

$-\omega_2$ 的 CARS 束, 其强度正比于 $(N_{v''j''} - N_{v'j'})^2$, 其中 $N_{v'j'}$ 和 $N_{v''j''}$ 分别为喇曼跃迁的上能级和下能级的粒子数. 在超声分子束中, 等熵膨胀降低了平移温度和转动温度, 在某些情形中还降低振动温度, 从而下能级的粒子数增加, CARS 信号也增强. 图 8 表示超声分子束 CARS 系统的示意图, 在只要求中等分辨率 ($0.1-0.3$ 厘米 $^{-1}$) 的情形中, 只要简单地使一个大气压的气体通过喷嘴膨胀到由机械泵抽空的容器中就可以了. 在该系统中由 CARS 光谱测得了氮分子的转动温度^[1].

显然, 超声分子束的特点同样适于其他的相干喇曼光谱方法.

参 考 文 献

- [1] N. F. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford: Clarendon Press, (1956).
- [2] D. V. Ehrenstein, *Ann. Physik*, **7** (1961), 342.
- [3] D. R. Preuss et al., *J. Chem. Phys.*, **71** (1979), 3553.
- [4] I. V. Hertel, et al., *J. Phys. E*, **8** (1975), 1023.
- [5] R. L. Barger, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **34** (1979), 850.
- [6] В. И. Балыкин и др., *ЖЭТФ*, **78** (1980), 1376.
- [7] T. F. Gallagher, et al., *Phys. Rev. A*, **21** (1980), 148.
- [8] Г. И. Бекон и др., *ЖЭТФ*, **75** (1978), 2092.
- [9] R. Schmiedl et al., *Opt. Commun.*, **31** (1979), 329.
- [10] S. M. Beck et al., *J. Chem. Phys.*, **70** (1979), 232.
- [11] P. Huber-Wälchi et al., *Chem. Phys. Lett.*, **67** (1979), 233.

颜色物理和 CIE¹⁾ 标准色度系统

胡 维 生

(中国计量科学研究院)

一、引 言

颜色物理和色度学是研究颜色视觉规律、颜色测量理论与技术的科学. 它是国际协议统一规定的色度学系统为基础而对颜色进行物理测量的. 国际上一致同意对色度学标准的确定属于国际照明委员会 (CIE) 的职能. 作为现代色度学的基础, CIE 标准色度观察者颜色匹配函数是在 1931 年由 CIE 制定推荐的, 至今已 50 年了. 50 年以来, CIE 对最初的推荐进行过必要的改动, 并在新的实验数据的基础上增补了新的推荐和规定, 根据科学和实践的发展而扩展了色度学的范围.

CIE 1931 标准色度观察者是由两套不同的颜色匹配函数规定的. 第二套是为了在色度学实践中应用方便而推荐的, 它可以由第一套颜色匹配函数通过一定的线性转换而导出. 其线性转换规则和解析关系式广泛应用于当代彩色

电视、电影、印刷、遥感红外彩色摄影的假色分析以及多光谱摄影彩色合成的图象识别等有关领域^[1,2].

二、颜色的心理物理性质

我们生活在一个五光十色、丰富多彩的世界之中. 我们的眼睛是认识世界的重要视觉和色觉器官. 正因为我们人类本身具有色觉系统, 所以才能有效地利用客观物体的物理色信息. 能刺激视觉器官而产生视觉的辐射称为可见光, 可见光的波长在 380nm 至 780nm 之间. 人眼的视觉不但能从物体各点出射光的强弱来辨别物体的形象, 而且还能对不同波长的光作出选择性的反应, 这就是色觉. 色觉是人眼的重要特性, 它大大地丰富了人们对客观世界的认识能力.

1) CIE 是国际照明委员会 (法文 Commission Internationale de l'Eclairage) 的简称.

从心理物理学角度讲,颜色是可见辐射的一种特性,是客观辐射作用于视觉器官,由此产生的视神经活动传递到大脑,为大脑所认识的感觉之一。作为一个量值,颜色是一个心理物理量,它既与人眼视觉特性有关,又与新观测的客观辐射有关。CIE 推荐的色匹配函数代表了人眼的平均视觉特性。当人眼视觉特性确定之后,颜色就完全决定于进入人眼的辐射。物理学定义的进入人眼而引起色觉的辐射称为色刺激。色刺激的相对光谱功率分布 $\varphi(\lambda)$ 称为色刺激函数。在规定的照明和观测条件下,颜色和色刺激函数之间有某种对应关系。色度学和颜色物理学就是以色感觉和色刺激相关联的实验结果为基础而建立起来的。

三、颜色和照明

最普遍的颜色是物体色,它是人们从自发光或非自发光物体看到的色。自发光物体色简称光源色,其色刺激函数 $\varphi(\lambda) = S(\lambda)$;非自发光物体色简称表面色,其色刺激函数 $\varphi(\lambda) = \tau(\lambda)S(\lambda)$, 或 $\varphi(\lambda) = \rho(\lambda)S(\lambda)$ 。这里 $S(\lambda)$ 代表照明光源的相对光谱功率分布, $\tau(\lambda)$, $\rho(\lambda)$ 分别为物体的光谱透射比和光谱反射比^[3,4]。基于物体对照明辐射作用的时间、空间和光谱特性,物体调制(透射、反射、吸收)辐射的能力不同,所以被物体反射、透射或散射到人眼内的色刺激不但与 $S(\lambda)$ 及物体本身特性有关,而且与对物体的照明和观测的几何条件有关。因而必须在统一规定的照明和观测条件下来测量物体的 $\tau(\lambda)$ 和 $\rho(\lambda)$, 以表征物体调制照明辐射的特性。因此, CIE 先后推荐了六种标准施照体, 三种标准光源, 四种照明和观测的几何条件^[3]。在影响物体色的波长范围内具有某一规定的相对光谱功率分布的辐射叫做标准施照体。CIE 已列表规定了这种函数。CIE 还规定了产生三种标准人工光源的方法, 四种照明观测几何条件的定义、尺寸、角度及其公差^[3]。

物理

四、CIE-*RGB* 表色系

如何以物理量值表示颜色以及颜色的物理测量方法,都是以人眼色觉的实验规律为基础的。由于视觉系统内部色觉机理的复杂性,所以现时存在几种色视觉理论,例如杨-亥姆霍兹(Young-Helmholtz)的三色学说,赫林(E. Hering)的对立颜色学说,米勒(Müller)的阶段学说和兰德(E. H. Land)的网膜皮层理论等^[3,5]。各理论的实验方法无例外地都是心理物理学的方法,受试者是具有正常视觉的人,光作为一种输入,以人眼受光后作出的判断为输出,它是纯物理方法所不能完全代替的。

目前的基础色度学——CIE 色度学系统以三色学说的色匹配实验为基础。色匹配就是调配一种颜色使其和另外的一个给定颜色相等同。所谓三色原理即,任何一个颜色,都能用线性无关的三个原色适当地相加混合与之匹配。亦即任何一个颜色刺激,都能用线性无关的三个参照刺激适量的代数和来重现^[6]。可用如下的代数方程来表达:

$$C^* = C(C) = R(R) + G(G) + B(B), \quad (1)$$

即任意一个色 C^* 可以用线性无关的三个原色 (R) , (G) , (B) 以适当的量相混合与 C^* 色相匹配。 R , G , B 为与被测色 C^* 相匹配所需要的三个原色的刺激量,称为被测 C^* 的三刺激值, (R) , (G) , (B) 为三个原色单位。 C 为被测色的量,称为颜色 C^* 的色量值, (C) 为其单位,它是这样选取的:使 $C = R + G + B$, 即 C^* 的色量值等于其三刺激值之和。于是,方程(1)可变为

$$(C) = \frac{R}{R + G + B} (R) + \frac{G}{R + G + B} (G) + \frac{B}{R + G + B} (B).$$

定义: $r = \frac{R}{R + G + B}$; $g = \frac{G}{R + G + B}$;

$b = \frac{B}{R + G + B}$, 称为色 C^* 的色坐标, 所以,

$$R = Cr; G = Cg; B = Cb, \quad (2)$$

$$C(C) = r(R) + g(G) + (1 - r - g)(B) \quad (3)$$

因此, 颜色 C^* 的三刺激值分别等于色量值与色坐标之乘积. (3) 式为色 C^* 的单位方程. 可以看出色 C^* 的一个单位, 即色 C^* 的“品质”可以表示为仅仅是两个变数的函数, 这样就能用几何方法在一个两维图上表示出来. 这样的 r, g 图 (XYZ 表色系中为 x, y 图) 称为色品图或色度图.

三色原理实验还指出: 在广泛的观测条件范围内, 色匹配具有线性和可加性规律. 即两个相匹配的色, 如果它们相应地被等量地增加或减少, 仍将保持相匹配; 如果 $C_1(C_1)$ 和 $C_2(C_2)$ 相匹配, $C_3(C_3)$ 和 $C_4(C_4)$ 相匹配, 则相加混合的 $C_1(C_1) + C_3(C_3)$ 和 $C_2(C_2) + C_4(C_4)$ 两个颜色也是相匹配的^[6]. 设有 $C_1(C_1), \dots, C_i(C_i), \dots, C_n(C_n)$ n 个色, 它们的三刺激值分别为 R_i, G_i, B_i ; 色坐标分别为 r_i, g_i, b_i . n 个色相加混合与色 $C(C)$ 相匹配, 根据相加混合定律及(2)式, 则 $C(C)$ 色的三刺激值 R, G, B 分别为

$$\left. \begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^{i=n} R_i = \sum_{i=1}^{i=n} C_i r_i, \\ G &= \sum_{i=1}^{i=n} G_i = \sum_{i=1}^{i=n} C_i g_i, \\ B &= \sum_{i=1}^{i=n} B_i = \sum_{i=1}^{i=n} C_i b_i. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当用 $(R), (G), (B)$ 三原色匹配等能白色时, 其白色的单位方程可表示为

$$(W) = r_w(R) + g_w(G) + b_w(B).$$

显然, r_w, g_w, b_w 的数值与所用三原色单位 $(R), (G), (B)$ 的大小有关. 为了使三原色单位适应颜色计量上均衡性的要求, 规定将 $(R), (G), (B)$ 的单位加以调整, 使等能白色的色坐标完全相等, 即 $r_w = g_w = b_w = 1/3$. 这样 $(R), (G), (B)$ 的光亮度就不相等, 令它们分别为 $l_{(R)}, l_{(G)}, l_{(B)}$, 因此, 颜色 $C^* = C(C)$ 的亮度 L 的方程为

$$L = Cl_{(C)} = Rl_{(R)} + Gl_{(G)} + Bl_{(B)},$$

$$l_{(C)} = rl_{(R)} + gl_{(G)} + bl_{(B)}. \quad (5)$$

那末, 已知色 $C(C)$ 的光亮度 L , 则该色的色量值:

$$C = L/[rl_{(R)} + gl_{(G)} + bl_{(B)}]. \quad (6)$$

按三原色学说和混色定律, 我们将任意色刺激函数 $\varphi(\lambda)$ 的颜色看作是每一个光谱色的相加混合. 针对选定的三原色, 通过对人眼的色匹配实验, 可以得到每个光谱色的色坐标^[6], 令其为 $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$. 每一波长间隔光谱色的色量值为 $dC(\lambda)$, 每一单色刺激元 $\varphi(\lambda)d\lambda$ 的光亮度 $L(\lambda) = V(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda$, $V(\lambda)$ 为明视觉的光谱光效率. 因此, 由(6)式得^[1]

$$dC(\lambda) = [V(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda]/[r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}]. \quad (7)$$

由(4)式得到任意色刺激函数 $\varphi(\lambda)$ 的三刺激值:

$$\left. \begin{aligned} R &= \int r(\lambda)dC(\lambda); & G &= \int g(\lambda)dC(\lambda); \\ B &= \int b(\lambda)dC(\lambda). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

我们定义:

$$\left. \begin{aligned} [r(\lambda)V(\lambda)]/[r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}] &= \bar{r}(\lambda), \\ [g(\lambda)V(\lambda)]/[r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}] &= \bar{g}(\lambda), \\ [b(\lambda)V(\lambda)]/[r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}] &= \bar{b}(\lambda). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

因此, 任意色刺激函数 $\varphi(\lambda)$ 的三刺激值可表示为

$$\left. \begin{aligned} R &= \int \bar{r}(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda; & G &= \int \bar{g}(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda; \\ B &= \int \bar{b}(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对等能白色, 即 $\varphi(\lambda)$ 等于常数 K 时, 其三刺激值应相等, 即 $R = G = B$, 由上式得

$$\left. \begin{aligned} &\int \frac{r(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}} \\ &= \int \frac{g(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}}, \\ &\int \frac{g(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}} \\ &= \int \frac{b(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{r(\lambda)l_{(R)} + g(\lambda)l_{(G)} + b(\lambda)l_{(B)}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由 380—780nm 可见波段已知的 $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ 和 $V(\lambda)$, 通过逐步逼近的积分法, 由联立方程 (11) 可解得三个原色单位的亮度比率是

$$l_{(R)}:l_{(G)}:l_{(B)} = 1:4.5907:0.0601. \quad (12)$$

因此, (9) 式所定义的 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 就可成为一组基于人眼色匹配实验和等能白色归化三原色单位的色匹配函数了. 由 CIE 推荐的 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 称为 CIE-*RGB* 表色系的标准色度观察者光谱三刺激值. 这样已知色刺激函数 $\varphi(\lambda)$ 就可根据 (10) 式求得三刺激值和色坐标了. 1931 CIE-*RGB* 表色系所基于的三原色是: $R = 700.0\text{nm}$, $G = 546.1\text{nm}$, $B = 435.8\text{nm}$.

五、CIE-XYZ 表色系

CIE-*RGB* 表色系中光谱色的色坐标 $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda) = 1 - r(\lambda) - g(\lambda)$, 如图 1 所示. 由 (9) 式定义得出的光谱三刺激值 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 如图 2 所示.

由图可见, *RGB* 表色系中的光谱色的色坐标和三刺激值出现负值, 因此, 利用 (10) 式计算时极不方便, 也不易理解. 为了在色度学的实践中计算和分析应用的方便, CIE 推荐了 *XYZ* 表色系. 该表色系选取理论上的三个原色时所依据的两个主要原则是: (1) 使假定的 (*X*) 和

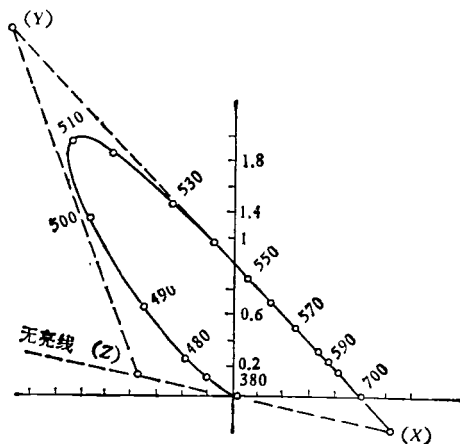


图 1 CIE-*RGB* 系统色度图及 (*R*), (*G*), (*B*) 向 (*X*), (*Y*), (*Z*) 的转换

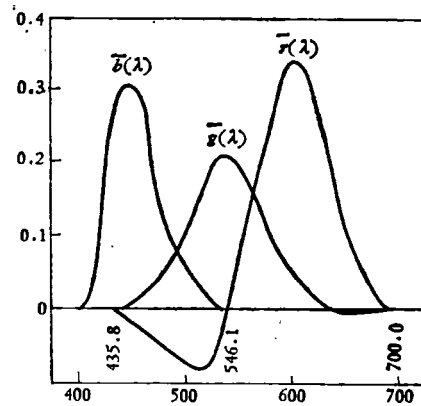


图 2 CIE-*RGB* 系统标准色度观察者光谱三刺激值曲线

(*Z*) 两个原色的亮度为零, 即 (*X*), (*Z*) 两个原色在无亮度线上, 颜色的亮度可只由 (*Y*) 的量 *Y* 来体现, 因此, 计算时很方便; (2) 既考虑到使 (*X*), (*Y*), (*Z*) 形成的三角形所包括的非真实色尽量少, 又要包括整个光谱色轨迹, 以便一切光谱色和自然界中的一切颜色都能以正的三刺激值和色坐标来表示.

根据原则 (1), 将 (12) 式中的三原色亮度比率代入亮度方程 (5) 中, 并令 $l_{(C)} = 0$, 则得到无亮度线, 即 (*X*)(*Z*) 直线方程

$$0.9399r + 4.5306g + 0.0601 = 0. \quad (13)$$

根据原则 (2) 确定 (*X*)(*Y*) 和 (*Z*)(*Y*) 直线. 由 *r-g* 图及其数值知道, 波长大于 550nm 的光谱轨迹是一直线^[7], 其光谱色在色觉上呈现二色性, 因此, 取 (*X*)(*Y*) 边与该直线重合. 通过 700nm 和 640nm 两点的色坐标值求出该直线方程是

$$r + 0.9899g - 1 = 0. \quad (14)$$

选取原色 (*Z*) 位于在心理上只有蓝色感觉的光谱色 ($\lambda = 477\text{nm}$) 和等能白色 (S_E) 的连线上^[2], 同时, 使 (*Z*)(*Y*) 直线与凸形光谱轨迹在 $\lambda = 503\text{nm}$ 处相切. 这样得到的 (*Z*)(*Y*) 直线的方程为

$$1.45r + 0.55g + 1 = 0. \quad (15)$$

由 (13)、(14)、(15) 三个直线方程两两分别联立而得到三个原色 (*X*), (*Y*), (*Z*) 在 *r-g* 图中的色坐标:

| | <i>r</i> | <i>g</i> | <i>b</i> |
|------|----------|----------|----------|
| (X): | 1.2750 | -0.2778 | 0.0028 |
| (Y): | -1.7393 | 2.7673 | -0.0280 |
| (Z): | -0.7431 | 0.1409 | 1.6022 |

现在,决定了(X), (Y), (Z)在*r-g*图中的位置,就具备了CIE-*RGB*表色系向CIE-*XYZ*表色系进行线性转换的条件。颜色是三维空间向量,我们可以用色向量概念作为分析推导的手段^[1]。令(*R*), (*G*), (*B*)为*RGB*表色系中的三原色单位向量; [*X*], [*Y*], [*Z*]为*XYZ*表色系中的三原色单位向量。这里用不同型式的括号仅表示不同的表色系。令同一个颜色*C**在不同表色系中的单位色向量以(*C*)和[*C*]表示,这样*C**在两个表色系中可分别表示为

$$\begin{aligned} C^* &= (R + G + B)(C) \\ &= R(R) + G(G) + B(B), \\ C^* &= (X + Y + Z)[C] \\ &= X[X] + Y[Y] + Z[Z]. \end{aligned} \quad (16)$$

已知(*X*), (*Y*), (*Z*)的色坐标分别为(*r_x*, *g_x*, *b_x*); (*r_y*, *g_y*, *b_y*); (*r_z*, *g_z*, *b_z*),那么,它们在*RGB*表色系中的单位色向量,由(3)式得到:

$$\left. \begin{aligned} (X) &= r_x(R) + g_x(G) + b_x(B), \\ (Y) &= r_y(R) + g_y(G) + b_y(B), \\ (Z) &= r_z(R) + g_z(G) + b_z(B). \end{aligned} \right\} (17)$$

设*K_x*, *K_y*, *K_z*为决定[*X*], [*Y*], [*Z*]单位向量的归化系数,因为在转换中的两个表色系可以按不同的归化条件(如采用不同的白点)。因此,得

$$\left. \begin{aligned} [X] &= K_x(X) \\ &= K_x\{r_x(R) + g_x(G) + b_x(B)\}, \\ [Y] &= K_y(Y) \\ &= K_y\{r_y(R) + g_y(G) + b_y(B)\}, \\ [Z] &= K_z(Z) \\ &= K_z\{r_z(R) + g_z(G) + b_z(B)\}. \end{aligned} \right\} (18)$$

将(18)代入(16),同时由(*R*), (*G*), (*B*)两边系数相等而得:

$$\left. \begin{aligned} R &= K_x r_x X + K_y r_y Y + K_z r_z Z, \\ G &= K_x g_x X + K_y g_y Y + K_z g_z Z, \\ B &= K_x b_x X + K_y b_y Y + K_z b_z Z. \end{aligned} \right\} (19)$$

由此得

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{\begin{vmatrix} R & r_y & r_z \\ G & g_y & g_z \\ B & b_y & b_z \end{vmatrix}}{K_x \begin{vmatrix} r_x & r_y & r_z \\ g_x & g_y & g_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}}; \\ Y &= \frac{\begin{vmatrix} r_x & R & r_z \\ g_x & G & g_z \\ b_x & B & b_z \end{vmatrix}}{K_y \begin{vmatrix} r_x & r_y & r_z \\ g_x & g_y & g_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}}; \\ Z &= \frac{\begin{vmatrix} r_x & r_y & R \\ g_x & g_y & G \\ b_x & b_y & B \end{vmatrix}}{K_z \begin{vmatrix} r_x & r_y & r_z \\ g_x & g_y & g_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}}. \end{aligned} \right\} (20)$$

由白点作归化条件可确定*K_x*, *K_y*和*K_z*。在两个表色系中,取等能白色点都在其色品三角形的重心,同时单位白色相等,即[*W*]和(*W*)的色坐标

$$x_w = y_w = z_w = r_w = g_w = b_w = 1/3,$$

且[*W*] = (*W*)。因此,

$$[W] = \frac{1}{3}[X] + \frac{1}{3}[Y] + \frac{1}{3}[Z], \quad (21)$$

$$[W] = (W) = \frac{1}{3}(R) + \frac{1}{3}(G) + \frac{1}{3}(B). \quad (22)$$

将(18)式代入(21)式,得:

$$\begin{aligned} [W] &= \frac{1}{3}(K_x r_x + K_y r_y + K_z r_z)(R) \\ &\quad + \frac{1}{3}(K_x g_x + K_y g_y + K_z g_z)(G) \\ &\quad + \frac{1}{3}(K_x b_x + K_y b_y + K_z b_z)(B). \end{aligned} \quad (23)$$

比较(23)和(22)式,得:

$$\left. \begin{aligned} K_x r_x + K_y r_y + K_z r_z &= 1, \\ K_x g_x + K_y g_y + K_z g_z &= 1, \\ K_x b_x + K_y b_y + K_z b_z &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

由(24)式可解出 K_x , K_y 和 K_z , 并代入(20)式,得:

$$\left. \begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} R & r_y & r_z \\ G & g_y & g_z \\ B & b_y & b_z \end{bmatrix}; \\ Y &= \begin{bmatrix} r_x & R & r_z \\ g_x & G & g_z \\ b_x & B & b_z \end{bmatrix}; \\ Z &= \begin{bmatrix} r_x & r_y & R \\ g_x & g_y & G \\ b_x & b_y & B \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

将(X),(Y),(Z)已知的色坐标代入(25)式,得:

$$\left. \begin{aligned} X &= 0.49000R + 0.31000G + 0.20000B, \\ Y &= 0.17697R + 0.81240G + 0.01063B, \\ Z &= 0.00000R + 0.01000G + 0.99000B. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

这便是两个表色系三刺激值之间的关系式。可以看出,当 $R = G = B$ 时,则 $X = Y = Z$ 。光谱色三刺激值也存在(26)式的关系,所以对某一波长 λ 的光谱色,色坐标 $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ 与 $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ 之间的关系式为:

$$\left. \begin{aligned} x(\lambda) &= \frac{0.49000r(\lambda) + 0.31000g(\lambda) + 0.20000b(\lambda)}{0.66697r(\lambda) + 1.13240g(\lambda) + 1.20063b(\lambda)}, \\ y(\lambda) &= \frac{0.17697r(\lambda) + 0.81240g(\lambda) + 0.01063b(\lambda)}{0.66697r(\lambda) + 1.13240g(\lambda) + 1.20063b(\lambda)}, \end{aligned} \right\}$$

物理

$$z(\lambda) = \frac{0.00000r(\lambda) + 0.01000g(\lambda) + 0.99000b(\lambda)}{0.66697r(\lambda) + 1.13240g(\lambda) + 1.20063b(\lambda)}. \quad (27)$$

用(27)式则可求出 CIE-RGB 色度图中,同一波长光谱色在 CIE-XYZ 色度图中的色度点,将各点连接即成为 CIE1931 色度图的光谱轨迹,如图 3 所示。在 CIE-XYZ 表色系中,用

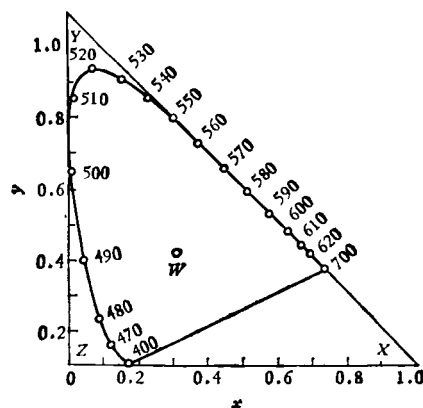


图 3 CIE 1931 色度图

于匹配等能光谱刺激的(X),(Y),(Z)三原色的数量 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 叫做“CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值,”简称“CIE1931 标准观察者”。类似(9)式,我们定义:

$$\bar{y}(\lambda) = \frac{[V(\lambda)y(\lambda)]}{[x(\lambda)l_{(x)} + y(\lambda)l_{(y)} + z(\lambda)l_{(z)}]}. \quad (28)$$

因为(X),(Z)的亮度为零,颜色的亮度由(Y)的量Y来体现,所以 $l_{(x)} = l_{(z)} = 0$, $l_{(y)} = 1$, 这样由(28)式得到: $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ 。

因为

$$\frac{\bar{x}(\lambda)}{x(\lambda)} = \frac{\bar{y}(\lambda)}{y(\lambda)} = \frac{\bar{z}(\lambda)}{z(\lambda)},$$

因此得到 CIE-XYZ 表色系中光谱三刺激值的简单形式^[7]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}(\lambda) &= \frac{x(\lambda)}{y(\lambda)} V(\lambda); \quad \bar{y}(\lambda) = V(\lambda); \\ \bar{z}(\lambda) &= \frac{z(\lambda)}{y(\lambda)} V(\lambda). \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

根据(29)式,由 $V(\lambda)$, $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ 而得 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值,

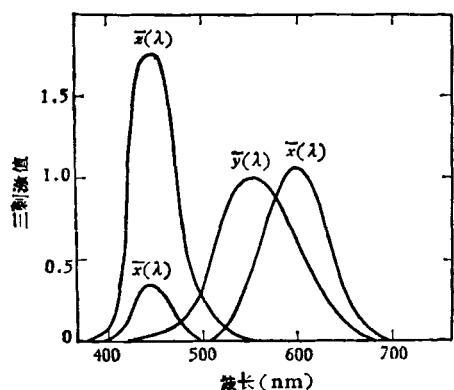


图4 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值

如图4所示。与分析(7)和(9)式的原理一样,对任意色刺激函数 $\varphi(\lambda)$ 的三刺激,类似(10)式而得到:

$$\begin{aligned} X &= K \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y &= K \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= K \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (30)$$

并定义调整因数 $K = \frac{100}{\int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$ 。由于这

个定义,因此当 $\varphi(\lambda) = \tau(\lambda)S(\lambda)$ 时, Y 为物体的光透射比;当 $\varphi(\lambda) = \rho(\lambda)S(\lambda)$ 时, Y 为物体的光反射比。现代测色光谱光度计所连机用的电子计算机,其程序就是用式(30)来计算几种标准施照体下的三刺激值、色坐标的。

六、最新报道

CIE-TC1·3 色度委员会一直不断地考虑和采纳色度学的新知识,先后增补和推荐了 CIE 1964 补充标准色度观察者光谱三刺激值^[6], CIE 1960 UCS 色度图, CIE1964($U^*V^*W^*$)空间, CIE 1976($L^*u^*v^*$)空间, CIE1976($L^*a^*b^*$)空间及其相应的 CIE1976 色差公式。这些都是 CIE-RGB 和 CIE-XYZ 表色系的补充和延伸,以适应大张角视场的观测和颜色知觉空间均匀

性的要求。最近(1979年8月)于日本京都举行的 CIE 第19次会议(有包括我国在内的27个国家、659名代表参加)上, CIE-TC1·3 色度委员会下属的标准光源、白度、色差、色适应、同色异谱各分会都有专题报告, TC2·3 材料委员会和 TC3·2 显色委员会也报告了颜色测量和颜色再现等方面的进展。

为促进颜色科学的交流和推广,于1967年6月成立了国际颜色协会(AIC)¹⁾。最近举行的 AIC 第四次大会(Color 81)于1981年9月在西柏林召开。重要的学术演讲有:颜色视觉的机理、颜色测量的发展、色差、色度学、CIE 标准观察者50年、颜色编排的体制。另外还有颜色适应、颜色再现、颜色视觉的模式、白度、明度和亮度等报告会^[7]。

我国光学学会颜色光学首次学术交流会于1980年12月在青岛召开。会上进行了学术交流,并讨论了“关于加强我国颜色光学研究工作的报告”。与会代表提出了许多宝贵意见和建议,认为颜色科学是门重要的边缘学科,它的应用面极广,关系到轻纺化工、电影电视、造纸印刷、玻璃陶瓷、光源照明、颜色计量、军事伪装、遥感技术等许多部门,应该加强理论和应用技术的研究和推广。

参 考 文 献

- [1] D. B. Judd, G. Wyszecki, Color in Business, Science and Industry, 3rd ed., (1975), 122.
- [2] R. S. Sinclair, Numerical Problems in Colour Physics, 2nd ed., (1971), 10.
- [3] 荆其诚、焦书兰、俞柏林、胡维生,色度学,科学出版社,(1979), 164.
- [4] 胡维生、滕秀金、尹演子,绝对光谱反射比的测量和反射色标准,物理,9-2(1980), 127.
- [5] W. D. Wright, The Measurement of Colour, 4th ed., (1969), 200.
- [6] Commission Internationale de l'Eclairage, Publication No. 15, Colorimetry, (1971).
- [7] The 4th Congress of the AIC, First Circular.

1) AIC 是国际颜色协会(法文 Association Internationale de la Couleur)的简称。