

## 颜色分区理论误差分析研究

严爱国, 刘真

(南京林业大学 江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室, 南京 210037)

**摘要:** 分析了颜色分区理论,对颜色分区理论产生误差的原因进行了剖析,提出了分区边界以及共享区域的概念和分区边界描述的修正方法,在此基础上确定了判断颜色是否在共享区域内的规则。通过构建多色分色模型对修正算法进行了检验,对进行共享区域判断和不进行共享区域判断进行了比较。分色实验结果表明,分区边界描述修正方法能很好地解决颜色分区理论产生的误差,能进一步提高多色分色模型的精度。

**关键词:** 颜色分区; 多色分色; 边界描述; 共享区域; 3次样条插值

**中图分类号:** TS801.3 TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)15-0092-05

## Inaccuracy Analysis and Research of Color Subarea Theory

YAN Ai-guo, LIU Zhen

(Jiangsu Provincial Key Lab of Pulp and Paper Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** The color subarea theory and the causes of error of color subarea theory were analyzed. The concepts of subarea boundary and sharing area and a modification method called the subarea boundary description were proposed. On the basis of this a judgment rule of whether the color is in sharing area was confirmed. By building multi-color separation model, the modification algorithm was verified. The effect of carrying out sharing area judgment or not were compared. The separation experiment result showed the subarea boundary description method can solve the error problem of color subarea theory, and can further improve accuracy of multi-color separation model.

**Key words:** color subarea; multi-color separation; subarea boundary description; sharing area; cubic spline interpolation

多色印刷复制工艺由来已久,在近 20 年得以被重新开发,并受到越来越多的关注,特别是高保真印刷概念的出现,在一定程度上满足了艺术品复制等特殊需求以及人们日益增长的对精美印刷品的追求<sup>[1]</sup>。多色分色技术是多色印刷复制工艺的核心技术,对多色分色技术的研究一直是该领域的热点<sup>[2]</sup>。引入颜色分区思想,能使多色分色变得简单。

多色分色模型主要有 2 种:一种是以 ICISS 平台为代表的交互式图形界面设置分色模型,该模型采用纽介堡方程进行计算;另一种是以 Pantone 为代表的 CLUT 颜色查找表固定分色模型。对于较成熟的四色分色模型如纽介堡方程,可以通过颜色分区的思想应用至多色分色领域<sup>[3-4]</sup>。文中基于颜色分区理论

仍存在误差这一实验现象,分析产生误差的原因,并提出对分区边界进行描述的修正方法,最终设计实验,对进行分区边界描述修正和不进行修正的多色分色模型精度进行了比较。

## 1 理论分析

### 1.1 颜色分区理论

多色分色较四色分色基色数增多,因此分色算法更为复杂。若将四色分色算法直接应用到多色分色中来,会带来许多问题。首先,由于基色数量变多,分色模型需要进行方程组或项数的扩展,给模型求解带来一定难度;其次,对于分色模型的构建,一般需要对

收稿日期: 2012-05-02

作者简介: 严爱国(1987—),男,江苏人,南京林业大学硕士生,主要从事印刷色彩再现等方面的研究。

设备进行采样,多个基色将会使采样点数量异常庞大;再次,多色直接采样会受设备输出最大墨量的限制。解决上述问题的一种方法是引入分区思想<sup>[3]</sup>。

颜色分区理论认为,将设备色域按分色基色可分为多个颜色区域,以 CMYKRGB 7 色为例,见图 1。可分为 RKY, YKG, GKC, CKB, BKM, MKR 共 6 个

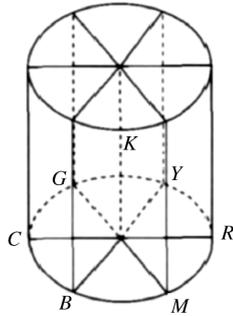


图 1 CMYKRGB 七色分区示意

Fig. 1 Schematic diagram of CMYKRGB subareas

分区,原稿中的任意颜色,只要位于某 3 种颜色所形成的色域内,都可以由组成该色域的 2 种基本色和黑色混合得到,该颜色的色相由 2 种基本色的比例决定,而颜色的亮度由黑色决定<sup>[4]</sup>。

1.2 颜色分区误差分析

在进行分色时,首先需要判断给定的颜色位于哪个分区内,然后才能使用该分区的分色模型进行分色计算。依据颜色分区理论,分区归属判断的方法是计算给定颜色的色相角,然后与除 K 以外的所有基色 CMYRGB 的色相角进行比较,位于哪 2 个基色的色相角之间,该颜色就位于由这 2 个基色与 K 所组成的分区内。即 2 个相邻基色的色相角线所形成的三角扇区属于一个分区,见图 2。

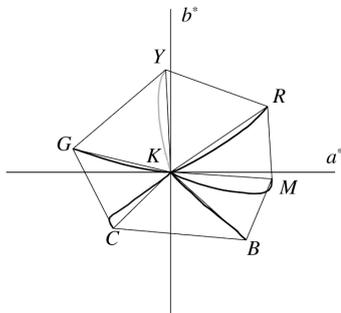
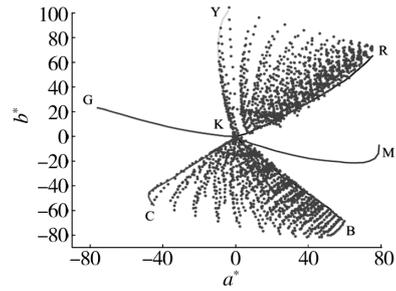


图 2  $a^*b^*$  平面基色阶调颜色值曲线与色相角线

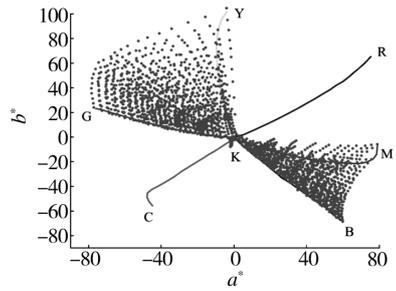
Fig. 2 Primary colors curves and hue lines in  $a^*b^*$  plane

对各基色以 5 为步长进行采样输出,测量得到不

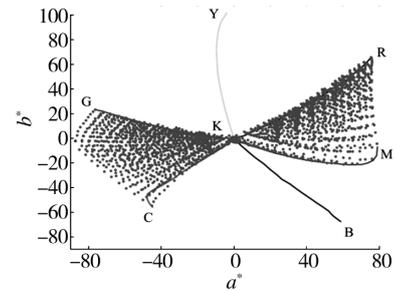
同浓度的单色彩墨的  $L^*a^*b^*$  值,形成的颜色曲线见图 2。可以看到,基色阶调颜色值在  $a^*b^*$  平面上的连线并非严格的直线而是一条曲线<sup>[5]</sup>,将各基色的阶调颜色曲线称为分区之间的“边界线”,并按对应基色色相进行名称标定,依次称为 R 边界、Y 边界、G 边界、C 边界、B 边界和 M 边界。因此某一分区内的所有颜色并非只在 2 基色色相角线之间,而是布满整个区域,见图 3。图 3 是对每个分区各基色以 10 为步长



a RKY与CKB分区的色域点



b YKG与BKM分区的色域点



c GKC与MKR分区的色域点

图 3 各分区在  $a^*b^*$  平面上的色域点

Fig. 3 Gamut dot diagram of different subareas

并进行组合共获得 1 331 个采样点后,输出测量得到各采样点  $L^*a^*b^*$  值,得到的每个分区在  $a^*b^*$  平面上的色域点图。

以图 3a 中 RKY 分区为例,由于 2 条分区边界线都出现弯曲,整个分区已将 RKY 三角扇区包含在内。结合图 2 与 3,若按常规方法进行判断,只会将三角扇区内的颜色划分到 RKY 分区内,而在 KR 线段外的

颜色会被划分到 MKR 分区,在 KY 线段外的颜色会被划分到 YKG 分区,并分别使用这 2 个分区的分色模型进行分色计算,可能会由于这 2 个分区根本无法复制出对应的颜色而使分色结果出现异常解。这就是使用颜色分区理论进行分色计算出现误差的原因。

## 2 误差修正算法

### 2.1 分区边界描述

从图 3 每个分区的色域点位置关系进行分析,在 R, Y, G, C, B, M 边界一侧的某一小块区域内除含有某一分区内自身的颜色外又含有另一侧分区的颜色,将这样一块区域称为“共享区域”。因为只是  $a^*b^*$  平面,实际在 Lab 色立体空间中,共享区域内的颜色可能并不共享,它们有亮度  $L^*$  的区别而属于不同的颜色。在进行颜色分区归属判断时,与颜色的亮度无关,只是简单地通过色相角来判断它属于哪个分区,然后使用该分区的分色模型进行分色。经观察发现,共享区域均为分区边界曲线与基色色相角直线所围成的区域。以 M 边界为例进行分析,与 M 边界线相关的是 BKM 和 MKR 分区,见图 3b 和 c。可以很明显看到位于 BKM 分区内的颜色已经越过了 M 边界,即位于 M 色相角线和 M 边界曲线所围成的区域内的颜色,见图 3b;而这样一块区域也同样存在 MKR 分区的颜色,见图 3c。这就是所谓的共享区域。将各共享区域按对应基色色相进行名称标定,称为共享区域 R, Y, G, C, B 和 M。

在进行分色时,按常规方法只会将共享区域内的颜色划分到某一颜色分区,而无法对其进行特殊处理。如对 M 共享区域,按色相角大小关系会被完全划分到 BKM 分区,对于共享区域内原本属于 BKM 分区的颜色可正确输出分色值,而对于共享区域内原本属于 MKR 分区的颜色分色输出后则会出现一定的误差。

文中提出对分区边界进行数学描述的方法,能很好地解决上述问题。对分区边界进行描述后,就能确定哪些颜色位于共享区域内。然后对这些颜色分别使用 2 个分区的分色模型进行分色计算,将计算结果再次代入分色模型计算色差,取色差较小者对应的分色值作为最终分色结果。

在分色时,首先根据给定颜色的色相角判断位于哪个分区,再判断是否位于共享区域内,若是则进行

特殊处理,若不在共享区域内,则按常规方法进行处理。根据图 2 所显示的基色色相角线和分区边界线的位置关系, RKY, YKG, GKC, CKB, BKM, MKR 分区需进行判断的共享区域名称分别为:无, Y, G, C, B, M, R。其中 RKY 三角扇区不包含任何共享区域,所以无需进行判断,而 GKC 三角扇区则同时包含了共享区域 G 和 C,因此需要对它们都进行判断。

### 2.2 算法实现

使用 1.2 节描绘基色阶调颜色值曲线时得到的离散点数据来对分区边界进行描述。使用离散点数据来描述一段曲线,一般使用函数逼近的方法。由于函数需要通过最外的顶点才有意义,确定使用 Matlab 中的 spline(x, y) 函数对边界曲线进行 3 次样条插值逼近。

仔细观察图 2,发现对边界曲线进行样条插值并不能笼统地以  $a^*$  为自变量,  $b^*$  为因变量,而应根据曲线走势来变换自变量和因变量。例如 C 边界线,若以  $a^*$  为自变量,  $b^*$  为因变量,那么根据  $a^*$  值来求  $b^*$  值就会在曲线末端出现二值现象,这样给程序运算带来不定性,此时应将  $b^*$  作为自变量,  $a^*$  作为因变量。根据图 2 情况,边界曲线样条插值函数可选自变量分别为: C 和 Y 边界线须以  $b^*$  为自变量, M 边界线须以  $a^*$  为自变量, R, G, B 边界线既可以  $a^*$  为自变量也可以  $b^*$  为自变量。由表 1 可知,由于共享区域 G, C 需

表 1 颜色是否在共享区域的判断规则

Tab. 1 Judgement rule of whether the color is in sharing area

分区号	共享区域及边界线	函数自变量	函数值与原值大小比较可能情况	是否在共享区域内
RKY	无	无	无	无
YKG	Y	$b^*$	$a^* > a_0$	否
			$a^* \leq a_0$	是
GKC	G	$b^*$	$a^* > a_0$	否
			$a^* \leq a_0$	是
	C	$b^*$	$a^* > a_0$	否
			$a^* \leq a_0$	是
CKB	B	$a^*$	$b^* > b_0$	否
			$b^* \leq b_0$	是
BKM	M	$a^*$	$b^* > b_0$	否
			$b^* \leq b_0$	是
MKR	R	$a^*$	$b^* > b_0$	否
			$b^* \leq b_0$	是

要同时进行判断,为使对共享区域进行判断的算法就比较容易实现,文中对 Y, G, C 边界线都以  $b^*$  为自变量

进行插值,对 R,B,M 边界线都以  $a^*$  为自变量进行插值。

将分区边界曲线描述出来之后,就可以判断分区内给定的颜色是否位于共享区域内。由于共享区域均为分区边界曲线与基色色相角直线所围成的区域,判断方法如下:对于颜色  $(L_0, a_0, b_0)$ ,根据该分区边界曲线插值函数所对应的自变量,假设为  $a^*$ ,则将  $a_0$  代入计算函数值,将函数值与原来的  $b_0$  比较大小,即可判断出是否位于该分区所对应的共享区域内,判断规则见表 1,其中假设给定的颜色点为  $(L_0, a_0, b_0)$ ,函数自变量与因变量为  $a^*$  和  $b^*$ 。

依据上述判断规则,即可在 Matlab 中写出加入共享区域判断的分色算法。首先需准备好写有分色目标 Lab 值矩阵数据,并按照基色色相角将每个分区的数据存入各自的分区矩阵中,用于不同分区的分色;其次是读入分区边界的离散点数据进行边界描述,用于进行共享区域判断;最后返回的分色矩阵中,除含有分色数据外还包含区别分色数据是自身分区还是相邻分区的标识位。以 BKM 分区为例的共享区域判断算法如下:

```
Mab=textread('M.txt');
ppM=spline(Mab(:,1),Mab(:,2));
bkm_spa=ppval(ppM,bkm_Lab(:,2));
isIn=(bkm_spa)<=(bkm_Lab(:,3));
isIN=double(isIn);
SiInIndices=find(isIn==1);
if size(isInIndices,1)~=0 isInDatas=...
    area_sep=calc_Neugebauer(isInDatas),
    BKM_seyuan,BKM_coes,
    MKR_seyuan,MKR_coes);
.....
end
```

式(1)中 Mab 为用于边界描述的离散点数据矩阵,ppM 为得到的三次样条插值函数,bkm\_spa 为将  $a$  值代入计算的函数值,并与  $b$  值进行比较得到位于共享区域内的索引矩阵 isIn,最后调用已经写好的纽介堡方程分色算法 calc\_Neugebauer(),得到分色数据可进行后续处理。

### 2.3 实验结果分析

通过构建基于纽介堡方程的多色分色模型进行分色实验<sup>[3,6]</sup>,并通过生成多色 ICC 的方法<sup>[3,7]</sup>,对提出的分区边界修正算法进行检验。其中构建纽介堡

分色模型的本质是对纽介堡方程的反向求解,而生成 ICC 的方法是按照 ICC 规范将对应分色数据写入 ICC 的查找表中,二者皆可编程实现,论文不详细叙述。纽介堡方程为:

$$\begin{cases} X_{n_x}^{\frac{1}{n_x}} = \sum_{i=1}^8 f_i X_i^{\frac{1}{n_x}} \\ Y_{n_y}^{\frac{1}{n_y}} = \sum_{i=1}^8 f_i Y_i^{\frac{1}{n_y}} \\ Z_{n_z}^{\frac{1}{n_z}} = \sum_{i=1}^8 f_i Z_i^{\frac{1}{n_z}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中  $X_i, Y_i, Z_i (i=1, 2, \dots, 8)$  为各基本色元的三刺激值,  $n_x, n_y, n_z$  表示 3 个方程式的指数修正系数。

按照提出的判断规则,文中从共享区域中随机选取 1 000 个颜色组成测试色靶,见图 4。首先,构建分

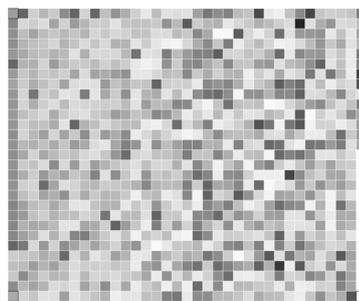


图 4 色靶原稿

Fig. 4 Original of test chart

色模型时不进行共享区域判断,即直接使用按常规方法构建的分色模型进行分色,分色效果见图 5;然后

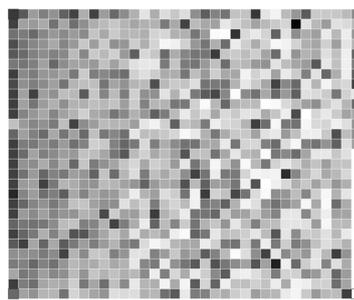


图 5 不含共享区域判断分色

Fig. 5 Color separation not involving sharing area judgement

向其中加入进行共享区域判断的程序代码,构建新的分色模型,分色效果见图 6。最终将分色值带入纽介堡正向模型求得的 Lab 值与原 Lab 值计算的色差结果见表 2 和 3,采用的色差计算公式为 CIEDE2000。

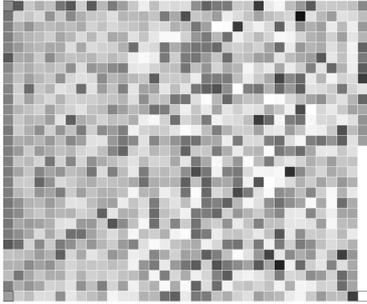


图6 含共享区域判断分色

Fig. 6 Color separation involving sharing area judgement

表2 不含共享区域判断分色色差

Tab. 2 Patche  $\Delta E$  not involving sharing area judgement

色差 区间	0~1	1~2	2~3	3~4	4~6	6~8	平均 色差	最大 色差
数量	220	117	89	78	150	105		
比例/%	22	11.7	8.9	7.8	15	10.5		
色差区间	8~10	10~12	12~14	14~16	16~20	>20	5.280	29.549
数量	63	68	44	38	11	17		
比例/%	6.3	6.8	4.4	3.8	1.1	1.7		

表3 含共享区域判断分色色差

Tab. 3 Patches  $\Delta E$  involving sharing area judgement

色差 区间	0~1	1~2	2~3	3~4	4~6	6~8	平均 色差	最大 色差
数量	717	93	70	35	67	18	1.065	7.883
比例/%	71.7	9.3	7	3.5	6.7	1.8		

从表2和3计算的色差数据分析可明显看出,加入共享区域判断的分色模型精度要高于不加入共享区域判断的分色模型。从表2,对于不含共享区域判断的分色模型,其色差在0~16各区间都有较多数量的分布,平均色差为5.28,最大色差接近30。从表3,对于含共享区域判断的分色模型,其色差均在8以内,主要集中在0~1区间,最大色差仅为7.883,平均色差降至1.065,明显优于前者。

### 3 结语

分析了在多色分色中使用的颜色分区理论以及颜色分区理论产生误差的原因,其中提出分区边界和共享区域的概念。通过对分区边界进行数学描述以及对共享区域进行判断,分析出颜色是否在共享区域内的判断规则,从而构造出了具有较高精度的基于颜色分区理论的多色分色模型。实验结果亦表明,颜色分

区理论分区边界描述的修正方法能够提高最终分色模型的精度。

### 参考文献:

- [1] 陈炳萍,唐正宁.多色打印中基于光谱的油墨的选择——最佳油墨选择[J].包装工程,2007,28(2):64-66.  
CHEN Bing-ping, TANG Zheng-ning. Spectral-based Ink Selection for Multiple—ink Printing: Optimal Ink Selection[J]. Package Engineering, 2007, 28(2): 64-66.
- [2] 刘真,周倩,朱明.高保真多色分色模型中间色的设置[J].包装工程,2011,32(15):18-21.  
LIU Zhen, ZHOU Qian, ZHU Ming. A Mid-color Setting Method for Hi-Fi Color Separation Model[J]. Package Engineering, 2011, 32(15): 18-21.
- [3] 朱明,刘真,陈广学.基于分区纽阶堡方程的6色印刷分色模型研究[J].光学学报,2011,31(7):289-298.  
ZHU Ming, LIU Zhen, CHEN Guang-xue. Research on Six-Color Separation Model Based on Subarea Neugebauer Equations[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 289-298.
- [4] 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.  
SHI Rui-zhi, CAO Zhao-hui. Separation Model Based on 7 Hi-Fi Color Printing [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5): 58-60.
- [5] 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.  
WANG Yi-feng, ZENG Ping, WANG Ying. Multi-Channel Printer Characterization Based on Gamut Partition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 507-511.
- [6] TZENG Di-yuan. Spectral-Based Color Separation Algorithm Development for Multiple-ink Color Reproduction [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 1999.
- [7] Specification ICC. 1:2004-10, International Color Consortium[S].