

Kubelka-Munk单常数配色理论与实践

郝文静, 赵秀萍

(天津科技大学 包装与印刷工程学院, 天津 300222)

摘要 Kubelka-Munk理论是计算机配色的重要理论基础, 本文对Kubelka-Munk单常数配色理论及三刺激值配色法进行了研究。并根据该理论和研究方法, 对15种专色油墨进行配色实验, 得出了单常数配色可以满足专色油墨配色要求的结论。

关键词 Kubelka-Munk; 单常数配色; 计算机配色; 三刺激值; 专色油墨

中图分类号 TS801.3 **文献标识码** A

Study on Kubelka-Munk Theory with Single Constant and Practice of Computer Color Matching

HAO Wenjing, ZHAO Xiuping

(College of Packaging and Printing Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract The Kubelka-Munk theory is the important theoretical foundation of the computer color matching. In the paper, the Kubelka-Munk theory with single constant and the method of tristimulus color matching are introduced. Based on the theory and the method, the fifteen kinds of spot-color ink are matched. It can be concluded from the experimental results that the Kubelka-Munk theory with single constant could meet the requirement of the spot-color matching.

Key words Kubelka-Munk; Single constant matching; Computer color matching; Tristimulus; Spot-color ink

0 引言

印刷厂在承接烟酒、化妆品、日用品等包装产品的印制时经常要使用专色油墨, 以保证印品色彩的一致性, 便于防伪。专色油墨的大量使用对印刷厂和油墨厂提出了新的要求。现在国内厂家大都以仪器配色与经验配色相结合的方式调配专色油墨, 但这种配色方式调配时间长, 需反复多次, 浪费严重。于是计算机配色应运而生。计算机配色不仅速度快、准确度高、节省时间, 而且具有剩墨利用功能, 可以节约成本。目前计算机配色软件大都是基于Kubelka-Munk理论而开发的。本文采用PANTONE色卡上的5个专色, 东洋AQDW油墨调配的5个专色和东洋TWH油墨调配的5个专色作为标样, 对Kubelka-Munk单常数

配色理论进行实验验证, 希望对今后计算机配色软件的开发起到积极的引导作用。

1 单常数配色理论

Kubelka-Munk理论是以半透明介质为例推导出来的普遍适用于半透明介质、不透明介质的混沌介质理论。该理论研究颜色物质对光的吸收和散射能力与对光的反射率之间的关系。Kubelka-Munk推导模型如图1所示。基本公式为:

$$R = \frac{1 - R_g(a - b \coth bSX)}{a - R_g + b \coth bSX} \quad (1)$$

其中: $a = 1 + K/S$ $b = \sqrt{a^2 - 1}$

R 为油墨反射率, R_g 为背景反射率, K 、 S 分别为

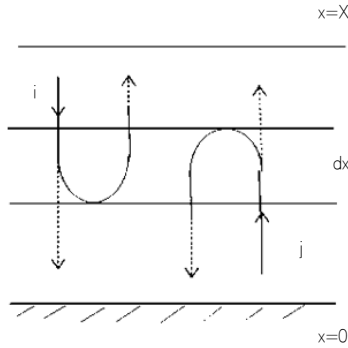


图1 Kubelka—Munk方程导出模型

Fig.1 Model of Kubelka—Munk

吸收系数和散射系数，即单位厚度的光吸收率与漫反射率。

该理论是在做了一系列假设的条件下推导的^[1]。

①样品界面上的折射率无变化；②光线在介质内被足够地散射，一直呈完全扩散状态；③光线在介质内的传播方向（通道）只考虑垂直于界面的上下两个方向，因此该理论属于“二光通”理论；④散射介质介于平行界面之间；⑤介质不发射辐射。这些假设条件将油墨对光的吸收与反射情况、纸张与油墨之间的相互作用简化成了理想情况，使得公式易于理解与应用，得到了广泛的应用与推广。

Kubelka—Munk单常数理论提出：由于颜色的反射光谱真实反映了颜色的本质，所以分光吸收系数（ K ）和分光散射系数（ S ）是油墨的特有参数，可用于区别不同颜色的油墨^[2]。1种油墨的每个波长都对应一个特征参数（ K/S ），且该参数适用加和性原理^[3]。

根据三刺激值配色理论，如果两个颜色的三刺激值相同，可认为它们的颜色外观是相同的，即两者同色异谱。因此，在配色中只要使配样与标样的三刺激值相等即可^[4-6]。

以3种基础油墨配色为例，波长从400~700nm，波长间隔取20nm。令：

$$t = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} \bar{x}_{400} & \bar{x}_{420} & \dots & \bar{x}_{700} \\ \bar{y}_{400} & \bar{y}_{420} & \dots & \bar{y}_{700} \\ \bar{z}_{400} & \bar{z}_{420} & \dots & \bar{z}_{700} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} E_{400} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E_{420} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & E_{700} \end{bmatrix}$$

t 为标样的三刺激值， T 为标准色度观察者光谱三刺激值， E 为CIE标准光源的相对光谱功率分布。

令标样的光谱反射率列矢量为 r^s ，配样的光谱反射率列矢量为 r^m ，如下：

$$r^s = \begin{bmatrix} R_{400}^s \\ R_{420}^s \\ \vdots \\ R_{700}^s \end{bmatrix} \quad r^m = \begin{bmatrix} R_{400}^m \\ R_{420}^m \\ \vdots \\ R_{700}^m \end{bmatrix}$$

三刺激值公式为：

$$\begin{cases} X = k \cdot \sum E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ Y = k \cdot \sum E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ Z = k \cdot \sum E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \end{cases} \quad (2)$$

据同色异谱理论，只要使配样与标样的三刺激值相等即可。所以可得：

$$\begin{aligned} K \sum E(\lambda) \cdot R^m(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda &= K \sum E(\lambda) \cdot R^s(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ K \sum E(\lambda) \cdot R^m(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda &= K \sum E(\lambda) \cdot R^s(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ K \sum E(\lambda) \cdot R^m(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda &= K \sum E(\lambda) \cdot R^s(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{即：} TEr^m = TEr^s \quad (4)$$

由于颜料的散射性很差，故 S 值很小，可大致认为是一个常数，所以可将 K/S 看做一个变量。因此，当色差不大时，

$$\Delta R \sim dR = \frac{dR}{d(K/S)} \Delta(K/S) \quad (5)$$

$$\text{即 } R_i^s - R_i^m = \frac{\partial R_i}{\partial (K/S)_i} \left(\left(\frac{K}{S} \right)_i^s - \left(\frac{K}{S} \right)_i^m \right) \quad (6)$$

改写成矩阵形式为：

$$r^s - r^m = D(f^s - f^m) \quad (7)$$

其中：

$$f = \begin{bmatrix} (K/S)_{400} \\ (K/S)_{420} \\ \vdots \\ (K/S)_{700} \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} d_{400} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & d_{420} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & d_{700} \end{bmatrix}$$

$$d_i = \frac{\partial R_i}{\partial (K/S)_i} = \frac{2R_i^2}{R_i^2 - 1}$$

将式(7)带入式(4)得：

$$TEDf^s = TEDf^m \quad (8)$$

由Kubelka—Munk单常数理论知：

$$\left(\frac{K}{S} \right)^m = \left(\frac{K}{S} \right)^t + \sum_{i=1}^3 c_i \left(\frac{K}{S} \right)_i \quad (9)$$

令:

$$\Phi = \begin{bmatrix} (k/s)_{400}^1 & (k/s)_{400}^2 & (k/s)_{400}^3 \\ (k/s)_{420}^1 & (k/s)_{420}^2 & (k/s)_{420}^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (k/s)_{700}^1 & (k/s)_{700}^2 & (k/s)_{700}^3 \end{bmatrix} \quad c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{则式(9)可改写为: } f^m = f^t + \Phi c \quad (10)$$

其中 f^t 为基底($\frac{K}{S}$)列阵, c 为基础油墨浓度的列阵,即配色处方。将式(9)代入式(7)整理得:

$$TED\Phi c = TED[f^s - f^t] \quad (11)$$

由此可得配色处方的计算公式:

$$c = [TED\Phi]^{-1} TED[f^s - f^t] \quad (12)$$

根据算得的油墨配方,由式(1)计算出油墨的反射率,进而求得油墨的三刺激值。由三刺激值,根据CIE Lab1976色差公式计算配方与标样的色差。若符合色差要求,则配色成功。但是,一般情况下,一次配色成功的概率很小,需要对配色处方进行修正^[6,7]。修正公式为:

$$c' = c + \Delta c \quad (13)$$

其中, $\Delta c = [TED\Phi]^{-1} \Delta t$, Δt 为配方与标样的三刺激值之差。

2 验证实验

实验仪器:IGT F1型印刷适性仪;X-Rite Eyeone分光光度计

印刷条件:速度0.3m/s;压印盘印刷压力325N;网纹辊压力175N;网纹辊线数80线/厘米

实验材料:东洋油墨(TWH型和AQDW型);70g/m²双胶纸;PANTONE色卡

实验过程:用TWH型油墨调配5个专色油墨,记为t1、t2、t3、t4、t5。用东洋AQDW型油墨调配5个专色油墨,记为a1、a2、a3、a4、a5。以a1为例:用IGT F1型印刷适性仪印刷5条a1样品,从中选择印刷效果好的1条作为标样。

另外,选取PANTONE色卡上的5个专色,记为p1、p2、p3、p4、p5,目的是为了检测外来标样的配色准确程度。这样便有了15个专色油墨作为标样。

在每种标样上选取5个均匀点,用分光光度计测量其反射率,取平均值,记为标样的反射率。测量承印

物的反射率,记为 R_g 。用IGT印刷适性仪印刷基础油墨样条,测量基础油墨的反射率,AQDW型C、M、Y油墨反射率记为 R_{ac} 、 R_{am} 、 R_{ay} ,TWH型记为 R_{tc} 、 R_{tm} 、 R_{ty} 。

用X-Rite Eyeone测标样的L*a*b*值,如表1。

通过Matlab编程计算配色浓度及配方的L*a*b*值,配色结果如表2和表3。

其中, t_c 、 t_m 、 t_y 分别表示用TWH型油墨配色时,配方中C、M、Y基础油墨的浓度,即配色处方, t_L 、 t_a 、 t_b 表示配方的L*a*b*值,色差 ΔE_t 表示配方与标样的 ΔE_{ab}^* 色差。

a_c 、 a_m 、 a_y 分别代表用AQDW系列油墨配色时配色处方浓度, a_L 、 a_a 、 a_b 代表配方的L*a*b*值,色差 ΔE_a 代表配方与标样的 ΔE_{ab}^* 色差。

3 结果分析

1) 对表2和表3配色色差结果进行统计,如图2,可以看出,在本实验中,单常数配色的色差 $\Delta E < 6$ 的专色有29个,只有一个色差 $\Delta E > 6$ 。所以,单常数配色能满足一般印刷品对颜色再现的要求。

2) 比较用TWH型和AQDW型两种油墨配色的结果(见图3)。可以看出两者的配色结果相差不大,说明基础油墨系列的不同对配色结果没有太大影响,配色结果稳定。

表1 用X-Rite Eyeone测量标样的L*a*b*

Tab.1 L*a*b* of the samples measured with X-Rite Eyeone

	L*	a*	b*
a1	57.8	48.4	46.5
a2	36.5	-6.9	-12.3
a3	45.6	-42.4	15.8
a4	39.8	-6.5	9
a5	44.2	6.9	15.2
t1	42.3	-1.3	9.6
t2	42	14	11.7
t3	52.8	52.6	26.2
t4	33.4	10.4	-23.6
t5	45.2	-39.2	9.3
p1	65	41.3	74.2
p2	38.1	-17.9	2.1
p3	31.7	4.5	29.1
p4	24.6	28.1	-37.9
p5	89.9	-5	95.2

表2 TWH型基础墨配方
Tab.2 Prescription used TWH ink

	t_c	t_m	t_y	t_L	t_a	t_b	色差 ΔE_t
a1	0	0.1298	0.8253	57.7691	46.7296	45.4608	1.97
a2	0.1399	0.1793	0.2882	35.9104	-6.976	-12.1372	0.62
a3	0.1637	0.0401	0.596	46.1894	-42.73	15.969	0.70
a4	0.0815	0.1374	0.5998	40.1434	-7.0324	8.9598	0.63
a5	0.0437	0.1581	0.6994	42.0958	6.8556	15.884	2.21
t1	0.0546	0.1202	0.4731	43.5676	-1.9309	9.406	1.43
t2	0.0343	0.1756	0.5315	42.718	13.6414	11.7734	0.81
t3	0	0.2321	0.4744	53.2147	54.2468	28.7144	3.03
t4	0.1151	0.2965	0.1647	33.0073	10.1267	-24.0168	0.63
t5	0.1742	0.0526	0.4988	44.2299	-38.5411	9.409	1.18
p1	0.0007	0.0613	1.8572	64.7405	33.4119	71.3441	8.39
p2	0.104	0.1123	0.3692	42.8	-18.2051	3.8508	5.02
p3	0.0879	0.3033	3.3084	33.2403	3.6931	30.4409	2.20
p4	0.1321	0.9143	0.0177	25.4585	29.2635	-36.4702	2.03
p5	0.0003	0	0.7475	90.9933	-5.4756	94.0823	1.63

表3 AQDW型基础墨配方
Tab.3 Prescription used AQDW ink

	a_c	a_m	a_y	a_L	a_a	a_b	色差 ΔE_d
a1	0	0.2576	0.3777	57.6724	46.9043	45.4483	1.83
a2	0.1603	0.3473	0.112	35.8563	-6.7087	-12.1165	0.70
a3	0.1867	0.0788	0.2819	46.3401	-42.8703	16.2354	0.98
a4	0.0917	0.2732	0.2669	40.0826	-6.7576	9.0112	0.38
a5	0.0482	0.3161	0.3113	42.033	7.2218	15.9525	2.32
t1	0.061	0.2388	0.209	43.5284	-1.6277	9.5153	1.27
t2	0.0377	0.3488	0.2286	42.6614	14.0455	11.8817	0.69
t3	0	0.4551	0.1936	53.0437	54.4973	28.61	3.08
t4	0.1314	0.5704	0.0379	32.8729	10.4537	-24.045	0.69
t5	0.1984	0.1024	0.2327	44.395	-38.5855	9.7356	1.10
p1	0	0.4119	1.0417	66.054	35.5209	73.5368	5.91
p2	0.1131	0.3861	0.2059	42.3448	-18.3902	3.2324	4.42
p3	0.0854	1.9564	1.8567	33.1949	4.3333	30.5181	2.07
p4	0.1106	5.0973	0	26.8061	29.4461	-34.6069	4.19
p5	0.0015	0	0.4401	90.8633	-5.2896	93.9801	1.58

3) 比较 3 种不同系列的标样，即分别以AQDW型、TWH型油墨调配的专色墨与从PANTONE色卡上选取的标样的配色结果。如图4和图5所示，对PANTONE标样的配色效果没有AQDW型和TWH型标样的配色效果理想。分析原因如下。

①Kubelka-Munk理论本身是在做了一系列假设的基础上推导出来的，考虑的是理想情况下油墨对光的吸收与反射情况，而实际情况却要复杂得多。

②单常数配色理论将油墨看做不透明介质，忽略墨层厚度。在本次实验中，印刷条件稳定，基础油墨样条和AQDW、TWH标样的墨层厚度基本一致，而PANTONE色卡是由胶印制成的，墨层厚度的差别使

得配色出现较大的色差^[8]。

③实验过程中存在误差。比如在测量反射率时用到的分光光度计的精确度，对实验结果有较大影响。另外，实验环境也会对实验结果产生影响。

④采用三原色进行配色。基础油墨与理想油墨之间的差别导致的误差。

4 结语

Kubelka-Munk是目前大多数配色软件的理论基础，属于二光通理论。该理论形式简单，易于理解与应用。本文使用基于Kubelka-Munk的单常数配色理

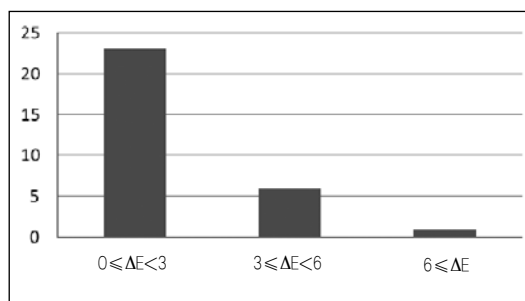


图2 色差分布图
Fig.2 Diagram of color difference distribution

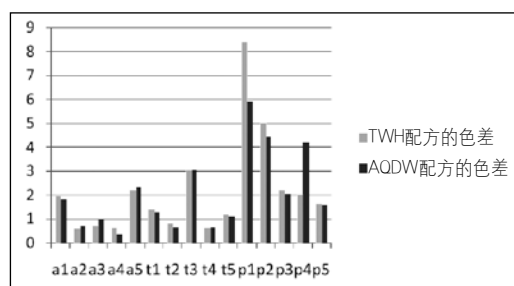


图3 色差图
Fig.3 Chart of color difference

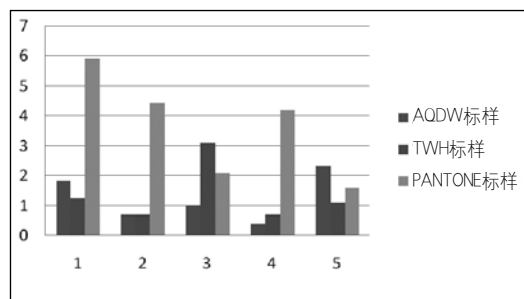


图4 以AODW型油墨为基础的油墨配方的色差
Fig.4 Color difference of prescription used AODW ink

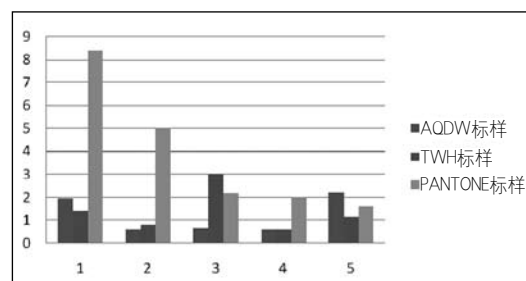


图5 以TWB型油墨为基础的油墨配方的色差
Fig.5 Color difference of prescription used TWB ink

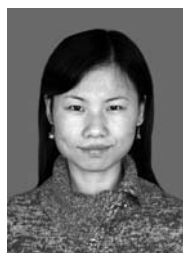
论进行配色。通过对15个标样进行配色实验,得出单常数配色可以满足大多数印刷品对颜色要求的结论。但是,影响该方法配色准确度的因素比较多,且未考虑墨层厚度对油墨颜色的影响,在印刷打样时要尽量保证墨层厚度的一致性。

参考文献

- [1] 董娟娟. 胶版印刷专色油墨的计算机配色理论与实践[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [2] 高虎, 颜梅, 李举. 专色油墨计算机配色[J]. 印刷世界, 2005, 11: 18-20.
- [3] 高虎. 塑料凹印专色油墨计算机配色的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [4] 周春霞, 唐正宁. 包装印刷专色油墨的计算机配色理论研究[J]. 包装工程, 2006, 27(5): 121-123.
- [5] 亓辉. 胶印油墨的专色配色研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
- [6] 徐海松, 叶荣荣. 计算机自动配色预测算法研究[J]. 光学学报, 1996, 16(11): 1657-1661.
- [7] 徐海松. 计算机测色与配墨新技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 1999.
- [8] 赵晨飞, 兀旦晖, 杨保宏, 等. 柔版印刷专色油墨

配色的影响因素分析[J]. 陕西科技大学学报, 2007, 25(4): 80-83.

主要作者



郝文静(1985年—), 硕士研究生; 研究方向: 印刷复制色彩管理与质量评价

HAO Wenjing, born in 1985. She is a graduate student of Tianjin University of Science and Technology. Her main research interests include color reproducing and color management, printing quality management.

E-mail: haowenjingxf@163.com



赵秀萍(1959年—), 教授, 硕士研究生导师, 天津科技大学印刷工程系主任。主要研究方向: 包装印刷色彩管理及质量评价。

Professor ZHAO Xiuping, born in 1951. She is the master student supervisor and the director of Printing Engineering of Tianjin University of Science and Technology. Her main research interests include color reproducing and color management, printing quality management.