

### 3 种基于分区组介堡方程的分色算法的误差分析

张桢杰, 刘真

(上海理工大学, 上海 200093)

**摘要:** 在分析基于线性回归、指数修正、胞元划分等 3 种算法原理的基础上, 设计了实验, 以评价 3 种算法在精度、稳定性上的优劣, 从而为改进和优化分区组介堡分色算法提供方向和思路。研究表明: 在高保真印刷环境下, 线性回归组介堡方程精度和稳定性最低, 指数修正组介堡方程精度和稳定性其次, 胞元划分组介堡方程精度和稳定性最高。

**关键词:** 组介堡方程; 分色; 高保真; 线性回归; 指数修正; 胞元划分

**中图分类号:** TS801.3; TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)15-0088-04

### Errors Analysis of Three Color Separation Algorithms Based on Subarea Neugebauer Equation

ZHANG Zhen-jie, LIU Zhen

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Arithmetic principles of linear regression, exponent modification, and cellular element partition were analyzed. Experiments were designed to evaluate the accuracy and stability of the three algorithms with the purpose looking for optimizing and improving direction of Subarea Neugebauer Equation. The results showed that linear regressed Neugebauer Equation is the worst in; exponent modified Neugebauer Equation is in the middle; cellular element partition Neugebauer Equation is the best in accuracy and stability under the environment of high-fidelity printing.

**Key words:** Neugebauer Equation; color separation; high-fidelity; linear regression; exponent modification; cellular element partition

组介堡方程是组介堡在 1937 年根据格拉斯曼的色光混合定律推导得出的印刷网点呈色数学模型<sup>[1]</sup>。其模型简单, 又由于它是以印刷品某处的反射率为基础, 根据面积元假设和色元值假设建立起来的, 因而它有其他纯数值运算分色模型(如多项式回归、神经网络等)没有的物理意义。

三色组介堡方程可用式(1)表示:

$$\begin{cases} X = \sum_{i=1}^8 f_i x_i \\ Y = \sum_{i=1}^8 f_i y_i \\ Z = \sum_{i=1}^8 f_i z_i \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $X, Y, Z$  为所生成色的三刺激值;  $f_i$  为各色在单位面积上所占的比例;  $x_i, y_i, z_i$  为各色元的三刺激值。

组介堡方程是印刷网点呈色的理想的数学模型, 在实际印刷中, 油墨的首层表面反射、多重内反射以及油墨在纸张上所产生的光渗现象等都会影响到组介堡方程的准确性<sup>[2]</sup>, 因而后人提出了各种针对组介堡方程的修正算法。对于多色印刷(7 色)来说, 组介堡方程的个数远小于未知数个数, 无法直接求解该方程。鉴于此, 根据颜色分区理论, 选择基于线性回归、指数修正、胞元划分等 3 种修正的组介堡方程的分色算法进行比较<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2012-05-15

基金项目: 苏州市科技支撑计划(SG201102)

作者简介: 张桢杰(1989—), 男, 江苏人, 上海理工大学硕士生, 主攻颜色空间转换方向。

## 1 输出、测量设备及样本选取

打印输出设备: HP Designjet Z3200 (24inch) HT(CMYKRGBmkk)。

颜色测量设备:gretagmacbeth iliO。

样本选取:选择6个分区,分别为KMB,BCK,CGK,GYK,YRK,RMK,每个分区的3个基色按网点面积率0,10,20,...100排列组合成色块,每个分区共1331个色块组成分色样本,以KMB分区为例,分色样本见图1。选择6个分区,每个分区3个基色

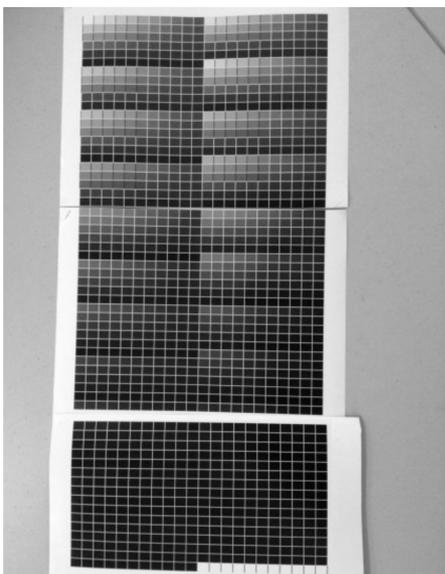


图1 KMB分区分色样本

Fig.1 Sample of KMB subarea color separation

按网点面积率0,25,50,75,100排列组合成色块,每个分区共125个色块组成检测样本,以KMB分区为例,检测样本见图2。

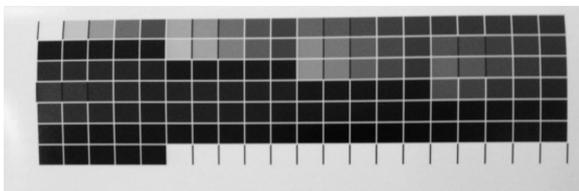


图2 KMB分区检测样本

Fig.2 Sample of KMB subarea detection

## 2 3种分色算法内容及建模过程

### 2.1 线性回归修正的纽介堡方程

根据线性回归算法,一阶线性回归修正的纽介堡

方程可以用式(2)表示:

$$\begin{cases} X = \sum_{i=1}^8 f_i U_i \\ Y = \sum_{i=1}^8 f_i V_i \\ Z = \sum_{i=1}^8 f_i W_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_i, V_i, W_i$ 为对应于各色元网点面积率的三刺激值 $X_i, Y_i, Z_i$ 的回归系数。该算法运用最小二乘法求出与8个色元相对应的 $U_i, V_i, W_i$ ,  $U_i, V_i, W_i$ 的计算方法如下。

以求解 $U_i$ 为例,令:

$$Q_U = \sum_{j=1}^n [X_{m,j} - \sum_{i=1}^8 f_i U_i]^2$$

式中: $X_{mj}$ 为测量的刺激值 $X$ ;  $n$ 为建模样本个数。令 $Q_U$ 分别对 $U_i$ 求偏导,得 $\partial Q_U / \partial U_i = 0$ ,对方程组求解得到 $U_i$ ,此时 $Q_U$ 最小。求解 $V_i, W_i$ 方法和 $U_i$ 类似,文中不再赘述<sup>[4]</sup>。

选用6个分区的分色样本,分别用一阶、二阶、三阶线性回归方程对进行建模,并用正向纽介堡方程预测,预测平均色差见表1(表中所有数据均为6个分区的平均值)。

表1 不同阶数线性回归的色差对比

Tab.1 Contrast of color difference with different order linear regression

| 色差   | 一阶线性回归   | 二阶线性回归   | 三阶线性回归   |
|------|----------|----------|----------|
| 平均色差 | 14.163 8 | 12.925 2 | 12.904 1 |
| 最小色差 | 0.37     | 0.3340   | 0.331    |
| 最大色差 | 110      | 101      | 100.8    |

由表1分析得出,三阶线性回归纽介堡方程和二阶线性回归纽介堡方程在准确性上相差无几,阶数增多反而会增加计算量,因此选择二阶线性回归纽介堡方程进行分色建模。

### 2.2 指数修正的纽介堡方程

指数修正的纽介堡方程可以用式(3)表示:

$$\begin{cases} X^{1/n_x} = \sum_{i=1}^8 f_i X_i^{1/n_x} \\ Y^{1/n_y} = \sum_{i=1}^8 f_i Y_i^{1/n_y} \\ Z^{1/n_z} = \sum_{i=1}^8 f_i Z_i^{1/n_z} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $n_x, n_y, n_z$ 为指数修正系数。

使用  $n$  值扫描法确定  $n_x, n_y, n_z$  的最佳值, 具体方法如下:

$$Q = \sum_{j=1}^n [(X_{m,j} - \sum_{i=1}^8 X_i f_i)^2] + \sum_{j=1}^n [(Y_{m,j} - \sum_{i=1}^8 Y_i f_i)^2] + \sum_{j=1}^n [(Z_{m,j} - \sum_{i=1}^8 Z_i f_i)^2]$$

一般  $n_x, n_y, n_z$  的取值范围为 1~5, 以 0.1 为步长, 重复取值, 当  $Q$  取最小值时的  $n_x, n_y, n_z$  即为最终的  $n_x, n_y, n_z$ , 各个分区的  $n_x, n_y, n_z$  见表 2。

表 2 各个分区修正系数  $n_x, n_y, n_z$  取值

Tab. 2 value of correction factor  $n_x, n_y$ , and  $n_z$  in subareas

| 修正系数  | 分区  |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       | MBK | BCK | CGK | GYK | YRK | RMK |
| $n_x$ | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 1.9 |
| $n_y$ | 2.1 | 2.2 | 1.9 | 2.0 | 1.9 | 2.0 |
| $n_z$ | 1.7 | 2.0 | 2.0 | 1.7 | 2.1 | 2.2 |

### 2.3 胞元划分纽介堡方程

该方法把色立体空间均匀划分成  $n \times n \times n$  个子空间, 每个子空间用 8 个顶点位置所对应的 8 个色元和网点面积率重新建立子空间的纽介堡方程, 以 MBK 分区为例, MBK 分区胞元划分成  $2 \times 2 \times 2$  的 8 个子空间, 效果见图 3。

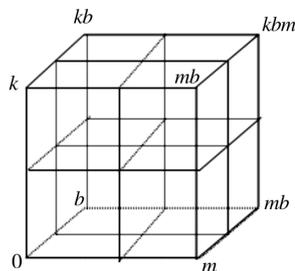


图 3 胞元划分效果

Fig. 3 Sketch map of cellular element partition

分别选用 6 个分区的分色样本在  $2 \times 2 \times 2, 5 \times 5 \times 5, 10 \times 10 \times 10$  的胞元等级进行建模, 并对 6 个分区的  $6 \times 125$  个检测样本分色。根据待分色色块的 XYZ 值确定所在分色胞元, 用正向纽介堡方程预测,  $2 \times 2 \times 2, 5 \times 5 \times 5, 10 \times 10 \times 10$  胞元等级对应的预测平均色差分别为 4.5, 1.8, 1.6 (表 2 中所有数据均为 6 个分区的平均值)。

可以分析出当胞元等级选择  $5 \times 5 \times 5$  时, 预测精度已经达到比较好的效果, 综合精度和运算效率考虑, 选择的胞元等级为  $5 \times 5 \times 5$ 。

## 3 误差分析

将检测样本分别用 3 种纽介堡方程分色算法分色后, 重新打印输出。

### 3.1 色差分布分析

因篇幅限制, 只列出 KMB 分区 3 种纽介堡分色算法的色差分布情况, 其他分区分布情况同 KMB 分区类似:

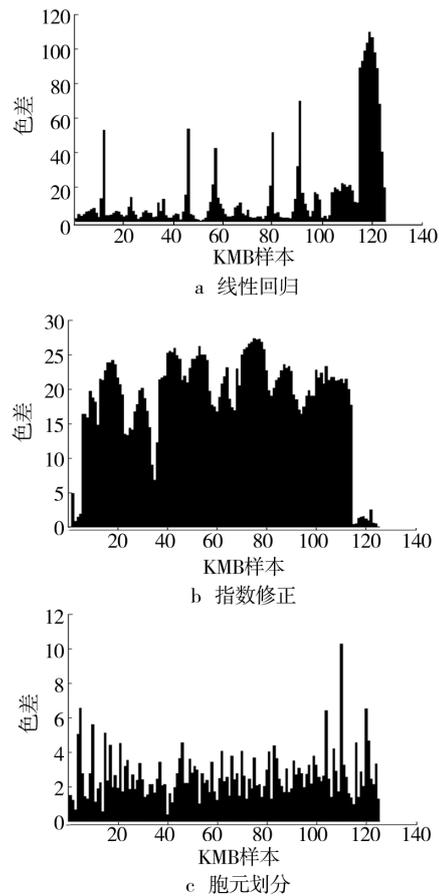


图 4 3 种纽介堡方程的色差分布

Fig. 4 Distribution of color difference of the three kinds of Neugebauer Equation

比较上面 3 种纽介堡方程的色差分布, 结合测试样本的排列规律, 可以发现: 线性回归纽介堡方程在亮调和中间调部分色差较小, 在暗调部分色差特别大; 指数修正纽介堡方程在亮调和暗调部分色差较小, 在中间调部分色差较大; 胞元划分纽介堡方程在整个范围内色差都较小。

### 3.2 精度分析

通过比较平均色差, 最大色差, 最小色差来评价

3种分色算法的精度,见表3(表中所有数据均为6个分区的平均值)。

表3 不同分色算法分色结果色差对比

Tab.3 Contrast of color difference of the result of different color separation algorithms

| 纽介堡方程 | 平均色差 | 最大色差 | 最小色差 |
|-------|------|------|------|
| 线性回归  | 11.8 | 60.3 | 0.3  |
| 指数修正  | 10.5 | 19.1 | 0.1  |
| 胞元划分  | 2.5  | 10.2 | 0.1  |

分析表3中数据,线性回归纽介堡方程精度最低,指数修正纽介堡方程精度其次,胞元划分纽介堡方程精度最高。

### 3.3 稳定性分析

根据概率论基本理论,标准差可以反映分色算法的稳定性,下面通过对3种分色算法分色结果标准差的比较来评价3种分色算法的稳定性。线性回归、指数修正、胞元划分算法对应的粉色结果方差分别为13.1,9.64和2.5(数据均为6个分区的平均值)。可知,线性回归纽介堡方程稳定性最低;指数修正纽介堡方程稳定性其次;胞元划分纽介堡方程稳定性最高。

## 4 结论

综合精度和稳定性,对3种分色算法进行比较后,可得出如下结论。

1) 线性回归纽介堡方程引入 $U, V, W$ 回归系数,代替原色元的 $X, Y, Z$ 进行计算,提高纽介堡方程的准确性。在亮调和中间掉部分色差较小,在暗调部分修正效果不好,色差特别大,精度和稳定性最低;

2) 指数修正纽介堡方程中,考虑到油墨的首层表面反射、多重内反射以及油墨在纸张上所产生的光渗现象,引入 $n_x, n_y, n_z$ 指数修正系数,提高纽介堡方程准确性<sup>[5-6]</sup>。在亮调和暗调部分色差较小,在中间掉部分色差较大,精度和稳定性其次;

3) 胞元划分纽介堡方程相当于增加了色元数

目,将色元上的误差降为0,因此能提高纽介堡方程的准确性。如果划分的子空间足够多,从数值计算的角度可以将误差降低,但同时也增加了计算量<sup>[7]</sup>。在整个范围内色差都较小,精度和稳定性最高。

### 参考文献:

- [1] 周世生. 印刷色彩学[M]. 北京:印刷工业出版社,2005.  
ZHOU Shi-sheng. Theory of Printing Colors[M]. Beijing:Graphic Communications Press,2005.
- [2] 胡成发. 印刷色彩与色度学[M]. 北京:印刷工业出版社,1993.  
HU Cheng-fa. Theory of Printing Color and chromaticity [M]. Beijing:Graphic Communications Press,1993.
- [3] 朱明,刘真. 基于分区纽介堡方程的6色印刷分色模型研究[J]. 光学学报,2011,31(7):1-10.  
ZHU Ming, LIU Zhen. Research on Six-Color Separation Model Based on Subarea Neugebauer Equations[J]. Acta Optica Sinica,2011,31(7):0733001-1-0733001-10
- [4] 张瑞,周世生. 基于纽介堡方程的柔版印刷呈色模型探讨[J]. 包装工程 2010,31(5):96-98  
ZHANG Rui, ZHOU Shi-sheng. Study on the Color Performance of Flexograph Based on Neugebauer Equation [J]. Package Engineering,2010,31(5):96-98
- [5] 张琳,杨旭. 纽介堡方程计算精度的研究[J]. 包装工程,2007,28(11):73-74.  
ZHANG Lin, YAN Xu. Research on Precision of Neugebauer Equation[J]. Package Engineering,2007,28(11):73-74.
- [6] 周倩,刘真,朱明. 三种主流分色算法的误差分析[J]. 包装工程,2011,32(7):107-111.  
ZHOU Qian, LIU Zhen, ZHU Ming. Errors analysis of three major separation algorithms[J]. Package Engineering,2011,32(7):107-111.
- [7] 刘浩学. 颜色建模方法[DB/OL]. <http://www2.bigc.edu.cn/wangshangjiaoxue/wangshangjiaoxue.htm>.  
LIU hao-xue. Color modeling method[DB/OL]. <http://www2.bigc.edu.cn/wangshangjiaoxue/wangshangjiaoxue.htm>.