

# 基于分区组阶堡方程的 6 色印刷分色模型研究

朱 明<sup>1</sup> 刘 真<sup>1</sup> 陈广学<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 南京林业大学轻工科学与工程学院, 江苏 南京 210037)  
(<sup>2</sup> 华南理工大学轻工与食品学院, 广东 广州 510640)

**摘要** 借鉴颜色分区理论,以青、品、黄、黑、桔红、绿为基色构建 6 色印刷分色模型。从现有 6 色国际色彩联盟 (ICC) 特性文件中获取光谱反射率数据,计算组阶堡基色的色度数据,并创建各分区组阶堡印刷呈色模型。在利用迭代法对分区组阶堡方程组进行反向求解的过程中,引入了基于节点地址的色域压缩方案,成功地解决了对目标色域外样本点进行分色求解所出现的异常值问题。基于新分色模型制作相应的多色 ICC 特性文件。采用主观评价方法设计了模型评价实验。纵向和横向评价实验结果表明,提出的 6 色分色算法在精度上与主流色彩管理软件的分色算法相当,且通过完善组阶堡方程的修正和灰色成分替代实验能够进一步提高算法性能。

**关键词** 视觉与色彩; 6 色分色模型; 组阶堡方程; 多色 ICC 特性文件; 高保真复制

**中图分类号** O432.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0733001

## Research on Six-Color Separation Model Based on Subarea Neugebauer Equations

Zhu Ming<sup>1</sup> Liu Zhen<sup>1</sup> Chen Guangxue<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Light Industry Science and Engineering, Nanjing Forestry University,  
Nanjing, Jiangsu 210037, China  
<sup>2</sup> College of Light Industry and Food Sciences, South China University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510640, China

**Abstract** The color of cyan, magenta, yellow, black, orange and green are used as printing primary colors. The six-color separation model is established based on color subarea theory. Based on the spectral measurement data in an existing six-color printing International Color Consortium (ICC) profile, the Neugebauer equation system in each subarea is established. The gamut compression algorithm based on the node addresses is introduced into the solving process of the Neugebauer equation system in each subarea based on Newton-Raphson method. It successfully solves the problem that the color separation of sampling points outside the target gamut results in the abnormal value. The corresponding six-color ICC profile based on the new color separation model is generated. Subjective evaluation method is used to design the evaluation experiment. Through the longitudinal and transverse evaluation experiments, it is concluded that the proposed six-color separation algorithm and multi-color separation algorithm of mainstream color management software have similar precision. The performance of the separation algorithm can be improved further by perfecting gray component replacement experiment and the correction of Neugebauer equations.

**Key words** vision color; six-color separation model; Neugebauer equation; multi-color ICC profile; high-fidelity reproduction

**OCIS codes** 330.1730; 100.2000; 110.1758

**收稿日期**: 2011-02-17; **收到修改稿日期**: 2011-03-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(60972134)和江苏省高校研究生科研创新计划(CX09B\_180Z)资助课题。

**作者简介**: 朱 明(1983—),男,博士研究生,主要从事色彩再现理论与应用等方面的研究。

E-mail: zhumingmaradona@yahoo.com.cn

**导师简介**: 刘 真(1953—),女,教授,博士生导师,主要从事印刷光学工程、色彩再现理论与应用等方面的研究。

E-mail: lunaprint@163.com(通信联系人)

# 1 引 言

多色分色技术通过在青品黄黑(CMYK)4色基础上增加分色基色的数量来扩大印刷颜色的表现范围,以实现色彩信息的高保真复制。高保真分色算法划分为分析模型法、经验模型法和基于光谱的多色分色算法3种类型。参考文献[1,2]提出了基于颜色分区理论的多色印刷分色方案。其中文献[1]研究了基于颜色分区纽阶堡方程的7色印刷分色方案;文献[2]提出了基于颜色分区的经验分色模型,针对每个颜色分区单独创建特征样本集,并根据样本集的测量值和输入信号值使用查找表插值、多项式回归或神经网络等方法建立分色模型。Tzeng<sup>[3]</sup>从光谱颜色复制的角度出发,提出了基于最小化同色异谱的多色分色方案<sup>[4]</sup>。

本文借鉴颜色分区理论,以青(C)、品(M)、黄(Y)、黑(K)、桔红(O)和绿(G)为基色构建6色印刷分色模型,在利用牛顿迭代法对分区纽阶堡方程进行反向求解的过程中,引入了基于节点地址的色域压缩方案。基于国际色彩联盟(ICC)色彩管理机制,设计分色模型的输入颜色样本集;根据ICC机制将色域压缩算法内嵌在所构建的分色模型中。根据输入样本集和相应的计算分色值构建分色模型,并以多维查找表的形式生成多色ICC特性文件。最后采用主观评价方法验证了分色模型的技术可行性和分色精度。

## 2 分区纽阶堡方程组的构建

图1显示了Lab色域图中的CMYKOG6种基色的分区情况,可以看出整个Lab色域被划分为5个分区,分别是KMO,KOY,KYG,KGC和KCM分区,落在任何一个分区中的颜色都可以用该分区

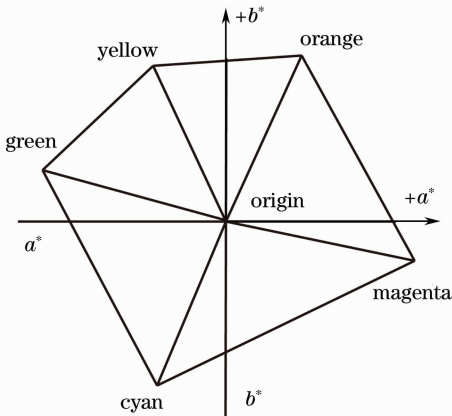


图1 CMYKOG6基色分区图

Fig. 1 Subarea figure of six primary colors (CMYKOG)

的两个基色加上黑色来复制,因此也就产生5组纽阶堡基色,如表1所示。

表1 各分区的纽阶堡基色

Table 1 Neugebauer primary colors of each subarea

Subarea	Symbol of each Neugebauer primary color							
KMO	K	M	O	KM	KO	MO	KMO	W
KOY	K	O	Y	KO	KY	OY	KOY	W
KYG	K	Y	G	KY	KG	YG	KYG	W
KGC	K	G	C	KG	KC	GC	KGC	W
KCM	K	C	M	KC	KM	CM	KCM	W

为简化分色模型的求解,根据颜色分区理论,将一个6基色纽阶堡方程组划分为5个对应分区(KMO,KOY,KYG,KGC和KCM)的3基色纽阶堡方程组。以KCM分区为例,该分区的纽阶堡方程组为

$$\begin{cases} X^{1/n_x} = \sum_{i=1}^8 f_i X_i^{1/n_x} \\ Y^{1/n_y} = \sum_{i=1}^8 f_i Y_i^{1/n_y}, n_x = 2.7, n_y = 2.65, n_z = 2.5 \\ Z^{1/n_z} = \sum_{i=1}^8 f_i Z_i^{1/n_z} \end{cases} \quad (1)$$

式中色元面积  $f_i$  可用德米切尔关系式描述; $X, Y, Z$  为各色元最终合成的颜色三刺激值; $X_i, Y_i, Z_i (i = 1, 2, \dots, 8)$  分别为该分区8个纽阶堡基色的XYZ三刺激值, $n_x, n_y, n_z$  为方程组的修正系数。本文采用一组胡成发<sup>[5]</sup>推导的推荐值作为修正值。

## 3 纽阶堡基色数据获取

以6色分色算法模型的设计和实现为研究目标,因此为避免复杂的基色数据获取实验,以现有的Profile Maker色彩管理软件生成的6色ICC特性文件“ArtPaper Test Hi-fi.icc”为基础,从中获取各纽阶堡基色的光谱测量数据,并计算得到相应的色度数据。特性文件中的“colorTableTag”标签用于读取CMYKOG6种基色的CIE-Lab色度值,除此以外的其他各纽阶堡基色可从“DevD”和“CIED”两个标签中获得。从这两个标签中可以获得每个纽阶堡基色以10 nm为间隔、在380~730 nm波长范围的光谱反射系数值。表2只列出了380~480 nm波长范围内的部分纽阶堡基色的光谱反射系数。

表 2 各组阶堡基色的光谱反射系数  
Table 2 Spectral reflectance of each Neugebauer primary color

Primary color (order number)	Spectral reflectance /10 <sup>-4</sup>											
	380 nm	390 nm	400 nm	410 nm	420 nm	430 nm	440 nm	450 nm	460 nm	470 nm	480 nm	
MK(C69)	92	94	97	98	100	100	102	104	103	97	92	
KO(C75)	111	118	120	121	123	122	125	125	124	123	125	
YK(C72)	79	87	88	86	87	89	90	94	94	99	110	
KG(C76)	137	139	143	143	149	152	158	169	178	188	194	
CK(C65)	111	124	140	148	154	156	162	168	168	168	166	
MO(C70)	738	604	501	450	436	421	412	385	340	291	249	
YO(C73)	291	222	175	149	137	132	129	130	133	136	153	
YG(C74)	201	207	217	232	251	281	321	398	523	685	952	
CG(C67)	185	282	480	732	984	1306	1754	2322	3043	3860	4493	
CM(C63)	301	524	848	1174	1418	1681	1986	2132	1992	1725	1427	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	

根据表 2 中列出的数据,使用反射色三刺激值计算公式计算得到除 CMYKOG 基色外其他各分区组阶堡基色的 CIE-XYZ 三刺激值。CMYKOG 6 基色的 CIE-XYZ 三刺激值可以从“colorTableTag”标签中获得,白点基色(W)的 CIE-XYZ 三刺激值

可从“mediaWhitePointTag”标签中获得。以 KCM 分区为例,该分区内各组阶堡基色的 XYZ 三刺激值如表 3 所示。将最终得到的各分区组阶堡基色的 XYZ 值代入相应分区的方程组,创建各分区的组阶堡印刷呈色模型(即各分区的组阶堡方程组)。

表 3 CKM 分区基本色元的 XYZ 三刺激值

Table 3 CIE-XYZ tristimulus values of each primary color in CKM subarea

	C	CK	CKM	K	KM	M	CM	W
X	16.18	1.11	0.66	1.95	1.61	30.77	5.8	81.47
Y	23.23	1.39	0.89	1.98	1.23	15.26	3.55	85.72
Z	64.36	2.38	0.62	1.64	1.38	21.38	16.86	97.17

## 4 创建 6 色分色模型

根据 ICC 色彩管理机制,印刷分色模型是以多维查找表的形式存在于 ICC 特性文件中。查找表的输入部分为颜色样本集的 Lab 色度值,输出部分即为输入样本集的印刷分色值。

### 4.1 算法流程

首先设计了分色模型的输入颜色样本集,然后通过反向求解分区组阶堡方程组和色域压缩的方法计算输入样本集对应的印刷分色值(CMYKOG 值),并将分色值与输入样本集共同组成多维查找表,最后基于该查找表制作 ICC 特性文件。该分色模型的算法流程如图 2 所示。

### 4.2 创建节点地址数组描述输出色域

使用节点地址方式描述色域具有方法直观、计

算量小等特点,因此非常适合用于分色中的色域压缩,其算法流程如图 3 所示。首先创建一个数组,用于存放每个采样点的节点地址、相应分色值(对应各采样通道的网点面积率)以及采样点色度值和节点地址对应的真实色度值之间的色差。该数组创建完成后,在各颜色分区内等间隔采样,获取各分区颜色样本集形成样本总集;然后将样本总集中每个采样点的网点面积率值作为相应分区内各色元的网点面积率,并将其代入相应分区的组阶堡方程组,求出每个采样点的 Lab 色度值;将计算所得样本点的 Lab 值转换为节点地址用以描述印刷色域。为了在计算量和精度之间取得平衡,并与所构建的分色查找表中输入样本点的采样间隔相一致,计算 L(0:100)通道节点地址时所取间隔为 3.125,计算 a, b(-128:127)

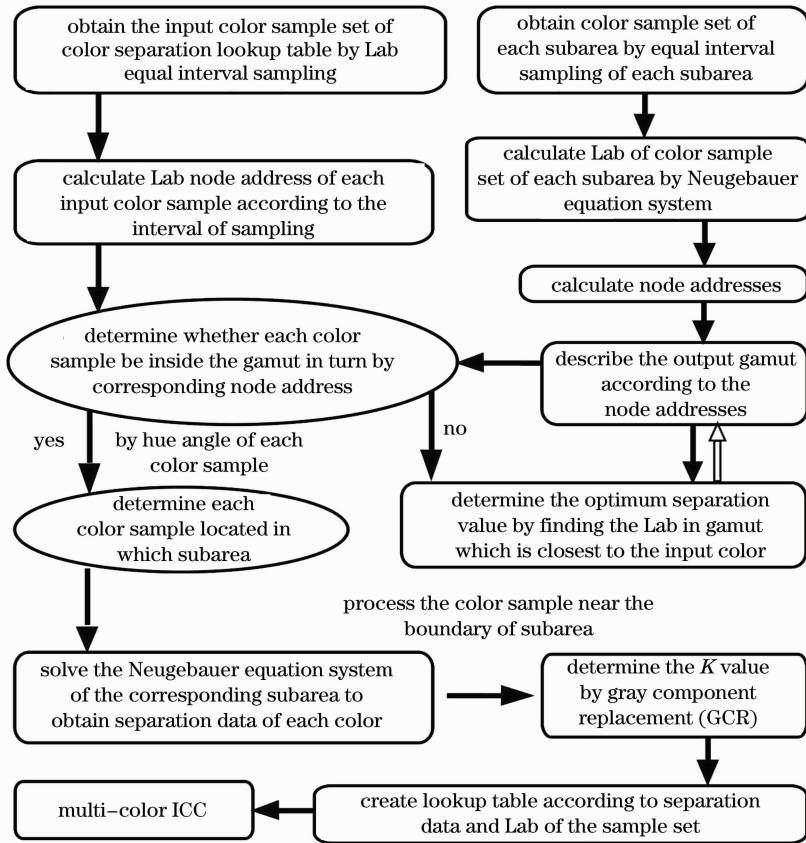


图 2 构建 6 色分色模型的算法流程

Fig. 2 Flow-chart of the algorithm for six-color separation model

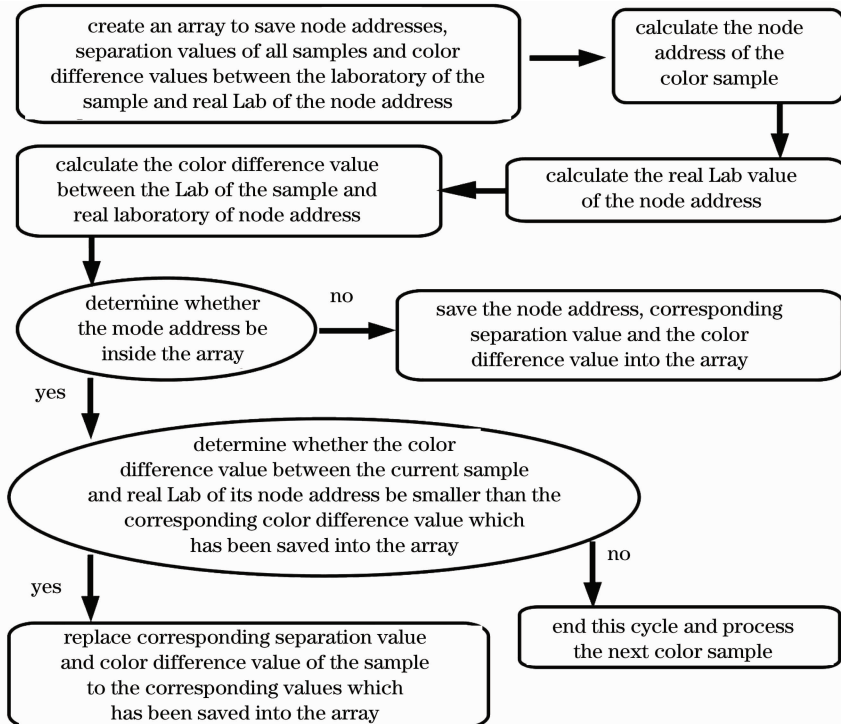


图 3 使用节点地址数组描述色域的算法流程图

Fig. 3 Flow-chart of the algorithm for describing gamut using node address array

通道节点地址所取间隔为 7.969。Lab 三通道节点地址的计算公式

$$\begin{cases} \text{node\_address}_L = \text{round}(l\_data(i)/3.125) \\ \text{node\_address}_a = \text{round}[(a\_data(i) + 128]/7.969) \\ \text{node\_address}_b = \text{round}[(b\_data(i) + 128]/7.969) \end{cases} \quad (2)$$

其中在 ab 通道加上 128 目的是将地址值取正,因此节点地址 Lab 均为 0~32 的整数,即( $L=0,1,2,\dots,32$ ;  $a=0,1,2,\dots,32$ ;  $b=0,1,2,\dots,32$ )。最后使用

$$\begin{cases} l\_real = \text{node\_address}_L \times 3.125 \\ a\_real = \text{node\_address}_a \times 7.969 - 128.0 \\ b\_real = \text{node\_address}_b \times 7.969 - 128.0 \end{cases} \quad (3)$$

计算该采样点节点地址对应的真实色度值,并利用 CIE1976 色差公式计算该采样点 Lab 色度值与其节点地址对应的真实色度值之间的色差:

下面进入第一个判断模块(如椭圆形模块),根据该采样点的节点地址遍历数组进行查找,如果该采样点的节点地址未存在于数组中,便将这组新的节点地址、各通道网点面积率值以及相应色差值存入数组;如果数组中已存在该节点地址,那么进入第二个判断模块,将当前采样点色度值与其节点真实色度值之间色差和数组中对应位置上已经存入的色差值进行比较,如果当前色差值大于已存入值,那么结束本次循环进入下一个采样点处理过程,否则即将该采样点各通道网点面积率值和相应色差值替换数组中相应位置上的已存入值。依次处理完样本集中全部采样点后得到的数组便可用于描述印刷色域。

### 4.3 分色模型的创建

按照图 2 所示的算法流程构建分色模型,首先设计分色模型的输入颜色样本集。

#### 4.3.1 输入样本集合

为了在分色精度和计算量之间取得平衡,对 Lab 进行全色域等间隔采样,L 通道和 a/b 通道所取的采样间隔分别为 3.125 和 7.969,即 Lab 每个通道的采样节点数都为 33,因此所设计的分色模型的输入样本集中共有 35937 ( $33 \times 33 \times 33$ ) 个采样点。这种设计方法与色域描述相一致。

#### 4.3.2 分区组阶堡方程组的求解

针对某个输入采样点,按照图 2 所示的算法流程,通过其节点地址判断该颜色是否在输出色域内,如不在色域内则对其进行色域压缩处理,如在色域

内则根据其色度值计算色相角,用以判断该采样点所在分区。确定分区后,需求解该采样点所在分区的组阶堡方程得出采样点的分色值。这里以某个分区为例,对该分区的组阶堡方程组进行求解,其他分区与此类似。组阶堡方程组中具有未知变量的乘积,因此可以将其看作一个非线性方程组。根据一元函数的泰勒公式和一元非线性方程牛顿迭代法之间的关系,利用多元函数的泰勒公式推导出三元非线性方程组的牛顿迭代法,在此基础上利用 Matlab 编程完成方程组的求解。以 KCM 分区为例,首先将对应该分区的组阶堡方程组进行变形,变形后的方程组形式为

$$\begin{cases} F_1(x_1, x_2, x_3) = \sum_i^8 f_i X_i^{1/2.7} - X^{1/2.7} = 0 \\ F_2(x_1, x_2, x_3) = \sum_i^8 f_i Y_i^{1/2.65} - Y^{1/2.65} = 0, \\ F_3(x_1, x_2, x_3) = \sum_i^8 f_i Z_i^{1/2.5} - Z^{1/2.5} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $x_1, x_2, x_3$  分别为 K, C, M 通道的网点面积率,即分色值。将(4)式按一阶泰勒公式展开可得

$$\begin{bmatrix} F_1(x_1, x_2, x_3) \\ F_2(x_1, x_2, x_3) \\ F_3(x_1, x_2, x_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} & \frac{\partial F_1}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} & \frac{\partial F_2}{\partial x_3} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x_1} & \frac{\partial F_3}{\partial x_2} & \frac{\partial F_3}{\partial x_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

令

$$\begin{aligned} F_1(x_1, x_2, x_3) &= F_1, & F_2(x_1, x_2, x_3) &= F_2, \\ F_3(x_1, x_2, x_3) &= F_3, \\ \frac{\partial F_1}{\partial x_1} &= F_{11}, & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} &= F_{12}, & \frac{\partial F_1}{\partial x_3} &= F_{13}, \dots \end{aligned}$$

可将(5)式简化表示为线性方程组:

$$\begin{cases} F_1 + F_{11}\Delta x_1 + F_{12}\Delta x_2 + F_{13}\Delta x_3 = 0 \\ F_2 + F_{21}\Delta x_1 + F_{22}\Delta x_2 + F_{23}\Delta x_3 = 0, \\ F_3 + F_{31}\Delta x_1 + F_{32}\Delta x_2 + F_{33}\Delta x_3 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中  $F_1, F_2, F_3$  为  $F_i$  函数第一次计算结果在  $x_1, x_2, x_3$  时的取值;  $\partial F_i / \partial x_1, \partial F_i / \partial x_2, \partial F_i / \partial x_3$  为偏导数  $F_i$  的第一次迭代结果在  $x_1, x_2, x_3$  时的取值,  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  为第一次迭代求出的网点面积率值的修正量。以  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  为未知量通过求解线性方程组可得

$$\begin{cases} \Delta x_1 = \frac{(F_2 F_{32} - F_3 F_{22})(F_{13} F_{22} - F_{23} F_{12}) - (F_1 F_{22} - F_2 F_{12})(F_{23} F_{32} - F_{33} F_{22})}{(F_{11} F_{22} - F_{21} F_{12})(F_{23} F_{32} - F_{33} F_{22}) - (F_{21} F_{32} - F_{31} F_{22})(F_{13} F_{22} - F_{23} F_{12})} \\ \Delta x_2 = \frac{(F_2 F_{33} - F_3 F_{23})(F_{11} F_{23} - F_{21} F_{13}) - (F_1 F_{23} - F_2 F_{13})(F_{21} F_{33} - F_{31} F_{23})}{(F_{12} F_{23} - F_{22} F_{13})(F_{21} F_{33} - F_{31} F_{23}) - (F_{22} F_{33} - F_{32} F_{23})(F_{11} F_{23} - F_{21} F_{13})} \\ \Delta x_3 = \frac{(F_2 F_{31} - F_3 F_{21})(F_{12} F_{21} - F_{22} F_{11}) - (F_1 F_{21} - F_2 F_{11})(F_{22} F_{31} - F_{21} F_{32})}{(F_{13} F_{21} - F_{23} F_{11})(F_{22} F_{31} - F_{21} F_{32}) - (F_{23} F_{31} - F_{33} F_{21})(F_{12} F_{21} - F_{22} F_{11})} \end{cases} \quad (7)$$

设  $x_1, x_2, x_3$  的初始值  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}$  为 0.618, 如果  $F_i$  函数第一次计算结果在  $x_1, x_2, x_3$  时的取值满足

$$\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2} \leq \epsilon, \quad (8)$$

式中  $\epsilon$  取任意极小正数, 使  $\epsilon = 0.0001$ , 那么此时的  $x_1, x_2, x_3$  值即为该采样点的分色值; 如果不满足, 那么使用(8)式中计算得到的  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$  来修正  $x_1, x_2, x_3$  的初始值  $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, x_3^{(0)}$ , 得到第一次迭代值  $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}$ , 即

$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1, \quad x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2, \quad x_3^{(1)} = x_3^{(0)} + \Delta x_3. \quad (9)$$

设定停止迭代的条件为第  $k+1$  次迭代时函数  $F_i$  满足

$$\begin{cases} \sqrt{F_1[x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, x_3^{(k+1)}] + F_2[x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, x_3^{(k+1)}] + F_3[x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, x_3^{(k+1)}]} \leq \epsilon, \\ x_1^{(k+1)} = x_1^{(k)} + \Delta x_1, \quad x_2^{(k+1)} = x_2^{(k)} + \Delta x_2, \quad x_3^{(k+1)} = x_3^{(k)} + \Delta x_3 \end{cases} \quad (10)$$

此时的  $x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, x_3^{(k+1)}$  就是方程组的解, 即分色结果。

#### 4.3.3 边界采样点的处理

CIE-Lab 颜色空间的不均匀性导致图 1 所示的 ab 色度平面中的等色相线并非是直线。因此, 简单依靠某个具体的色相角无法判断位于相邻分区边界处附近的采样点的所在分区。本文对相邻分区边界附近的采样点采取如下的处理流程: 1) 以各基色色相角为中心取  $\pm 3^\circ$  的扇形区域为边界过渡区域; 2) 当判断某个采样点位于此区域内时, 可分别求解两个相邻分区的组阶堡方程组, 获得两组分色值; 3) 根据这两组分色值, 使用两个相应分区的正向模型计算它们的 Lab 色度值, 并分别与采样点的原始色度值进行色差计算; 4) 选择对应较小色差的其中一个分区的分色值作为该采样点的最终分色值。

#### 4.3.4 色域压缩

如果对样本集中每个采样点都直接使用求解组阶堡方程组的方法进行分色, 那么对某些采样点求解所得的网点面积率值可能会出现异常值, 即会出现大于 1 或小于 0 的情况, 这些异常值的出现说明该采样点不在印刷色域内, 需要对其进行色域压缩处理。具体算法流程如图 4 所示: 首先计算节点地址数组中每个节点地址的真实色度值, 然后使用色差公式依次计算每个节点地址真实色度值与该色域外采样点色度值之间的色差, 并找出与该采样点色差最小的节点地址, 该节点地址在数组中相应位置的网点面积率即可作为该采样点的分色数值。本文采用的色域压缩方法对色域内颜色不作处理而直

接分色, 对色域外颜色使用色域边缘与其色差最小的颜色来代替, 这对应 ICC 标准中定义的绝对色度匹配法<sup>[7,8]</sup>。

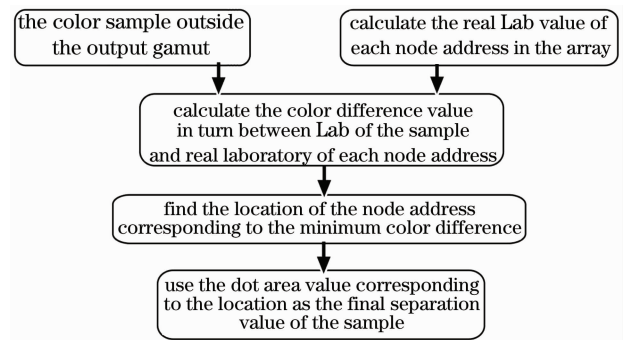


图 4 基于节点地址的色域压缩算法流程

Fig. 4 Flow-chart of the algorithm of gamut compression based on the node addresses

#### 4.3.5 生成多色 ICC 特性文件

利用 Matlab 编程读入分色模型的输入样本集合, 通过求解分区组阶堡方程和色域压缩算法对输入样本集中每个采样点依次进行处理, 最后将处理后得到的所有采样点分色值生成 TXT 格式的文本文件(如图 5 所示), 用于生成多色 ICC 特性文件。

多维查找表主要用于完成颜色空间转换即分色, 因此它是 ICC 特性文件中分色模型的实际表现形式。通过 Java 编程生成多色 ICC 特性文件, 程序读取 TXT 文本格式的分色值文件, 利用读取到的样本集中所有采样点的分色值创建 ICC 文件的多

文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)	
C	M	Y	K	O	G
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.02000000	0.00000000	0.64000000
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.06000000	0.00000000	0.85000000
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.06000000	0.00000000	0.85000000
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.13000000	0.00000000	1.00000000
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.13000000	0.00000000	1.00000000
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.13000000	0.00000000	1.00000000
1.00000000	0.00000000	0.00000000	0.13000000	0.00000000	1.00000000

图 5 输入样本集中所有采样点对应的分色值

Fig. 5 Separation values of all samples in the input sample collection

维查找表标签。由于构建的 6 色分色模型基于绝对色度压缩法,因此这里以 BtoA1 查找表为例说明生成特性文件的过程。

BtoA1 查找表的结构如图 6 所示。进入查找表的 Lab 数据首先需要经过单通道输入调整曲线进行分通道调整,调整后的 Lab 数据进入多维查找表并转换为 CMYKOG 多通道颜色数据,最后再由单通道设备颜色调整曲线对其进行调整并输出最终的 CMYKOG 分色数据。在具体实现的过程中,通过 Java 编程将 Lab 3 通道输入调整曲线和 6 通道的设

备颜色调整曲线都设为 1:1 的线性关系,然后将输入样本集合及其对应的分色值分别作为多维查找表的输入部分和输出部分写入 ICC 特性文件的 BtoA1 查找表,此时该特性文件的 BtoA1 查找表在整体上表现为输入样本集合及其相应分色值之间的数学转换关系。在使用该特性文件对图像进行分色的过程中,位于样本集合内部的采样点可以直接在查找表中查找其分色值,位于输入样本集合外的采样点可以利用色彩管理模块(CMM)的插值算法来计算其分色值<sup>[9]</sup>。

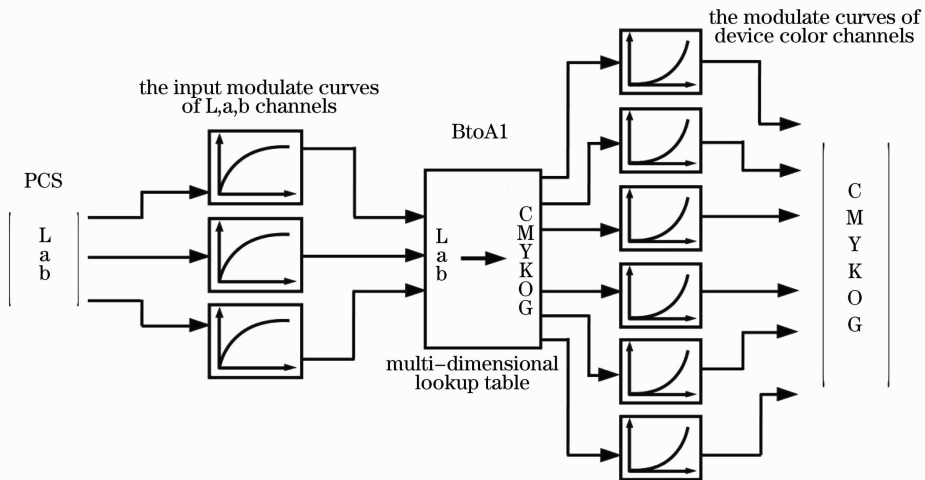


图 6 BtoA1 查找表的结构

Fig. 6 Structure of the BtoA1 lookup table

## 5 模型评价

按照测评目标将分色模型的评价分为纵向评价和横向评价。纵向评价主要用于验证分色模型的技术可行性,横向评价则通过对比现有主流色彩管理软件(Profile Maker)以及加密法生成的 6 色 ICC 特性文件的分色效果来评价本文算法的分色精度。由于使用传统印刷或打样方式来印刷色标较难控制输出精度,且实验成本较高,而多色数字喷墨打印机的打印驱动通常不支持多色 ICC 特性文件的加载,因此采用软件模拟分色的方法对算法进行主观评价。

### 5.1 模型评价实验的设计

选择 Profile Maker 色彩管理软件自带的 TC9.18 色标(如图 7 所示)作为测试目标,该色标共含 918 个色块,基本覆盖所有色相、明度和饱和度范围,而且还包含了中性灰梯尺。评价原理如下:使用 PhotoShop CS4 软件中支持多色分色的“转换为配置文件”功能模块实现模拟分色<sup>[10]</sup>。选择 10 位色觉正常的观察者,其中 5 位是色彩专业人员,5 位是非专业人员。每位观察者都使用 PhotoShop CS4 软件的“转换为配置文件”模块加载不同的多色 ICC

特性文件,并选择绝对色域压缩方法将色标图像转换到输出颜色空间,然后查看并比较各特性文件对色标图像的分色结果,从而实现对每个特性文件分色精度的评价。

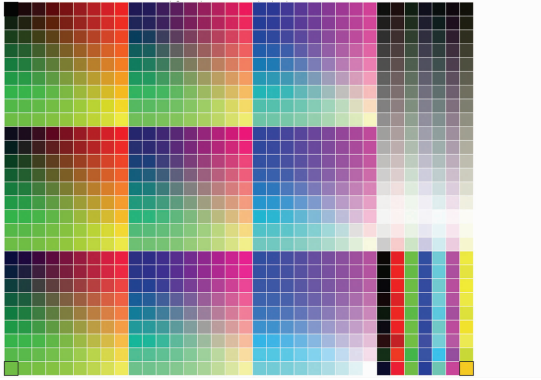


图 7 TC9.18 色标

Fig.7 TC9.18 color target

### 5.2 纵向评价实验

在纵向评价实验中,首先使用无色域压缩的 ICC 特性文件对色标图像进行分色,分色后的效果如图 8 所示,而使用包含色域压缩的 ICC 特性文件(由本文算法生成)对色标的分色结果如图 9 所示。通过对比可以发现,图 8 中暗调区域部分色块的颜色严重偏离了原始色标图像。

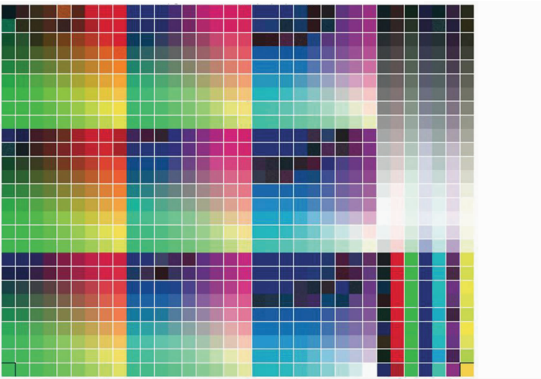


图 8 未包含色域压缩的分色结果

Fig.8 Result of color separation without gamut compression

对实验结果进行分析可以得知,这些偏色色块对应印刷输出色域外的颜色,对这些颜色值直接执行纽阶堡方程的求解将得出大于 1 或小于 0 的异常值,因此需要对其进行适当的色域压缩处理。通过对比原始色标图像发现,图 9 显示的分色结果在色彩整体感觉上除了略微有些偏暗外,能够较好地与原始色标图像保持一致。通过纵向评价实验能够验证本文算法具备技术可行性。

另外,通过色域比较也可以验证多色印刷较 4 色印刷的优越性。图 10 显示了本文算法生成的 6 色印

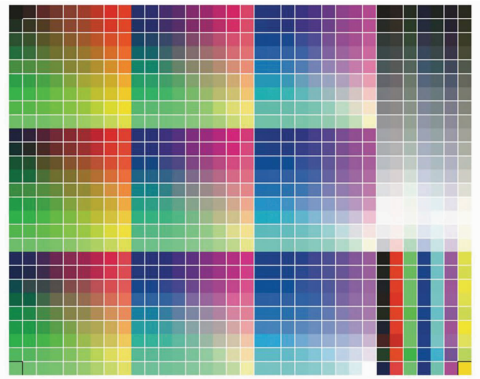


图 9 包含色域压缩的分色结果

Fig.9 Result of color separation with gamut compression

刷 ICC 特性文件和 4 个典型的 4 色 ICC 特性文件的色域,其中最外围的边界代表 6 色 ICC 特性文件的色域,而另外 4 个不同大小的边界中,有两个分别代表两种欧洲 4 色印刷标准的 ICC 特性文件,分别为“EuroscaleUncoated.icc”和“EuroscaleCoated.icc”,另两个分别代表两种日本 4 色印刷标准的 ICC 特性文件,分别为“JapanColor2001Uncoated.icc”和“JapanColor2001Coated.icc”。从图中可以很明显地看出,本文算法对应的 6 色 ICC 特性文件的色域边界完全包含了 4 种 4 色 ICC 特性文件的色域。

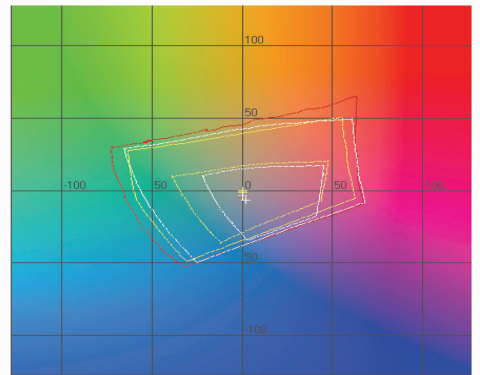


图 10 6 色和 4 色 ICC 的色域图

Fig.10 Gamut of six-color and four-color ICC

### 5.3 横向评价实验

在横向评价实验中,分别使用“加密法”<sup>[11]</sup>、Profile Maker 软件算法和本文算法生成的 ICC 特性文件对色标图像进行分色,并让不同观察者观察和对比不同 ICC 特性文件对色标图像的分色结果(如图 11 所示)。将实验观察结果进行汇总可以发现:1) 在色相、亮度和彩度方面,图 11(b),(d)显示的分色结果之间基本不存在颜色感觉差异,但细微观察发现图 11(b)中的部分色块(红绿部分)在亮度和彩度上较图 11(d)更接近原稿色标图像;2) 与图 11(a)所示的原始色标图像相比,图 11(b),(d)所



示的分色结果在颜色整体感觉上虽然能够较好地与原始色标图像相一致,但亮度和彩度还是略微偏低;3)与图 11(c)所示的“加密法”所生成的 ICC 特性文件分色结果相比,图 11(b),(d)所示的分色结果与

原始色标图像在色彩感觉上最一致;4)图 11(c)中的蓝绿色相区域出现了很明显的颜色并级现象,并且在整体上与原始图像的感知色差较大。

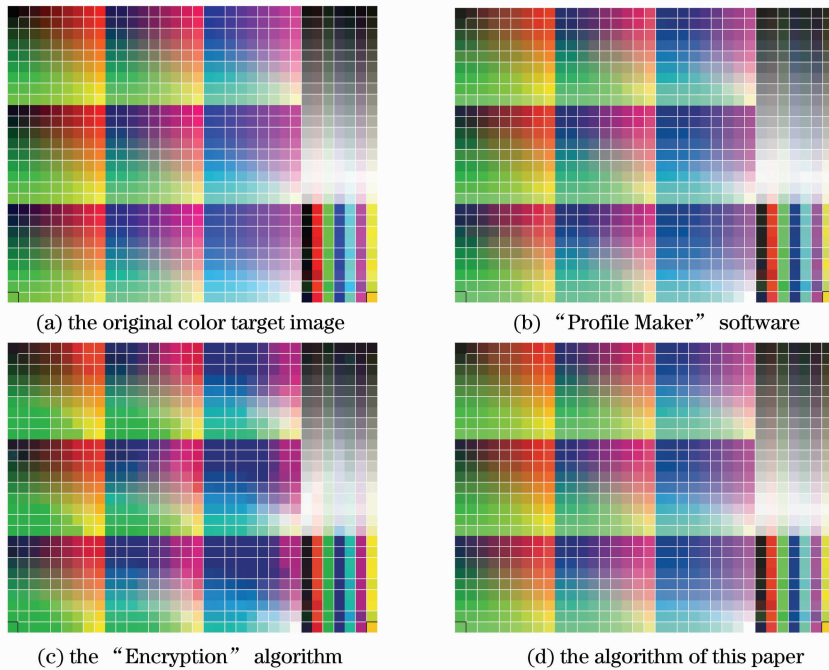


图 11 不同算法生成的 ICC 特性文件的分色效果

Fig. 11 Results of color separation for ICC profiles generated by different algorithms

横向评价实验结果表明,1)本文提出的分色模型在精度上与目前主流色彩管理软件 Profile Maker 的分色算法相当。2)本文算法产生的分色结果亮度和彩度略微偏低的原因可能有 3 条,即:色域压缩造成的亮度和彩度压缩;采用最大灰色成份替代造成了黑版量过大从而影响了图像整体的亮度和彩度;由于没有进行专门的组阶堡方程组的修正实验,而是对各个分区采用了一组相同的推荐修正值,在一定程度上影响了分色精度。3)“加密算法”生成的 ICC 特性文件的分色精度较差,这是因为“加密算法”对色域内的颜色值计算节点地址并据此查找其对应的分色值,必然会产生误差,从而影响分色精度。

## 6 结 论

目前国外主流的色彩管理软件如 Profile Maker, Monaco Profiler 等都可以生成多色 ICC 特性文件,但其中包含的多基色分色算法多为技术保密和专利,没有公开。另外,计算分色模型所用基色样图的输出和测量过程比较复杂,需要较高的实验成本。以 6 色分色算法模型的设计和实现为研究目

标,以现有的 Profile Maker 色彩管理软件生成的 6 色 ICC 特性文件为基础,从中获取 6 色分区的组阶堡基色的光谱测量数据,并计算得到相应的色度数据;然后根据获取的组阶堡基色色度数据创建基于 6 色分区的修正组阶堡方程组,以此为算法原理构建 6 色分色模型;最后基于新分色模型制作相应的多色 ICC 特性文件。由于是从现有软件生成的 ICC 特性文件中获取基色数据,因此选择采用主观评价方法设计评价实验。通过纵向评价实验验证了算法的技术可行性,而横向评价实验结果则表明,在分色精度上,生成的多色 ICC 特性文件明显好于 4 色 ICC,并且与目前主流色彩管理软件生成的多色 ICC 特性文件相当。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yifeng, Zeng Ping, Wang Ying. Multi-channel printer characterization based on gamut partition[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(3): 507~511  
王义峰,曾平,王莹.基于色域划分的多通道打印机色彩校正[J]. *电子学报*, 2010, **38**(3): 507~511
- 2 Shi Ruizhi, Cao Zhaohui. A color separation model based on 7-color Hi-Fi press[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, **32**(5): 58~60  
史瑞芝,曹朝辉.基于 7 色高保真彩色印刷的颜色分色模型[J].

- 测绘科学, 2007, **32**(5): 58~60
- 3 Di-Yuan Tzeng. Spectral-Based Color Separation Algorithm Development for Multiple-Ink Color Reproduction [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 1999. 10~18
- 4 Wang Ying, Zeng Ping, Wang Yifeng *et al.*. Spectral-based color separation for multi-spectral images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2122~2127  
王莹, 曾平, 王义峰等. 一种面向多光谱图像的打印分色方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2122~2127
- 5 Hu Chengfa. Chromatics and Colorimetry for Printing [M]. Beijing: Graphic Communication Press. 1993  
胡成发. 印刷色彩与色度学[M]. 北京: 印刷工业出版社. 1993
- 6 Xu Ruimin. Newton's method for the nonlinear function of two independent variables [J]. *J. Shandong Institute of Light Industry*, 2009, **23**(4): 89~91  
徐瑞敏. 二元非线性方程组求根的牛顿迭代法[J]. *山东轻工业学院学报*, 2009, **23**(4): 89~91
- 7 In-Su Jang, Chang-Hwan Son, Tae-Yong Park. Hi-Fi printer characterization method using color correlation for gamut extension[C]. Proceedings of the International Conference on Image Processing, ICIP 2006, 1517~1520
- 8 Xu Tianliang. Research on Detecting Color Characteristics and Color Correction Technology of Six-ink Printer[D]. Xian: Xidian University, 2008. 23~45  
许天亮. 六色打印机彩色特性检测与校正技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 23~45
- 9 Specification ICC. 1: 2004-10 (Profile Version 4. 2. 0. 0) [S]. International Color Consortium, 2004
- 10 Huang Min, Liu Haoxue, Liao Ningfang. Study on just noticeable color difference discrimination threshold by using printed samples I: analysis of visual evaluation experimental data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1431~1435  
黄敏, 刘浩学, 廖宁放. 印刷样品恰可察觉小色差辨色阈值的研究 I: 目视评价实验数据分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1431~1435
- 11 Si Lili. Research on Software of Creating Output Device Profile Based on Corrected Neugebauer Equation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008. 2~16  
司莉莉. 基于修正的组介堡方程输出特性文件制作软件的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2008. 2~16