

喷墨印刷平面呈色模型的建立与检验

徐锦林¹ 闫小凡¹ 徐宏平¹ 徐咏驰²

(1 武汉大学印刷与包装系, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)
(2 西安理工大学印刷包装工程学院, 西安市金花南路 5 号, 710048)

摘 要:采用插值算法, 提出了一种新的平面呈色模型建立方法, 实现喷墨印刷中 $L^* a^* b^*$ 与 cmY 颜色空间之间的转换, 并对转换精度进行了检验分析。本研究通过比较喷墨打印和胶印的平面呈色模型, 为在各种印刷方式中建立平面模型提供了成功的范例和切实可行的方法。
关键词:平面呈色模型; 平面方程; 喷墨印刷
中图法分类号: P288

基于实验数据, 文献[1] 提出了彩色印刷呈色的平面模型。在多色印刷中, 保持其中一种油墨的网点面积率不变, 叠印色的色变坐标在 $L^* a^* b^*$ 空间处于同一平面。通过对一系列平面方程系数的曲线拟合, 得到了表征印刷图像色度值与油墨网点面积率之间的函数关系。平面呈色模型建立过程中考虑多种实际影响因素, 避开了 Neugebauer 方程中修正系数难以确定和色元面积率假设的缺点, 从理论上来说, 具有比 Neugebauer 方程更高的精确性。但目前对于平面呈色模型的研究大多限于平版胶印, 本文选取成像设备、材料和成像方式都与胶印有很大差别的喷墨印刷进行实验, 检验在喷墨印刷中平面模型是否成立, 探索建立彩色喷墨印刷平面模型的方法。

1 喷墨印刷平面方程的建立及其验证

文献[1, 2] 中表述的平面方程可表示为:

$$L^* = A_{c_i} a^* + B_{c_i} b^* + C_{c_i} \tag{1}$$
$$L^* = A_{m_i} a^* + B_{m_i} b^* + C_{m_i} \tag{2}$$
$$L^* = A_{y_i} a^* + B_{y_i} b^* + C_{y_i} \tag{3}$$

式中, A_{c_i} 、 B_{c_i} 、 C_{c_i} 、 A_{m_i} 、 B_{m_i} 、 C_{m_i} 、 A_{y_i} 、 B_{y_i} 、 C_{y_i} 是平面方程的系数; c 、 m 、 y 表示颜色的青、品和黄; i 表示网点面积率; L^* 为 CIE1976 $L^* a^* b^*$ 空间的明度指数; a^* 、 b^* 为色度指数(以下统称为色度

值)。式(1)、式(2)、式(3)分别为青色油墨、品色油墨和黄色油墨平面方程。

实验中的样本色块和检验色块都是青、品、黄三色色块。选择原则为: 必须包括亮调、中间调和暗调颜色; 色块个数要尽可能多, 以提高模型精度。样本色块的青、品、黄墨网点面积率配比设置如下: 以青为例, 青的网点面积率分别为 0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%, 每一种网点面积率都对应着 25 个色块, 这 25 个色块中的品和黄的网点面积率为 10%、30%、50%、70%、90% 的组合。以青网点面积率为主时共对应 11 组 275 个色块。同理, 分别以品和黄为主设置样本色块, 则共有 33 组 825 个三色样本色块。另外还有 125 个检验色块, 其中青、品、黄油墨的网点面积率为 5%、25%、45%、65%、85% 的组合。实验设备为 Epson7600 彩色喷墨打印机、Eyeone 分光光度计。实验材料为 Easicolor 数码打样纸、圣彩虹 c 、 m 、 y 三色墨水。

色块打印并干燥后, 用分光光度计测量其色度值, 然后利用数理统计学中的二元线性回归算法分别对 33 组色块的色度值进行处理, 得出对应的 33 个(11+ 11+ 11= 33) 平面方程。

其回归方程为:

$$L^* = A \times a^* + B \times b^* + C \tag{4}$$

式中, C 为常数; A 、 B 为回归系数, 它由下列方程组决定:

$$l_{11}A + l_{12}B = l_{10}$$
$$l_{21}A + l_{22}B = l_{20}$$

(5)

式中, $l_{11} = \sum_1^{25} (a_i^* - \overline{a^*})^2$; $l_{22} = \sum_1^{25} (b_i^* - \overline{b^*})^2$; $l_{12} = l_{21} = \sum_1^{25} (a_i^* - \overline{a^*})(b_i^* - \overline{b^*})$; $l_{10} = \sum_1^{25} (a_i^* - \overline{a^*})(L_i^* - \overline{L^*})$; $l_{20} = \sum_1^{25} (b_i^* - \overline{b^*})(L_i^* - \overline{L^*})$; $\overline{a^*} = (\sum_1^{25} a_i^*)/25$; $\overline{b^*} = (\sum_1^{25} b_i^*)/25$;

$$25; \overline{L^*} = (\sum_1^{25} L_i^*)/25.$$

表 1 列出了青平面方程的各项系数及显著性检验值。由表 1 可知, 相关系数 R 均接近 1.0, 剩余离差平方和/回归离差平方和很小, 表明平面的总体线性相关程度非常高。证明在喷墨印刷中, 平面方程同样存在。实验中不同青墨网点面积率所对应的 11 个平面在 $L^* a^* b^*$ 空间的分布如图 1 所示。

表 1 青平面方程各项系数值

Tab.1 Coefficients of Plane Equation of Cyan

网点面积率标称值/%	A_{c_i}	B_{c_i}	C_{c_i}	相关系数 R	剩余离差平方和/回归离差平方和
0	- 0.628 8	- 0.138 9	89.355 5	0.996 6	0.006 8
10	- 0.638 5	- 0.148 4	86.324 6	0.994 1	0.011 9
20	- 0.625 3	- 0.143 2	81.590 8	0.996 5	0.007 1
30	- 0.598 6	- 0.153 8	76.584 4	0.998	0.003 9
40	- 0.601 6	- 0.179 1	72.444 1	0.997 8	0.004 4
50	- 0.590 9	- 0.194 3	67.271 7	0.996 8	0.006 5
60	- 0.590 9	- 0.237 8	61.439 7	0.995 2	0.009 7
70	- 0.589 3	- 0.270 3	54.027 9	0.995 6	0.008 9
80	- 0.593 3	- 0.312 6	46.104 1	0.991 6	0.016 9
90	- 0.594 1	- 0.374 9	35.011 3	0.995 4	0.009 2
100	- 0.897 8	- 0.582 1	0.166 9	0.966 5	0.070 5

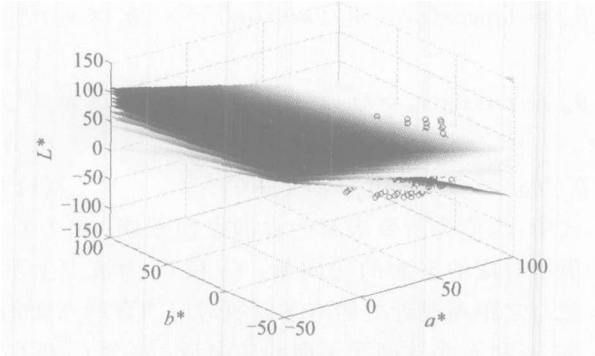


图 1 样本数据和青墨对应的平面分布示意图

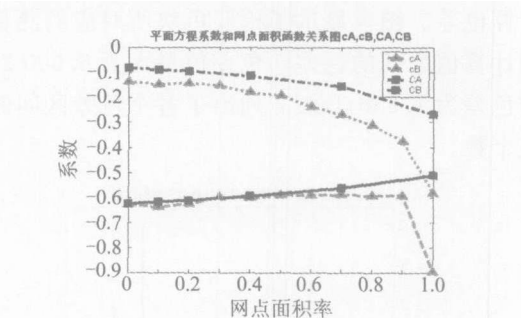


图 2 喷墨与胶印网点面积率和平面方程系数函数关系图

Fig. 2 Relation of Plane Coefficient and Dot Area in Ink Jet and Offset

由表 1 可知, 当网点面积率不同时, 其平面方程的系数 A 、 B 、 C 不同, 即平面方程系数是网点面积率的函数。

图 2 为喷墨印刷与胶印网点面积率和平面方程系数 A 、 B 的关系图, 系数 C 的数值与 A 、 B 差别大, 图中未画出。图中有三角形标记的曲线为喷墨印刷, 方形标记的曲线为胶印。

结合表 1、图 1 和图 2 可以看出, 在胶印中, 随着网点面积率的逐渐增大, 系数 A 逐渐增大, 系数 B 和 C 逐渐减小。此时, 平面方程系数和网点面积率之间的函数关系很容易用曲线来表示。文献[1-3]通过二次曲线拟合, 将式(1)、式(2)、式(3)中的 9 个系数分别表示为各自所对应的油

墨网点面积率的二次函数, 建立了平面呈色模型, 实现了色度值和网点面积率之间的转换。

但是, 对于喷墨印刷, 随着网点面积率的逐渐增大, 除了 C 值逐渐减小外, A 和 B 没有明显的变化规律, 这就很难通过曲线拟合来描述网点面积率和平面方程系数之间的函数关系。因此, 本文应用插值方法来建立平面呈色模型。

2 c 、 m 、 y 到 L^* 、 a^* 、 b^* 的数学转换及误差分析

在表 1 中, 已经求得青、品、黄墨在不同网点

面积率处所对应的样本平面的方程系数。对于任何一个色块,在网点面积率 c 、 m 、 y 值已知的条件下,如果能确定其网点面积率和 11 个样本值之间的对应关系,那么青、品、黄墨网点面积率各自所对应的平面方程系数也就能确定。联合 3 个方程便可以求得该色块所对应的 L^* 、 a^* 、 b^* 值。

计算公式如下(以青网点面积率为例):

$$\theta_{12} = \arccos(n_1 \times n_2 / (n_1 \times n_1)^{1/2} \times (n_2 \times n_2)^{1/2})$$
 (6)

$$\theta_{01} = \arccos(n(k) \times m / (n(k) \times n(k))^{1/2} \times (m \times m)^{1/2})$$
 (7)

$$\theta_{01} / \theta_{12} = (C_0 - C_1) / (C_2 - C_1)$$
 (8)

式中, C_0 为已知色块的青网点面积率值; C_1 、 C_2 是和 C_0 相邻的两个色度值平面所对应的网点面积率,当 C_0 为上述样本值时,则 $C_1 = C_2$; n_1 、 n_2 、 $n(k)$ 分别为 C_1 、 C_2 、 C_0 在 $L^* a^* b^*$ 颜色空间中所对应的平面的法向量; θ_{12} 、 θ_{01} 分别为 C_1 和 C_2 、 C_1 和 C_0 在 $L^* a^* b^*$ 颜色空间中所对应平面的夹角。

应用 125 个检验色块对上述方法的转换精度进行检验。由色块的网点面积率 c 、 m 、 y 值,计算出所对应的色度值,将计算值和测量值相比较,并计算色差。图 3 显示了检验色块所对应的测量值和计算值之间的色差。色差值最大为 6.000 2,平均色差为 1.836 3,表 2 列出了各个色差区间的色块个数。

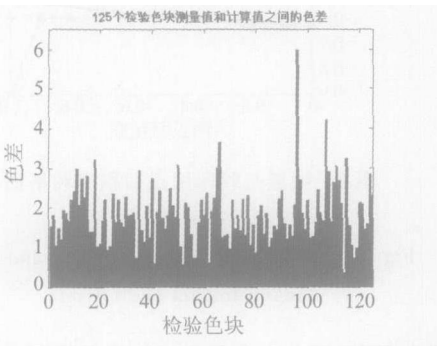


图3 检验色块测量值和计算值之间色差示意图
Fig. 3 Color Difference Between Measuring and Calculating Value of 125 Sample Spangles

表2 检验色块色差分布统计表

Tab.2 Distribution of Color Difference of Sample Spangles

色差范围	色块个数	比例/ %
$\Delta E \leq 1$	13	10. 4
$\Delta E \leq 2$	77	61. 6
$\Delta E \leq 3$	118	94. 4
$\Delta E \leq 4$	123	98. 4
$\Delta E \leq 5$	124	99. 2
$\Delta E \leq 6$	124	99. 2
$\Delta E \leq 7$	125	100

从表 2 可知,在 125 个色块中,色差小于 3 的有 118 个,占 94. 4%;而色差大于 5 的只有 1 个,仅占 0. 8%。按照 3 倍标准差法,色差符合要求。因此,本课题中应用平面方程来解决 c 、 m 、 y 值到 L^* 、 a^* 、 b^* 值的转换方法是成功的。

3 L^* 、 a^* 、 b^* 到 c 、 m 、 y 的数学转换及误差分析

设已知某色块的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,在平面理论成立的情况下,该 L^* 、 a^* 、 b^* 值所对应的色度坐标点一定分布在 $L^* a^* b^*$ 颜色空间中的某一个平面上,而且这个平面所对应的网点面积率一定在 0% 和 100% 之间。经过前面的数据分析和处理,已经在 $L^* a^* b^*$ 颜色空间中建立了 11 个样本平面,因此对于任意一确定的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,如果能够在该点的两侧各自找到一个和它距离最近的样本平面,通过对这两个平面和该点坐标三者位置关系的处理,就可以近似得到该 L^* 、 a^* 、 b^* 值所对应的网点面积率值,由此可实现 L^* 、 a^* 、 b^* 到 c 、 m 、 y 值的转换。这里以计算青的网点面积率为例,计算公式如下:

$$\theta_{12} = \arccos(n_1 \times n_2 / (n_1 \times n_1)^{1/2} \times (n_2 \times n_2)^{1/2})$$
 (9)

$$\theta_{01} = \arccos(n_0 \times n_1 / (n_0 \times n_0)^{1/2} \times (n_1 \times n_1)^{1/2})$$
 (10)

$$\theta_{01} / \theta_{12} = (C_0 - C_1) / (C_2 - C_1)$$
 (11)

式中, C_0 值为所要求解的青网点面积率; n_0 为 C_0 值所对应的平面的法向量; C_1 和 C_2 为该点上下侧与之距离最近的样本平面所对应的青网点面积率, n_1 和 n_2 为这两个平面的法向量; θ_{12} 为 C_1 和 C_2 两个平面的夹角, θ_{01} 是 C_1 和 C_2 两个平面的夹角。

将式(9)和式(10)的计算结果代入式(11),即可求得 C_0 值。

同理,可求得 L^* 、 a^* 、 b^* 值所对应的网点面积率 M_0 和 Y_0 。对于任何一个色块,如果色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 已知,根据上述方法,就可分别求得所对应的 c 、 m 、 y 值,这也就实现了 L^* 、 a^* 、 b^* 值到 c 、 m 、 y 值的转换。应用 125 个检验色块对上述方法的转换精度进行检验。125 个检验色块网点面积率标称值(5%, 25%, 45%, 65%, 85%)与计算值的平均误差和最大误差如表 3 所示。

由表 3 可以看出:

- 1) 纵向比较。青所对应的平均误差和最大误差值都偏小,情况较好;而品和黄所对应的则有较大偏差。

表 3 网点面积率平均误差和最大误差统计表

Tab.3 Min and Max Errors of Dot Areas

网点面积率标称值	5(%)	25(%)	45(%)	65(%)	85(%)
<i>c</i> 平均误差	2.027 4	1.229 7	1.725 7	1.215 9	0.575 6
<i>c</i> 最大误差	5.255 2	3.536 6	4.349 2	4.068 2	1.478 5
<i>m</i> 平均误差	2.732 1	2.756 8	1.746 2	1.209 9	0.866 3
<i>m</i> 最大误差	6.024 4	6.627 6	5.228 7	2.970 2	3.258 2
<i>y</i> 平均误差	2.844 3	2.777 5	2.395 4	1.947 7	1.015 7
<i>y</i> 最大误差	6.222 9	6.022 5	6.337 4	6.120 7	2.535 4

2) 横向比较。在网点面积率标称值为 5% 处的平均误差和最大误差最大, 甚至超过了本身的网点面积率值; 网点面积率为 85% 处的平均误差和最大误差最小, 非常理想。

至此, 便完成了喷墨印刷平面呈色模型的建立, 实现了色度值和网点面积率值之间的相互转换。本文中的模型是基于网点面积率标称值建立的, 如果是实测值, 理论上只会改变平面方程的系数, 而模型不变。依转换方法的精度检测结果来看, 从 c 、 m 、 y 到 L^* 、 a^* 、 b^* 的转换结果精度较高; 而从 L^* 、 a^* 、 b^* 到 c 、 m 、 y 的转换却存在着较大的误差, 尤其是在亮调区域, 受到色度测量值精度的影响。实验中分光光度计的白板色度值达不到标准要求, 亮调处网点面积率小, 色度测量值的较小偏差即可能造成较大的计算误差。

本文研究仅限于青、品、黄三色印刷, 四色印刷平面呈色模型的建立是进一步研究的重大课题。

除胶印以外的传统印刷工艺, 除喷墨以外的其他类型的数字印刷, 平面模型是否适用, 以及平面模型的建立方法, 也有待今后进一步研究。平面呈色模型的发现和建立, 是对彩色印刷网点图像呈色理论研究的新贡献。它让人们对色彩特性的认识更为深刻, 对色彩色度值分布规律掌握更加全面。从工艺实践看, 平面呈色模型在色彩管理、分色和配色以及印品质量检测技术中都具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

[1] 梶光雄. カラー印刷物の測色の性質について[J]. 日本印刷学会誌, 2001, 38(2): 21-39

[2] Azuma Y. Evaluation of an Algebraic Technique for Colorimetric Calibration of a Printing System [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2001, 45(2): 93-99

[3] 徐敏. 彩色印刷图像平面呈色模型的验证与应用研究[J]. 包装工程, 2004(2): 34-35

[4] 日下秀夫. 彩色图像工程(第一版)[M]. 北京: 科学出版社, 2004

[5] Woods J. 数字喷墨印刷与油墨的发展[J], 中国印刷物资商情, 2002(12): 4-6

第一作者简介: 徐锦林, 教授, 主要研究方向为印刷图像处理(调频加网)、色彩管理。代表成果: 调频加网技术的商品化研究。
E-mail: jinlinxu@126.com

Plane Imaging Model's Establishment and Verification of Ink Jet Printing

XU Jinlin¹ YAN Xiaofan¹ XU Hongping¹ XU Yongchi²

(1 Department of Printing and Packaging, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Institute of Printing and Packaging, Xi'an University of Technology, 5 South Jinhua Road, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new flat plane model is proposed using interpolations, which converts $L^* a^* b^*$ color space to cmY color space and analyzes the accuracy of the transformation. The flat plane model of ink jet printing is compared with that of offset, which gives insight and feasible methods in order to establish the flat plane models for all kinds of printing means.

Key words: plane imaging model; plane equation; ink jet printing

About the first author: XU Jinlin, professor, the main research is on printing image processing(frequency screening) and color management. He has made great contributions to the commercial research of frequency screening technology.
E-mail: jinlinxu@126.com