

文章编号: 0253-2239(2004)09-1224-5

基于线性数据库的色差权重因子计算机配色

王喜昌 华 臻 官严军 宋东草
(烟台大学物理系, 烟台 264005)

摘要: 计算机配色广泛应用于纺织印染、涂料油漆、塑料、建材等工业领域。计算机配色的基础理论是库贝尔卡-芒克(Kubelka-Munk)函数与浓度的线性关系,但实际上,库贝尔卡-芒克函数与浓度呈非线性关系,这限制了计算机配色在我国的广泛应用,为此,提出一种数学方法,建立一个线性染料数据库。全光谱配色方法是计算机配色的重要方法之一,但对物体而言,每个波长上同等光谱反射率的变化却显示出不同程度的颜色感知差异,在某些波长处,呈现较强的灵敏性,而在另外一些波长处有较大的惰性,因此,根据色度学理论,为全光谱配色提供每个波长处灵敏程度不同的色差型权重因子。同时,为色差权重因子提供线性染料数据库。结果证明,数据库的线性程度明显提高,使用色差权重因子配色的效果明显提高。

关键词: 颜色光学; 计算机配色; 色差权重因子; 线性数据库

中图分类号: O432.3

文献标识码: A

Color Difference Weight Computer Color Matching Based Linear Database

Wang Xichang Hua Zhen Gong Yanjun Song Dongcao

(*Physics Department, Yantai University, Yantai 264005*)

(Received 20 January 2003; revised 26 November 2003)

Abstract: Computer color matching is widely applied in industry such as textile printing and dyeing, paint, plastic and building material. The fundamental theory of computer color matching is the linear relationship between Kubelka-Munk function and concentration of dye. But in fact, Kubelka-Munk function is nonlinear with the concentration of dye, which limits the wide application of computer color matching in China. Therefore, a kind of mathematical method is put forward and a linear dye database is set up accordingly. Spectrophotometric color matching is an important method for computer color matching. But the change of reflectivity of coordinative spectrum at each wavelength can cause different degree color difference for the object, and the change is sharp at some wavelength while it is lazier at others. So the different degree color difference weight factor at each wavelength is given for spectrophotometric color matching according to colorimetry, and provided with linear dye database. The result show that the linearity of the database is increased obviously and the use of color difference weight factor could improve the spectrophotometric color matching distinctly.

Key words: color optics; spectrophotometric color matching; color difference weight; linear database

1 引 言

全光谱配色^[1,2]是计算机配色的基本方法之一,但通常情况下,传统的全光谱配色对每个波长点进行同等匹配,而在实际上,物体不同波长处的同等

大小的变化所引起的颜色感知变化却有明显的差异,在某些波长处,变化很小,却产生较大的颜色感知差异,显示出较强的灵敏性;而在有的波长处,变化较大,不能使颜色发生相应的变化,呈现出较强的惰性。因而,应该对不同波长给予不同权重的匹配。对颜色比较敏感的波长处,给予较大的权重,进行重点匹配,对颜色不敏感的波长处,给予小的权重。

虽然,目前有两种权重因子,但它们不能反映每个

E-mail: wangxichang@ytu.edu.cn

收稿日期: 2003-01-20; 收到修改稿日期: 2003-11-26

波长处对颜色感知的变化,本文根据颜色灵敏函数模型的设计及其规律的研究^[3],为全光谱配色提供了色差权重因子。

计算机配色的基础理论是光在完全不透明介质中的吸收和散射理论,即库贝尔卡-芒克(Kubelka-Munk)理论^[4,5]。理论上,库贝尔卡-芒克函数与浓度是线性关系^[5],而在实际中呈现非线性关系。这主要是由于库贝尔卡-芒克理论在建立时做了以下三个方面的假设:

1) 色料层为无限厚。

2) 光线在色料层被充分地散射,呈完全扩散状态(而实际上光在介质中不一定完全扩散)。

3) 光线在介质内运行的通道只考虑两个,一个朝上,一个朝下,并垂直于界面。

由于理论上的缺陷和其它原因,实际中的库贝尔卡-芒克函数与浓度呈非线性关系。为解决理论和实际中的矛盾,在实际中经常采用表面反射因子^[6]来纠正理论上的缺陷,Steans认为表面反射因子由基底决定。当用非常强的吸收染料印染时,最大吸收波长处的反射率为表面反射因子。仔细考虑,此方法有一定的缺点,即使没有表面反射,最大吸收波长处的反射率也不一定为零。而Elters等^[7]也采用此方法。本文为使实际中的库贝尔卡-芒克函数与浓度趋于线性关系,使用一种数学方法确定表面反射因子,从而为色差权重因子建立了线性染料数据库。此方法与曾华的方法基本一致^[10]。

2 建立线性染料数据库

2.1 建立线性染料数据库的数学模型

计算机配色的基础理论是库贝尔卡-芒克函数

理论,其基本表达式为

$$\frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R}, \quad (1)$$

其中 K 为光在不透明介质中的吸收系数, S 为光在不透明介质中的散射系数, K/S 为库贝尔卡-芒克函数,可以写为 $f(R)$, R 为不透明介质的反射率。

在理论上,库贝尔卡-芒克函数与浓度是线性关系,其表达式为

$$f(R) = \phi C + [f(R)]^{(1)}, \quad (2)$$

其中 $[f(R)]^{(1)}$ 为基底的库贝尔卡-芒克函数, ϕ 为染料单位浓度的库贝尔卡-芒克函数值, C 为浓度, $f(R)$ 为在基底上印染后的库贝尔卡-芒克函数值。我们将建立 ϕ 的过程称为建立染料数据库的过程。

在使用表面反射因子 R_0 后的库贝尔卡-芒克函数表达式为

$$f(R) = \frac{[1 - (R - R_0)]^2}{2(R - R_0)}. \quad (3)$$

由于各种原因的存在,使得计算机配色理论偏离线性关系,因而我们从纠正这种偏离着手,来确定表面修正因子。

采用不同浓度值的染料来获得染料的光谱数据,染料和基底的光谱数据经过(3)式修正后,分别为

$$[f(R)]^{(i)} = \frac{[1 - (R_{\lambda}^{(i)} - R_0)]^2}{2(R_{\lambda}^{(i)} - R_0)}, \quad (4)$$

$$[f(R)]^{(t)} = \frac{[1 - (R_{\lambda}^{(t)} - R_0)]^2}{2(R_{\lambda}^{(t)} - R_0)}, \quad (5)$$

式中 $[f(R)]^{(i)}$, $R_{\lambda}^{(i)}$ 为第 i 个浓度印染时 λ 波长处的库贝尔卡-芒克函数值和反射率, t 表示基底。

因而,将(4)式和(5)式代入(2)式,每种染料的单位浓度的库贝尔卡-芒克函数可以写为

$$\phi_{\lambda}^{(i)} = \left\{ \frac{[1 - (R_{\lambda}^{(i)} - R_0)]^2}{2(R_{\lambda}^{(i)} - R_0)} - \frac{[1 - (R_{\lambda}^{(t)} - R_0)]^2}{2(R_{\lambda}^{(t)} - R_0)} \right\} \bigg/ C_i, \quad (6)$$

C_i 表示第 i 个浓度印染时的浓度值。

如果实际上库贝尔卡-芒克函数与浓度也趋于线性关系,由(6)式可以看出,不同浓度之间的单位库贝尔卡-芒克函数的差别应趋于最小。即

$$\sum_{i \neq j} [\phi_{\lambda}^{(i)} - \phi_{\lambda}^{(j)}]^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

(7)式对所有的波长处都成立,所以可改写为

$$\int_{\lambda} \sum_{i \neq j} [\phi_{\lambda}^{(i)} - \phi_{\lambda}^{(j)}]^2 d\lambda \rightarrow \min, \quad (8)$$

由于表面反射因子与基底有关,与染料的种类无关,所以当有 k 种染料时,可以将(8)式改写为

$$\sum_1^k \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{i \neq j} [\phi_{\lambda}^{(i)} - \phi_{\lambda}^{(j)}]^2 d\lambda \rightarrow \min, \quad (9)$$

将(6)式代入上边的方程,并对(9)式求最小值,就会求得 R_0 。

2.2 建立线性数据库的结果分析

为建立线性数据库,采用棉涤混合物 T65/C35 作为基底;用分散红染料 3B、分散黄染料 RGFL 和分

散兰染料 2BLN 在基底上用八种浓度值印染。按照上面阐述的办法进行编程处理,在棉涤混合物 T65/C35 的基底上,得到表面反射因子 $R_0=0.06020$,在处理前后,库贝尔卡-芒克函数与浓度的关系分别如图 1、图 2 和图 3 所示(横坐标为浓度,纵坐标为库贝尔卡-芒克函数)。

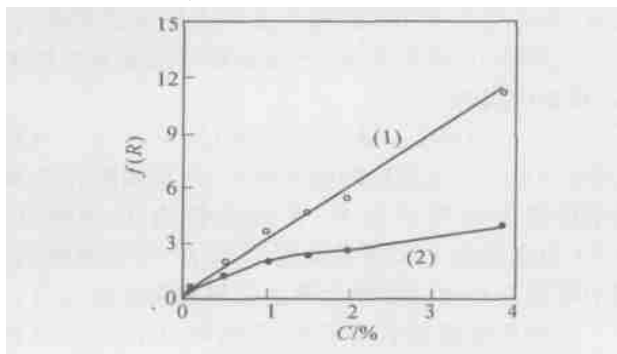


Fig. 1 Curve of $f(R)$ value and 3B dye concentration. Data from reflectance with (1) and without (2) surface reflectance correction

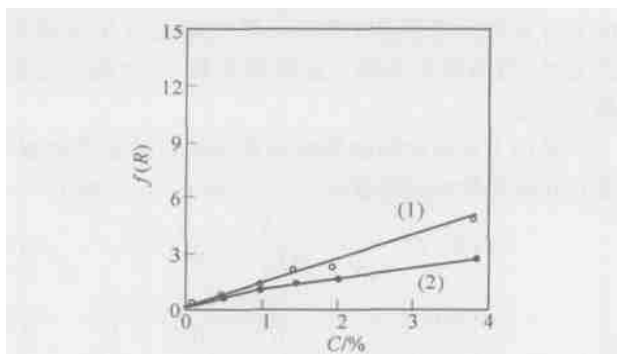


Fig. 2 Curve of $f(R)$ value and 2BLN dye concentration. Data from reflectance with (1) and without (2) surface reflectance correction

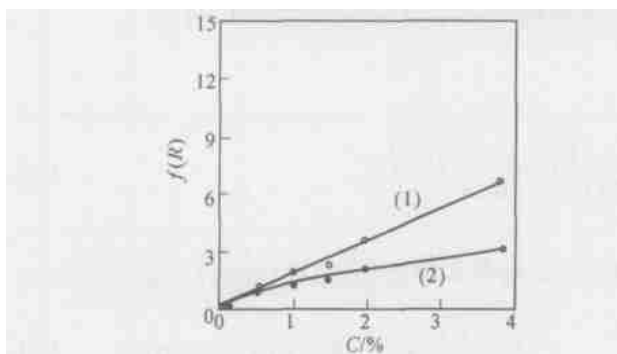


Fig. 3 Curve of $f(R)$ value and RGFL dye concentration. Data from reflectance with (1) and without (2) surface reflectance correction

从图 1、图 2 和图 3 可以看出,经过处理后的线性关系有很明显的改善,因此按照我们的新方法,为色差权重因子计算机配色建立了线性数据库。

3 色差权重因子计算机配色

3.1 全光谱计算机配色方法

全光谱匹配^[8,9]比较广泛地应用于计算机配色。这种方法通过直接拟合光谱曲线的方法,使色差达到最小。这种方法的基本思想的数学表达式为

$$\sum_j \omega_j^2(\lambda_j) [\Delta R(\lambda_j)]^2 \rightarrow \min, \quad (10)$$

这里 $\omega_j(\lambda_j)$ 是一种权重因子, $\Delta R(\lambda_j)$ 为 λ_j 波长处的目标色和匹配色的光谱反射率差异。权重因子的建立是全光谱配色方法一个非常重要的因素,它直接影响全光谱配色方法的配色精度,目前存在两种权重因子,这两种权重因子为

$$\omega_j = \{ [\bar{x}(\lambda_j) + \bar{y}(\lambda_j) + \bar{z}(\lambda_j)] S(\lambda_j) \}^{1/4}, \quad (11)$$

和

$$\omega_j = \{ [\bar{x}(\lambda_j) + \bar{y}(\lambda_j) + \bar{z}(\lambda_j)] S(\lambda_j) \}^{1/4} \times [R_{\text{std}}(\lambda_j)]^{-2/3}, \quad (12)$$

式中 $S(\lambda_j)$ 为光源的相对光谱功率分布, $R_{\text{std}}(\lambda_j)$ 为标准色的光谱反射率。

全光谱配色的矩阵表达式为

$$C = [(W\Phi)^T (W\Phi)]^{-1} W\Phi W D [f^{(s)} - f^{(t)}], \quad (13)$$

式中 $W(16 \times 16)$ 为不同波长处的权重因子置于对角线元素上而其余元素为零的方阵,下标 400, 420, 700 表示以 nm 为单位的波长,即

$$W = \begin{bmatrix} \omega_{400} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega_{420} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \omega_{700} \end{bmatrix}$$

$D(16 \times 16)$ 代表各波长的 $[dR/df]$ 值置于对角线元素上,而其余元素为零的方阵,即

$$D = \begin{bmatrix} \left[\frac{dR}{df(R)} \right]_{400}^{(s)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \left[\frac{dR}{df(R)} \right]_{420}^{(s)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \left[\frac{dR}{df(R)} \right]_{700}^{(s)} \end{bmatrix},$$

矩阵 $\Phi(16 \times 3)$ 代表染料 1、2 和 3 的单位浓度的 (K/S) 值

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{1400} & \Phi_{2400} & \Phi_{3400} \\ \Phi_{1420} & \Phi_{2420} & \Phi_{3420} \\ \dots & \dots & \dots \\ \Phi_{1700} & \Phi_{2700} & \Phi_{3700} \end{bmatrix},$$

$f^{(s)}(16 \times 1)$ 代表标准色的库贝尔卡-芒克函数列矩阵; $f^{(t)}(16 \times 1)$ 代表基底的库贝尔卡-芒克函数列矩阵, 即

$$f^{(s)} = \begin{bmatrix} f(R)_{400}^{(s)} \\ f(R)_{420}^{(s)} \\ \vdots \\ f(R)_{700}^{(s)} \end{bmatrix}, \quad f^{(t)} = \begin{bmatrix} f(R)_{400}^{(t)} \\ f(R)_{420}^{(t)} \\ \vdots \\ f(R)_{700}^{(t)} \end{bmatrix},$$

C 表示染料浓度列矩阵。

3.2 色差权重因子权重因子的建立

如果建立的权重因子恰好是此波长处反射率的变化引起的色差, 那么这个权重因子无疑是理想的权重因子。王喜昌等^[9] 已经给出了每一个波长点处

物体颜色的变化引起的颜色感知差异——物体颜色灵敏函数。它定义为物体的每一波长处单位光谱反射率的变化 ΔR 所产生的色差 ΔE , 物体颜色灵敏函数的定义式为

$$\omega(X, Y, Z, \lambda) = \frac{\Delta E(X, Y, Z, \lambda)}{\Delta R(\lambda)}, \tag{14}$$

其中 (X, Y, Z) 为标准色的三刺激值, (14) 式可以改写为

$$\omega(x, y, Y, \lambda) = \frac{\Delta E(x, y, Y, \lambda)}{\Delta R(\lambda)}, \tag{15}$$

(x, y) 和 Y 表示标准色的三色坐标和亮度因子。

其物体颜色灵敏函数的具体表达式为

$$\omega(x, y, Y, \lambda) = \kappa S(\lambda) / Y^{2/3} \times \left\{ [L_0 \bar{y}(\lambda)]^2 + \left[a_0 \left(\frac{y}{x} \right)^{2/3} \bar{x}(\lambda) + a_1 \bar{y}(\lambda) \right]^2 + \left[b_0 \bar{y}(\lambda) + b_1 \left(\frac{y}{1-x-y} \right)^{2/3} \bar{z}(\lambda) \right]^2 \right\}^{1/2}, \tag{16}$$

其中 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \bar{z} 表示 CIE1964 标准观察者三刺激值函数,

$$L_0 = \frac{116}{3Y_0^{1/3}}, \quad a_0 = \frac{500}{3X_0^{1/3}}, \quad a_1 = -\frac{500}{3Y_0^{1/3}}, \quad b_0 = \frac{200}{3Y_0^{1/3}}, \quad b_1 = -\frac{200}{3Z_0^{1/3}},$$

对于给定的光源, X_0 、 Y_0 和 Z_0 为确定的值, 例如 D65 光源, $X_0 = 94.825$, $Y_0 = 100.000$, $Z_0 = 107.381$, 因此, L_0 、 a_0 、 a_1 、 b_0 和 b_1 均为常数。 k 为固定的常数。从定义式可以看出

$$\Delta E(x, y, Y, \lambda) = \omega(x, y, Y, \lambda) \Delta R(\lambda), \tag{17}$$

从(17) 式可以看出, 物体颜色灵敏函数与此波长处光谱反射率的变化乘积恰好等于此波长处光谱反射率的变化所引起的色差。

将(17) 式和(10) 式比较可以看出, 如果使用物体颜色灵敏函数作为权重因子, (10) 式可以写为

$$\sum_j \omega^2(\lambda) [\Delta R(\lambda_j)]^2 = (\Delta E)^2 \rightarrow \min. \tag{18}$$

这样, 我们找到了一种理想的权重因子——物体颜色灵敏函数。这种权重因子的具体表达式为(16)式。由于这种权重因子使得某一波长点的光谱反射率变化所产生的色差为最小, 因而这种权重因子真正反应了不同波长的光谱反射率变化所引起的颜色感知差异, 因而可以认为是一种比较好的权重因子, 称之为色差权重因子 w_{CD} 。

4 配色结果

为了验证色差权重因子的配色效果, 采用棉涤

混合物 T65/C35 作为基底; 用分散红染料 3B、分散黄染料 RGFL 和分散兰染料 2BLN, 分散深蓝 HGL 和分散黑 S-2BL 等 5 种分散性染料建立了小型染料色样数据库, 采用国际照明委员会(CIE)标准光源 D65 作为照明光源, 分别使用权重因子一 w_{11} [(11)式]、权重因子二 w_{12} [(12)式]和色差权重因子进行匹配标准色墨绿色和蓝色, 配色效果用国际照明委员会 CIE1976($L^* a^* b^*$)颜色空间色差公式来衡量。

其匹配的配方(单位为 g/L)和色差如表 1~表 4所示。

Table 1 The recipe of matching blackish green sample

| | S-2BL | 2BLN | RGFL |
|---|-------|------|------|
| First weight factor w_{11} | 1.45 | 4.64 | 9.21 |
| Senond weight factor w_{12} | 4.35 | 2.25 | 6.12 |
| Color difference weight factor w_{CD} | 5.45 | 1.48 | 4.56 |

Table 2 The color difference of matching blackish green sample

| | w_{11} | w_{12} | w_{CD} |
|------------------|----------|----------|----------|
| ΔE_A | 1.58 | 1.03 | 0.33 |
| ΔE_{D65} | 2.39 | 0.93 | 0.39 |

Table 3 The recipe of matching blue sample

| | HGL | 3B | RGFL |
|---|-------|------|------|
| First weight factor w_{11} | 12.54 | 6.33 | 0.01 |
| Senond weight factor w_{12} | 12.63 | 5.88 | 0.03 |
| Color difference weight factor w_{CD} | 12.50 | 5.92 | 0.06 |

Table 4 The color difference of matching
blue sample

| | w_{11} | w_{12} | w_{CD} |
|------------------|----------|----------|----------|
| ΔE_A | 1.64 | 1.35 | 0.98 |
| ΔE_{D65} | 1.26 | 0.97 | 0.38 |

上面的表格中 ΔE_A 表示在 A 光源照明下产生的色差, ΔE_{D65} 表示在 D65 光源照明下产生的色差。

从表 1~表 4 的数据可以看出,无论匹配墨绿色还是匹配蓝色,权重因子一和权重因子二的色差比较大,而使用色差权重因子进行计算机配色的色差比较小,能够更好地满足计算机配色的要求。

本文挑选的两组配色色差精度较高,但无论是计算机配色给出的配方精度还是实际印染的精度,色差权重因子给出的配方精度都好于其他的权重因子。

结论 库贝尔卡-芒克函数与浓度在实际中的非线性关系始终制约着计算机配色在实际中的广泛应用,本文在已经印染的染料数据的基础上,为建立线性染料数据库而使用了一种新的数学方法,确定了表面反射因子,通过这种方法为色差权重因子的计算机配色建立了线性染料数据库。

在线性染料数据库的基础上,将物体颜色灵敏函数推广到计算机配色,建立了色差权重因子,配色

结果表明,使用这种方法进行计算机配色的效果相当理想,能够更好地满足计算机配色的要求。其效果比较理想的根本原因是该权重因子真正反映了每个波长处变化引起的颜色感知差异。

参 考 文 献

1 Walowit W, McCarthy C J, Berns R S. Spectrophotometric color matching based on two-constant Kubelka-Munk theory. *Col. Res. Appl.*, 1988, **13**(6):358~362

2 Xu Haisong, Ye Guanrong. A study of computer color matching predication algorithms. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(11):1657~1661 (in Chinese)

3 Wang Xichang, Zhou Fengkun, Chen Shufang *et al.*. Design and study on color sensitive function. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8): 1057~1064 (in Chinese)

4 Kubelka P, Munk F. Zin beitray zur optik der farbanstriche. *Z. Technol. Phys.*, 1931, (12):593~601

5 Park R H, Stearns E I. Spectrophotometric fomulation. *J. Opt. Sci. Am.*, 1944, **34**(1):112~115

6 Kuehni R. *Computer Color Formulation*. Lexington Book, Lexington, MA 1975. 61~79

7 Eiters J N. Estimating and using surface reflectance in Kubelka-Munk computations. *American Dyestuff Reporter*, 1997. 15~20

8 Sluban B. Comparson of colorimetric and spectrophotometric algorithms for computer color matching. *Col. Res. Appl.*, 1993, **18**(2):74~79

9 Wang Xichang, Zhou Fengkun, Yu Bingxi *et al.*. Comparison of Tri-stimulus and spectrophotometric algorithms for computer color matching. *Optical and Frecision Engineering*, 1999, **7**(2):13~16

10 Zeng Hua, Bai Fengxiang, Liao Ningfang *et al.*. A new effective method for getting absorption and scattering coefficients of dyestuffs. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(7): 978~981 (in Chinese)