计划内。这就意味着各国具有经验的色度工作者将共同考虑和解决这个问题。

一般都承认，这项任务是非常困难的，在颜色辨别方面缺少新的实验资料是妨碍委员会找出一个满意的解决方法的最重要的因素。然而，由于问题的迫切性，1960年决定暂时推荐使用由 Mac Adam 首先提出的 UCS 图。在若干相似图中选择这种色度图的原因，是从 CIE (x,y) 色度图转换成这种色度图比较简单。

暂时推荐的图是大家都知道的 CIE 1960 均匀色度图。凡是需要有一个色间距感觉上比 CIE (x,y) 色度图更均匀的色度图时，推荐用该图。CIE 1960 年均匀色度图所提供的色间距适用于所观察的色刺激具有可忽略的亮度差的情况。由颜色客体所表现的刺激都具有相同的大小和形状，并且观察者已经适应于与平均日光如 D_{65} 相差不多的色视场之后，在白到中灰的背底上观看这些刺激。

基于 Wyszecki 的建议，1964 年 CIE 暂时推荐把 CIE 1960 年均匀色度图扩大到三维空间。所推荐的直角座标 U^*, V^*, W^* 与 CIE 三刺激值 X, Y, Z 是非线性关系。在 CIE 1964 年 (U^*, V^*, W^*) 空间内两个给定点 (U_1^*, V_1^*, W_1^*) 和 (U_2^*, V_2^*, W_2^*) 之间的距离确定两给定点所表现的两种颜色之间感觉上差异大小的一个量度 ΔE_{CIE} 。 ΔE_{CIE} 很简单地由计算两种颜色相应的 U^*, V^*, W^* 座标值之差的平方和的平方根得到。

1960 和 1964 CIE 的推荐之所以提出是企图统一工业上评定色度差的各种方法，从而有助于评定与规定和描述色宽容度有关联的一些问题。在提出两推荐时，在不同的实验室，约有十几种方法被用作估测色度差。实际上这种多种多样是很不理想的。由

一种色度差公式推出的色度差要用另一色度差公式来解释，如果不是不可能，就是有困难。

CIE 企图统一评定色度差的种种实践只取得了有限的成功。工业界的许多工作者指出，CIE 的暂时推荐对他们的工作没有产生预期的改善。因此，再度强调确定使人满意的色度差公式的迫切性，于是 CIE 色度学委员会的工作计划被扩充了。这个工作计划规定要搜集色度差判断的新的实验资料，并且提议除 CIE 1964 年公式外要研究其他三种色度差公式。其它三种公式是根据 Glasser 等人研究的立方根公式，根据 Godlove 研究的 Godlove-Munsell 再标 (renotation) 公式及 Friele-Mac Adam-chickering 公式。还有 Adams-Nickersen 色度差公式，叫 ANCAB 公式，它在纺织业引起注意。

CIE 主张进一步研究色度差评定问题的建议增加了对这个问题的兴趣，特别是在工业方面的应用。最近几年已作出了与这问题有直接关系的贡献是很多的。然而要满意的解决这个问题，恐怕到现在为止还没取得重大的进展。尽管如此，毫无疑问，对这个问题已有相当深入的了解，这将加速了这一领域的进展。

关于色度差评定的最新成就，已经发表过详细的评述，本文引用目前受欢迎的色度差公式（见表 1）和 CIE 色度委员会在 1971 年 9 月 Barcelona 会议上提出的工作计划。

表 1 当前流行的特别有用的色度差公式

CIE 1964

$$\Delta E_{CIE} = [(U_1^* - U_2^*)^2 + (V_1^* - V_2^*)^2 + (W_1^* - W_2^*)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$U^* = 13W^*(u - u_0)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0)$$

$$W^* = 25Y^{\frac{1}{3}} - 17 (0 \leq Y \leq 100)$$

$$u = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v = 6Y / (X + 15Y + 3Z)$$

u_0, v_0 = 标称消色刺激的色度坐标

ANLAB

$$\Delta E_{AN} = \left[(L_1 - L_2)^2 + (A_1 - A_2)^2 + (B_1 - B_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$L = 9.66 V_r$$

$$A = 42 (V_x - V_r)$$

$$B = 16.8 (V_y - V_r)$$

用表格将 X, Y, Z 三刺激值转换成所需要的 V_x, V_y 和 V_z 值。立方根(Cube Root)

$$\Delta E_{CR} = \left[(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (L_1 - L_2)^2 \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$a = 106.0 (R^{\frac{1}{3}} - G^{\frac{1}{3}})$$

$$b = 42.34 (G^{\frac{1}{3}} - B^{\frac{1}{3}})$$

$$L = 25.29 G^{\frac{1}{3}} - 18.38$$

$$R = 1.1084X + 0.0852Y - 0.1454Z$$

$$G = -0.0010X + 1.0005Y + 0.0004Z$$

$$B = -0.0062X + 0.0394Y + 0.8192Z$$

FMC-2

$$\Delta E_{FMC-2} = \left[(\Delta C)^2 + (\Delta L)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta C = K_1 \left[(\Delta C_{rg}/a)^2 + (\Delta C_{yb}/b)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta L = 0.279K_2 (P\Delta P + Q\Delta Q) / \left[a(P^2 + Q^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$K_1 = 0.55669 + 0.049434Y - 0.82575 \cdot 10^{-8} Y^2 + 0.79172 \cdot 10^{-6} Y^3 - 0.30087 \cdot 10^{-7} Y^4$$

$$K_2 = 0.17548 + 0.027556Y - 0.57262 \cdot 10^{-8} Y^2 + 0.63893 \cdot 10^{-6} Y^3 - 0.26731 \cdot 10^{-7} Y^4$$

$$a^2 = 17.3 \cdot 10^{-8} (P^2 + Q^2) / \left[1 + 2.73P^2Q^2 / (P^4 + Q^4) \right]$$

$$b^2 = 3.098 \cdot 10^{-4} (S^2 + 0.2015Y^2)$$

$$P = 0.724X + 0.382Y - 0.098Z$$

$$Q = -0.48X + 1.37Y + 0.1276Z$$

$$S = 0.686Z$$

Godlove-Munsell

$$\Delta E_{GM} = f_s \left\{ 2 f_b C_1 C_2 \left[1 - \cos 3.6 (H_1 - H_2) \right] + (C_1 - C_2)^2 + 16(V_1 - V_2)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

H = 孟氏再标 (Munsell renotation)

色调

V = 孟氏再标 (Munsell renotation)

明度值

C = 孟氏再标 (Munsell renotation)

彩度值

$$f_b = \left\{ 4 / \left[3 - \cos 3.6 (H_1 - H_2) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

(色调加权系数)

3.6(H₁ - H₂) = 以角度的度数表达色度差

$$f_s = (15 + S^{\frac{1}{2}}) / (5 + S^{\frac{1}{2}})$$

$$S = \bar{C} + 16(\bar{V} - V_s)^2$$

$$\bar{V} = (V_1 + V_2) / 2 \quad \bar{C} = (C_1 + C_2) / 2$$

V_s = 孟氏再标 (Munsell renotation)
灰底或白底的值

CIE 关于色度差评定的工作计划

CIE 色度学委员会注意到各种色度差公式研究, 在这些研究中比较了1967年提出研究的四种公式。这些研究并没有揭示这四种公式中的任何一种在预测视觉观察中得出的色度差大小方面, 显著的比其他公式好。然而, 在这个工作中, 色度差判断常常是以某种商业方面的可接受性为基础的, 而不是以纯可感觉性为基础的。今后的工作应该面向可感觉性方面, 因为可接受性对于不同的应用可能有很大的差异。

如果可能的话, 现有的关于阈限色度差或近于阈限色度差数据 (主要是关于颜色匹配方差的数据) 应汇总起来以便提供一套一致的数据, 它们代表具有正常颜色视觉观察者的颜色匹配的方差。

需要对色度差可感觉性作进一步的实验, 譬如当色度差比阈限大而比孟氏系统的典型色度差小的时候。这项工作应符合1967年规定的方针的条件下进行。这项建议如下:

色度差大小: 1到10 CIE 1964年色度差单位。

注: 由于在色度差公式方面期望有所修正和改进, 根据 CIE 1964 公式计算的色度差单位座标为“CIE 1964 色度差单位”。

视场大小：4°或更大

周围的性质：均匀一致

周围的亮度：100到1000烛光/平方米

周围的色度：等效于从5500K 到 7500K
的CIE D 光源的色度

样品的亮度：为周围亮度的5%到50%
以产生表面色感觉。

分界线：宽度接近零

观察者：能判断色度差的可感觉性而没有任何可接受性偏见。

关于孟氏系统典型色度差大小的数据现在已较好地确定了，例如孟氏再标系统及由美国光学协会均匀色标委员会汇编的数据。应对这些数据加以比较和系统化，为颜色的描述提供一个方便的均匀的颜色空间。所使用的参数应包括色调、明度、色浓度的近似相关量。

若干实验室已表示他们计划根据 CIE 方案进行研究，预料这些研究在几年之内将有结果。

白度测量

可以说，白度测量与基础色度学或高等色度学都无关，因为白度的视觉判断受诸如爱好与习惯这些复杂的心理参数的影响，并与所涉及的特殊职业和技术密切相关。在任何合理的定量分析中，考虑这些因素都是困难的。看来不可能提出一个普通使人满意的白度公式。

也可以说，白度的测量确实与高等色度学有关，因为许多实际情况说明白度的概念是有意义的，并可在可靠性和精确性均使人满意的情况下得出白度标。白度等级的判断可与已确立的色度参数和颜色感觉参数联系起来。

这两种说法哪一种是正确的 还正在讨论。虽已提出许多白度公式，但还没有找到一个普遍被接受的公式。这种情况与色度差的评定在某种程度上类似，只是在白度评定方面，关于喜爱白或理想白的问题仍有待

于决定。

CIE 色度委员会所持的态度是，值得研究白度测量这个复杂的问题，搞清究竟是否能在色度学范围内得到圆满的解决。已经成立了一个小组委员会，在视觉实验和仪器实验两方面努力从事这项任务。

在这方面 Ganz 的最新贡献是值得注意的，有关白度测量的进一步工作 Ganz 提出了应考虑若若干点，其中的几点如下：

(1) 应使用同样的标准光源进行视觉的和仪器的白度的测定。他推荐用近似 CIE 标准光源，包括光谱的紫外部分的 D_{65} 光源。

(2) 与(1)不一致的实验数据不能用于确立或检验白度公式。

(3) 应该放弃建立在喜爱白式理想白基础上的白度公式，因为很难使用这样一种目标白来评定不同色调的白。

(4) 推荐用白度 $W = 100$ 的漫射体作为白度公式的参照点。

颜色适应

颜色适应的视觉现象在颜色外貌的任何测量中，不管视场是复杂的还是简单的，都是一个有力的因素。或许颜色适应是高等色度学中迫切需要进一步研究的最重要的一个参数。

颜色适应定义为“眼睛处在视场全部颜色相平衡的状态”。

观察者眼睛在这种状态下，以消色的或灰色的，刺激的三刺激值来规定这种状态是方便的，在改变视场的刺激时，眼睛的颜色适应也发生变化，问题是要对由此而引起的视觉反应的变化进行精确的预测。

尽管在不同条件下得到了许多观察材料，但很少揭示出颜色适应的一般原则。

CIE 委员会最近建立了一个小组委员会，它的专门任务就是去研究颜色适应的问题。并希望通过这个小组委员会进行新的实验和理论的研究以导致问题的解决。

译自“Colour 73” P.21—