



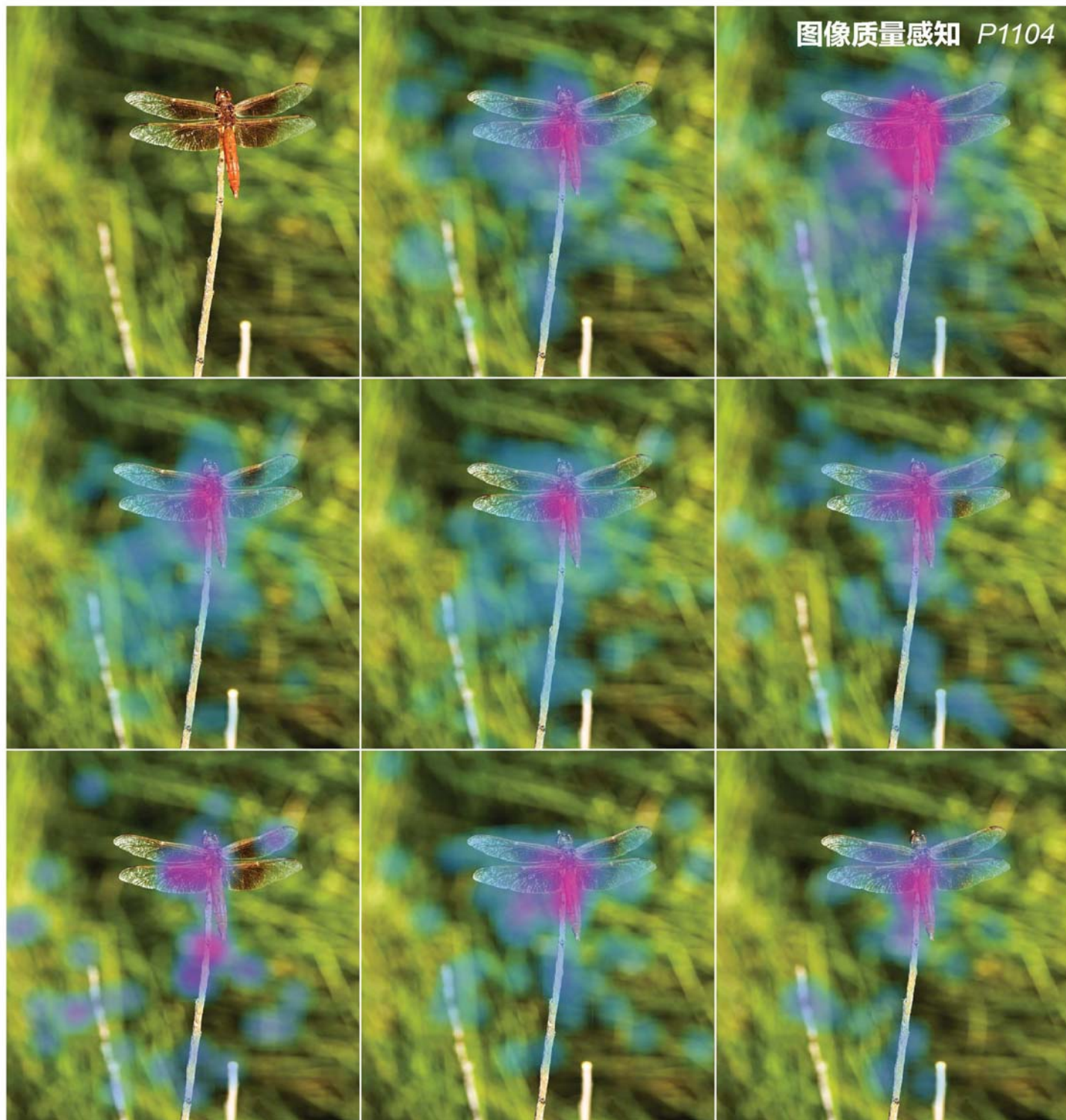
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

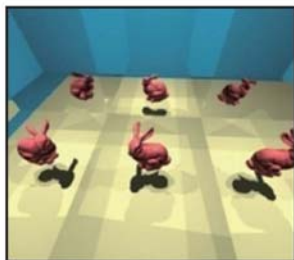
2014
07
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



多特征融合的图像自动变形
(第1012页)

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪(第1038页)

快速虚顶点光子映射的焦散
绘制(第1062页)**综述**

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强 0985

图像处理和编码

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵 0998

Lytro相机的光场图像校正与重对焦方法

周文晖, 林丽莉 1006

多特征融合的图像自动变形

肖红光, 肖树根, 刘京, 李淳芃, 陈立福 1012

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴 1021

图像分析和识别

中心投影变换的抗噪性分析

黄永东, 李三三, 杨建伟 1031

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪

宁纪锋, 赵耀博, 石武祯 1038

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青 1046

分层树结构字典编码的行为识别

周同驰, 程旭, 吴镇扬 1054

计算机图形学

快速虚顶点光子映射的焦散绘制

李瑞瑞, 秦开怀 1062

双重视图下的3维网格模型可见水印

陆尘, 朱长青, 王玉海 1068

虚拟现实与增强现实

个性化编辑的轻量化3维树木模型构建

董天阳, 纪磊, 刘思远, 范菁, 熊丽荣 1074

遥感图像处理

带距离徙动校正的压缩感知PFA成像方法

段化军, 朱岱寅 1085

结合边缘和区域的活动轮廓模型SAR图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣鲲, 符鹏 1095

第2届全国图像图形联合学术会议专栏

视线跟踪技术的图像质量主观数据库构建及其可视化

张昀, 牟轩沁 1104

丰富图像标签的正则化非负矩阵分解方法

夏召强, 冯晓毅, 彭进业 1112

CONTENTS

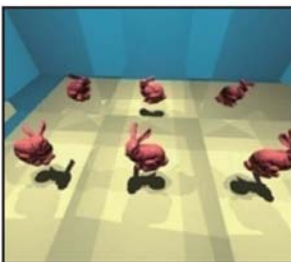
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-feature fusion-based image morphing(P1012)



Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature(P1038)



Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations(P1062)

Review

- Review of spectral printer characterization
Wan Xiaoxia, Liu Qiang 0985

Image Processing and Coding

- Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field
Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing 0998
- Light field image rectification and refocus method for Lytro camera
Zhou Wenhui, Lin Lili 1006
- Multi-feature fusion-based image morphing
Xiao Hongguang, Xiao Shugen, Liu Jing, Li Chunpeng, Chen Lifu 1012
- The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion
Bian Weixin, Feng Jufu, Luo Yonglong, Xu Deqin 1021

Image Analysis and Recognition

- Robustness to noise of central projection transformation
Huang Yongdong, Li Sansan, Yang Jianwei 1031
- Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature
Ning Jifeng, Zhao Yaobo, Shi Wuzhen 1038
- Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot
Du Mingfang, Wang Junzheng, Li Jing, Cui Guangtao, Fang Jianjun, Cao Haiqing 1046
- Action recognition using hierarchically tree-structured dictionary encoding
Zhou Tongchi, Cheng Xu, Wu Zhenyang 1054

Computer Graphics

- Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations
Li Ruirui, Qin Kaihuai 1062
- Visible watermarking for three-dimensional mesh model in two views
Lu Chen, Zhu Changqing, Wang Yuhai 1068

Virtual Reality and Augmented Reality

- Construction of lightweight three-dimensional tree models supporting personalization editing
Dong Tianyang, Ji Lei, Liu Siyuan, Fan Jing, Xiong Lirong 1074

Remote Sensing Image Processing

- PFA imaging with range migration correction by compressive sensing
Duan Huajun, Zhu Daiyin 1085
- Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image
Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng 1095

Column of UCIG'2013

- Eye tracking based image quality assessment database and visualization method
Zhang Yun, Mou Xuanqin 1104
- Regularized non-negative matrix factorization method for image tag enrichment
Xia Zhaoqiang, Feng Xiaoyi, Peng Jinye 1112

中图法分类号: TP334.8 TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)07-0985-13

论文引用格式: Wan X X, Liu Q. Review of spectral printer characterization[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7): 985-997. [万晓霞, 刘强. 打印机光谱特性化方法研究综述[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7): 985-997.] [DOI:10.11834/jig.20140701]

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强

武汉大学印刷与包装系, 武汉 430079

摘要: **目的** 打印输出技术是目前国内外图像复制领域的主流技术。打印机特征化旨在建立打印机输入控制值与输出色彩信息值之间的对应关系, 保证打印输出图像各像素色彩值的准确性。基于可见光谱的打印机特性化过程, 以图像光谱信息作为打印机特性化过程中的色彩控制依据, 可避免基于色度的打印输出过程所固有的同色异谱问题, 实现图像色彩复制领域最高级别的无条件颜色匹配。在广泛文献调研的基础上, 本文回顾了打印机光谱特性化方法各部分研究的发展历程, 分析介绍了该领域主要研究内容及其研究现状, 对打印机光谱特性化方法流程进行了较为全面的综述。**方法** 以 Yule-Nielsen 修正的光谱 Neugebauer 模型 (YNSN 模型) 为典型代表, 从打印机墨量限制方法、正向光谱预测模型、反向光谱分光模型以及色彩匹配评价度量 4 个方面, 对目前基于可见光谱的打印机特性化方法研究情况进行了总结与归纳, 并结合现有研究存在的问题对未来研究发展趋势进行了展望。

结果 综合近几年该领域研究发展情况, 认为目前打印机光谱特性化方法研究在墨量限制算法合理性、正反向建模精度等方面已经取得了较为理想的结果。然而, 尽管已有 20 多年的广泛研究, 鉴于光谱数据的高维性以及具体应用场景的多样性, 导致准确而高效的实现光谱打印机特性化仍然是一个极具难度的问题, 特别在建模效率提高、模型适用性增强、模型物理意义提升以及评价度量综合性能优化等方面, 目前研究仍存在较大的研究发展空间。

结论 打印机光谱特性化是实现图像色彩信息高保真打印复制的必要手段, 其今后将继续在图像复制领域起到非常关键作用。然而, 由于基于光谱的打印机特性化过程涉及光谱学及色度学理论、半色调呈色理论、最优化计算理论、人眼视觉机理、数字加网技术等多种理论与技术, 故其研究具有一定的难度与挑战性。本文对打印机光谱特性化方法研究现状进行了较为深入的介绍与分析, 意在使国内同行对该领域有一个较为全面的了解, 以期引起更多研究者对该领域的关注。由于篇幅所限, 许多问题未及深究。

关键词: 可见光谱; 打印机特性化; 墨量限制; 光谱预测; 光谱分光; 光谱匹配度量

Review of spectral printer characterization

Wan Xiaoxia, Liu Qiang

School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objective** Until recently, printing technology has been a kind of mainstream technology for color image reproduction. Printer characterization aims at establishing the relationship between the input control values of the printer and its output colors. It is the core of color accuracy controlling for each image pixel during the printing process. Spectral-based printer characterization conquers the metamerism problem of colorimetric characterization and thus can achieve unconditional matched color reproduction, which represents the highest level of color reproduction in the state of the art. Based on the extensive and in-depth investigation of existing articles, in this paper we review the research development of the main topics of spectral-based printer characterization and present a comprehensive survey of various existing methods, with more than 60

收稿日期: 2013-04-16; 修回日期: 2014-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61275172); 国家重点基础研究发展计划 (973) 基金项目 (2012CB725302)

第一作者简介: 万晓霞 (1965—), 女, 教授, 博士生导师, 2002 年于武汉大学获地图学与地理信息系统专业工学博士学位, 研究方向为基于光谱的色彩复制、色彩视觉感知。E-mail: wan@whu.edu.cn

related reviewed pieces of literature. **Method** This review employs the famous Yule-Nielsen modified spectral Neugebauer model as an example; critically reviews the research of spectral-based printer characterization from the aspects of ink limitation algorithm development, spectral prediction model establishment, spectral separation method development, and image color match evaluation metric optimization; and discusses future research trends according to the existing problems of the current study. **Result** Based on the comprehensive survey of the current research situation, significant progress has been made in the field of ink limitation algorithm development, spectral prediction modeling, and spectral separation algorithm development. However, in spite of more than 20 years of research and development in this field, the general problem of how to precisely and efficiently conduct spectral-based printer characterization still exists, not only because of the high dimensionality of spectral data but also because of the variety of actual applications. Therefore, in many aspects, such as improving modeling efficiency, enhancing model applicability, interpreting the model's physical meaning, and optimizing evaluation metrics, further work is still needed. **Conclusion** Spectral-based printer characterization is an essential means for high-fidelity color reproduction and will continue to play an important role in the image reproduction workflow. However, because of its interdisciplinarity among several subjects, which involve spectroscopy and colorimetry theory, halftone color rendering theory, optimization theory, human vision theory, and digital halftoning technology, difficulties surely exist. This paper introduces the main topics and analyzes the current research situation of spectral-based printer characterization. This overview aims to help researchers in this area to have a more intuitive understanding of existing spectral-based printer characterization methods and to attract more researchers' attention in this field. Given the space limitation, some issues are not discussed in detail.

Key words: spectral reflectance; printer characterization; ink limitation; color prediction; color separation; spectral match metric

0 引言

打印输出技术是目前国内外影像复制领域的主流技术。此类色彩复制技术通过分色与加网,以二值化数据控制打印设备着色剂(如墨粉或墨滴)在承印介质上的疏密排列与叠合,从而实现图像色彩的准确再现。其中,分色指为实现色彩的准确复制而对着打印色剂种类及其组分进行的分解性预测;加网则是将原始图像色彩信息转化为打印设备可识别的二值化信息(又称为半色调数据,即控制打印机在特定位置是否打印着色剂的0-1数据)的过程^[1]。打印设备特性化旨在建立打印机输入控制值与输出颜色值之间的双向对应关系,从而实现高精度色彩输出控制^[2],其对于保证打印分色的准确性具有重要意义。

可见光谱反射率是指在可见光各波段入射光量与反射光量之间的比率,该信息是物体反射呈色条件下色彩真实表征的本质信息^[3-5],如

$$\begin{aligned} R &= \int_{380}^{780} r(\lambda) E(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\ G &= \int_{380}^{780} g(\lambda) E(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\ B &= \int_{380}^{780} b(\lambda) E(\lambda) P(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} X &= \int_{380}^{780} \bar{x}(\lambda) E(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\ Y &= \int_{380}^{780} \bar{y}(\lambda) E(\lambda) P(\lambda) d\lambda \\ Z &= \int_{380}^{780} \bar{z}(\lambda) E(\lambda) P(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $r(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ 、 $b(\lambda)$ 分别表示色彩信息获取过程中获取设备在RGB 3个通道的光谱灵敏度,即感光元件对各波段色光的敏感程度, $E(\lambda)$ 为照明光源光谱功率分布, $P(\lambda)$ 表示物质色彩的光谱反射率信息, λ 表示380~780 nm范围内的可见光波长, R 、 G 、 B 值即为设备获取的图像色彩信息值; $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 表示人眼视觉匹配函数,即人眼(观察者)对各波段色光的敏感程度, X 、 Y 、 Z 值为CIE三刺激值,其表示在特定光源照明条件下人眼对物体反射色光的感受情况^[3]。

传统色彩复制过程是以 R 、 G 、 B 、 X 、 Y 、 Z 数据为基础的复制,其实现的是在特定光源、特定观察者条件下基于 R 、 G 、 B 、 X 、 Y 、 Z 值的有条件的色彩匹配,即色彩色度复制^[3]。由式(1)(2)可知,对于具有不同光谱反射率的色彩,在特定照明观察条件下,其 R 、 G 、 B 、 X 、 Y 、 Z 值可能相同,但当照明及观察者条件改变时,其色彩匹配将无法实现,该问题即为同色异谱问题。

为解决此问题,基于光谱的色彩复制技术应运

而生。其通过对色彩表征最具特征性的物质色彩光谱反射率信息 $P(\lambda)$ 的准确复制, 克服传统色度复制方法所固有的同色异谱缺陷, 从而实现环境无关、场景无关、观察者无关的无条件色彩再现^[6]。近年来, 在设备特性化研究领域, 从可见光谱维度实现打印设备的特性化, 已成一大研究热点^[7-11]。

基于光谱的打印设备特性化过程主要分为打印机墨量限制、正向光谱预测建模、反向分色建模以及色彩匹配度量评价4个部分内容^[12], 如图1所示。其中, 墨量限制是指为了避免墨量超限问题所采取的墨量压缩过程; 正向光谱预测建模的含义为建立从打印机控制值(常见为CMYK值, 通常以0~1之间的面积率形式表示)到输出光谱反射率之间的预测模型, 即已知打印机控制值求解输出光谱值; 反向分色建模的含义恰与此相反, 为在已知待复制光谱信息的前提下, 反向求解可打印出该色彩的打印机着色剂组分。在上述正反向建模过程中, 模型的构

建及优化都是以相关色彩匹配度量的最大或最小化为依据的, 因此选取合理的建模度量对于特性化过程精准的实现意义重大。

图1中分隔线以上部分即为典型的打印机光谱特性化流程。其中, 虚线部分表示正向建模过程, 该过程的实现是通过打印若干已知墨量值色块所组成的样本集、测量获取其光谱信息, 并利用相关模型进行物理分析与数据拟合而实现的。在此过程中, 原始墨量值(或称理论面积率值)首先要通过相关墨量限制算法进行压缩, 以避免墨量超限问题; 同时, 模型具体参数的确定则通过基于相关度量的最优化计算求得。加粗实线部分为反向分色建模过程, 该过程是打印机特性化的最终目标, 其与正向建模类似, 都是在墨量限制、度量优化、打印样本、测量建模等步骤的基础上实现的。其特殊之处在于反向建模是以正向建模为基础的, 其实质为通过最优化方法对正向模型进行反转, 因此其建模过程更偏重于数学层面。

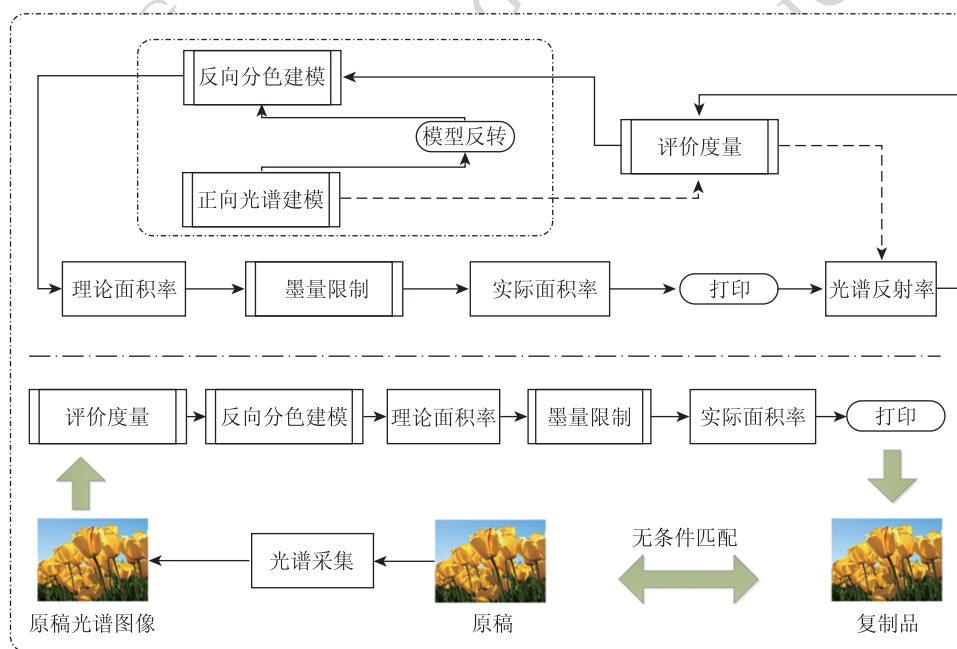


图1 基于光谱的打印机特性化基本流程图

Fig. 1 Flow diagram of spectral printer characterization

图1中分隔线以下部分表示基于光谱的打印机特性化在光谱色彩复制流程中的具体作用。由前文所述可知, 打印机特性化的最终目标为实现基于光谱的高精度分色。因此, 在特性化流程完成条件下, 对于任意原稿, 在获取其光谱信息后, 皆可利用特性化过程中的反向模型实现基于光谱的准确分色, 并在墨量限制、度量控制等步骤组成的标准打印输出

流程下实现原稿光谱信息的准确复制。

1 墨量限制算法

在打印过程中, 受纸张与着色剂自身属性的影响, 打印纸张所能承载的最大墨量存在特定上限, 当墨量超过此上限时, 不仅打印色彩再现的范围不会

提高,反而会因墨层表面出现的起皱、模糊、积墨甚至溢出等现象,影响最终的输出效果,如图2所示。

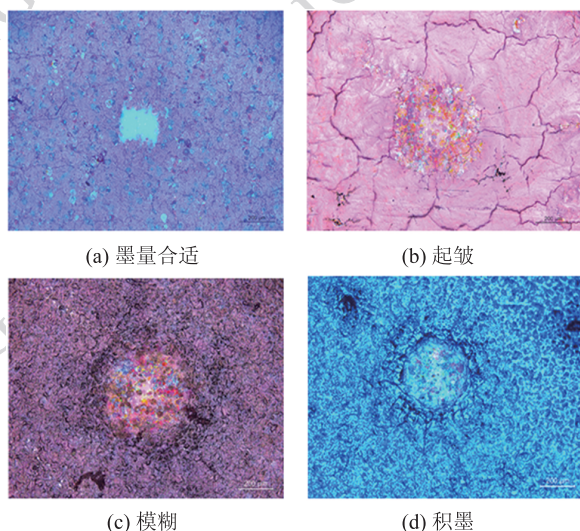


图2 喷墨打印墨量超限情况显微观察图^[13]
(显微镜100倍放大)

Fig. 2 Micrographs of four different ink-holding conditions of the center blank point

为解决上述问题,需要利用墨量限制算法对打印机输入控制值进行限制,以保证在特定设备、纸张及着色剂组合条件下输出墨量的合理性。目前较为常用的方法为结合打印设备供应商提供的介质墨量概览文件,利用相关输出控制软件打印特定单色及多色叠印梯尺,并依据梯尺的墨量情况对单通道墨量及多通道墨量进行设定,从而实现墨量限制^[14-15]。虽然此类方法可以解决打印过程中的墨量超限问题,但由于需要顾及实际应用过程的简便性,上述方法大都仅从单通道墨量、多通道墨量以及总墨量等少数叠印情况对打印墨量进行限制,对实际打印过程中复杂的墨层叠合情况缺少足够的考虑。此外,由于此类方法大都内嵌于输出控制软件之中,实际操作者对于具体算法一般无从得知,从而导致在研究及应用过程中,操作者仅能依此方法解决墨量限制问题,但无法对墨量限制后的实际打印色域(即打印设备所能再现的色彩范围)损失情况获得足够的了解。

对打印墨量进行准确直接控制的最为合理的方法为利用 Postscript 等打印机控制语言^[16]对打印喷头的喷墨量进行控制。在此基础上,Tzeng 等人^[17]提出了子打印机模型的概念,通过将多色打印机细分为若干三色及四色子打印机的方法,避免了多色

叠印所导致的墨量超限情况。2004年,Chen 等人^[18]针对六色打印机的特性化过程,提出了一种利用墨量不超限样本数据来预测墨量超限样本数据的方法,也间接避免了多色叠印墨量超限的问题。随后,Urbán^[19]提出的基于 Neugebauer 基色线性插值的方法,实现了从打印机控制值色空间到墨量限制色空间的全局压缩,为半色调呈色过程中的墨量控制提供了更为直观的方法。

上述方法在墨量限制方面都可以达到满意的效果,但由于都未对墨量限制对打印系统的色域再现能力所造成的影响进行讨论,因此在设备色域再现方面缺少说服力。为此,Wan 等人通过墨量限制情况视觉评价样本的设计(图3),结合显微观察方法,提出了一种基于非线性插值的墨量限制方法,并对墨量限制算法对最大光谱色域的再现能力进行了验证,取得了较为理想的结果^[13],如图3所示,当墨量超限时,样本中空白部分将会出现图2所示的起皱、积墨等现象。



图3 墨量限制情况视觉评价样本^[13]

Fig. 3 Ink spilling judging samples^[13]

2 打印机正向光谱预测模型

打印机正向光谱建模是指建立从打印机数字控制值到输出光谱值的映射关系。2000年,Wyble 等人^[12]对于基于光谱的打印机正向建模研究进行了全面深入的总结,并将正向模型分为回归模型(regression model)以及一级原理模型(first principal model)两大类。其中,回归模型旨在利用回归方法提高模型对打印光谱值的预测精度,而并不将具体的半色调呈色过程描述作为研究重点;相反,一级原理模型更加注重提高模型物理过程描述的合理性,而将回归拟合精度的提高视为次要内容。

综合分析打印机正向建模领域的经典研究成果以及现阶段该领域的研究发展情况,本研究认为在模型分类过程中,不同类模型之间并不存在明显的分类划分标准,即绝大部分模型都是以一级原理分

析为物理基础,以回归拟合为后续优化方式构建的,模型间的区别仅在于物理分析与数学回归二者比重的不同。从方便论述的角度,本文认为将 Wyble 等人提出的回归模型细分为以查找表^[20]、神经网络^[21]、遗传算法^[22]等为典型代表的数学回归模型以及以 YNSN (Yule-Nielsen modified spectral Neugebauer) 模型^[23]为典型代表的物理回归模型更为准确,因为该两大类回归模型在是否考虑半色调呈色的物理过程问题上存在本质区别。

纵观上述3类模型,由于一级原理模型的建模过程主要针对半色调呈色物理过程的描述^[24-27],其正向光谱预测精度相对较低,且模型反向化较为复杂,此外对特殊的光学分析设备也存在依赖性,因此并不适合于打印机特性化过程;数学回归模型通过输入输出数据的黑箱式拟合,可以获得较高精度,然而由于光谱反射率数据的高维性,此类方法精度的提高往往是以海量采样、海量存储以及复杂运算为代价的,并不适合实际应用;相比之下,物理回归建模方法,兼顾了物理过程分析与数学回归拟合,因此具有采样少、精度高、反向简便等优势,是目前正向光谱预测建模研究领域的主流方法。因此,针对物理回归模型,通过对在该领域研究占绝对主导地位的 YNSN 模型的演变过程及其研究现状的论述,对目前打印机光谱特性化过程中的正向建模研究情况进行介绍。

2.1 经典模型

2.1.1 Murray-Davies 公式

Murray-Davies 公式^[28]是半色调打印模型研究的开端,后续的模型都是在此公式的基础上建立的。该公式从着色剂对光线的吸收和纸张对光线的反射两方面进行加权求和以求解实际打印光谱,可以看成是依据纸张光谱与着色剂实地(即100%着色的样本)光谱之间的比重对实际输出光谱所进行的线性插值预测,如图4所示。

图4中, P_s 表示实地网点的反射率, a 表示网点面积率。其中,网点指设备所能实现的最小的打印单元。在单位面积内打印网点所占的比例称为网点面积率。故着色剂吸收部分的光量为 $a(1-P_s)$,因该模型仅考虑着色剂吸收及纸张反射两部分光量,故整个半色调网点所反射的总光量 $P(\lambda)$ 为 $1-a(1-P_s)$ 。为精确表示,将纸张反射率以 P_w 表示(图4中将其近似为1),可得

$$P(\lambda) = aP_s(\lambda) + (1-a)P_w(\lambda) \quad (3)$$

式中, λ 表示可见光波长。

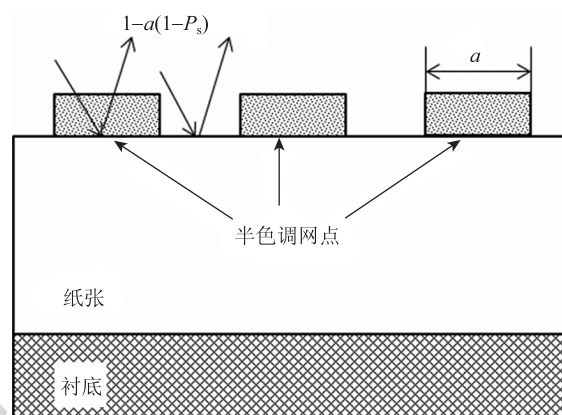


图4 Murray-Davies 模型构建原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the modeling principles of Murray-Davies model

Murray-Davies 公式简明直观地对半色调呈色进行了描述。然而,由于对于着色剂呈色实际情况缺乏足够的认识,此模型的光谱预测精度较低,总结起来其主要存在如下问题:

1)从能量守恒角度分析,从印品表面入射的光,应出现吸收、反射、透射、散射等多种情况,如图5所示。其中,光在印品表面及内部的行为主要包括纸张表面反射(A)、着色剂吸收(B)、着色剂反射(C)、纸张内部散射(D)、纸张吸收(E)、纸张着色剂双重吸收后的反射(着色剂层射出)(F)、纸张着色剂双重吸收(G)、纸张着色剂三重吸收后的反射(非着色剂层射出)(H)、纸张着色剂双重吸收后的反射(非着色剂层射出)(I)和承印物透射损失等^[29](J)。Murray-Davies 公式仅用前两种光路来表示半色调呈色过程,在物理分析的合理性方面存在问题。

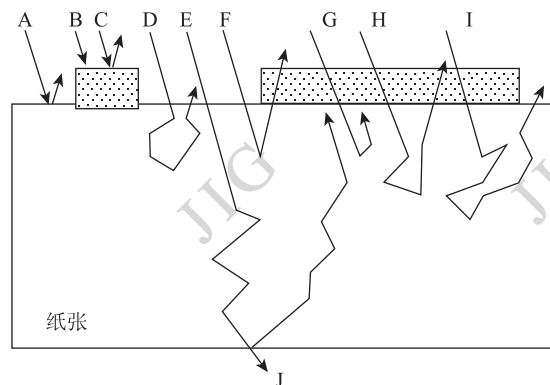


图5 半色调呈色光路示意图

Fig. 5 Schematic diagram of light paths of halftone prints

2)在打印过程中,受着色剂铺展以及光散射作用的影响,着色剂的面积率往往存在着物理网点扩

大及光学网点扩大问题^[30],这也导致了用 Murray-Davies 公式预测的打印光谱值往往高于实际测量值。

基于上述原因,研究者们引入有效网点面积率 a_{eff} 的概念,并将原始的网点面积率定义为理论网点面积率 a_{tho} ^[12]。有效网点面积率定义为满足 Murray-Davies 公式的网点面积率,即可以利用该公式准确预测打印光谱时的面积率。事实上,在实际应用中,Murray-Davies 公式的主要意义即在于利用其反向公式求解有效网点面积率,并与理论网点面积率建立对应网点扩大曲线,进而利用有效网点面积率进行后续半色调光谱呈色预测建模。

2.1.2 Neugebauer 方程

Murray-Davies 公式仅对单色打印的半色调呈色原理进行了描述,并未对多色叠印的情况进行讨论。为此,Neugebauer 方程^[31]通过设定基色并计算各基色网点面积率的方法,利用各基色反射率与对应的网点面积率的加权和求得叠印网点的光谱反射率,从而将 Murray-Davies 公式扩充到多色叠印领域。

Neugebauer 方程的光谱形式为

$$P(\lambda) = \sum_{i=1} A_i P_i(\lambda) \quad (4)$$

式中, $P_i(\lambda)$ 表示第 i 个 Neugebauer 基色的光谱反射率, A_i 为利用 Demichel 方程^[29] 求得的各基色面积率。

以 CMY 三色打印为例, Demichel 方程求解的各基色面积率为

$$\begin{aligned} A_w &= (1 - a_{c, \text{eff}})(1 - a_{m, \text{eff}})(1 - a_{y, \text{eff}}) \\ A_c &= a_{c, \text{eff}}(1 - a_{m, \text{eff}})(1 - a_{y, \text{eff}}) \\ A_m &= a_{m, \text{eff}}(1 - a_{c, \text{eff}})(1 - a_{y, \text{eff}}) \\ A_y &= a_{y, \text{eff}}(1 - a_{c, \text{eff}})(1 - a_{m, \text{eff}}) \\ A_{cm} &= a_{c, \text{eff}}a_{m, \text{eff}}(1 - a_{y, \text{eff}}) \\ A_{cy} &= a_{c, \text{eff}}a_{y, \text{eff}}(1 - a_{m, \text{eff}}) \\ A_{my} &= a_{m, \text{eff}}a_{y, \text{eff}}(1 - a_{c, \text{eff}}) \\ A_{cmy} &= a_{c, \text{eff}}a_{m, \text{eff}}a_{y, \text{eff}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, c, m, y 表示青、品、黄三色墨色, a_{eff} 为 Murray-Davies 公式求得各墨色的有效网点面积率。

Neugebauer 方程直观地描述了多色叠印的光谱呈色情况,然而由于此模型也仅考虑了半色调呈色过程中纸张反射与着色剂吸收的作用,并未考虑光线的透射、散射、吸收等因素的影响,因此该模型的光谱预测精度也较低。此外,模型的线性插值结构

限制了模型优化的自由度,也是造成其光谱预测精度较低的一大因素。

2.1.3 Yule-Nielsen 方程

1951 年, Yule 和 Nielsen 在其对半色调呈色过程的研究^[32] 中发现, 色光往往并不是在其射入纸张的位置进行反射。他们预计, 大约有 25% ~ 50% 的光线会从纸张上入射, 而从网点的着色剂部位射出, 反之亦然, 这也造成了前文所述的光学网点扩大问题。因此, 在建立模型时, 应综合考虑光的透射和散射作用的影响, 如图 6 所示。

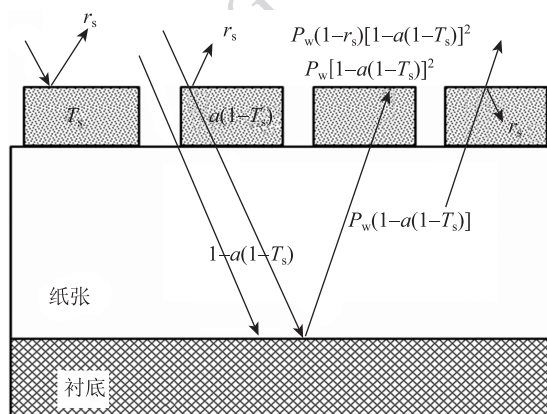


图 6 Yule-Nielsen 公式构建原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the modeling principles of Yule-Nielsen equation

首先,入射光入射到网点单元时,会有 $a(1 - T_s)$ 的光被着色剂吸收,图 6 中, T_s 表示光线在着色剂的透射部分。因此,当 1 单位光射入网点单元时,其透过部分的 $1 - a(1 - T_s)$ 将在纸张中进行反射和散射。当光线再次到达网点单元表面时,其总量将减弱为 $P_w[1 - a(1 - T_s)]$,其中 P_w 表示纸张反射率,且 $0 < P_w < 1$ 。当此部分光再次经过着色剂层时,着色剂会再次吸收,从而使剩余光通量降低为 $P_w[1 - a(1 - T_s)]^2$ 。最后,考虑到在光入射过程中的着色剂反射光量 r_s ,则光入射过程中总的光谱反射率 P 应为

$$P = r_s + P_w(1 - r_s)[1 - a(1 - T_s)]^2 \quad (6)$$

式中,着色剂吸收率 T_s 可通过求解式(6)在网点为实地时的值获得,即令 $a = 1$,并通过实验测量求得实地网点的光谱反射率 P_s 以及纸张反射率 P_w ,从而求得

$$T_s = \{ (P_s - r_s) / [(P_w(1 - r_s))] \}^{1/2} \quad (7)$$

上述 Yule-Nielsen 模型是综合考虑色光、纸张以及着色剂三者相互关系的众多模型中最为简单的

情况。光线在纸张中, 往往会存在着多次的反射与折射。因此, 为了弥补上述缺陷, Yule-Nielsen 提出了一个修正系数 n , 以对其模型进行完善, 即

$$P = r_s + P_w(1 - r_s)[1 - a(1 - T_s)]^n \quad (8)$$

在实际应用中, 由着色剂反射的光量 r_s 往往很小 ($r_s < 4\%$), 假设此部分光亮可以忽略, 则式(8)在实地网点 ($a = 1$) 条件下可以简化为

$$T_s = (P_s/P_w)^{1/n} \quad (9)$$

忽略 r_s 部分, 并将式(9)代入式(8), 并以 λ 表示波长, 以有效网点面积率 a_{eff} 代替 a 则可得 Yule-Nielsen 公式最为常见的形式

$$P(\lambda)^{1/n} = a_{\text{eff}} P_s(\lambda)^{1/n} + (1 - a_{\text{eff}}) P_w(\lambda)^{1/n} \quad (10)$$

综上所述, Yule-Nielsen 公式对光在着色剂中的透射、在纸张中散射、折射与反射等因素进行了考虑, 并以修正系数 n 对上述因素进行了统一表征。从数学角度来看, 当 $n = 1$ 时, Yule-Nielsen 公式完全等同于 Murray-Davies 公式, 因此可以认为 Yule-Nielsen 公式是对 Murray-Davies 公式在自由度上的扩充, 故其光谱预测精度必定优于 Murray-Davies 公式。

2.1.4 YNSN 模型

1951 年, Yule 等人将 n 值非线性修正方法应用于 Neugebauer 模型, 大幅度提升了 Neugebauer 模型的精度^[32]。但受当时实验条件的影响, 其模型采用的是密度形式。将上述 Yule-Nielsen 修正的 Neugebauer 模型扩充到光谱色空间, 即形成 YNSN 模型

$$P(\lambda) = \left[\sum_{i=1}^n A_i P_i(\lambda)^{1/n} \right]^n \quad (11)$$

相比于前期所有模型, YNSN 模型兼顾了半色调呈色的物理分析与数学回归优化, 因此取得了较为理想的光谱预测精度。此后, 相关领域学者在此模型基础上又进行了诸多改进与优化, 并将正向建模精度及模型实用性进一步提高。

2.1.5 Cellular YNSN 模型

为了进一步提高 YNSN 模型的正向光谱预测精度, Heuberger^[33] 与 Rolleston^[34] 几乎同时提出了细胞分区优化的 YNSN (CYNSN) 模型。该模型通过增加采样节点数的方法增加 Neugebauer 基色数量, 进而提高了 YNSN 模型中非线性插值预测的精度。相关研究证明, CYNSN 模型基本上可以认为是目前正向光谱预测领域预测精度最高的模型, 并得到了较为广泛的应用^[35-36], 但由于该模型建立需要打印过

多的建模样本, 故其建模过程相对较为复杂。

上述 5 类模型的发展过程即为目前基于光谱的打印机特性化正向建模研究的主要演变过程。其中, YNSN 模型以及 CYNSN 模型的优化, 在目前该领域研究中占据了相当大的比重。值得注意的是, 在基于光谱的半色调呈色预测研究领域, 也存在着诸如 Beer 定律模型、Kubelka-Munk 模型、Clapper-Yule 模型、Kruse-Wedin 模型、点扩散函数理论模型、MTF (modulation transfer function) 理论模型等经典模型^[29], 但此类模型更加注重对半色调呈色物理过程的分析, 综合分析模型预测精度、模型反向化简易程度、光学设备依赖性等因素, 其整体表现劣于 YNSN/CYNSN 模型, 故目前应用此类模型进行特性化反向建模的研究鲜见报道。基于上述原因, 本研究将该类模型统一归化为一级原理模型, 此处暂不讨论。

2.2 研究进展

如上文所述, CYNSN 模型的建立主要包含有效网点面积率优化、Neugebauer 基色优化、 n 值非线性修正以及细胞分区方法优化等步骤。因此, 本部分研究主要从上述 4 个角度对正向光谱预测建模研究现状进行论述。此外, 考虑到加网方式对半色调呈色过程的影响, 对此方面的研究情况也将进行相应介绍。

2.2.1 有效网点面积率优化

如前文所述, Murray-Davies 公式的主要作用在于有效网点面积率的求解。然而, 由于光谱反射率数据的高维性, 不同波段的 Murray-Davies 公式求得的有效网点面积率并不相同, 为此 Wyble 等人^[12] 的论述中提到了最小二乘法以及最小波长法两种有效面积率求解方法。其中, 最小二乘法旨在寻找令预测光谱均方根误差 (RMS) 最小化的最优解, 而最小波长法认为利用光谱波段中量值最小的波段求得有效面积率最为合适, 因为该波段值受网点面积率变化影响较大。

考虑到纸张光谱反射率与网点面积率之间的非线性关系, Arney, Zeng 以及 Engeldrum^[37-38], 通过引入半色调加网的空间分辨率以及着色剂在网点中的分布系数等概念, 建立了纸张反射率及网点面积率之间的反相关函数关系, 从而推广了 Murray-Davies 模型, 并以此对有效网点面积率的求解进行了优化。Hersch 等人^[39] 考虑到不同着色剂叠印情况下由着色剂铺展所导致的网点扩大变化情况, 利用打印多色叠印梯尺获取多条网点扩大曲线的方法提高了有

效网点面积率的求解精度。基于与 Hersch 方法的类似思想,Qu 等人^[25]提出了从三刺激值维度求解有效网点面积率的方法,也获得了较好的建模精度。

上述方法都是从半色调呈色原理出发,利用回归方法对面积率进行求解。为了更加直观地获得半色调印品表面的网点面积率,Namedanian 等人利用电子显微分析技术,提出了一种将反射测量光谱与透射测量光谱相结合的网点面积率求解方法,并实现了光学网点扩大与物理网点扩大的分离表述^[30]。然而,由于方法对电子显微设备的要求较高,故对于特性化过程其实用性不强。

综合看来,目前有关有效网点面积率优化的方法相对较多,这也一定程度上决定了后续正向建模方法的多样性。

2.2.2 Neugebauer 基色优化

相对于面积率优化方式的多样性,通过优化 Neugebauer 基色提高正向模型预测精度的方法相对较少。其中,具有代表性的是为 Balasubramanian 等人提出的方法^[40]。该方法考虑到原始基色在光谱测量过程中可能存在的噪声误差会影响模型精度,因此通过迭代方法相继进行基色及面积率的优化,以得到最优的基色组合以及网点扩大曲线。

2.2.3 n 值非线性修正

Yule-Nielsen 针对模型预测光谱与实际测量光谱之间的非线性关系所提出的修正系数 n ,对于正向建模精度的提高具有重要的意义。迄今为止, n 值的研究一直是基于光谱的打印机特性化领域的一大热点。简要说来,其研究内容主要分为 n 值的优化求解以及物理意义解释两方面。

1) n 值求解。受半色调呈色方式、纸张着色剂光学特性、加网方式以及打印环境等因素的影响,迄今为止不同研究中关于 n 的取值存在明显差异。在早期研究中,大部分研究模型优化所得 n 值都在 1~3,部分近期研究也得到了相似的结论^[7,8];然而,Berns 等人认为在对高分辨率喷墨打印机进行特性化建模过程中,当 n 取值大于 5 时模型更为合理;2006 年,Lewandowski 在对陶瓷喷墨打印机进行建模时甚至发现,当 n 取负值时该模型可以获得最高的光谱预测精度^[41]。由此可见,受打印过程中多种因素的影响,最优 n 值的取值存在多样性。针对此种情况,研究者已经基本达成了共识,即 n 值难以用数学公式予以表述,最优的 n 值应由实验方式得出^[42]。

在 n 值求解方面,较为常用的方法为分步采样枚举法及迭代求解法,其核心思想都是针对特定样本集建模精度的最优化计算^[12]。除上述两类全局 n 值方法外,最近几年研究者在正向建模过程中,提出了分区 n 值的概念。例如,Lino 与 Janiak 等人提出了从光谱维度回归求解 n 值的方法,该方法将 n 值从 1 维标量扩展为基于波长的向量函数,从而避免了单一 n 值无法满足不同波段光谱同时准确预测的问题,实现了正向模型精度的大幅提高^[43]。此外,2010 年 Rossier 等人考虑到不同墨色在网点扩大物理及光学特性上可能存在的差异,利用各个墨色分区求解 n 值的方法,也实现了 YNSN 模型精度的提高^[44]。

2) 物理意义解释。由于 n 值的引入使原有公式不再满足半色调呈色过程中的能量守恒定律^[3],因此其意义更多地在于以参数的形式对 Murray-Davies 公式及 Neugebauer 模型的线性结构进行优化。尽管如此,由于此方法确实显著提高了模型预测精度,因此可以推断 n 值的引入在一定程度上抵消了 Murray-Davies 公式及 Neugebauer 模型仅考虑纸张反射和着色剂吸收作用所造成的预测误差,因此也必然具有一定的物理意义。

1978 年,Ruckdesche 与 Hauser 的研究对不同 n 值条件下 Yule-Nielsen 公式的物理意义进行了尝试性的解释,并对纸张散射特性及打印加网方式等因素对于 n 值取值的影响进行了分析^[45]。Shiraiwa 等人^[46]将 n 为整数时的 Yule-Nielsen 公式进行展开分析,并通过其展开式与 Murray-Davies 公式之间比较,对由网点扩大引起的印品变暗问题进行了解释。Arney 等人提出了从加网方式及网线频率等角度描述 n 值的经验公式,从而部分阐明了 n 值所包含的物理信息。2007 年,Soler 等人^[47]从广义平均的角度建立了 n 值取值与纸张着色剂见光散射情况的关联性,从而进一步解释了不同条件下 n 值取值的物理意义。

2.2.4 细胞分区优化

近年来,为了提高光谱预测的精度,分区优化的方法已成为了正向建模研究领域的主流。Guo^[9]、Wang^[7]和 Rossier^[48]等人利用细胞分区方法对 Yule-Nielsen 公式、Neugebauer 方程以及 YNSN 模型进行了优化,并通过与传统模型比较证实了细胞分区方法在预测精度方面的优势。1992 年,Stokes 等人^[49]提到,人眼区分两份图像间色彩差异的 CIELAB 色差阈值大约为 2.284,而利用上述方法构

建正向模型的特性化精度基本都已满足此条件,由此可见,CYNSN模型在精度方面已符合现代高端色彩复制领域的要求。

尽管CYNSN模型精度较高,其在建模样本方面的海量需求决定了其并不适合一般场合的应用。CYNSN模型建模所需打印的色块样本数量为

$$N = C^i \quad (12)$$

式中, N 表示样本数量, i 为打印墨色数, C 为细胞节点数。以7色打印为例,当节点数为4时,所需打印色块数也已达16384个,而且随着细胞采样数目的增加,采样数目还会以更大的增幅增长。

因此,如何在采样数量与模型精度之间寻找平衡或利用非均匀采样方法减少采样数量,已成为CYNSN建模方面需要解决的问题。

2.2.5 加网方式

目前,半色调呈色领域常用的加网方式主要由旋转加网、点对点加网以及调频加网等,其中调频加网在目前打印领域最为常用^[50]。不同加网方式,会对正向光谱预测模型的建模过程产生重要影响。例如,Rogers等人^[51]从随机加网过程中不同墨色通道加网独立性的角度对Neugebauer建模精度的影响进行了分析,并从加网角度方面对双色Neugebauer模型中Demichel公式成立的条件进行了讨论。随后,Amidror进一步对Demichel公式成立条件进行了推理,并得出了完整的判断标准^[52]。

综上所述,尽管目前常用的YNSN模型从物理意义上来看对多数半色调呈色建模并不十分准确,然而在 n 值优化及细胞分区等方法的修正下,其依然可以获得较好的正向预测精度,这更进一步证明了目前此类物理回归模型是物理分析与数学拟合的统一体的判断。

3 打印机反向模型

在特性化过程中,打印机反向建模是指建立从待输出光谱反射率信息到原始打印机控制值的反向映射。相比于正向建模过程中兼顾半色调呈色原理的物理分析与数学拟合的特点,反向算法仅考虑如何高精度地实现正向模型的反转。同时,由于反向模型的建立是以正向模型为基础的,故正向模型的精度会直接影响反向模型精度。

目前基于正向模型的模型反转存在多种算法。在实际模型反向过程中,具体流程的差异也增加了

反向建模方式的多样性。为此,本部分主要从反向算法及过程优化两方面,对目前基于光谱的特性化反向建模方法进行论述。

3.1 反向算法

从数学结构上来看,YNSN模型并不可逆,因此目前的反向算法都是以特定评价度量为依据,通过最优化计算实现的。2001年,Taplin将AMOEB、POWELL、FRPR及DFP等算法^[53]应用于反向分色模型,从分色精度及运算速度等方面对各算法进行了比较,并将DFP算法定为最优算法,并利用多个色彩检验样本集对其反向建模精度进行了检验。随后,Urbn结合其在YNSN反向建模,建模速度提升及CYNSN模型最优细胞选择算法等方面的研究成果^[54],提出了面向CYNSN反向建模的线性回归迭代算法,并取得了较好的结果。由于此类方法主要基于向量及矩阵的线性运算,因此在建模速度上相比前述算法有了较大提升。随后,Li等人利用奇异值分解对此类方法进行了进一步优化,使其反向建模速度进一步提升,并提高了最优细胞分区算法的准确性^[55]。

3.2 过程优化

相对于算法创新,在特性化过程中,也存在诸多过程优化方法。2000年,为了降低特性化模型的维度,Tzeng等人提出了特性化研究领域的一个重要假设,即多色打印机模型可以由若干三色及四色的子打印机模型组合而成^[17]。自此,基于打印机子模型思想的CYNSN模型特性化方法在后续的特性化流程中得到了广泛的使用^[7,35-56]。2010年,王义峰等人提出了与此类似的基于色域划分^[57]的打印机特性化方法,也取得了建模精度的提高。由于此类方法引入了子模型及细胞分区思想,因此在子模型构建、最优分色子模型选择、最优分色细胞选择等方面增加了反向模型的自由度,为特性化研究过程的进一步优化提供了可能。

除此之外,考虑到特性化模型对于打印方式、加网方式、纸张着色剂特性等因素的依赖性,有关如何利用特性化标定的方法建立不同打印机特性化模型之间的关联性,从而避免重复打印建模样本的相关研究^[35,58-59]也是最近几年打印机特性化领域的研究热点。

4 评价度量

在特性化建模过程中,正向模型参数优化及模

型反向的最优化计算,都是以相关色彩评价度量的最大或最小化为基础的。目前,在基于光谱的打印机特性化研究领域最为常用的度量为光谱均方根误差 RMS 以及色度误差 CIEDE2000^[29]。然而,由于上述两类误差之间所存在的非线性关系^[60],当利用光谱误差最小化进行特性化时,色度误差可能较大,从而造成特性化视觉效果较差的问题;如果依据色度误差进行特性化,则无法克服同色异谱问题。为此,如何选择合适的颜色匹配度量,使得特性化过程既能克服同色异谱问题,也能在色度判断上获得较为一致的结果,是评价度量研究的主要目的。

目前在基于光谱的色彩匹配评价领域主要存在色度误差、光谱误差、加权光谱误差以及同色异谱误差等 4 类度量^[60]。由于其对于色彩光谱匹配的侧重各有不同,因此在选择相关度量进行特性化建模时,所得结果会很大程度地受其影响。2002 年,Imai 等人^[60]对上述问题进行了全面总结,但并未对此提出具体的解决方法。2005 年,López 等人^[61]提出了一种色度与光谱加权混合度量,并将其应用于光谱匹配领域。然而,由于该方法缺少对权重系数确定方法的分析与论证,故对于实际应用缺少实质性的指导意义。2012 年,Wang 等人^[56]引入多光源下平均色差的概念从而将色度误差与同色异谱误差相结合,并以此作为最优化度量进行特性化建模,实现了各类光谱匹配度量精度在平均值范畴的全面提高。然而,由于该研究仅以平均值表现其度量评价情况,并未对误差最大值等特殊情况进行讨论,因此并未从根本上解决特殊条件下光谱误差与色度误差评价结果不一致的问题。

综上所述,尽管已有学者在光谱匹配评价度量方法进行了相关探索,但目前对于打印机特性化光谱匹配度量选择问题,仍未得到合理的解决。

5 结 语

本文从打印机墨量限制算法、正向光谱预测模型、反向光谱分光模型以及相关最优化度量 4 个方面,对基于光谱的打印机特性化方法研究现状进行了总结与归纳,并对目前该领域研究所存在的若干问题进行了讨论。综合近几年研究发展情况,笔者认为目前基于光谱的打印机特性化方法研究在墨量限制算法合理性、正反向建模精度等方面已经取得了较为理想的结果。

然而,在建模效率提高、模型适用性增强、模型物理意义提升以及评价度量综合性优化等方面,还有待进一步深入:

1) 建模效率有待提高。目前,基于 CYNSEN 模型的特性化方法在特性化精度方面已经取得了非常理想的结果。然而,该方法采样节点数过多,其高精度建模的实现是以海量采样为前提的,故打印测量的耗材及时间成本较高。同时,细胞分区数量的增多也造成了反向建模过程中因最优分区搜索而导致的分区时间过长问题。针对上述问题,未来研究可从特性化样本非均匀采样优化、打印机拆分式建模、色域拆分式建模、最优细胞分区搜索算法优化等方面进行深入研究,通过采样数量的减少以及算法速度的提升提高整体特性化建模效率。

2) 模型适用性有待增强。目前研究大都以常用纸张介质为研究对象,其模型构建样本也主要从打印设备色域全局采样的角度进行选择。为此,未来研究可从基于原稿图像光谱色彩信息的特性化建模、基于特殊色彩集合(如国画颜料色彩、油画颜料色彩等)的特性化建模、基于特殊介质(如宣纸、油画布等)的特性化建模以及基于特殊打印加工工艺(如上光、覆膜等)特性化建模等方面入手,对特性化模型适用性进行扩展性研究。

3) 模型物理意义有待提升。在目前基于物理回归模型的建模过程中,存在着诸如 n 值意义无法准确合理解释^[42]、Demichel 公式失效^[52]等问题,因此,若能从增强模型物理意义的角度进行模型修正,进而增强模型优化自由度,则必能进一步提升特性化模型的合理性。

4) 精度评价度量有待综合性优化。目前在打印设备光谱特性化过程中所采用的精度评价度量大都为单一性度量,其仅通过不同形式的色度误差、光谱误差、同色异谱指数等或其组合对特性化过程进行控制与评价。由前文所述可知,上述度量对于特性化精度的影响是与具体打印输出场景直接相关的。为此,未来工作可从基于打印色彩再现场景的度量选择入手,结合基于人眼视觉的相关心理物理学实验方法,对基于再现场景的特性化度量自适应选择方法进行研究。此外,有关打印网点可见性等反映打印图像整体质量的评价度量,也应在未来研究中有考虑。

综上所述,由于基于光谱的打印机特性化过程涉及光谱学及色度学理论、半色调呈色理论、最优化

计算理论、人眼视觉机理、数字加网技术等多种理论与技术,故其研究具有一定的难度与挑战性。考虑到现有研究仍处于探索起步阶段,故希望本文可为该领域研究的发展起到抛砖引玉的作用。

参考文献 (References)

- [1] Yao H G. Ink Jet Printing[M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2011: 12-18. [姚海根. 喷墨印刷[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2011: 12-18.]
- [2] Xu Y F. Color Management Principles and Applications [M]. Beijing: Graphic Communication Press, 2011: 22-30. [徐艳芳. 色彩管理原理与应用[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2011: 22-30.]
- [3] Koenderink J J. Color for the Sciences [M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2010: 210-214.
- [4] Bianco S, Colombo A, Gasparini F, et al. Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc. 2011, 183.
- [5] Liu Z, Wan X X, Huang X G, et al. The study on spectral reflectance reconstruction based on wideband multi-spectral acquisition system [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4): 1076-1081. [刘振, 万晓霞, 黄新国, 等. 基于宽带多通道的光谱反射率重建方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1076-1081.] [DOI: 10.3964/j. issn. 1000-0593 (2013) 04-1076-06.]
- [6] Yang W P, Xu N, Duan J J, et al. Application and development of multispectral imaging technology in color reproduction [J]. Journal of Yunnan University of Nationalities: Natural Sciences Edition, 2009, 18(3): 191-197. [杨卫平, 徐楠, 段剑金, 等. 多光谱成像技术在颜色复制方面的应用及发展[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2009, 18(3): 191-197.]
- [7] Wang B Y, Xu H S, Luo M R, et al. Spectral-based color separation method for a multi-ink printer [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(6): 063301 (1-4). [DOI: 10.3788/COL201109.063301]
- [8] Guo J Y, Xu H S, Luo M R, et al. Spectral characterisation of color printer based on a novel grey component replacement method [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 7(9): 073301 (1-4). [DOI: 10.3788/COL201109.073301]
- [9] Guo J Y, Xu H S, Luo M R. Novel spectral characterization method for color printer based on the cellular neugebauer model [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 11(8): 1106-1109. [DOI: 10.3788/COL20100811.1106]
- [10] Shen H L, Zheng Z H, Jin C C, et al. Adaptive characterization method for desktop color printers [J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(2): 023012 (1-9). [DOI: 10.1117/1. JEL. 22. 2. 029801]
- [11] Jin C C, Shen H L, Shao S J, et al. Color characterization method for colorful inkjet printers [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 308-312. [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): 308-312.] [DOI: 10.3788/aos201131.1233001.]
- [12] Wyble D R, Berns R S. A critical review of spectral models applied to binary color printing [J]. Color Research & Application, 2000, 25(1): 4-19. [DOI: 10.1002/(SICI)1520-6378(200002)25:1<4::AID-COL3>3.0.CO;2-X]
- [13] Liu Q, Wan X X. Study on ink restriction of ink-jet printing based on spectral gamut maximization [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1636-1641 [刘强, 万晓霞. 基于光谱色域最大化的喷墨打印墨量限制方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1636-1641]
- [14] Liang Y M, Cheng C X, Bao W C, et al. Comparative study of ink-jet color proofing systems based on color management [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2012, 20(4): 9-11, 16. [梁艳梅, 程常现, 鲍伟成, 等. 基于色彩管理的彩色喷墨打样系统比较研究[J]. 北京印刷学院学报, 2012, 20(4): 9-11, 16.]
- [15] Guo G, Xu Y F, Nan L, et al. Analysis of the influence of black plate and total ink amount restriction on output device's color performance [J]. Information Recording Materials, 2011, 12(1): 19-22. [郭歌, 徐艳芳, 南林, 等. 黑版及总墨量限制对输出设备颜色表现能力的影响分析[J]. 信息记录材料, 2011, 12(1): 19-22.]
- [16] Ferilli S. Automatic Digital Document Processing and Management [M]. Berlin: Springer-Verlag London Limited, 2011. [DOI: 10.1007/978-0-85729-198-1.]
- [17] Tzeng D Y, Berns R S. Spectral-based six-color separation minimizing metamerism [C]//Proceedings of IS&T/SID Eight Color Imaging Conference. Scottsdale, AZ, United States: Society for Imaging Science and Technology, 2000: 342-347.
- [18] Chen Y, Berns R S, Taplin L A, et al. Six color printer characterization using an optimized cellular yule-nielsen spectral neugebauer model [J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2004, 48(6): 519-528.
- [19] Urban P. Ink limitation for spectral or color constant printing [R]. Germany: Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [20] Wang Y, Zeng P, He X F, et al. Spectral color calibration method for the multi-ink printer using the look-up table [J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(1): 41-48. [王莹, 曾平, 何秀芳, 等. 采用查找表的超四色打印光谱色彩校正方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2010, 37(1): 41-48.]
- [21] Chen T, Li W, Zhao D B, et al. Press characterization recalibration by principal component analysis and debp model [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 200: 670-675. [DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.200.670]
- [22] Zuffi S, Schettini R. Modeling dot gain and inks interaction [C]//Final Program and Proceedings-IS and T/SID Color Imaging Conference. Scottsdale, AZ, United States: Society for Imaging Science and Technology, 2004: 181-186.

- [23] Zhao C F, Han Q, Chi C C, et al. Effective dot area's calculating based on ynsn model [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 262: 40-43. [DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.262.40]
- [24] Xing W, Zhang Y. Spectral prediction model for variable dot-size ink jet presswork [C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. Bellingham, United States: SPIE, 2012; 82921E(1-6). [DOI: 10.1117/12.905735]
- [25] Qu Y Y, Gooran S. A simple color prediction model based on multiple dot gain curves [C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. Bellingham, United States: SPIE, 2011, 786615(1-8). [DOI: 10.1117/12.871620]
- [26] Machizaud J, Hébert M. Spectral reflectance and transmittance prediction model for stacked transparency and paper both printed with halftone colors [J]. *JOSA A*, 2012, 29(8): 1537-1548. [DOI: 10.1364/JOSAA.29.001537]
- [27] Hébert M, Hersch R D. Analyzing halftone dot blurring by extended spectral prediction models [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 2010, 27(1): 6-12. [DOI: 10.1364/JOSAA.27.000006]
- [28] Murray A. Monochrome reproduction in photoengraving [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 1936, 221(6): 721-744.
- [29] Kang H R. *Computational Color Technology* [M]. Bellingham: SPIE-International Society for Optical Engineering, 2006.
- [30] Namedanian M, Gooran S. High resolution analysis of optical and physical dot gain [C]//*Proceedings of Technical Association of Graphic Arts*. Rochester, United States: TAGA, 2010; 48-51.
- [31] Neugebauer H E J. Die theoretischen Grundlagen des mehrfarbendrucks [J]. *Zeitschrift für Wissenschaftliche Photographie Photophysik und Photochemie*, 1937, 36(4): 73-89.
- [32] Yule J A C, Nielsen W J. The penetration of light into paper and its effect on halftone reproduction [C]//*Proceedings of Technical Association of Graphic Arts*. Rochester, United States: TAGA, 1951; 231-242.
- [33] Heuberger K J. Color Transformations and lookup tables [C]//*Proceedings of Technical Association of Graphic Arts*. Rochester, United States: TAGA, 1992; 863-891.
- [34] Rolleston R, Balasubramanian R. Accuracy of various types of neugebauer model [C]//*Final Program and Proceedings-IS and T/SID Color Imaging Conference*. Scottsdale, AZ, United States: Society for Imaging Science and Technology, 1993; 32-37.
- [35] Wang B Y, Xu H S, Luo M R, 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 A: Optics and Image Science, and Vision*, 2011, 28(7): 1429-1435. [DOI: 10.1364/JOSAA.28.001429]
- [36] Parraman C, Wang Y. Printability beyond the limits: alternative double printing method for inkjet [C]//*Color Imaging XIV: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications*. San Jose, CA, United States: SPIE, 2009; 72411G(1-7). [DOI: 10.1117/12.805708]
- [37] Arney J S, Engeldrum P G, Zeng H. Expanded murray-davies model of tone reproduction in halftone imaging [J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 1995, 39(6): 502-508.
- [38] Engeldrum P G. The color between the dots [J]. *The Journal of imaging science and technology*, 1994, 38(6): 545-551.
- [39] Hersch R D, Emmel P, Collaud F, et al. Spectral reflection and dot surface prediction models for color halftone prints [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2005, 14(3): 033001-033012. [DOI: 10.1117/1.1989987]
- [40] Balasubramanian R. The use of spectral regression in modeling halftone color printers [C]//*IS&T/OSA Optics & Imaging in the Information Age Proceedings*, 1996; 372-375.
- [41] Lewandowski A, Ludl M, Byrne G, et al. Applying the yule-nielsen equation with negative N [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 2006, 23(8): 1827-1834. [DOI: 10.1364/JOSAA.23.001827]
- [42] Xu J L, Xu J F. Review of optical dot gain and discussion of dot percentage [J]. *China Printing and Packaging Study*, 2012, 4(1): 1-6, 13. [徐锦林, 徐军飞. 光学网点增大研究综述及网点面积率探讨 [J]. *中国印刷与包装研究*, 2012, 4(1): 1-6, 13.]
- [43] Lino K, Berns R S. Building color-management modules using linear optimization I. desktop color system [J]. *The Journal of Imaging Science and Technology*, 1998, 42(1): 79-94.
- [44] Rossier R, Hersch R. Ink-dependent n-factors for the yule-nielsen modified spectral neugebauer model [C]//*Proceedings of the 5th European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision and 12th International Symposium on Multispectral Colour Science 2010*. Joensuu, Finland: Society for Imaging Science and Technology, 2010; 202-210.
- [45] Ruckdeschel F R, Häuser O G. Yule-nielsen effect in printing: a physical analysis [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(21): 3376-3383.
- [46] Shiraiwa Y, Mizuno T. Equation to predict colors of halftone prints considering the optical property of paper [J]. *Journal of Imaging Science*, 1993, 37(4): 385-391.
- [47] Soler P, Arnabat J. Efficient color printer characterization based on extended neugebauer spectral models [C]//*Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*. Bellingham WA, United States: SPIE, 2007; 64930S(1-8). [DOI: 10.1117/12.704561]
- [48] Rossier R, Bugnon T, Hersch R D. Introducing ink spreading within the cellular yule-nielsen modified neugebauer model [C]//*Proceedings of the 18th Color and Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications, Technical Papers and Proceedings*. Springfield, United States: Society for Imaging Science and Technology, 2010; 295-300.
- [49] Stokes M, Fairchild M D, Berns R S. Precision requirements for digital color reproduction [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1992, 4(11): 406-422. [DOI: 10.1145/146443.146482]

- [50] Velho L, Frery A, Gomes J. Digital halftoning. [M]//Image Processing for Computer Graphics and Vision. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2009: 313-344.
- [51] Rogers G L. Neugebauer revisited: random dots in halftone screening[J]. Color Research and Application, 1998, 23(2): 104-113. [DOI: 10.1002/(SICI)1520-6378(199804)23:2<104::AID-COL6>3.3.CO;2-9]
- [52] Amidror I, Hersch R D. Neugebauer and demichel: dependence and independence in n-screen superpositions for colour printing [J]. Color Research and Application, 2000, 25(4): 267-277. [DOI: 10.1002/1520-6378(200008)25:4<267::AID-COL7>3.0.CO;2-M]
- [53] Chong E K, Zak S H. An Introduction to Optimization[M]. New York: Wiley, 2013: 108-115. [DOI: 10.1109/MAP.1996.500234]
- [54] Urban P, Rosen M, Berns R. Fast spectral-based separation of multispectral images[C]//Final Program Proc. IS T SID Color Imaging Conf. Springfield, VA, United States; Society for Imaging Science and Technology, 2007: 178-183.
- [55] Li C J, Luo M R. Further accelerating the inversion of the yule-nielson modified neugebauer model[C]//Final Program Proc. IS T SID Color Imaging Conf. Springfield, VA, United States; Society for Imaging Science and Technology, 2008: 84-88.
- [56] Wang B Y, Xu H S, Luo M R. Color separation criteria for spectral multi-ink printer characterization[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(1): 013301 (1-4). [DOI: 10.3788/COL201210.013301]
- [57] Wang Y F, Zeng P, Wang Y, et al. Multi-channel printer characterization based on gamut partition[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 507-511. [王义峰, 曾平, 王莹, 等. 基于色域划分的多通道打印机色彩校正. 电子学报, 2010, 38(3): 507-511.]
- [58] Monga V, Wang S G. System and Method for Halftone Independent Temporal Color Drift Correction in Hi-Addressability Xerographic Printers: US, 8274706[P]. 2012-09-25.
- [59] Wang S G, Bala R, Monga V. Halftone Independent Color Drift Correction: US, 7724406[P]. 2010-03-17.
- [60] Imai F H, Rosen M R, Berns R S. Comparative study of metrics for spectral match quality[C]//Proceedings of Conference on Colour in Graphics. Imaging and Vision. Poitiers, France; Society for Imaging Science and Technology, 2002: 492-496.
- [61] López-Ivarez M A, Hernández-Andrés J, Valero E, et al. Colorimetric and spectral combined metric for the optimization of multi-spectral systems[C]//Proceedings of the 10th Congress of the International Colour Association. Granada, Spain: International Colour Association, 2005: 1685-1688.