

# 一种高效的胞元光谱组介堡模型胞元搜索算法

张桢杰<sup>1</sup>, 刘真<sup>1</sup>, 吴明光<sup>2</sup>, 杨晟炜<sup>3</sup>

(1. 上海理工大学, 上海 200093; 2. 南京师范大学, 南京 200046; 3. 南京林业大学, 南京 210037)

**摘要:** 采用训练样本排序框定初始胞元、差异优先搜索最优胞元和初始胞元再扩大方法, 建立了 CYNSN 模型的胞元搜索算法。实验结果表明, CYNSN 模型胞元搜索算法能使 CYNSN 反向模型在色度和光谱反射率上实现高精度复制, 和已有的 CYNSN 模型相比, 胞元搜索算法不仅保持了 CYNSN 模型的精度, 而且效率提高了 10 倍。

**关键词:** 光谱色彩学; 胞元搜索算法; 胞元光谱组介堡; 打印机特征化

**中图分类号:** TS807 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)15-0019-04

## High-efficient Cell-search Method for Cellular Yule-Nielson Spectral Neugebauer Model

ZHANG Zhen-jie<sup>1</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, WU Ming-guang<sup>2</sup>, YANG Sheng-wei<sup>3</sup>

(1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Nanjing Jiangsu Normal University, Nanjing 200046, China; 3. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** A high-efficient cell-search method for CYNSN model was proposed, which included framing initial cell by ordering the training sample set, searching optimal cell using the priority in difference method step by step, and expanding initial cell. Experimental result showed that the proposed cell-search method can make the backward CYNSN model copy accurately in spectral and colorimetric reflectance; compared with existing CYNSN model, the CYNSN model using the proposed cell-search method improves efficiency more than 10 times with the same precision.

**Key words:** spectral chromatology; cell-search method; Cellular Yule-Nielson Spectral Neugebauer; printer characterization

在现代印刷工业中,使打印机能够对颜色进行准确、高效地复制是打印机特征化模型的目标。Cellular Yule-Nielson Spectral Neugebauer(CYNSN)模型是一种常用的打印机特征化模型。它将打印机色空间划分成若干胞元,在每个胞元内部用 YNSN 方程进行正向、反向预测。这种方法具有预测精度高,能有效消除同色异谱现象等优点,但是,其反向模型不能简单判断目标颜色所在胞元,需要使用胞元搜索算法搜索最优胞元。这个过程需要对多个可能胞元进行 YNSN 方程逆向求解,这导致了 CYNSN 模型计算量大,运算效率低。由此,提出一种高效、高精度的 CYNSN 模型胞元搜索算法很有必要<sup>[1]</sup>。

Urban 提出了一种基于线性迭代的胞元搜索算

法,对 CMYK 四基色逐次优化,直到得到 C, M, Y, K 的最优墨水覆盖率<sup>[2-4]</sup>。使用这种搜索算法的 CYNSN 模型计算量较大,精度不高。郭晋一提出了一种胞元搜索算法,根据每个胞元的假想中心点与目标颜色在色空间中的距离选择  $2^k+1$  ( $k$  为打印机的基色个数)个可能基本胞元,再从中选择最优胞元<sup>[5]</sup>。对于 CMYK 四色印刷,使用这种搜索算法的 CYNSN 模型每次预测 C, M, Y, K 墨水覆盖率的过程需要对至少 17 个基本胞元进行逆向求解,虽然精度非常高,但计算量太大,并不能用于实际应用。

## 1 CYNSN 模型

CMYK 四色 YNSN 模型为:

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(41271446);上海市研究生教育创新计划;江苏省研究生科研创新计划(CXZZ11\_0517)

作者简介: 张桢杰(1989-),男,江苏人,上海理工大学硕士生,主攻色彩再现理论与应用。

$$R(\lambda) = \left\{ \sum_{i=1}^{16} w_i \cdot R_i(\lambda)^{1/n} \right\}^n \quad (1)$$

式(1)中, $R(\lambda)$ 是根据墨水覆盖率预测的打印色光谱反射率, $\lambda$ 表示波长; $R_i(\lambda)$ 表示打印色第*i*个色元的光谱反射率; $w_i$ 取决于打印色 C, M, Y, K 的墨水覆盖率,可用德米切尔关系式描述; $n$ 为 Yule-Nielson 幂指数<sup>[6-7]</sup>。

CYNSN 模型是在 YNSN 模型的基础上,将打印色空间划分为多个较小胞元,然后对每一个胞元分别应用经典的 YNSN 方程建立模型。CYNSN 模型能显著提高模型的预测精度,但同时增加了测量样本数和模型复杂度<sup>[8]</sup>。

正向 CYNSN 模型的过程是根据训练样本的墨水覆盖率和光谱反射率数据,判断任意打印色墨水覆盖率所在的胞元并预测其光谱反射率。反向 CYNSN 模型的过程是通过胞元搜索算法和正向 CYNSN 模型的高精度预测性能搜索到最优胞元,然后在最优胞元内建立 YNSN 模型,反向计算求得最优 CMYK 墨水覆盖率并将其输出。

## 2 高效胞元搜索算法

使用高效胞元搜索算法的 CYNSN 模型建立的具体步骤见图 1:由目标光谱反射率和训练样本确定初

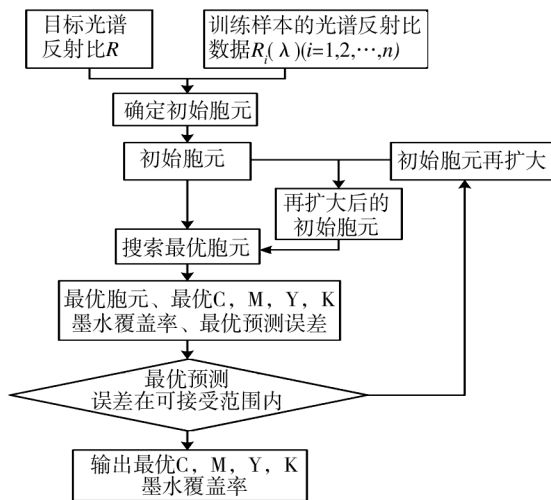


图 1 使用高效胞元搜索算法的反向 CYNSN 模型具体流程

Fig. 1 Specific steps of backward CYNSN model using high-efficient cell-search method

始胞元,初始胞元可以是若干个基本胞元。利用正向 CYNSN 模型的高精度预测性能,将初始胞元进行切

分,搜索最优胞元,得到最优胞元及其对应的最优 C, M, Y, K 墨水覆盖率、最优预测误差。若最优预测误差在可接受的范围内,将最优 C, M, Y, K 墨水覆盖率输出;反之,需要对初始胞元再扩大后重新搜索最优胞元。

### 2.1 搜索初始胞元

在训练样本中,选择与目标光谱反射率差异最小的若干个样本,框定一个四维胞元,即为初始胞元。具体步骤见图 2。

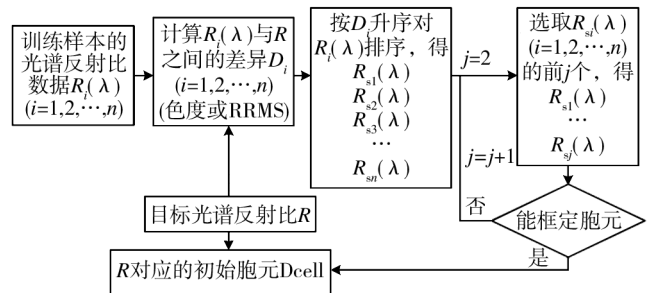


图 2 搜索初始胞元的具体步骤

Fig. 2 Specific steps of searching initial cell

第 1 步。计算训练样本光谱反射率数据  $R_i(\lambda)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 和目标光谱反射率  $R(\lambda)$  之间的 RRMS 或色度差异  $D_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) (文中选择 RRMS 差异)。RRMS 计算公式如下:

$$RRMS = \sqrt{(R_1 - R_2) * (R_1 - R_2)^T / N} \quad (2)$$

式(2)中, $R_1, R_2$ 表示 2 组光谱反射率数据的行向量形式; $N$ 表示光谱反射率数据的维数。

第 2 步。按  $D_i$  升序对  $R_i(\lambda)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 排序,得  $R_{s_i}(\lambda)$  ( $i=1, \dots, n$ )。

第 3 步。选取  $R_{s_i}(\lambda)$  ( $i=1, \dots, n$ ) 的前  $j$  个 ( $j$  的初始值设为 2, 因为框定一个胞元至少需要 2 组光谱反射率和墨水覆盖率数据), 得  $R_{s_i}(\lambda)$  ( $i=1, \dots, j$ )。

第 4 步。若能用  $R_{s_i}(\lambda)$  ( $i=1, \dots, j$ ) 框定一个胞元,该胞元即是目标光谱反射率  $R$  对应的初始胞元 Dcell; 若不能框定,  $j$  自增 1, 重复执行步骤 3-4。

判断能否框定胞元的方法如下:在训练样本中,找出与  $R_{s_i}(\lambda)$  ( $i=1, \dots, j$ ) 对应的墨水覆盖率 CMYK<sub>*s<sub>i</sub>*</sub> ( $i=1, \dots, j$ )。求 CMYK<sub>*s<sub>i</sub>*</sub> ( $i=1, \dots, j$ ) 在 C, M, Y, K 等 4 个通道的最大墨水覆盖率  $C_{s\_max}, M_{s\_max}, Y_{s\_max}, K_{s\_max}$  和最小墨水覆盖率  $C_{s\_min}, M_{s\_min}, Y_{s\_min}, K_{s\_min}$ 。

若  $C_{s\_max}, M_{s\_max}, Y_{s\_max}, K_{s\_max}$  中有等于 0 的,置为  $1/\text{grade}$  (grade 为 CYNSN 模型的胞元等级);

若  $Cs_{min}, Ms_{min}, Ys_{min}, Ks_{min}$  有等于 1 的, 置为  $(grade-1)/grade$ 。若  $(Cs_{max}-Cs_{min}) * (Ms_{max}-Ms_{min}) * (Ys_{max}-Ys_{min}) * (Ks_{max}-Ks_{min}) = 0$ , 则不能框定胞元; 反之, 则能框定胞元。

## 2.2 搜索最优胞元

搜索最优胞元开始前, 用来表示预测光谱反射率和目标光谱反射率之间差异的差异阈值需要被设定。将差异阈值设为正向 CYNSN 模型 RRMS 误差的平均值。在用差异优先的方法搜索最优胞元的过程中, 如果差异小于差异阈值, 意味着最优胞元被找到, 胞元搜索过程随即结束。这样, 就能很好地平衡反向 CYNSN 模型的精度和效率。

搜索最优胞元的具体步骤为: 如果初始胞元是基本胞元或者初始胞元内反向 YNSN 模型精度已经满足差异阈值, 则初始胞元就是最优胞元; 如果不是, 用一个切平面将初始胞元切分成 2 个子胞元。切平面垂直于初始胞元在 C, M, Y, K 等 4 个轴向上跨度最大的轴, 同时还经过初始胞元的中心点。选择表现较优的子胞元并判断其精度是否满足差异阈值, 对较优子胞元继续切分操作直到其满足差异阈值或者变成基本胞元。

## 2.3 初始胞元再扩大

实际应用中, 可能会出现目标光谱反射率落在初始胞元外而使预测误差超出可接受范围的情况。由此, 当预测误差超出可接受范围时, 需要将初始胞元再扩大。将可接受阈值设为正向 CYNSN 模型 RRMS 误差的最大值。

初始胞元再扩大的具体方法为: 将 2.1 节中得到的  $R_{si}(\lambda)$  ( $i=1, \dots, n$ ) 继续选取前  $j+1$  个, 判断能否框定一个比原初始胞元更大的胞元。若能框定, 当前框定的胞元即为再扩大后  $R$  对应的初始胞元; 反之,  $j$  自增 1, 重复上述方法。

## 3 实验及数据分析

打印输出设备选用 HP Designjet Z3200 (24inch) HT (CMYKRGBmkk) 打印机, 使用 EFI Colorproof XF 软件对打印机做基础线性化控制, 所有样本都在此基础线性化流程下打印输出。打印介质选用 Easi-Color EP520H 顶级半光面打样纸, 分光光度计选用 gretagmacbeth i1iO。分光光度计在 (D50, 2°) 条件下测量色块在 380 ~ 730 nm 波长范围内的光谱反射

率。

### 3.1 正向 CYNSN 模型的建立

文献[5]表明, 当胞元等级为 5 时, CYNSN 模型能用最少的基本胞元达到最佳的预测精度, 因此文中 CYNSN 模型选择 5 胞元等级, 训练样本按 C, M, Y, K 墨水覆盖率 [0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1] 排列组合打印输出获得, 共 1296 个色块。检测样本按 C, M, Y, K 墨水覆盖率 [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1] 排列组合打印输出获得, 共 625 个色块。

Yule-Nielsen 幂指数  $n$  的值与具体实验环境 (打印机、油墨、纸张等因素) 有关, 难以用简单的数学模型预测, 用  $n$  值迭代法确定最优 Yule-Nielsen 幂指数  $n$ 。

将  $n$  在 1 ~ 5 之间, 以 0.3 为间隔取值, 分别用正向 CYNSN 模型在设定条件下预测检测样本的光谱反射率数据<sup>[8]</sup>。分析比较检测样本光谱反射率数据的预测值和实际测量值之间的 RRMS 误差, 确定最优 Yule-Nielsen 幂指数  $n$ 。

$n$  取不同值时, 正向 CYNSN 模型的 RRMS 误差见图 3。当  $n=3.1$  时, 平均预测 RRMS 误差取最小值

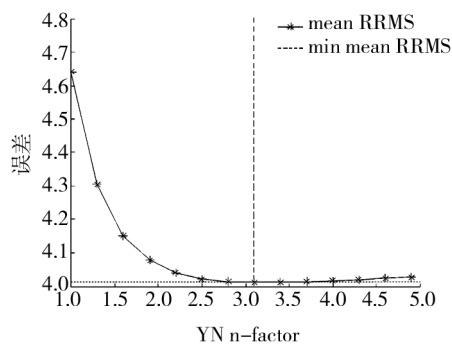


图3 取不同值时正向模型的 RRMS 误差

Fig. 3 RRMS error of forward model against n-factor

$4.01 \times 10^{-3}$ , 因此实验环境的最优 Yule-Nielsen 幂指数  $n$  选择为 3.1。

### 3.2 正向 CYNSN 模型评价

用正向 CYNSN 模型预测检测样本墨水覆盖率对应的光谱反射率, 与检测样本光谱反射率的实际测量值分别在 RRMS 误差、CIELAB 色差、CIEDE2000 色差等 3 个方面进行分析评价。实验数据见表 1。

由表 1 可知, 正向 CYNSN 模型有很高的预测精度, 因此在反向 CYNSN 模型中, 用正向 CYNSN 模型预测得到的光谱反射率数据是准确可信的。

表1 正向 CYNSN 模型精度

Tab.1 Precision of forward CYNSN model

	max	mean	median
RRMS	0.0193	0.0041	0.0019
$\Delta E_{ab}^*$ (D50, 2°)	2.74	1.07	0.89
$\Delta E_{00}^*$ (D50, 2°)	2.36	0.70	0.62

### 3.3 反向 CYNSN 模型的建立

将检测样本实际测量的光谱反射率数据作为目标光谱反射率,用反向 CYNSN 模型对其预测并输出墨水覆盖率。将预测的墨水覆盖率重新打印输出并测量,得到检测样本的复现测量值。

表2 反向模型 RRMS 误差、运算效率对比

Tab.2 comparison of RRMS error and computation efficiency of backward model

	RRMS			逆向求解胞元个数		
	mean	max	median	mean	Max	median
文中胞元搜索算法	0.0053	0.0297	0.0039	1.56	11	1
文献[5]的胞元搜索算法	0.0035	0.0229	0.0027	17	17	17

表3 反向模型色度误差对比

Tab.3 Comparison of chromaticity error of backward model

	D50, 2°				A, 2°				F11, 2°			
	$\Delta E_{ab}^*$		$\Delta E_{00}^*$		$\Delta E_{ab}^*$		$\Delta E_{00}^*$		$\Delta E_{ab}^*$		$\Delta E_{00}^*$	
	mean	max	mean	max	mean	max	mean	max	mean	max	mean	max
文中胞元搜索算法	1.40	4.72	0.90	3.71	1.40	5.57	0.89	4.42	1.52	5.87	0.94	4.71
文献[5]的胞元搜索算法	0.96	3.21	0.64	3.34	0.97	3.01	0.65	2.88	1.01	3.17	0.65	2.88

需逆向求解 1.56 个胞元,就已经很接近于逆向求解 1 个胞元这一理想值。同时,对大多数颜色进行反向预测时,只需要进行 1 次胞元逆向求解,这说明初始胞元已经很接近于最优胞元。

由表 2 和表 3 可知,与文献[5]的反向 CYNSN 模型相比,使用文中提出的高效胞元搜索算法的反向 CYNSN 模型精度略差。已有的研究表明,两幅图像的色差小于 2.2 个 CIELAB 单位的时候人眼是不能分辨的<sup>[9]</sup>。由此,对人眼来说,使用文中胞元搜索算法的 CYNSN 模型和使用文献[5]中胞元搜索算法的 CYNSN 模型在精度上是一样的,但前者在运算效率上有明显优势。

## 4 结论

运用高效最优胞元搜索算法和初始胞元再扩大方法,提出了一种高效的 CYNSN 模型胞元搜索算法。实

### 3.4 反向 CYNSN 模型评价

比较检测样本的实际测量值和复现测量值两者的 RRMS 误差以及在 D50, A, F11 光源下的色度误差,评价反向 CYNSN 模型在光谱反射率以及色度上的预测性能;分析逆向求解胞元个数,评价反向 CYNSN 模型的运算效率。同时,将该模型在 RRMS 误差、色度误差、运算效率等 3 方面和使用文献[5]中胞元搜索算法的 CYNSN 模型进行比较。对比结果见表 2 和表 3。

由表 2 中逆向求解胞元个数数据可知,使用文中提出的高效胞元搜索算法的反向 CYNSN 模型平均只

验结果证明了文中提出的胞元搜索算法能使 CYNSN 模型在色度和光谱反射率上实现高精度复制。和已有的 CYNSN 模型相比,使用文中胞元搜索算法的 CYNSN 模型在精度上相差无几,但在效率上提高了 10 倍。

### 参考文献:

- [1] WANG Bin-yu, XU Hai-song, LUO M. Ronnier. Color Separation Criteria for Spectral Multi-ink Printer Characterization [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(1): 013301.
- [2] URBAN Philipp, GRIGAT Rolf-rainer. Spectral-based Color Separation Using Linear Regression Iteration [J]. Color Research and Application, 2006, 31(3): 229-238.
- [3] URBAN P, ROSEN M R, BERNIS R S. Fast Spectral-based Separation of Multispectral Images [Z]. Final Program and Proceedings-IS and T/SID Color Imaging Conference, 2007: 178-183.

## 参考文献:

- [1] 于革刚,刘明利,孙瑞涛. 钢卷包装技术现状与发展趋势浅析[J]. 冶金设备,2005(2):48-50.  
YU Ge-gang, LIU Li-min, SUN Rui-tao. Analysis for Technology Actuality & Development Trend of the Coil Packaging[J]. Metallurgical Equipment,2005(2):48-50.
- [2] 刘明利,于革刚,孙瑞涛. 钢卷包装工艺技术研究[J]. 冶金设备,2005(3):35-38.  
LIU Li-min, YU Ge-gang, SUN Rui-tao. Research for Process of the Coil Packaging[J]. Metallurgical Equipment, 2005(3):35-38.
- [3] 杜庆华. 工程力学手册[K]. 北京:高等教育出版社,1994.  
DU Qing-hua, Mechanical Engineering Handbook[K]. Beijing: Higher Education Press, 1994.
- [4] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京:人民教育出版社,1979.  
XU Zhi-lun. Elastic Mechanics Book[M]. Beijing: People's

Education Press, 1979.

- [5] 周晓欢,于革刚. 钢板带材包装捆带受力分析研究[D]. 北京:机械科学研究院,2006.  
ZHOU Xiao-huan, YU Ge-gang. The Dynamic Analysis of the Strap for Steel Plate and Strip Packing[D]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 2006.
- [6] 罗超,鲍平. 冷轧钢卷最大约束反力分析[J]. 冶金设备, 2012(1):9-11.  
LUO Chao, BAO Ping. Analysis of Maximum Reaction Force for Cold-rolled Steel Coil[J]. Metallurgical Equipment, 2012(1):9-11.
- [7] 白振华,连家创,吴彬,等. 冷轧钢卷卷取过程内部应力三维分布的研究[J]. 钢铁,2001,36(9):42-45.  
BAI Zhen-hua, LIAN Jia-chuang, WU Bin. Research of Three-dimensional Distribution of Internal Stress in Coiling Process[J]. Journal of Iron and Steel, 2001, 36(9):42-45.

(上接第22页)

- [4] LI Chang-jun, LUO M R. Further Accelerating the Inversion of the Yule-Nielson Modified Neugebauer Model[Z]. Final Program and Proceedings-IS and T/SID Color Imaging Conference, 2008:84-88.
- [5] GUO Jin-yi, XU Hai-song, LUO M R. Novel Spectral Characterization Method for Color Printer Based on the Cellular Neugebauer Model[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(11):1106-1109.
- [6] 朱明,刘真,陈广学. 基于分区纽阶堡方程的6色印刷分色模型研究[J]. 光学学报,2011,31(7):288-297.  
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):288-297.
- [7] 金崇超,沈会良,邵思杰,等. 一种彩色喷墨打印机的颜

色特性化方法[J]. 光学学报,2011,31(12):316-320.

- JIN Chong-chao, SHEN Hui-liang, SHAO Si-jie, et al. Color Characterization Method for Colorful Inkjet Printers[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12):316-320.
- [8] 张楨杰,刘真. 三种基于分区纽介堡方程的分色算法的误差分析[J]. 包装工程,2012,33(15):88-91.  
ZHANG Zhen-jie, LIU Zhen. Errors Analysis of Three Color Separation Algorithms Based on Subarea Neugebauer Equation[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):88-91.
- [9] CHIKAKO S, TAO S, RONNIER L M. Colour Differences for Complex Images[Z]. Proceedings of the Final Program and Proceedings-IS and T/SID Color Imaging Conference, 2003:121-126.

(上接第52页)

- [5] FENG Xu-qiao, HANSEN J D, BIASI B, et al. Use of Hot Water Treatment to Control Codling Moths in Harvested California 'Bing' Sweet Cherries[J]. Postharvest Biology and Technology, 2004(31):41-49.
- [6] ADAY M S, CANER C, RAHVALLI F. Effect of Oxygen and Carbon Dioxide Absorbers on Strawberry Quality[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011(62):179-187.
- [7] 姜艳茹,付亚波,李东立,等. 分子筛改性 LDPE 活性包装膜在草莓保鲜中的应用研究[J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 1(5):61-66.  
JIANG Yan-ru, FU Ya-bo, LI Dong-li, et al. Molecular Sieve Modified LDPE Active Packaging for Strawberry Preserva-

tion[J]. China Packaging and Packaging Study, 2013, 1(5):61-66.

- [8] 钟耀广,朱蓓薇. 樱桃果实采后生理及保鲜研究[J]. 北方园艺, 2004(2):67-68.  
ZHONG Yao-guang, ZHU Bei-wei. Cherry Postharvest Physiology and Storage Technology, 2004(2):67-68.
- [9] 侯东明,江亿. 水果蔬菜薄膜气调贮藏[M]. 北京:清华大学出版社,1992:200.  
HOU Dong-ming, JIANG Yi. Fruits and Vegetables with Film MAP Storage[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992:200.