

计算机自动配色预测算法研究*

徐海松 叶关荣

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 基于配色基础理论 Kubelka-Munk 定律的单常数形式, 建立了计算机自动配色的三刺激值匹配算法, 通过纺织印染自动配色预测实验表明该算法可获得色差 ΔE^* 小于 0.10 CIELAB 的满意配方。

关键词 配色预测, 三刺激值匹配。

1 引 言

计算机配色主要包含三个要素, 即得到初始配方的公式、预测色料混合物颜色的光学模型、调整配方使之接近目标颜色的算法。可见, 首先要确定色料混合的光学模型, 然后实施配色预测的算法。应用得最广最成功的光学模型便是二光通理论即 Kubelka-Munk 理论。在计算色料配方时, 可以按光谱反射比曲线直接匹配, 也可以按三刺激值匹配^[1]。对于通常的配色应用(如纺织印染工业)允许异谱配色, 使标准和配方之间的三刺激值差最小以优化色料浓度方程组, 故常采用三刺激值匹配方法。在这种三刺激值匹配法中, 用矩阵转换法得到的配方再加以迭代改善, 就能满足低异谱性匹配。

2 理论基础

目前所有计算机配方预测系统都基于一个实现两种特殊功能的光学模型^[2]: 1) 将单个色料的浓度与色料在使用中的一些可测特性相关联; 2) 描述色料在混合物中的行为。最常用的光学模型是 Kubelka-Munk 理论^[3], 用 K 和 S 两个参数(分别称为色料的 Kubelka-Munk 吸收系数和散射系数)将测得的反射比值与色料浓度相联系, 并用在色料混合物中 K 和 S 的加和性来表征各色料在混合时的光学行为, 其针对不透明样品的基本方程为^[4]

$$K/S = (1 - \rho_{\infty})^2 / 2\rho_{\infty} \quad (1)$$

式中 ρ_{∞} 指无穷大厚度时的反射比, 即厚度再增大不会影响样品的反射比。

根据 Kubelka-Munk 理论, 其吸收和散射系数适用加和性原理。设 K 和 S 为膜层总的吸收和散射系数, 各色料的单位吸收和散射系数为 K_1, K_2, \dots, K_n 和 S_1, S_2, \dots, S_n , 基质的吸收和散射系数为 K_t 和 S_t , 则有

* 国家教委博士点专项基金资助。

$$K = K_t + c_1K_1 + c_2K_2 + \dots + c_nK_n \quad (2)$$

$$S = S_t + c_1S_1 + c_2S_2 + \dots + c_nS_n \quad (3)$$

式中 c_1, c_2, \dots, c_n 为组成膜层的 n 种色料的浓度。

如果散射系数不变并等于基质的散射系数, 由(2)式除以(3)式并设 $(\frac{K}{S})_t = \frac{K_t}{S_t}, (\frac{K}{S})_1 = \frac{K_1}{S_1}, (\frac{K}{S})_2 = \frac{K_2}{S_2}, \dots, (\frac{K}{S})_n = \frac{K_n}{S_n}$, 则有

$$\frac{K}{S} = (\frac{K}{S})_t + c_1(\frac{K}{S})_1 + c_2(\frac{K}{S})_2 + \dots + c_n(\frac{K}{S})_n \quad (4)$$

可见, 对于每个波长需对应一个参数 (K/S) 来表征一种色料, 因此这种处理方法称为 Kubelka-Munk 单常数理论。

3 三刺激值匹配算法

对色料混合光学模型的研究发现, 有些情况下不管色料配方发生什么变化, 其散射系数基本不变。如染色纺织品, 其染料层的光散射受纺织纤维的作用, 加入到纺织品中的染料似乎溶于纤维中而不影响基质的散射能力, 使其中各染料的散射系数相等, 且与基质的散射系数一致, 因此纺织印染自动配色适用 Kubelka-Munk 单常数理论^[5]。下面以三染料组合为例, 说明应用 Kubelka-Munk 单常数理论进行三刺激值匹配的算法。

3.1 变量定义

在讨论算法之前, 首先定义下列矩阵和矢量:

$$T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{400} & \bar{x}_{420} & \dots & \bar{x}_{700} \\ \bar{y}_{400} & \bar{y}_{420} & \dots & \bar{y}_{700} \\ \bar{z}_{400} & \bar{z}_{420} & \dots & \bar{z}_{700} \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} E_{400} & & & 0 \\ & E_{420} & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & E_{700} \end{bmatrix}$$

其中 X, Y, Z 是光谱三刺激值函数(色混合函数), E_i 表示在波长 i (nm) 上光源的相对光谱功率分布。这里假定在此配方中使用 400~700 nm 范围内的波长间隔为 20 nm, 当然也可用其它的范围和间隔(按具体需要而定)。

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

其中 ρ 指不透明样品的光谱反射比。上标(s)指被匹配的样品即标准色样, (t)指匹配的基质。函数 $f(\rho)$ 具体为不透明样品的 $(1 - \rho)^2 / 2\rho$ [见(1)式]。

$$D = \begin{bmatrix} d_{400} & & & 0 \\ & d_{420} & & \\ & & \dots & \\ 0 & & & d_{700} \end{bmatrix}, \quad \Phi = \begin{bmatrix} \phi_{400}^{(1)} & \phi_{400}^{(2)} & \phi_{400}^{(3)} \\ \phi_{420}^{(1)} & \phi_{420}^{(2)} & \phi_{420}^{(3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{700}^{(1)} & \phi_{700}^{(2)} & \phi_{700}^{(3)} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$$

这里 $d_i = [d\rho/df(\rho)]_{i = 400, 420, \dots, 700} = -2\rho_i^2 / (1 - \rho_i^2)$; ϕ 值指不透明样品所用染料单位 K/S 值, 下标为波长, 上标是染料编号; c_1, c_2, c_3 指三种染料的浓度。

3.2 初始配方计算

为了便于推导, 再定义三个过程矢量:

$$t = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad r^{(s)} = \begin{bmatrix} \rho_{400}^{(s)} \\ \rho_{420}^{(s)} \\ \vdots \\ \rho_{700}^{(s)} \end{bmatrix}, \quad r^{(m)} = \begin{bmatrix} \rho_{400}^{(m)} \\ \rho_{420}^{(m)} \\ \vdots \\ \rho_{700}^{(m)} \end{bmatrix}$$

其中 X 、 Y 、 Z 为三刺激值, ρ_i 表示在波长 i (nm) 处的光谱反射比, (s) 表示标准色样, (m) 表示配方样品。

对于完善匹配, 应有 $X^{(s)} = X^{(m)}$, $Y^{(s)} = Y^{(m)}$, $Z^{(s)} = Z^{(m)}$, 故由色度学理论可以写成

$$TE[r^{(s)} - r^{(m)}] = 0 \quad (5)$$

如果不是存在特别严重的光谱异构性, 在任何一个波长上配方的反射比与标准色样的对应值相差不太大, 故可相当精确地写出

$$r^{(s)} - r^{(m)} = D[f^{(s)} - f^{(m)}] \quad (6)$$

根据 Kubelka-Munk 理论的 K/S 加和性原理 $f^{(m)} = f^{(t)} + \Phi C$, 与(6)式一起代入(5)式并移项和整理后, 得

$$C = (TED\Phi)^{-1} TED[f^{(s)} - f^{(t)}] \quad (7)$$

这就是计算得到的初始配方, 它提供了一个相当接近但可能不是刚好的染料比例, 通常尚需进一步迭代改善。

3.3 迭代改善

令

$$\Delta t = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad \Delta C = \begin{bmatrix} \Delta c_1 \\ \Delta c_2 \\ \Delta c_3 \end{bmatrix}$$

其中 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 为标准色样与初始配方之间的三刺激值误差, Δc_1 、 Δc_2 、 Δc_3 是为使 Δt 减小至零所需初始配方的变化量, 故

$$\Delta t = B \cdot \Delta C \quad (8)$$

式中

$$B = \begin{bmatrix} \partial X / \partial c_1 & \partial X / \partial c_2 & \partial X / \partial c_3 \\ \partial Y / \partial c_1 & \partial Y / \partial c_2 & \partial Y / \partial c_3 \\ \partial Z / \partial c_1 & \partial Z / \partial c_2 & \partial Z / \partial c_3 \end{bmatrix}$$

若设

$$P = \begin{bmatrix} \partial X / \partial \rho_{400}^{(m)} & \partial X / \partial \rho_{420}^{(m)} & \cdots & \partial X / \partial \rho_{700}^{(m)} \\ \partial Y / \partial \rho_{400}^{(m)} & \partial Y / \partial \rho_{420}^{(m)} & \cdots & \partial Y / \partial \rho_{700}^{(m)} \\ \partial Z / \partial \rho_{400}^{(m)} & \partial Z / \partial \rho_{420}^{(m)} & \cdots & \partial Z / \partial \rho_{700}^{(m)} \end{bmatrix} \quad \text{及} \quad Q = \begin{bmatrix} \partial \rho_{400}^{(m)} / \partial c_1 & \partial \rho_{400}^{(m)} / \partial c_2 & \partial \rho_{400}^{(m)} / \partial c_3 \\ \partial \rho_{420}^{(m)} / \partial c_1 & \partial \rho_{420}^{(m)} / \partial c_2 & \partial \rho_{420}^{(m)} / \partial c_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \partial \rho_{700}^{(m)} / \partial c_1 & \partial \rho_{700}^{(m)} / \partial c_2 & \partial \rho_{700}^{(m)} / \partial c_3 \end{bmatrix}$$

则

$$B = PQ \quad (9)$$

又根据色度学原理, 有 $X = \bar{x}_{400} E_{400} \rho_{400}^{(m)} + \bar{x}_{420} E_{420} \rho_{420}^{(m)} + \cdots + \bar{x}_{700} E_{700} \rho_{700}^{(m)}$, 显然 $\partial X / \partial \rho_{400}^{(m)} =$

$\bar{x}_{400}E_{400}, \partial X / \partial \rho_{420}^{(m)} = \bar{x}_{420}E_{420}, \dots, \partial X / \partial \rho_{700}^{(m)} = \bar{x}_{700}E_{700}$, 对 Y 和 Z 有类似关系。因此,

$$P = \begin{bmatrix} \bar{x}_{400}E_{400} & \bar{x}_{420}E_{420} & \dots & \bar{x}_{700}E_{700} \\ \bar{y}_{400}E_{400} & \bar{y}_{420}E_{420} & \dots & \bar{y}_{700}E_{700} \\ \bar{z}_{400}E_{400} & \bar{z}_{420}E_{420} & \dots & \bar{z}_{700}E_{700} \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad P = TE \quad (10)$$

考虑 Q 矩阵, $\frac{\partial \rho_{400}^{(m)}}{\partial c_1} = \left(\frac{d\rho}{df(\rho)}\right)_{400} \frac{\partial f(\rho)_{400}^{(m)}}{\partial c_1} = d_{400} \frac{\partial f(\rho)_{400}^{(m)}}{\partial c_1}, \because f(\rho)_{400}^{(m)} = f(\rho)_{400}^{(i)} + c_1\Phi_{400}^{(1)} + c_2\Phi_{400}^{(2)} + c_3\Phi_{400}^{(3)}$, 显然 $\frac{\partial f(\rho)_{400}^{(m)}}{\partial c_1} = \Phi_{400}^{(1)}, \therefore \frac{\partial \rho_{400}^{(m)}}{\partial c_1} = d_{400}\Phi_{400}^{(1)}$, 对于其它波长和染料有相似结论。由此可将 Q 矩阵表述为

$$Q = \begin{bmatrix} d_{400}\Phi_{400}^{(1)} & d_{400}\Phi_{400}^{(2)} & d_{400}\Phi_{400}^{(3)} \\ d_{420}\Phi_{420}^{(1)} & d_{420}\Phi_{420}^{(2)} & d_{420}\Phi_{420}^{(3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{700}\Phi_{700}^{(1)} & d_{700}\Phi_{700}^{(2)} & d_{700}\Phi_{700}^{(3)} \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad Q = D\Phi \quad (11)$$

将(10)式, (11)式代入(9)式后, 再代入(8)式, 便得到染料浓度的修正量:

$$\Delta C = (TED\Phi)^{-1}\Delta t \quad (12)$$

可见, 用于染料浓度迭代改善的逆矩阵与在初始配方计算中所用的逆矩阵相同。

最后, 由

$$C_{\text{new}} = C_{\text{old}} + \Delta C \quad (13)$$

计算出新的浓度矢量, 再由此确定三刺激值的接近程度, 或达到匹配要求并输出配方及有关参数而结束, 或再次进入下一轮迭代修正直至满足要求。在大多数情况下, 需要不超过四或五次迭代即可。

4 实验结果与讨论

在建立了染料的定标着色基础数据库的前提下, 按上述算法进行自动配色实验。图 1(a) ~ (c) 分别表示三个标准色样和对应的配方颜色的光谱反射比曲线, 其色度参数及配色误差如表 1 所示。

Table 1. Color matching data for 3 standard color samples

(CIE 1964 color system, light source for matching is D65 and metamerism A, ΔE^* & M : CIELAB)

color sample		X	Y	Z	x	y	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	M
red	std	17.39	10.66	6.23	0.5074	0.3109	39.00	46.70	17.63		
	match	17.42	10.68	6.25	0.5071	0.3110	39.04	46.65	17.63		
	diff	0.03	0.02	0.02	-0.0003	0.0001	0.04	-0.05	0.00	0.07	0.05
yellow	std	26.43	20.78	5.46	0.5017	0.3946	52.71	30.04	44.60		
	match	26.52	20.86	5.48	0.5016	0.3946	52.79	30.06	44.63		
	diff	0.09	0.08	0.02	-0.0001	0.0000	0.08	0.02	0.03	0.09	0.09
blue	std	13.96	18.58	41.89	0.1876	0.2496	50.20	-21.61	-31.57		
	match	13.99	18.60	41.98	0.1875	0.2495	50.22	-21.57	-31.62		
	diff	0.03	0.02	0.09	-0.0001	-0.0001	0.02	0.04	-0.05	0.08	0.20

可见, 配方的色差 ΔE^* 均小于 0.10 CIELAB, 同色异谱指数 M 均小于 0.20 CIELAB。因此, 按三刺激值匹配算法进行自动配色预测, 其配方与标准的匹配精度很高, 光谱异构程度很低, 且光谱分布也非常一致。

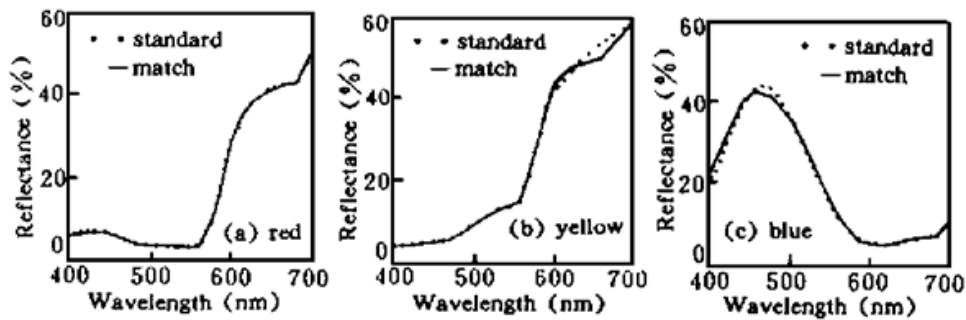


Fig. 1 Color matching results for 3 standard color samples

结 论 本文提出了一种计算机自动配色的三刺激值匹配算法, 并得到了实验验证。该算法在纺织印染等颜色测控工业领域中具有很大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] R. McDonald, *Colour Physics for Industry*. The Society of Dyers and Colourists, England, 1987: 116 ~ 185
- [2] J. M. Bishop, M. J. Bushnell, S. Westland, Application of neural networks to computer recipe prediction. *Color Res. Appl.*, 1991, **16**: 3~ 9
- [3] P. Kubelka, F. Munk, Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche. *Z. tech. Physik*, 1931, **12**: 593
- [4] D. B. Judd, G. Wyszecki, *Color in Business, Science, and Industry*. John Wiley & Sons, New York, 1975: 397~ 461
- [5] F. Grum, C. J. Bartleson, *Optical Radiation Measurements*, Vol. 2: Color Measurement. New York, Academic Press, 1980: 289~ 336

A Study of Computer Color Matching Prediction Algorithm

Xu Haisong Ye Guanrong

(The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 21 January 1996; revised 9 May 1996)

Abstract A tristimulus value match algorithm for computer automatic color matching is developed. The algorithm is based on the single constant form of color prediction theory Kubelka-Munk law. The experiment on textiles gives the result that satisfactory color recipes of ΔE^* less than 0.10 CIELAB can be obtained with this algorithm.

Key words color matching prediction, tristimulus value match.