

基于光谱的多色分色中颜色分区判断算法的研究

于明伟

(上海出版印刷高等专科学校, 上海 200093)

摘要: **目的** 研究基于光谱多色分色中颜色分区的判断算法。 **方法** 提出一种基于光谱的颜色分区判断算法, 该算法引入特征光谱的提取和匹配算法, 并在此基础上设计颜色分区判断算法。针对该算法流程中的参数, 设计实验进行推算。 **结果** 将光谱曲线的值域范围划分为12个等级, 目标光谱与分区的距离和目标光谱与所有分区距离最小值的差值小于14%, 预测光谱与目标光谱的RRMS小于0.01, 色差小于1.5时, 能够得到最佳的分区判断结果, 每个色块的判断次数为1.93, 约为遍历算法的24%。 **结论** 提出的基于光谱颜色分区算法能够有效地对目标光谱所在分区进行准确判断, 简化基于光谱的多色分色算法流程。

关键词: 颜色分区判断; 特征光谱; 光谱提取; 光谱匹配

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0122-05

Color Subarea Judgment Algorithm in Multi-color Separation Based on Spectrum

YU Ming-wei

(Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the color subarea judgment algorithm in multi-color separation based on spectrum. A color subarea judgment algorithm based on spectrum was proposed. The color subarea judgment algorithm was designed by introducing characteristic spectrum extracting and matching. On account of the parameters in the algorithm progress, the experiments were designed for calculation. The optimal subarea judgment results could be obtained under the following conditions: the value range of characteristic spectrum was divided into 12 levels, the differences between the target spectrum from subarea and target spectrum from the minimum distance of all subareas were smaller than 14%, while the RRMS and color difference between the predicted and target spectra were smaller than 0.01 and 1.5, separately. The exam indicated that the judge count of each patch was 1.93, which was about 24% volume of the circulation algorithm. The proposed color subarea judgment algorithm based on spectrum could exactly judge the target subarea where the color existed in an efficient manner, which simplified the multi-color separation progress based on spectrum.

KEY WORDS: color subarea judgment; characteristic spectrum; spectrum extracting; spectrum matching

多色分色在青品黄黑的基础上增加新的基色以实现色彩复制, 新增加的基色油墨(如RGB, OG等)通常为CMY基色的二次色, 其饱和度更高, 能够改善传统色彩复制中二次色叠印率不高、饱和度不足的问题, 扩大了可复制的色域。多基色分色会使转换模型复杂, 目前常用的解决方法以分区法为主, 即将色彩

空间划分为若干个三色或四色分区, 位于每个分区内的颜色由构成该分区的2个或3个彩色基色和黑色进行复制。由此, 进行分色的目标颜色, 首先需要进行颜色分区的判断。

根据颜色分区理论^[1-2], 颜色分区的判断方法是计算目标颜色的色相角, 然后与所有彩色基色的色相角

收稿日期: 2014-09-13

基金项目: 上海高校青年教师培养资助计划(ZZslg12037)

作者简介: 于明伟(1985—), 男, 山东烟台人, 硕士, 上海出版印刷高等专科学校讲师, 主要研究方向为印刷图文信息处理。

进行比较,该色相角位于哪2个基色的色相角之间,那么该颜色就位于由这2个基色与K所组成的分区内。王义峰等人^[3]发现,每个基色的基色线在 ab 平面内并不是一条直线,因此颜色分区理论并不能准确地判断分区。严爱国^[4]基于以上研究,提出了基于多项式拟合的分区边界的修正算法,进一步提高了分区判断的准确性。以上研究均是基于色度实现的,在基于光谱的多色分色中并不适用,原因是:基于光谱的多色分色以目标光谱作为分色对象,使用基于色度的分区判断算法需要将光谱值转换为色度值,增加了不必要的计算量;光谱与色度的特性不同,基于色度的分区判断算法是以色度分色最优为基础进行设计的,与光谱分色最优的结果不一定相同。由此,文中引入特征光谱的提取和匹配算法,设计完全基于光谱的颜色分区算法,并针对算法中的参数,设计实验进行求解。

1 基于光谱的颜色分区判断算法

1.1 特征光谱提取

特征光谱提取是指通过光谱导数变换提取目标光谱不同的特征光谱参数,如波段波长位置、峰值、波段宽度等^[5-6]。一般情况下离散光谱的导数见式(1)。

$$\begin{aligned}dA_i &= A_{i+k} - A_{i-k} \\ d^2A_i &= A_{i+2k} - 2A_i + A_{i-2k}\end{aligned}\tag{1}$$

式中: A_i 为第 i 个波段的光谱反射率; k 为波长索引的间隔,通常为1。

以文中使用的HPZ3200 CMYKRGB打印机为例,测量基色墨水单色梯尺的原始光谱反射率,并对其进行一阶和二阶导数变换,提取两类波段为特征段:一阶导数产生具有明显波峰和波谷的波段,表明这些波段原始光谱反射率变化最快;一阶导数约等于0的波段,通过判断对应波段二阶导数光谱值的正负情况,可以表明这些波段原始光谱反射率达到了极大值或极小值。结果见表1。

表1 各基色特征光谱波段
Tab.1 Feature spectrum band of primary colors

基色	特征光谱波段/nm
C	410,460,550,620,650,670,690,710
M	410,440,480,500,520,550,560,590
Y	420,500,550,570,580,640,700
R	400,420,480,520,540,550,590,700
G	420,480,520,590,650,690
B	410,440,490,540,590,610,620,660

1.2 特征光谱匹配

光谱匹配的前提是利用一种有效便捷的方法表示光谱曲线,文中采用多阈值的光谱曲线编码方式。由于一阶和二阶导数曲线的值有正有负,因此阈值划分的基本方法是将整个值域在正值域和负值域内分别平均划分为 N 个分区,对每一光谱反射率,按照阈值范围进行编码,见式(2)。

$$S(i) = \begin{cases} N & (T_{p\max} \leq A_i \leq T_{p\max} \times \frac{N-1}{N}) \\ \cdots & \\ 1 & (T_{p\max} \times \frac{1}{N} \leq A_i \leq 0) \\ -1 & (0 < A_i \leq T_{n\min} \times \frac{1}{N}) \\ \cdots & \\ -N & (T_{n\min} \times \frac{N-1}{N} < A_i \leq T_{n\min}) \end{cases}\tag{2}$$

式中: $S(i)$ 为第 i 个特征光谱波段的编码; A_i 为该波段的光谱反射率; $T_{p\max}$ 为正值域的最大阈值; $T_{n\min}$ 是负值域的最小阈值; N 为分区数。整个光谱值域共分为 $2N$ 个区间。

由于不同网点面积率的基色叠加形成的色块,在各个波段反射的光谱程度不同,其一阶导数和二阶导数的值域也不同,因此可以将各分区内所有色块的一阶导数和二阶导数经过编码后的编码范围提取出来,表示该分区所能复制的颜色特征。曲线编码范围的提取算法见式(3)。

$$\begin{aligned}V_0(i) &= \min(S(i,j)) \\ V_1(i) &= \max(S(i,j))\end{aligned}\tag{3}$$

式中: $V_0(i)$ 和 $V_1(i)$ 分别为所有色块第 i 个特征光谱波段编码的最小值和最大值; $S(i,j)$ 为第 j 个色块,第 i 个特征光谱波段的编码。

特征光谱匹配时,比较样本颜色导数光谱曲线与特征光谱编码范围的相似性,相似性通过类似于二进制编码间的Hamming距离来衡量,见式(4)和式(5)。

$$D = \sum_{i=1}^N D(i)/N\tag{4}$$

$$D(i) = \begin{cases} 0 & (V_0(i) \leq A(i) \leq V_1(i)) \\ 1 & (\text{else}) \end{cases}\tag{5}$$

其中 $A(i)$ 为样本曲线第 i 个特征光谱波段的编码,编码在特征光谱编码范围内则距离为0,在范围外则距离为1。由于不同颜色的特征波段数量不同,所以光谱的距离 D 为各波段距离之和与特征波段数量的比值,距离越大表示两曲线间的光谱形状差异越大。

1.3 分区判断算法设计

根据各基色在 Lab 空间中的位置,将 CMYKRGB 可复制的色域分为 CGYK, YRMK, MBCK, CMYK, RGBK 等 5 个四色分区和 BCG, GYR, RMB 等 3 个三子空间。分区的判断算法流程见图 1。

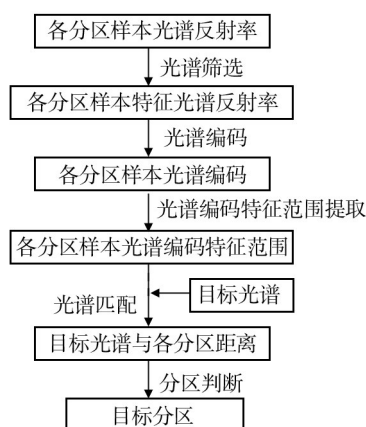


图1 分区判断算法流程

Fig.1 Algorithm chart of subspace judgment

针对每个分区,首先设计各基色不同网点面积率叠加的色块作为样本,打印并测量该色块的光谱反射率,选择表 1 中各彩色基色特征波段的并集作为该分区的特征波段,对特征光谱进行筛选,并按照式(2)和式(3)进行编码和提取特征范围,获得各分区的特征光谱编码范围。在进行分区判断时,先将目标光谱按照各分区的特征波段进行特征光谱的筛选,再与各分区的特征光谱编码范围按照式(4)和式(5)计算距离,最后按照一定的判断准则确定目标分区。由于分区判断主要为了解决多色分色中遍历分区求解的问题,因此文中结合分色算法^[7-8],针对该分区判断算法中光谱编码阈值选择和分区判断准则等关键问题进行研究。

2 光谱编码阈值的确定

光谱编码阈值的确定即光谱值域范围的区域划分问题,二值编码将值域划分为 2 个区域,精度较低,丢失了很多光谱特征信息。值域划分过细不仅会使算法复杂,而且会造成结果震荡,因此结合分色算法精度分析来确定值域的划分是可行和有效的。

2.1 条件

实验条件:打印输出设备,HP Designjet Z3200

(CMYKRGB 七色);打印介质,EasiColor EP520 210g 半亮面打样纸;颜色测量设备,GretagMacbeth iLiO。

2.2 设计

首先在每个分区内构建 6 胞元等级的 CYNSEN 模型^[9-13],建模样本由该分区各基色以 0, 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 为网点面积率排列组合叠加而成,即四基色分区有 1296 个,三基色分区有 216 个,检测样本由各基色以 5%, 25%, 50%, 75%, 95% 为网点面积率排列组合叠加而成,即四基色分区有 625 个,三基色分区有 125 个,8 个分区共 3500 个。针对每个检测样本,分别应用每个分区的 CYNSEN 模型求解墨水组合,即遍历分区求解墨水组合。计算预测光谱反射率^[14]与检测样本光谱反射率之间的光谱 RRMS, CIELab 色差和 CIEDE2000 色差^[15]。然后将光谱值域划分为 2 子域、4 子域、6 子域……,分别根据公式(1)~(3)编码和提取各分区的光谱编码特征范围,根据公式(4)~(5)计算检测样本与各分区的距离,最后与分色实验结果结合进行分析。

2.3 数据与分析

对于不同的子域等级,将检测样本与各分区的距离进行排序,分别根据光谱 RRMS 和色差指标分析分区判断的准确率,见图 2—3。图 2 表示距离最小的分区与 RRMS 值或色差值最小的分区相同的检测样本个数,图 3 表示距离最小的 3 个分区与 RRMS 值或色差值最小的分区相同的检测样本个数。

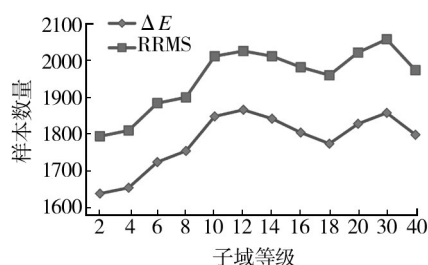


图2 不同分区子域判断准确样本数

Fig.2 Correct subspace judgment samples in different subareas

从图 2 中可以看出,随着子域等级的增加,分区判断完全准确的检测样本数逐渐增加。当子域等级为 12 级时,RRMS 判断准确的检测样本达到 2026 个,色差判断准确的检测样本达到 1866 个。当子域等级继续增加时,判断准确的检测样本数开始下降,虽然当子域等级达到 20 和 30 个时,判断准确的检测样本数量又增加了,但数量与 12 级相当,且当子域等级大于

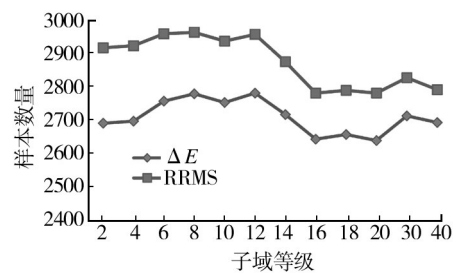


图3 不同分区前三分区判断准确样本数

Fig.3 Correct subspace judgment samples in first three subspaces in different subareas

12级时总体趋势是震荡的。

由图3可知,若按照距离最小的3个分区来判断,

同样是子域等级为12级,判断准确的样本数量达到最大值,RRMS判断准确的样本数量为2956个,色差判断准确的样本数量为2780个,然后随着子域等级的增加开始下降和震荡。由此,选择12级作为光谱编码的阈值划分等级,即正负子域各6级。

当选择12级子域等级时,针对各分区将检测样本分为该分区的检测样本和其余分区的检测样本,检测样本与各分区的距离见表2。由于每个分区的特征光谱波段数不同,因此表2中数据按照空间距离占最远距离的百分比进行统计。

由表2可知,相同分区的检测样本与该空间的平均距离约为6%~10%,不同分区的检测样本与该空间

表2 检测样本与各分区的距离

Tab.2 Distance between testing samples and each subspace

		CGYK	YRMK	MBCK	CMYK	RGBK	BCG	GYR	RMB
相同分区检测样本	平均光谱距离	9.21	9.24	12.23	6.55	10.49	10.52	10.55	10.55
	最大光谱距离	26.67	23.08	38.24	13.33	26.32	26.32	26.32	26.32
	光谱距离中位数	6.67	11.54	5.88	6.67	10.53	10.53	10.53	10.53
不同分区检测样本	平均光谱距离	29.11	23.23	34.35	15.80	25.70	22.82	23.92	28.32
	最大光谱距离	60.00	50.00	61.76	46.67	54.74	59.38	65.63	70.59
	光谱距离中位数	26.67	21.38	35.35	13.33	27.05	21.88	18.75	29.41

的平均距离为16%~35%,是相同分区的2.5~3.5倍,且不同分区检测样本的平均距离大于或几乎等于相同分区检测样本的最大空间距离。相同分区检测样本中与该分区距离较大的色块,主要集中在K基色网点面积率大于75%的色块,由于K基色吸收了大部分光线,因此这些色块的光谱反射率很小,各波段间光谱反射率的变化也很小,与各个分区的距离差别不大。

3 分区判断准则的确定

不同分区之间有部分基色是相同的,例如C和G基色同时存在于CGYK,BCG分区,因此当色块以C和G基色为主,其余基色网点面积率很小时,该色块与这2个分区的距离很接近。当K基色的网点面积率很大时,色块与包含K基色的各分区距离很接近,RRMS和色差指标也很接近,但空间距离最小的分区其结果不一定最好,因此文中通过分析空间距离与分色精度的关系来确定分区判断的准则。

3.1 实验设计

该实验条件与2.1节相同。

1) 实验1。针对每个检测样本,将其与各分区的距离进行升序排序,设定距离容差 l ,筛选出各分区中与检测样本的距离在 $[D_{min}, l+D_{min}]$ 范围内的分区,选择其中光谱RRMS和色差的最小值作为该检测样本的光谱RRMS和色差,并计算分区的判断次数,其中 l 分别选择0,2%,6%,10%,12%,14%,16%和20%。

2) 实验2。针对每个检测样本,将其与各分区的距离进行升序排序,设定距离容差 l ,筛选出各分区中与检测样本的距离在 $[D_{min}, l+D_{min}]$ 范围内的分区,设定可接受的光谱RRMS和色差阈值,从空间距离最小的分区开始判断,若该分区的光谱RRMS和色差阈值小于设定的阈值,则选择该分区的光谱RRMS和色差作为该检测样本的光谱RRMS和色差,若均不符合,则选择几个分区中光谱RRMS和色差的最小值作为该检测样本的光谱RRMS和色差,同时计算分区的判断次数。其中 tol 选择实验1得到的最佳值,光谱RRMS阈值分别选择0.005,0.01,0.015,CIELab色差阈值分别选择1,1.5,3,并将光谱RRMS与色差阈值排列组合,即共9组阈值进行分析。

3.2 实验数据和分析

实验1的数据见表3,其中第1列为各分色指标的

表 3 距离容差对分区判断的影响
Tab.3 Influence of distance tolerance on subspace judgment

		最佳	0	2%	6%	10%	12%	14%	16%	20%
RRMS	平均值	0.0033	0.0111	0.0082	0.0048	0.0035	0.0034	0.0033	0.0033	0.0033
	最大值	0.0233	0.2737	0.2309	0.1687	0.0394	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233
	中位数	0.0022	0.0033	0.0029	0.0024	0.0023	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
ΔE	平均值	1.07	4.03	3.07	1.94	1.19	1.13	1.10	1.10	1.09
	最大值	7.61	69.07	66.44	63.63	17.96	8.83	7.61	7.61	7.61
	中位数	0.68	1.03	0.89	0.75	0.70	0.68	0.68	0.68	0.68
DE2000	平均值	0.57	2.13	1.66	1.08	0.64	0.60	0.59	0.58	0.58
	最大值	4.40	45.76	41.50	41.32	9.26	4.40	4.40	4.40	4.40
	中位数	0.36	0.64	0.52	0.44	0.41	0.38	0.36	0.36	0.36
分区判断次数		1.11	1.53	2.26	3.21	3.79	4.35	4.84	5.37	1.11

最佳值。由表3可知,随着空间距离容差值的增大,各项分色指标的精度逐渐向最佳值靠近,同时分区判断的次数也不断增加。当容差达到14%时,各项指标的最大值和中位数与最佳值相等,平均值与最佳值几乎持平,此时每个检测样本的分区平均判断次数为4.84,约为遍历分区算法的60%。当容差大于14%时,分色精度几乎不再提高,因此可以认为空间距离与该样本与所有分区距离最小值的差大于14%时,无法得到更好的分色精度,在分色过程中不需要在这些分区中求解墨水组合。

实验2的数据见表4,其中第1列为各分色指标的最佳值。由表4可知,由于0.015和3的阈值均小于最佳RRMS和色差精度中的最大值,因此无论RRMS和色差的阈值如何变化,对于分色精度中的最大值不会

表 4 分色指标对分区判断次数的影响
Tab.4 Influence of separation parameters on subspace judgment numbers

RRMS 阈值		0	0.005	0.005	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015	0.015	0.015
ΔE 阈值		0	1	1.5	3	1	1.5	3	1	1.5	3
RRMS	平均值	0.0033	0.0034	0.0034	0.0034	0.0035	0.0036	0.0036	0.0035	0.0037	0.0038
	最大值	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233	0.0233
	中位数	0.0022	0.0023	0.0023	0.0023	0.0024	0.0025	0.0026	0.0024	0.0026	0.0027
ΔE	平均值	1.10	1.15	1.17	1.18	1.16	1.20	1.24	1.16	1.21	1.26
	最大值	7.61	7.61	7.61	7.61	7.61	7.61	7.61	7.61	7.61	7.61
	中位数	0.68	0.74	0.75	0.76	0.75	0.80	0.84	0.75	0.82	0.86
DE2000	平均值	0.59	0.64	0.64	0.65	0.64	0.66	0.68	0.64	0.67	0.70
	最大值	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40
	中位数	0.36	0.46	0.46	0.47	0.46	0.50	0.52	0.47	0.51	0.53
分区判断次数		4.84	2.60	2.41	2.36	2.35	1.93	1.68	2.34	1.88	1.60

造成影响。同时,随着阈值的增大,各项分色指标的平均值和中值增大,但幅度不大,平均每个检测样本的分区判断次数减少。由于当色差小于3时,几乎无法分辨颜色的差别,同时RRMS小于0.015时,光谱也非常接近,因此当RRMS阈值小于0.015、色差阈值小于3时,均达到了较高的精度。考虑分区的判断次数,文中选择0.01和1.5作为RRMS和色差阈值,此时平均每个检测样本的分区判断次数为1.93,约为遍历分区算法的24%。

4 结语

综上所述,在基于特征光谱匹配的分区判断算法的研究过程中,可知光谱编码时,将光谱曲线的值域范围划分为12个等级,即正负子域各6个,能够最佳描述光谱曲线的形状和特征信息。当目标光谱与分区的距离和目标光谱与所有分区距离最小值的差值

(下转第148页)

- YU Ke, WANG Yan-fang, ZHAO Xiao-bing, et al. Packaging and Logistics Modular of the Military Material Transportation at Sea[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 143—147.
- [13] 程元栋. 物流包装合理性评价指标体系的构建[J]. 辽宁工程技术大学学报(社会科学版), 2014, 16(1): 18—21.
- CHENG Yuan-dong. Construction of Evaluation Indexsystem for the Rationality of Logistics Packaging[J]. Journal of Liaoning Technical University(Social Science Edition), 2014, 16(1): 18—21.
- [14] 安冬梅, 王汉新. 提高快递包装规范性的有效对策分析[J]. 价值工程, 2013(6): 322—323.
- AN Dong-mei, WANG Han-xin. Analysis of Effective Countermeasures of Improving Express Packaging Standardization[J]. Value Engineering, 2013(6): 322—323.
- [15] 温丽娜. 网购时代来临包装企业准备好了吗[J]. 印刷技术, 2012(8): 14—17.
- WEN Li-na. Are Packaging Enterprises Ready in Online Shopping Era[J]. Printing Technology, 2012(8): 14—17.

(上接第 126 页)

大于 14% 时, 无法获得更好的分色精度, 分色过程中可以忽略这些分区。当目标光谱在某个分区中求解得到的墨水组合, 其预测光谱与目标光谱的 RRMS 小于 0.01、色差小于 1.5 时, 可以认为该墨水组合为所有分区中的最佳墨水组合, 即该分区为目标分区。

参考文献:

- [1] 曹朝辉. 多色印刷分色模型研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007.
- CAO Chao-hui. A Study of Multi-color Printing Color Separation Model[D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2007.
- [2] 史瑞芝. 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. Image Pyramid Model Dynamically Reconstruction Based on Multi-resolution Analysis of Wavelet Transform[J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5): 58—60.
- [3] 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(3): 13—17.
- WANG Yi-feng, ZENG Ping, WANG Ying. Multi-channel Printer Characterization Based on Gamut Partition[J]. Acta Electronica Sinica, 2010(3): 13—17.
- [4] 严爱国. 基于双分区修正的组介堡多色分色研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- YAN Ai-guo. The Research on Neugebauer Multi-color Separation Based on Double Subarea Modification[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [5] 王强. 空间信息的色彩管理机制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- WANG Qiang. The Study on Color Management Mechanism of Spatial Information[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [6] 杜培军, 方涛, 唐宏, 等. 高光谱遥感信息中的特征提取与应用研究[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 293—298.
- DU Pei-jun, FANG Tao, TANG Hong, et al. Spectral Features Extraction in Hyperspectral RS Data and Its Application to Information Processing[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(2): 293—298.
- [7] WANG Bin-yu, XU Hai-song, RONNIER L, et al. A Spectral-based Color Separation Method for a Multi-ink Printer[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(6): 301—322.
- [8] 郭晋一. 基于光谱匹配法 Neugebauer 方程的彩色打印系统特征化模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- GUO Jin-yi. Developing the Characterization Model of Color Printing System Using Spectral-based Neugebauer Equations[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [9] WANG Bin-yu, XU Hai-song, RONNIER L, et al. Color Separation Criteria for Spectral Multi-ink Printer Characterization[J]. Chinese Optics Letters, 2012(1): 13301—13304.
- [10] GUO Jin-yi, XU Hai-song, RONNIER L. Novel Spectral Characterization Method for Color Printer Based on the Cellular Neugebauer Model[J]. Chinese Optics Letters, 2010(11): 1106—1109.
- [11] 朱明, 刘真, 陈广学. 基于分区组介堡方程的 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.
- [12] WANG Bin-yu, XU Hai-song, RONNIER L, et al. Maintaining Accuracy of Cellular Yule-Nielsen Spectral Neugebauer Models for Different Ink Cartridges Using Principal Component Analysis[J]. Journal of the Optical Society of America Optics Image Science and Vision, 2011, 28(7): 1429.
- [13] 周倩. 高保真多色分色模型的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- ZHOU Qian. Study on HIFI Color Separation Model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [14] EMMEL P. Physical Models for Color Prediction[C]// Proc Digital Color Imaging Conference, 2013: 173—238.
- [15] 李金城. 色彩高保真复制的理论与实践[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- LI Jin-cheng. Theory and Practice of High-fidelity Color Reproduction[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.