印刷品原色油墨光谱预测中减色线性经验空间的建立

李玉梅[1,2]，何颂华[1*]，陈浩杰[2]，陈　桥[1]

1. 深圳职业技术学院传播工程学院，广东 深圳　518000
2. 曲阜师范大学工学院，山东 日照　276826

摘　要　在半色调印刷品原色油墨光谱预测技术中，在原光谱反射率空间进行主成分分析得到的代表性基向量数目会大于实际所使用的原色油墨数目，即光谱反射率空间并不适用光谱预测，且主成分分析得到的基向量会出现负值，没有物理意义。针对上述问题，建立了一个减色线性经验空间模型及其空间转换模型，并探究了影响经验空间线性程度 n 值的因素，通过实验及优化算法创新性找到确定最佳 n 值的方法，并在该减色线性经验空间进行半色调原稿原色油墨的预测实验。实验结果表明，在不同 n 值下，选取原始光谱反射率 R_m 和重构光谱反射率 R_{recon} 的 f 范数平方值的最小值对应的 n 值做为建立线性经验空间确定最佳 n 值的方法是有效的；为了将纸张和油墨类型对空间转换因数 n 的影响程度减到最小，最终确定 n 值为 3.5；在减色线性经验空间进行印刷品原色油墨数目预测，得到的代表性基向量数目恰好等于实际印刷使用的原色油墨数目 4，进行原色油墨光谱预测，预测的 4 色油墨除 K 色外，其他 CMY 色与实际原色油墨光谱相比拟合度 GFC 均大于 99.9%。即所提出的优化 n 值的新方法建立的减色线性经验空间是一个可作为半色调印刷品原色油墨数目预测和光谱预测的有效线性空间。

关键词　光谱颜色复制；减色线性经验空间模型；空间转换模型；原色油墨数目预测；光谱预测
中图分类号：O432.3　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2018)08-2542-07

引　言

传统的基于色度匹配的印刷复制技术已经很成熟并在广泛运用，但这是在特定光源和标准色度观察者条件下进行的同色异谱的颜色复制技术[1]，为实现在改变观察环境条件下色彩再现的一致性，达到同色同谱的复制效果，应使用基于光谱的印刷复制技术实现图像色彩的精确再现[2]。

半色调印刷复制品是由原稿上机印刷得到，或由数字原稿直接经数字印刷机复制而成，在某印刷复制品断版绝版，或仅有的印刷品不知使用何种品牌油墨复制的情况下，要想得到和已有的印刷品图像色彩再现效果一致的复制品时，最理想的做法就是寻找与印刷品原色油墨相同的油墨来完成印刷，实现与原色油墨光谱的最佳匹配。为实现基于原色油墨光谱一致的印刷技术，首先要完成对半色调印刷品原稿原色油墨的光谱预测，然后寻找最大限度上逼近原稿油墨光谱曲线的复制油墨[4]，这样便能减少甚至消除同色异谱现象，实现忠实于原稿的同色同谱的复制技术。其关键在于对原稿原色油墨的数目和光谱的准确预测，在光谱反射率空间使用主成分分析法(principal component analysis，PCA)进行光谱预测时，用前几个基向量的累计贡献率判断数据样本的代表性维度会超出原稿实际使用的油墨数目，且得到的基向量和对应系数矩阵会出现负数[3-7]。该问题说明，光谱反射率空间并不是一个适用于光谱预测的有效空间，为实现半色调印刷品原稿原色油墨的光谱预测，需建立一个能够真实反映数据样本信息的线性空间，为此依据半色调印刷复制品的光学特性并创新性地利用优化 n 值的方法建立了一个有效的减色线性经验空间。

本研究的整体思路为，首先从理论上建立了减色线性经验空间模型，在已有经验空间转换模型基础上经大量实验优化经验空间转换模型，进一步探究影响经验空间线性程度的因素及确定 n 值的方法，以此建立适用于光谱预测的最佳线性经验空间，然后在该减色线性经验空间进行半色调原稿原色油墨的数目预测和光谱预测实验。

收稿日期：2017-08-10，**修订日期**：2017-12-29
基金项目：国家自然科学基金项目(61108087)资助
作者简介：李玉梅，女，1990年生，曲阜师范大学工学院硕士研究生　e-mail：1353228591@qq.com
*通讯联系人　e-mail：hdh1818@szpt.edu.cn

1　原色油墨减色线性经验空间的建立

新建立的减色线性经验空间以光谱反射率空间为基础，该空间是线性空间且必须满足代表该空间数据信息的主要基向量数目与半色调印刷品原色油墨数目相等，能够满足半色调原稿原色油墨的光谱预测。

1.1　油墨减色线性经验空间模型

半色调印刷品使用光学特性为半透明的油墨，印刷复制品的阶调变化由网点面积率来表示，且网点的空间分布呈离散状态[3]，其光学特性有别于透明或不透明色料的连续调原稿。以光谱反射率为基础的空间变换可以借助库贝尔卡-芒克(Kubelka-Munk)理论，将光谱反射率转换到线性的吸收散射系数空间，也可借助光谱纽介堡(Neugebauer)方程来描述光谱反射率与网点百分比之间的关系[3,5]。但是 Kubelka-Munk 理论的成立基于一定假设条件，假设样品表面涂层折射率相等，忽略边界效应。但实际上光线向下和向上照射方向的折射率不相同，光线照射到印刷品表面时油墨层与纸张之间也存在多重反射，不可忽略边界效应，尤其对半透明的印刷油墨转换后并不是一个线性空间，不适合于原色油墨的光谱预测。光谱 Neugebauer 方程虽然是描述光谱反射率与网点面积率之间的关系，但这是基于纽介堡色元光谱反射率的线性加权，纽介堡色元数目与原色油墨数目的数学关系式为：$N=2^k$，该线性空间中的物理维度基于纽介堡色元，这将会远远超出实际使用的原色油墨数目，所以 Neugebauer 方程转换的光谱空间也并不适用于原色油墨的数目预测及光谱预测[3]。

由于上述理论建立的空间并不适用原色油墨的光谱预测，新建立的空间模型基于半色调原稿减色呈色的光学特性，且必须满足光谱预测的基本要求：

(1)该空间模型是线性的，以光谱反射率为基础建立；

(2)该空间可以表示为有限个基向量的线性组合，其代表性基向量数目等于原色油墨数目；

(3)该空间具有一定的物理意义：

①表示半色调原稿的整体光谱特性，是各原色油墨光谱特性与各油墨浓度百分比的线性组合；

②半色调原稿每种颜色的光谱特性是混合该颜色的各原色油墨光谱特性的线性叠加效果；

③每种颜色混合所需的各原色油墨浓度百分比之和为 1。

根据以上空间模型建立要求及半色调原稿光学特性，所建立的减色线性经验空间模型如式(1)

$$\Theta = \sum_{i=1}^{k} a_i c_i = AC$$

$$0 \leqslant a_i;\ 0 \leqslant c_i < 1;\ \sum_{i=1}^{p} c_{i,j} = 1,\ j = 1,2,3,\cdots,m \quad (1)$$

其中 Θ 为 $p\times q$ 矩阵表示半色调原稿整体的光学特性，p 为矩阵维数即光谱维度，q 为原稿颜色采样样本数这里指测量的色块数目。k 表示半色调原稿所用原色油墨数目，向量 a_i 表示第 i 个原色油墨的光谱特性，用向量组 A 表示 $A_{n\times k}=(a_1,a_2,a_3,\cdots,a_k)$，矩阵 A 中每列表示一个原色油墨的光谱特性，向量 c_i 表示第 i 个原色油墨对应的浓度百分比，用向量组 C 表示 $C_{k\times m}=(c_1,c_2,c_3,\cdots,c_m)$，矩阵 C 表示各原色油墨对应的浓度百分比。

1.2　空间转换模型

新建立的减色线性经验空间满足光谱预测要求，且具有实际存在的物理意义，但已知半色调印刷品情况下，其使用的原色油墨类型及其光谱特性和浓度很难得知，为得到有效的光谱预测空间，需建立一个从光谱反射率空间到减色线性经验空间的空间转换模型。

Tzeng 博士等经大量实验推导出一个由光谱反射率空间到减色线性经验空间的转换模型[5]见式(2)和式(3)

$$\Theta = \vec{b} - R_m^{1/2} \quad (2)$$

$$R_m = (\bar{b} - \Theta)^2 \quad (3)$$

上述经验空间转换模型中，Θ 表示转换后的减色线性空间，R_m 表示测得的半色调原稿印刷品的光谱反射率，偏移矢量 b 用于空间优化的经实验推导得出的经验向量。但实际情况下，需要考虑油墨覆盖到纸基以后油墨和纸张以及两者共同对光线的实际反射作用，以及转换后空间的线性程度，参考尤尔-尼尔森修正 Neugebauer 方程的方法，将上述转换模型用 n 值进行了修正，n 值决定空间的线性程度，并将模型的优化矢量 b 用纸张光谱反射率 R_p 代替，修正后的减色线性经验空间是完全针对于印刷油墨的光谱特性空间，除去了纸张对油墨预测的影响，当纸张上没有印刷油墨时，减色线性经验空间恰好为纸张的转换值，这使转换模型更具有物理意义。修正后的空间转换模型和逆变换如式(4)和式(5)

$$\Theta = R_p^{1/n} - R_m^{1/n};\ n \geqslant 2 \quad (4)$$

$$R_m = (R_p^{1/n} - \Theta)^n \quad (5)$$

1.3　转换因数 n 值确定步骤

转换因数 n 值决定着减色线性经验空间关于原色油墨浓度及光谱特性的线性相关程度，n 值的确定对线性经验空间的建立起到至关重要的一步。不同半色调印刷品使用不同的纸张及油墨，在建立减色线性空间时这都是影响空间线性程度不可避免的因素，为建立线性程度最优空间要对空间转换因数 n 进行优化确定，这里使用 Matlab 采用有约束条件的非负矩阵分解算法和优化工具箱中 fmincon 优化函数对 n 值进行优化，确定 n 值的具体技术路线如图 1。

在优化转换因数 n 时，首先给定 n 的初始值初步建立经验空间，对该空间进行有约束条件的非负矩阵分解，其思想符合减色线性经验空间的建立原则，约束条件即保证经验空间的建立原则，其中 cnmf(…)表示有约束条件的非负矩阵分解函数，k 指所用油墨数目，然后使模拟的经验空间逆回重构光谱反射率空间，重构光谱反射率与原始光谱反射率的近似程度越高，证明所建立的减色线性经验空间的线性程度越高[7]。因此取不同 n 值情况下，原始光谱反射率与重构光谱反射率的 f 范数平方值的最小值为判断标准，当两者 f 范数最小时输出最佳 n 值，以此建立线性程度最佳保证光谱预测有效性的减色线性经验空间。

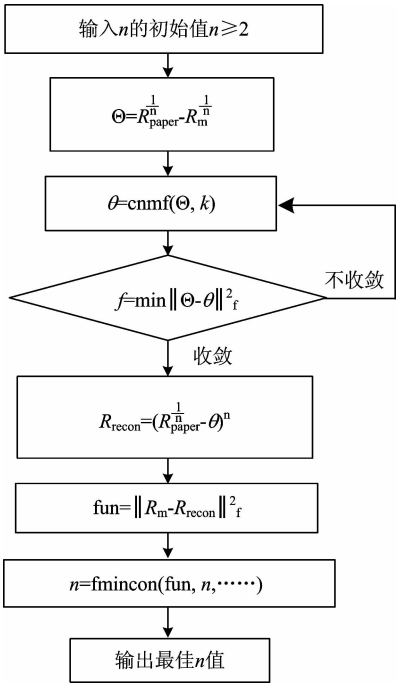

图 1 确定 n 值的技术路线

Fig. 1 Technical roadmap for making n values

2 减色线性经验空间有效性评价标准

2.1 基于主成分分析 PCA 的评价

在使用 PCA 法提取不同数据样本的主成分时，可将数据集表示成有限个基向量的线性组合[8-9]，而印刷品原稿正是由有限个原色油墨叠加复制而成，印刷品光谱特性数据样本的代表性基向量个数若能准确表示原色油墨数目，则该光谱特性数据空间是一个适合用于光谱预测的有效线性空间[7]。

假设半色调原稿光谱特性数据样本为 X，是 $p\times q$ 的矩阵，p 表示样本数，q 表示光谱维数[2]，对 X 进行主成分分析计算特征值的累计贡献率确定保留的基向量数目，特征值的贡献率和累计贡献率如式(6)

$$a_i=\frac{D_i}{\sum D}\quad Aa_j=\frac{\sum_{i=1}^{j}D_i}{\sum D} \tag{6}$$

通过计算特征向量对应的累计贡献率和增长速度，作为选取代表性基向量个数的标准，取累计贡献率大于 99.9%，且增长速度小于 0.03%，即 $Aa_j\geqslant 99.9\%$ 且 $Aa_{j+1}-Aa_j\leqslant 0.03\%$时，$j$ 作为原始数据组的主要基向量数目，即半色调原稿所用原色油墨的数目。此原色油墨数目的选取标准经过大量不同纸张和油墨的预测实验结果验证得到。

2.2 基于光谱色度和精度的评价

光谱的精度评价主要从两方面，色度精度和光谱精度[10]。这里采用 CIE1976 色差来评价光谱匹配的色度精度，使用 D50 光源和 2°观察视场下标准色度观察者的三刺激值，用均方根误差 RMSE 和拟合度 GFC 来评价光谱匹配的光谱精度[16]。

CIE1976 色差公式(7)

$$\Delta E=\sqrt{(\Delta L^2+\Delta a^2+\Delta b^2)} \tag{7}$$

均方根误差 RMSE，见式(8)

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum(R_{\mathrm{m}}-R_{\mathrm{recon}})^2}{n}} \tag{8}$$

拟合度 GFC，见式(9)

$$\mathrm{GFC}=\frac{\left|\sum(R_{\mathrm{m}}\times R_{\mathrm{recon}})\right|}{\sqrt{\sum(R_{\mathrm{m}}^2)}\sqrt{\sum(R_{\mathrm{recon}})^2}} \tag{9}$$

3 实验部分

3.1 设备

在减色线性经验空间建立时 n 值的确定以及空间有效性评价的实验中，选取三种纸张和两台数码印刷机分别印刷 IT8.7/3 色标(1 120 色块)得到 6 张印刷样张，这里使用数码印刷机自身配备的墨粉或墨膏来摸拟不同品牌的油墨，并使用 X-rite i1 Pro2 测量每个色块的光谱反射率作为 n 值准确性优化实验和空间有效性评价实验的数据样本。具体使用纸张和数码印刷机类型如下：

Konica Minolta C1085 数码印刷机及其配套 4 色墨粉，HP indigo5600 数码印刷机及其配套的 4 色墨膏，三种纸张编号及类型，见表 1。

表 1 实验中纸张类型

Table 1 Paper types in experiments

纸张编号	类型	克重/g	纸张色度		
			L	a	b
1#	铜版纸	157	96.903	0.036 8	4.775 0
2#	白卡纸	220	94.776	−0.485 7	1.481 4
3#	白卡纸	230	92.572	1.122 9	−4.506

3.2 结果与讨论

3.2.1 转换因数 n 值的确定

经上述实验得到 6 组样张的光谱反射率，其中 Konica Minolta C1085 数码印刷机打印的样张用 KM 表示，HP indigo5600 数码印刷机打印的样张用 HP 表示，在取一系列不同 n 值的情况下，计算测量的光谱反射率 R_{m} 与重构后的光谱反射率 R_{recon}之间的均方根误差 RMSE 和两者之间 f 范数的平方即 $\|R_{\mathrm{m}}-R_{\mathrm{recon}}\|_f^2$ 的值，并用两者范数平方值的曲线图和 RMSE 曲线图来表征不同 n 值下的结果，探究不同纸张和油墨下的最佳 n 值及其对 n 值的影响，如图 2 和图 3。

从图 2 和图 3 中可以明显看出，同一数码印刷机打印不同纸张时获得的光谱反射率与重构光谱反射率的 f 范数和 RMSE 最小时，所取 n 值不尽相同，同一纸张分别用两台印刷机打印时获得的光谱反射率与重构光谱反射率的 f 范数和 RMSE 最小时，所取 n 值也不相同，6 组样本 f 范数平方值最小时 n 值分别是 3.3，3.8，3.6，3.2，3.5，3.4，RMSE

最小时 n 值分别是 3.4，3.8，3.7，3.2，3.3，3.4，虽然 n 值不同但其范围在 3～4 之间，并且 n 值在该范围内同一样本的 f 范数和 RMSE 的值相差在千分位之后，可忽略不计。即纸张与数码印刷机均对空间转换模型中的 n 值产生影响但影响程度可忽略，将 n 的选取对各种纸张和油墨的影响减到最小，最终确定 n 值为 3.5。

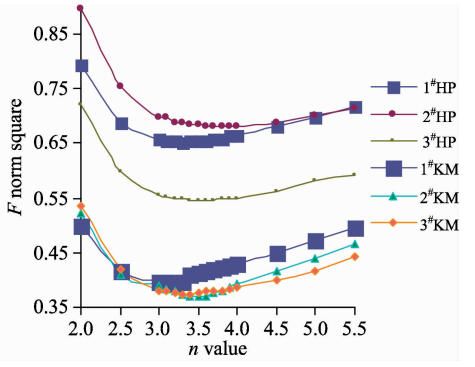

图 2　R_m 与 R_{recon} 的范数平方曲线图

Fig. 2　The diagram of f norm square of R_m and R_{recon}

分别对样本光谱反射率在选取各自最佳 n 值和 $n=3.5$ 时，转到线性经验空间中并对其进行主成分分析 PCA 得到各自的累计贡献率，并取前 6 个基向量对应的累计贡献率和

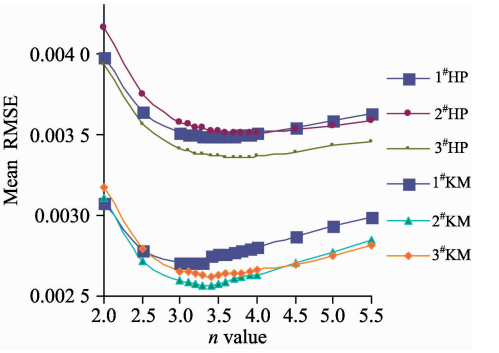

图 3　R_m 与 R_{recon} 的 RMSE 曲线图

Fig. 3　The RMSE diagram of R_m and Rrecon

基向量 4 和 5 累计贡献率的增长速度列入表 2，以探究固定 n 值为 3.5 是否会影响经验空间的线性程度，进一步影响原色油墨的预测。由于样本 2# KM 的最佳 n 值即 3.5，故取其他 5 组样本数据。从表中可以明显看出 5 组样本中最佳 n 值和 $n=3.5$ 时，4 个特征值以后的累计贡献率几乎相同均达到 99.9%以上，差异可以忽略不计，且 4 和 5 基向量对应的累计贡献率的增长速度均小于 0.03%，实际印刷样张时使用的油墨数目也是 4 个，即 $n=3.5$ 对 4 个特征值以后的累计贡献率无影响，对经验空间中原色油墨数目的预测也无影响，故最终确定 $n=3.5$ 是建立经验空间的最佳转换因数。

表 2　不同 n 值下 6 组样本的前 6 个累计贡献率及 4，5 之间增长速度

Table 2　The first 6 cumulative contribution rates and the growth rate between 4 and 5 of 6 sets samples under different n values

基向量	1# HP		2# HP		3# HP		1# KM		3# KM	
	$n=3.3$	$n=3.5$	$n=3.8$	$n=3.5$	$n=3.6$	$n=3.5$	$n=3.2$	$n=3.5$	$n=3.4$	$n=3.5$
1	0.663 88	0.662 87	0.672 50	0.673 81	0.690 68	0.691 05	0.683 36	0.682 15	0.687 44	0.686 94
2	0.866 24	0.865 18	0.868 52	0.869 85	0.868 49	0.869 00	0.867 78	0.866 15	0.868 72	0.868 21
3	0.996 49	0.996 52	0.996 51	0.996 47	0.997 29	0.997 28	0.995 59	0.995 61	0.995 54	0.995 55
4	0.999 57	0.999 57	0.999 57	0.999 56	0.999 64	0.999 64	0.999 81	0.999 81	0.999 82	0.999 82
5	0.999 83	0.999 83	0.999 82	0.999 82	0.999 85	0.999 85	0.999 91	0.999 91	0.999 91	0.999 91
6	0.999 91	0.999 90	0.999 90	0.999 90	0.999 91	0.999 91	0.999 94	0.999 94	0.999 93	0.999 95
差值	0.000 27	0.000 26	0.000 25	0.000 26	0.000 21	0.000 21	1×10^{-4}	9.8×10^{-5}	9×10^{-5}	8.6×10^{-5}

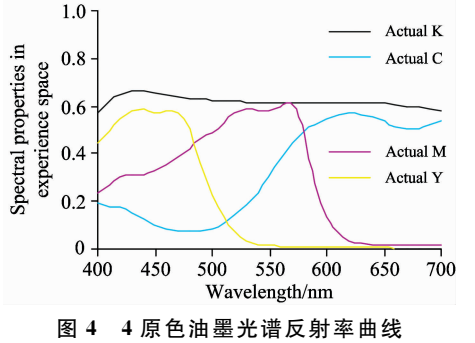

图 4　4 原色油墨光谱反射率曲线

Fig. 4　Spectral reflectance curves of 4 primary color ink

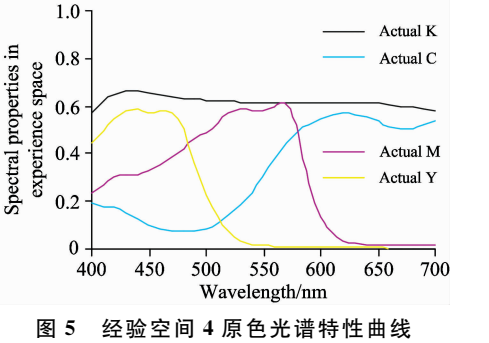

图 5　经验空间 4 原色光谱特性曲线

Fig. 5　Spectral characteristic curves in experience space

3.2.2　减色线性经验空间的分析评价

经过上述确定最佳 $n=3.5$ 后，选取 1# HP 样本数据为例建立减色线性经验空间，分析评价减色线性经验空间对半色调原稿原色油墨数目和光谱预测的有效性，1# HP 样本数

据是由惠普数码印刷机使用 4 色印刷墨膏在 157 g 铜版纸上印刷 IT8.7/3 色标，并由 X-rite i1 pro2 测量光谱反射率得到的数据，其中 4 种原色油墨的光谱反射率曲线和经验空间中光谱特性曲线如图 4 和图 5。

表 3 两空间中的贡献率和累计贡献率的比较

Table 3 Comparison of contribution rates and cumulative contribution rates in two spaces

基向量	原光谱反射率空间 R_m		减色线性经验空间 Θ	
	贡献率/%	累计贡献率/%	贡献率/%	累计贡献率/%
1	0.703 56	0.703 56	0.662 87	0.662 87
2	0.198 02	0.901 58	0.202 30	0.865 18
3	0.093 96	0.995 54	0.131 34	0.996 52
4	0.003 57	0.999 11	0.003 05	0.999 57
5	0.000 42	0.999 53	0.000 26	0.999 83
6	0.000 32	0.999 85	7.07×10^{-5}	0.999 91

将 1# HP 样本数据分别在减色线性经验空间 Θ 和原光谱反射率空间 R_m 进行 PCA，将前 6 个特征值对应的贡献率和累计贡献率列于表 3 中，并用前 6 个基向量分别重构两空间并评价分析重构结果的光谱精度和色度精度，将评价结果用色差和均方根误差列于表 4 中。

特征值的贡献率对应于特征向量对数据集信息量的贡献程度，累计贡献率指前几个特征向量代表整个数据集的信息量。从表 3 中可以明显看出，减色线性经验空间中前 4 个基向量的累计贡献率达到 99.96%，且增长速度为 0.026%小于 0.03%，而光谱反射率空间至少需要前 6 个基向量才能达到相同的信息贡献程度，且前 5 个基向量累计贡献率的增长速度都大于 0.03%。从表 4 中，也可以看出相同基向量个数重构时，减色线性经验空间的重构结果要优于光谱反射率空间，前 3 个基向量重构 Θ 空间时最大色差为 29，最大均方根误差为 0.03，用前 4 个基向量重构时最大色差为 1.6，最大均方根误差为 0.007，色差和均方根误差都在可接受范围内，重构 Θ 空间时重构结果在可接受范围内的最低基向量数目为 4，而相同基向量个数重构光谱反射率空间的结果均不如经验空间的重构结果。

表 4 两空间光谱重构后的 ΔE 和 RMS 评价

Table 4 The ΔE and RMS evaluation of spectral reconstruction in two spaces

基向量	R_m 空间 ΔE		Θ 空间 ΔE		R_m 空间 RMSE		Θ 空间 RMSE	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
1	29.558 7	82.878 3	20.080 3	87.766 6	0.277 32	0.079 41	0.074 08	0.210 91
2	22.160 5	116.890	13.989 6	90.590 2	0.187 42	0.038 31	0.038 19	0.144 77
3	4.803 82	32.175 4	1.707 95	29.058 6	0.053 68	0.014 38	0.009 94	0.033 29
4	0.773 26	4.707 0	0.226 52	1.633 3	0.021 95	0.004 50	0.001 99	0.006 93
5	0.611 22	2.980 9	0.151 74	1.554 2	0.016 07	0.003 16	0.001 44	0.005 17
6	0.316 32	2.344 7	0.122 9	1.148 7	0.009 80	0.002 13	0.001 11	0.004 63

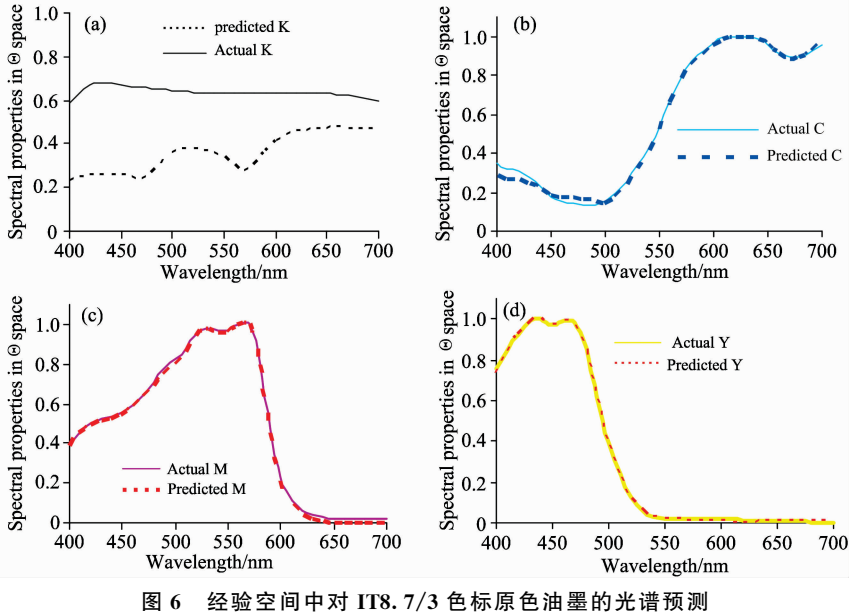

图 6 经验空间中对 IT8.7/3 色标原色油墨的光谱预测

(a)：黑色油墨的预测；(b)：青色油墨的预测；(c)：品色油墨的预测；(d)：黄色油墨的预测

Fig. 6 Spectral prediction of IT8.7/3 color printed primary ink in empirical space

(a)：Prediction of black ink；(b)：Prediction of cyan ink；(c)：Prediction of magneta ink；(d)：Prediction of yellow ink

因此该减色线性经验空间中 4 个基向量能够充分表征整个数据样本的信息，这与原稿实际使用印刷油墨数目相一致，其代表性基向量数目可作为预测原稿原色油墨数目的标准，故减色线性经验空间适合用于原色油墨数目预测。

表 5　经验空间中 IT8.7/3 色标原色油墨的预测光谱与实际光谱的比较

Table 5　Comparison of predicted spectra and actual spectra of IT8.7/3 in empirical space

原色油墨	GFC	ΔE	RMSE
K	0.966 18	24.117	0.298 68
C	0.999 46	2.413	0.013 05
M	0.999 70	1.694	0.011 09
Y	0.999 91	2.385	0.004 39

在减色线性经验空间 Θ 中能够准确预测原稿使用的原色油墨数目后，便可进一步在 Θ 空间进行对原色油墨的光谱预测，光谱预测算法使用有条件约束的非负矩阵算法，约束条件根据原稿光学特性设定，在经验空间中预测结果和原色油墨光谱特性曲线对比如图 6，图中三彩色油墨对比曲线经过归一化处理，四种油墨预测中除了黑色油墨预测结果有待提高外，其他三种青、品、黄彩色油墨的预测结果已经很准确，与实际原色油墨的光谱特性曲线拟合度均能达到 99.9% 以上，色差均小于 3，评价参数列于表 5 中。预测黑色油墨的光谱特性曲线形状类似于三彩色油墨光谱特性曲线的线性叠加，与半色调原稿的减色呈色原理相关，中性灰的呈色是其他三彩色油墨对光线混合吸收叠加的结果，预测得到的 K 像是运用了底色去除 GCR 印刷工艺，这对真正使用的 K 色油墨的预测有一定程度干扰，对 K 色油墨的预测还有待进一步研究，但这并不妨碍说明减色线性经验空间对半色调原稿原色油墨光谱预测的有效性。

4　结　论

通过减色线性经验空间的建立及实验数据分析可得到如下结论：减色线性经验空间建立时，转换模型中转换因数 n 值的确定至关重要，它决定经验空间的线性程度，可通过原光谱反射率数据集与重构的光谱反射率数据集两者 f 范数平方值收敛时取得的 n 值，作为确定最佳 n 值的判断标准。纸张和油墨对 n 值的确定有一定影响，为将影响程度降到最低，经实验分析最终确定最佳 n 值为 3.5。在取最佳 n 值时建立的减色线性经验空间中，进行半色调印刷品原色油墨数目预测取累计贡献率大于 99.9%，且增长速度小于 0.03% 时所得到的代表性基向量数目为半色调原色油墨数目，用光谱预测算法得到的四原色油墨光谱曲线中，除黑墨的预测不理想外，其他三彩色油墨的光谱预测很准确。即所提出的优化建立的减色线性经验空间是一个可作为半色调印刷品原稿原色油墨数目预测和光谱预测的有效线性空间。

References

[1] WANG Ying(王　莹). The Study of Key Techniques for Color Reproduction of Multispectral Images(多光谱图像彩色再现关键技术研究). Xi'an Electronic and Science University(西安电子科技大学), 2010.

[2] ZHANG Xian-dou(张显斗). Printing and Packaging Research in China(中国印刷与包装研究), 2013, 5(1): 10.

[3] HE Song-hua, GAO Yuan, CHEN Qiao, et al(何颂华, 高　媛, 陈　桥, 等). Journal of Optics(光学学报), 2016, 3: 304.

[4] Wang Haiwen, Chen Guangxue, Li Jie. Journal of Computational Information System, 2012, 8(5): 2107.

[5] Tzeng D, Berns R S. Color Research & Application, 2004, 29(2): 104.

[6] Li Jie, Wang Haiwen, Chen Guangxue. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2011, 8006: 502.

[7] HE Song-hua, CHEN Qiao, DUAN Jiang(何颂华, 陈　桥, 段　江). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(10): 3274.

[8] M Ronnier Luo, Luo Ming. Printing and Packaging Research, 2010, 2(S1): 5.

[9] WANG Yi-fan, TANG Zheng-ning(王一帆, 唐正宁). Optical Technique(光学技术), 2014, (2): 180.

[10] LIU Pan, LIU Zhen, CHEN Guang-xue, et al(刘　攀, 刘　真, 陈广学, 等). Journal of Optics(光学学报), 2015, 35(6): 0633001.

The Spectral Prediction Method of Primary Ink for Prints Manuscript Based on Non-Negative Matrix Factorization

LI Yu-mei[1,2], HE Song-hua[1*], CHEN Hao-jie[2], CHEN Qiao[1]

1. School of Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518000, China

2. School of Engineering, Qufu Normal University, Rizhao 276826, China

Abstract In the spectral prediction technology of the primary ink of halftone prints manuscript, the representative vector number obtained by principal component analysis will be greater than the actual number of primary inks used in the reflectance space. The space is not suitable for spectral prediction, and the based vectors obtained by PCA will appear negative. There is no physical meaning. Aiming at the above problems, a subtractive linear experimental space model and space conversion model were created. And the factors influencing the linearity degree of the space n value were explored. Through experiments and optimization algorithms, the methods for determining the best n value were found innovatively. Then the prediction experiments of the primary ink of halftone prints manuscript were carried out in the space. The experimental results showed that, under different n values, the n value corresponding to the minimum square value of the f norm was effective for determining the best n value to establishing the linear empirical space. Finally, the n value was determined to be 3.5. In the space, the number of representative base vectors obtained by the method of number prediction was exactly equal to 4, which was the actual primary ink number. In spectral prediction, in addition to K color, other CMY color compared to the actual primary ink spectrum, the fitting degree of GFC was greater than 99.9%. That was to establish a new method for the optimization of n proposed in this paper. The value of color space was an effective linear empirical linear space which can be used as a halftone color ink number prediction and spectral prediction. That is to say, the space created by the new method is an effective linear space that can be used to predict the number of primary ink and the spectrum of halftone prints manuscript.

Keywords Spectral color reproduction; The subtractive linear experience space model; Space conversion model; Primary ink number prediction; Spectral prediction

(Received Aug. 10, 2017; accepted Dec. 29, 2017)

* Corresponding author