

基于光谱的多级多色打印系统基础线性化模型

方恩印^{1,2}, 杨晟炜^{1,2}, 李春梅^{1,2}

(1.上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093; 2.上海出版传媒研究院, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究一种新的基础线性化算法, 优化多级多色打印系统模型。 **方法** 分析现有的用于多级多色打印系统基础线性化算法存在的问题, 并针对这些问题从多级墨量比例系数的确定、单通道控制、总墨量控制、网点级别转换和线性化等 5 个方面提出一种基于光谱的多级多色打印系统基础线性化模型。 **结果** 该方法的色域体积约为 EFI 流程控制的 109%, 在色域空间中的分布更加均匀, 喷墨量约为 EFI 流程的 50%~85%。 **结论** 新基础线性化算法在保证打印设备色域最大化的同时, 可实现各基色墨水的最佳利用。

关键词: 基础线性化; 多级多色; 颜色再现

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)17-0196-06

Basic Linearized Model Based on Spectrum in Multi-Level and Multi-Color Printing System

FANG En-yin^{1,2}, YANG Sheng-wei^{1,2}, LI Chun-mei^{1,2}

(1.Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China;

2.Shanghai Research Institute of Publishing and Media, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: It aims to study a new basic linearization algorithm that can optimize the model of multi-level and multi-color printing system. The defects of existing basic linearization algorithm were studied by using the multi-level and multi-color printing system. A basic linearized model was put forward based on spectrum in such five steps as the determination of proportional coefficient in multi-level ink, single channel control, total ink coverage control, dot level conversion and linearization. The color gamut volume of this method was about 109% of EFI workflow. The distribution of spectrum in the color space was more uniform and the amount of ink was about 50%~85% of EFI workflow. In conclusion, the new basic linearization algorithm realizes the best use of each of the primary color ink while guaranteeing the maximum color gamut of printer.

KEY WORDS: basic linearization; multi-level and multi-color; color reproduction

近年来, 多级多色控制技术在喷墨打印机上的应用日益广泛, 它们通过高寻址技术或者特殊的打印头设计等方法来控制微小墨滴的落点, 从而实现

多级输出^[1-2]。在传统青品黄黑 4 基色的基础上增加新的基色实现色彩复制, 增加的新基色油墨饱和度更高, 能够改善传统色彩复制中二次色叠印率不

收稿日期: 2016-03-04

基金项目: 上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“晨光计划”(12CGB09); 上海高校青年教师培养资助计划(ZZslg15090)

作者简介: 方恩印(1982—), 男, 河南南阳人, 硕士, 上海出版印刷高等专科学校讲师, 主要研究方向为色彩管理与数字印刷。

高、饱和度不足的问题, 扩大可复制的色域^[3], 并且基色数量的增加也提高了光谱多样性。目前, 多级多色打印系统也多用于基于光谱的颜色复制研究。多级多色打印系统在进行线性化时, 直接将现有的基础线性化算法用于多级多色打印系统, 无法最佳地体现其性能。文中根据多级多色打印系统自身的特点, 研究适用于多级多色打印系统的最优化基础线性化模型。

1 存在问题分析

确定当前纸张、墨水等打印组合条件下打印设备的最佳输出状态, 即确定最大墨量, 并进一步确定理论网点面积率与实际加网驱动打印设备输出的驱动网点面积率之间的对应关系, 称之为基础线性化模型^[4-5]。基础线性化模型通常通过 3 个步骤确定, 分别为总墨量确定、单通道墨量确定和线性化补偿。

现有基础线性化算法中, 以控制最大网点面积率实现单通道和总墨量的限制^[6]。在打印系统中, 实际用来驱动打印设备的是喷墨量, 常规的 2 级打印设备当喷墨量以比例表示时, 与网点面积率等同。对于多级打印系统来说, 每个网级别别控制喷墨头喷出的墨量不同, 因此不能用网点面积率来衡量单通道和总墨量的限制。

进行总墨量限制时, CMYK 四色打印系统将不溢墨且密度值最低的 CMYK 叠色黑色块对应的网点面积率之和作为总墨量^[7-8]。对于多级多色打印系统来说, 任意三色或四色叠加并不一定为黑色, 若按照该算法确定的总墨量进行限制时, 会减小多色打印系统可复制的色域, 且对于多级打印系统来说, 各级 K 基色达到最小亮度时总墨量限制不同。

以(0,1)级输出 100%网点面积率的色块通常并不能表现该基色的最大彩度, 以该算法进行单通道墨量限制时, 由于没有考虑多级打印系统的特性, 所以无法确定单通道墨量的限值出现在哪一个级别上, 及其对应各个级别的网点面积率。

在进行线性化补偿时, 以 Murray-Davis 或 Yule-Nilson 公式为基础计算网点面积率, 补偿后的单色梯尺在 Lab 空间与光谱反射率空间内分布不均, 人眼能明显分辨出色块之间色差变化的不均匀^[9-10]。在建立打印机色彩转换关系时, 基于亮度均分选择建模样本比基于网点面积率均分选

择建模样本精度更高, 证明基色在色度和光谱空间中分布的均匀程度对色彩转换模型的精度有影响^[11]。针对现有基础线性化算法存在的以上问题, 文中建立了一种基于光谱的基础线性化模型。

2 多级多色打印系统基础线性化模型

2.1 多级墨量比例系数的确定

以 1 级、2 级、3 级输出相同网点面积率的色块, 将各级输出所需的墨量与 1 级输出所需墨量的比值称为墨量比例系数 l 。规定 1 级输出时, 系数 l 为 1, 其余比例系数 l 通过以下方法确定。

1) 若喷墨设备为热泡式, 每一个墨滴的大小是相同的, 根据级数不同, 每次喷射的墨滴数量不同, 则 2 级和 3 级的比例系数分别为 2 和 3。

2) 若喷墨设备为压电式, 根据级数不同, 每一个墨滴的大小是不同的, 确定方法为: 首先, 测量 2 级和 3 级输出的梯尺上各色块主波长的光谱反射率, 通过最小二乘法分别拟合对应于 2 级和 3 级的网点面积率-光谱反射率关系曲线函数 F_2 和 F_3 , 然后测量 1 级输出实地色块的光谱反射率, 将其分别代入 F_2 和 F_3 , 通过解方程的方式得到 1 级实地色块在 2 级和 3 级中对应的网点面积率为 a_2 和 a_3 , 则 $l_2=100/a_2$, $l_3=100/a_3$ 。一般情况下, 各基色的比例系数一致, 采用任意基色进行计算即可。

2.2 总墨量控制

由于多色多级打印系统的色彩特性, 需要确定 2 个总墨量, 一个用于控制叠色黑的最大墨量 $I_{\max k}$, 另一个用于控制所有颜色的最大墨量 $I_{\max o}$ 。

1) 利用(0,1)级输出总墨量控制色靶。

2) 通过人眼观察, 确定恰不溢墨的图形对应的网点面积率, $I_{\max}$ 由式(1)确定:

$$I_{\max} = a_j V_j \cdot l \quad (1)$$

式中: a_j 为第 j 个基色的网点面积率; V_j 为基色 j 最小墨滴的容积; l 为该级墨滴容积与最小墨滴容积的比例系数。

3) 分别测量三色梯尺与四色梯尺各色块的光谱反射率曲线, 并按照各色块计算所有波段值的平均光谱反射率, 以网点面积率为 x 轴, 平均光谱反射率为 y 轴拟合曲线, 以平均光谱反射率不再下降或开始上升时对应的网点面积率为三色与四色的最大

墨量 $I_{\max 3}$ 和 $I_{\max 4}$ 。控制叠色黑的最大墨量 $I_{\max k}$ 由式(2)确定:

$$I_{\max k} = \min(I_{\max k}, \max(I_{\max 3}, I_{\max 4})) \quad (2)$$

若通过人眼观察或测量无法得到最大墨量限值,说明(0,1)级输出没有达到最大墨量,则依次以(0,2)级、(0,3)级输出,重复以上步骤。

2.3 单通道墨量控制

单通道墨量控制的色靶由各基色的单色梯尺组成,每个基色网点面积率从 0 ~ 100%,以 3.3% 为间隔,共 31 个色块。

1) 分别用多级控制中的 1 级、2 级、3 级各输出单通道墨量控制色靶。若色块的墨量超过了总墨量的限值,则按照式(1)压缩色块的墨量。测量各色块的光谱反射率值,以 C 基色为例,1 级、2 级、3 级输出的单色梯尺光谱反射率分别为 R_{1i} , R_{2i} , R_{3i} , 其中 $i=1, 2, \dots, 31$ 。通过积分计算各色块光谱反射率下方区域的面积,实际计算中以和代替,如式(3):

$$S_i = \sum_{\lambda=380}^{730} R_{i,\lambda} \times \Delta\lambda \quad (3)$$

式中: S_i 为色块光谱反射率下方区域的面积; $R_{i,\lambda}$ 为该色块 λ 波段的光谱反射率; $\Delta\lambda$ 为波长的取值间隔,文中为 10。

2) 针对每一级的单色色靶,以网点面积率为 x 轴,色块的面积为 y 轴拟合曲线,以面积不再变小时对应的网点面积率作为该级别单通道的最大网点面积率 $a_{\max i}$ 。

3) 根据式(4)计算各级最大网点面积率对应的墨量:

$$I_{\max i} = a_{\max i} V \cdot l \quad (4)$$

式中: $a_{\max i}$ 为第 i 级输出的最大网点面积率; V 为该基色最小墨滴的容积,通常在设备的规格说明书中可以查到。该基色的单通道墨量限值为各级最大墨量中的最大值,如式(5):

$$I_{\max} = \max(I_{\max 1}, I_{\max 2}, I_{\max 3}) \quad (5)$$

2.4 网点级别转换

除了像以上基础线性化色靶在输出时指定各网点的级别外,在实际应用中,更多的情况需要通过分色后的数字图像确定其对应网点级别,文中将这个过程称为网点级别转换。转换过程如式(6):

$$L_j = \begin{cases} 0 & I_j = 0 \\ 1 & 0 \leq I_j \leq 100 \times V_j \\ 2 & 100 \times V_j < I_j \leq 100 \times V_j \times 2 \\ 3 & I_j > 100 \times V_j \times 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_j 为色块第 j 个基色的网点的级别; I_j 为色块第 j 个基色的墨量; V_j 为该基色最小墨滴的容积。 I_j 可以通过线性化算法拟合的网点面积率与墨量的关系得到。

根据前文所述的流程可以确定各基色的墨量限值,由于各基色的墨量限值不同,对应的网点级别也就不同。例如,若 M 基色墨量限值为 1224 pL,该基色最小墨滴的容积是 6 pL,则墨量在 1 ~ 600 pL, 601 ~ 1200 pL 和 1200 pL 以上的颜色分别由 1 级、2 级和 3 级输出; K 基色墨量限值为 380 pL,该基色最小墨滴的容积为 4 pL,则所有 K 基色的色块都仅由 1 级网点输出。这样就实现了根据各基色色彩特性的不同进行网点级别的控制。

2.5 线性化

现有线性化结果在色度空间和光谱空间内分布不均,因此以等间隔网点面积率的色块在色度空间和光谱空间内均匀分布为基础建立网点面积率与墨量之间的关系^[12-13]。线性化控制的色靶由各基色的单色梯尺组成,每个基色网点面积率从 0 ~ 100%,以 3.3% 为间隔,共 31 个色块。各色块根据式(7)计算对应的墨量:

$$I_{i,j} = \frac{a_{i,j}}{100} \times I_{\max j} \quad (7)$$

式中: $I_{i,j}$ 为第 j 个基色第 i 个色块的墨量; $a_{i,j}$ 为第 j 个基色第 i 个色块的网点面积率; $I_{\max j}$ 为第 j 个基色的单通道最大墨量限值。

各基色分别进行线性化,线性化算法流程如下所述。

1) 打印线性化色靶,测量各色块的光谱反射率值,得到 $R_i(i=1, 2, 3, \dots, 31)$ 。

2) 根据式(3)计算各色块光谱反射率下方的面积,得到 $S_i(i=1, 2, 3, \dots, 31)$ 。

3) 以网点面积率为 x 轴,面积为 y 轴拟合曲线 $F(x)$ 。

4) 将面积按照 $S_{\min}$ ~ $S_{\max}$ 平均分 30 份,得到 $S_{\text{aver}}(i=1, 2, 3, \dots, 31)$,并代入曲线 $F(x)$ 求解得到线性化后的网点面积率 $a_{\text{lin}i}$ 。

5) 根据式(7)获得线性化后的网点面积率对应的墨量 I_{lini} , 以各色块的原始网点面积率 a_i 为 x 轴, 线性化后的网点面积率 I_{lini} 为 y 轴拟合曲线, 得到线性化后的网点面积率与墨量的对应关系。

3 多级多色打印系统基础线性化的实现和评价

文中所采用的 HP Z3200 CMYKRGB 打印设备进行了基础线性化控制^[14], 实验数据如下所述。

1) 多级墨量比例系数的确定。文中所采用的 HP Z3200 打印设备原理是热泡式, CMYKRGB 各基色的最小喷墨量分别为 4, 6, 6, 4, 6, 6, 6 pL。各级网点的多级墨量比例系数分别为 1, 2, 3, 且通过实验流程进行了验证。

2) 总墨量限制。所有颜色的最大墨量 I_{max} 为 1660 pL。控制叠色黑的最大墨量 I_{maxk} 为 1400 pL。

3) 单通道墨量限制。基于现有单通道墨量控制算法, 结合文中多级控制的转换, 各基色单通道墨量见表 1。可以看出, 基于光谱的单通道墨量限值比基于色度的单通道墨量限值略高, 说明墨量的增加虽然不能增加色域, 但可以增加光谱的多样性。

表 1 基于色度/光谱的各基色单通道墨量控制数据
Tab.1 Single channel ink limit result of each primary color based on chroma/spectrum pL

		1 级最大	2 级最大	3 级最大	墨量
		墨量	墨量	墨量	限值
基于色度	C	400	800	1200	1200
	M	600	1200	1560	1560
	Y	600	1200	1560	1560
	K	400	765	745	765
	R	600	1200	1425	1425
	G	600	1155	1180	1180
	B	600	1120	1140	1140
基于光谱	C	400	800	1200	1200
	M	600	1200	1620	1620
	Y	600	1200	1575	1575
	K	400	800	780	800
	R	600	1200	1500	1500
	G	600	1155	1315	1315
	B	600	1120	1460	1460

4) 线性化结果。各基色基于光谱的线性化结果见图 1, 可看出, 线性化的趋势基本一致。

基础线性化的评价从色域、空间分布和喷墨量 3 个方面进行评价, 对比的对象选择 EFI Colorproof

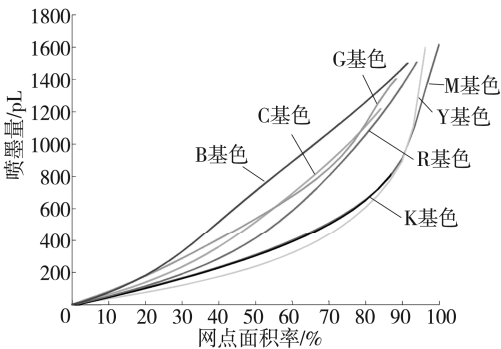


图 1 基于光谱的各基色线性化结果
Fig.1 Linearization result of each primary color based on spectrum

1) 色域评价。采用分区最大色域边界描述法 (SMGBD)^[15]将整个色域分割为 $12 \times 12 = 144$ 个分区进行色域描述, 见图 2。利用 SMGBD 法提取的各分区特征点对整个色域进行四面体分割, 色域体积为所有四面体体积之和, 经计算可得, 基于光谱的基础线性化的色域体积为 7.99×10^{-5} , EFI 基础线性化的色域体积为 7.39×10^{-5} 。文中提出的基础线性化方法比 EFI 的基础线性化方法能还原的色域大, 约为 EFI 的 109%。EFI 采用的网点等级为 2 级, 而文中提出的线性化流程部分基色的最大墨量对应等级为 3 级, 因此能够还原的色域更大。

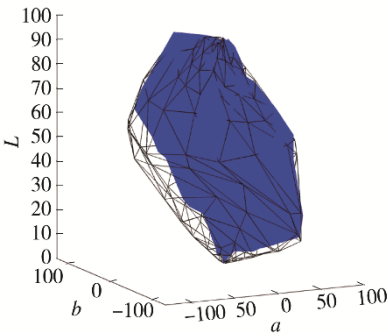


图 2 文中光谱基础线性化算法-EFI 线性化色域对比
Fig.2 Comparison of color gamut between basic linearization algorithm based on spectrum and EFI

软件的基础线性化流程。

2) 空间分布评价。基于光谱的基础线性化控制后各基色在光谱空间中的分布均匀。以 K 基色为例, 文中算法与 EFI 的线性化算法在 K 基色上的空间分布表现见图 3, 明显可看出, 文中算法空间分布更加均匀, 达到了算法的目的。

3) 喷墨量评价。喷墨量的评价方法: 将网点面积率从 0 ~ 100% 平均分为 30 份, 计算线性化后网点面积率对应的喷墨量, 然后计算所有喷墨量的

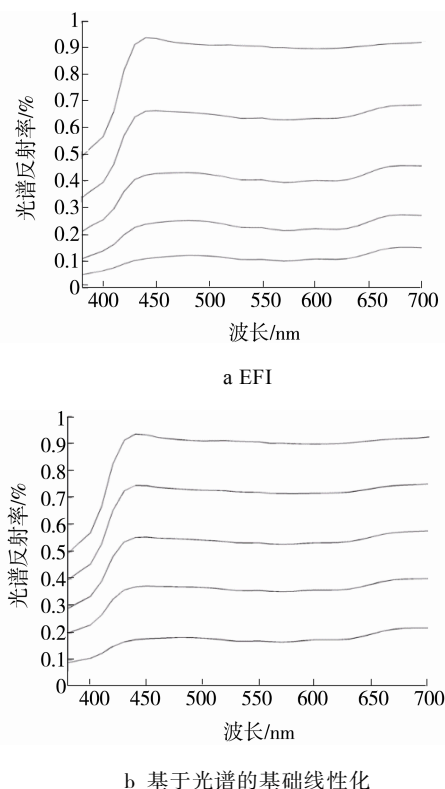


图 3 K 基色在光谱空间中的分布对比

Fig.3 Spatial distribution comparison in spectrum space of K
总和,即数值表示线性化后打印基色梯尺所需的喷墨量。各基色的实验数据见表 2。可以看出,由于线性化的结果有所区别,所以文中提出的基于光谱的基础线性化算法总喷墨量与 EFI 的基础线性化相比,除了 C 基色的总喷墨量比 EFI 基础线性化大以外,其余基色的总喷墨量均比 EFI 基础线性化小,尤其是 K 基色,大约为 EFI 线性化流程的 50%。文中基础线性化流程确定的 C 基色最大墨量为 1200 pL,远大于 EFI 线性化流程的 792 pL,因此文中算法 C 基色的总喷墨量大于 EFI 线性化流程是合理的。结合色域分析可知,文中提出的算法所能还原的色域范围比 EFI 大,因此可以证明该算法在保证了色域最大化的同时,实现了墨量的最佳利用。

表 2 各基色喷墨量数据

Tab.2 Ink quantity data of primary colors pL

	基于光谱的基础线性化	EFI 基础线性化
C	12 986	12 400
M	13 170	18 600
Y	10 447	18 600
K	5 914	12 400
R	15 159	18 600
G	15 702	18 600
B	19 039	18 600

4 结语

目前,现有的基础线性化算法没有考虑各基色不同的颜色特性,直接应用于多级多色打印系统会引发降低多级多色打印系统可复制的色域范围等问题。针对这些问题,文中提出了一种基于光谱的多级多色打印系统基础线性化模型,将墨点级别的确定和颜色转换过程联系起来,针对不同基色确定不同的墨点等级,并提出了基于光谱的基础线性化的新算法。通过实验证明,新算法可以保证多级多色打印设备色域的最大化的同时,实现各基色墨水的最佳利用。

参考文献:

- [1] 刘长鑫. 喷墨打印多级调频加网模块的研发[D]. 江苏: 南京林业大学, 2012.
LIU Chang-xin. The Research on the Model of Multi-level Frequency Modulated Screening Based on Ink-jet Printing[D]. Jiangsu: Nanjing Forestry University, 2012.
- [2] 刘小丹, 杨燕. 一种大幅面二级设备输出多级半色调图像的方法[J]. 计算机应用, 2006, 26(12): 3037—3038.
LIU Xiao-dan, YANG Yan. New Method of Printing Multi-Toning Image with Large Format Bi-level Printer[J]. Computer Application, 2006, 26(12): 3037—3038.
- [3] WANG B, XU H, LUO M R, et al. Spectral-Based Color Separation Method for a Multi-Ink Printer[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(6): 107—110.
- [4] 陈丽娜, 刘真. 喷墨打印输出设备墨量控制的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 11—17.
CHEN Li-na, LIU Zhen. Study on Ink Metering Control for Ink-jet Printer[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 11—17.
- [5] MOHTASHAM J, NATERI A S, KHALILI H. Textile Colour Matching Using Linear and Exponential Weighted Principal Component Analysis[J]. Color Technology, 2012 (8): 199—203.
- [6] 杨晟伟, 刘真. 喷墨印刷多级控制对颜色再现的影响研究[J]. 包装工程, 2013, 34(10): 11—17.
YANG Sheng-wei, LIU Zhen. Research on Influence of Multi-level Control on Color Reproduction for Ink-jet Printing[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(10): 11—17.
- [7] BARAKZEHI M, AMIRSHAHI S H, PEYVANDI S, et al. Reconstruction of Total Radiance Spectra of Fluorescent Samples by Means of Nonlinear Principal Component Analysis[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2013, 30(9): 1862—1870.
- [8] 付文亭, 邓体俊. 陶瓷喷墨印刷设备线性校准的研究[J]. 陶瓷学报, 2015, 36(6): 673—677.
FU Wen-ting, DENG Ti-jun. Linear Calibration of Ce-

- ramic Ink-jet Printing Equipment[J]. Journal of Ceramics, 2015, 36(6): 673—677.
- [9] 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.
- XU Tian-liang. Research on Detecting Color Characteristics and Color Correction Technology of Six-ink Printer[D]. Xi'an: Xidian University, 2008.
- [10] VALERO E M, HU Y, HERNANDEZ-ANDRES J, et al. Comparative Performance Analysis of Spectral Estimation Algorithms and Computational Optimization of a Multispectral Imaging System for Print Inspection[J]. Color Research & Application, 2014, 39(1): 16—27.
- [11] 章夫正, 林茂海, 周世生. 公共色域映射算法的原理与实施[J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2(6): 15—20.
- ZHANG Fu-zheng, LIN Mao-hai, ZHOU Shi-sheng. Principle and Implement of Public Gamut Mapping Algorithm[J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2(6): 15—20.
- [12] 范增华, 高军, 李长涛. 基于神经网络的墨量控制算法的研究[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 28—31.
- FAN Zeng-hua, GAO Jun, LI Chang-tao. Study of Ink Control Algorithm Based on Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(19): 28—31.
- [13] 杜宇. 基于模糊 PI 控制算法的喷码机墨路系统设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- DU Yu. Research on Ink Delivery of Inkjet Printer Base on Fuzzy PI Controller[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [14] 付文亭, 黄钟. 陶瓷多通道喷墨印刷总墨量限制研究[J]. 中国陶瓷, 2015(12): 78—81.
- FU Wen-ting, HUANG Zhong. Study on the Total Ink Limit of Ceramic Multi-channel Ink Jet Printing[J]. China Ceramics, 2015(12): 78—81.
- [15] TIAN J, TANG Y. Wavelength-sensitive-function Controlled Reflectance Reconstruction[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2818—2820.