

数字印刷品非均匀性的综合评价

孔玲君^{1,2}, 姜中敏², 高雪玲¹

(1. 上海出版印刷高等专科学校, 上海 2000931; 2. 上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 对数字印刷品大面积填充区域非均匀性感知质量的综合评价方法及其评价模型进行了研究。**方法** 结合噪声功率谱和人眼视觉传递函数计算数字印刷品非均匀性质量指标, 利用心理物理学实验获得人眼视觉对数字印刷品大面积填充区域非均匀性的主观感知评价得分, 通过对200个印刷色块的主客观质量评价实验创建了非均匀性感知质量评价模型。**结果** 非均匀性质量指标能较好地反映大面积填充区域在人眼视觉中的感知质量, 非均匀性质量评价模型可有效提供定量的非均匀性感知质量综合评价。**结论** 采用定量方式描述数字印刷品非均匀性的综合评价是完全可行的, 具有很好的实用性和现实意义。

关键词: 数字印刷品; 非均匀性; 综合评价; 噪声功率谱; 人眼视觉传递函数

中图分类号: TS86 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)01-0114-06

Comprehensive Evaluation of Non-Uniformity of Digital Prints

KONG Ling-jun^{1,2}, JIANG Zhong-min², GAO Xue-ling¹

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

2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: **Objective** To study the comprehensive evaluation method and evaluation model for the perceptual non-uniformity quality of large areas in digital prints. **Methods** The non-uniformity quality metric was calculated to measure the integrated non-uniformity of the digital prints based on noise power spectrum and human vision transfer function, the subjective perceptual evaluation scale was obtained through psychophysical experiment, and the quality evaluation model for the visual perception of digital prints' non-uniformity was created based on the objective and subjective quality evaluation experiments for 200 digital printed patches. **Results** The results showed that the quality metric well reflected the perceptual quality of the large printed area, and the evaluation model provided a valid quantitative and comprehensive evaluation results. **Conclusion** It is feasible and practical to evaluate the non-uniformity of digital prints comprehensively and quantitatively.

KEY WORDS: digital prints; non-Uniformity; comprehensive evaluation; noise power spectrum; human vision transfer function

印刷品中大面积填充区域的复制质量是印刷品质量检验和评价中的重要要素之一, 历来受到重视。数字印刷的固体墨粉由于转印过程经历的物理相变化, 以及墨粉颗粒尺寸和形状的非均匀性, 或者墨滴喷射到纸张的扩散和渗透效应, 与传统印刷相比, 数

字印刷大面积填充区域的均匀性较差, 容易出现颗粒感、斑点、条杠、条纹、空白和纹理等各种不平滑和不均匀缺陷。由此, 对于数字印刷品非均匀性的检测与评价显得尤为必要。

过去十多年来, 研究人员先后开展了基于反射率

收稿日期: 2013-09-17

基金项目: 新闻出版总署数字印刷工程研究中心基金项目

作者简介: 孔玲君(1972—), 浙江温岭人, 副教授, 主要研究方向为数字印刷及质量评价、图文信息处理与色彩再现等。

标准偏差、带通滤波、小波变换、噪声功率谱等方法的不均匀性检测算法与评价方法^[1-9],国际标准 ISO 13660^[10]提出以斑点和颗粒度作为不均匀性质量评价指标,仍处于开发中的 ISO 19751 标准则希望从宏观不均匀性和微观不均匀性两个角度对数字印刷品的大面积填充区域展开检测与评价^[11-12],但目前还没有给出最终研究结果。

文中基于噪声功率谱计算方法,提出用总噪声量作为不均匀性质量指标来度量各种不均匀性现象的综合效果,该质量指标的算法设计将充分考虑印刷品不均匀性具有在二维方向上随机呈现的特点,同时结合了人眼视觉系统对不同空间频率具有不同感知响应能力的特点。通过对大量典型数字印刷样本的实验研究,创建用于反映数字印刷品不均匀性综合感知质量的评价模型。通过对实际数字印刷品的检测与评价,验证了不均匀性评价模型的实际应用及其有效性。

1 非均匀性综合评价方法与原理

1.1 计算非均匀性质量指标

印刷品的空间非均匀性可使用噪声作为等价词,即大面积填充区域的不均匀性源于噪声的存在而产生的,大面积填充区域的空间非均匀性测量和评价可通过对噪声的测量来实现。噪声功率谱常用于描述数字成像系统的噪声特点,也是评价图像质量非常有用的指标。对于数字印刷品不均匀性的综合检测与评价,同样可借助大面积填充区域的噪声功率谱来实现,由噪声功率谱曲线与空间频率坐标轴所围成的区域面积计算得到噪声总量,并以此为基础计算得到不均匀性质量指标。同时,考虑到人眼视觉系统对不同频率的亮度波动具有不同的敏感性,那么具有不同空间频率的亮度波动所引起的非均匀性在人眼视觉感知中的结果也会各不相同。由此,在非均匀性质量指标计算过程中将以人眼视觉系统对噪声功率谱作视觉滤波处理。

Kuo 等人^[13]通过实验研究发现色相和饱和度远小于亮度对不均匀性的影响,即印刷品中出现的空间非均匀性源于亮度或密度的波动而产生的。另一方面,由于大面积填充区域的亮度波动可能会出现在水平方向和垂直方向,2个方向上的非均匀干扰是同重要的,因此文中将以数字印刷大面积填充区域的亮度波动为基础数据,以水平方向和垂直方向上计算得

到的非均匀性质量指标的平均值作为待评价区域的不均匀性综合质量指标,见公式(1)。

$$IUM = \frac{IUM_H + IUM_V}{2} \quad (1)$$

式中: IUM_H 和 IUM_V 为大面积填充兴趣区域在水平方向和垂直方向上计算得到的非均匀性评价指标,分别由公式(2)和(3)计算得到。

$$IUM_H = \sqrt{\frac{1}{W\Delta x} \sum_{n=0}^{W/2-1} [NPS^H(u_n) \times CSF(u_n)]} \quad (2)$$

$$IUM_V = \sqrt{\frac{1}{W\Delta x} \sum_{n=0}^{W/2-1} [NPS^V(u_n) \times CSF(u_n)]} \quad (3)$$

式中: $CSF(u_n)$ 为人眼视觉系统的对比度敏感函数(也称为视觉传递函数),按观察距离为 25 cm 计算,其函数曲线见图 1^[14]; $NPS^V(u_n)$ 和 $NPS^H(u_n)$ 为采用改进的直接谱估计 Welch 法计算得到的兴趣区域在垂直方向和水平方向上的噪声功率谱^[15]; Δx 为空间采样间隔,即图像的像素间距; W 为分段功率谱计算时所选取的数据长度,视兴趣区域的像素数量而定,取 512 或 256。

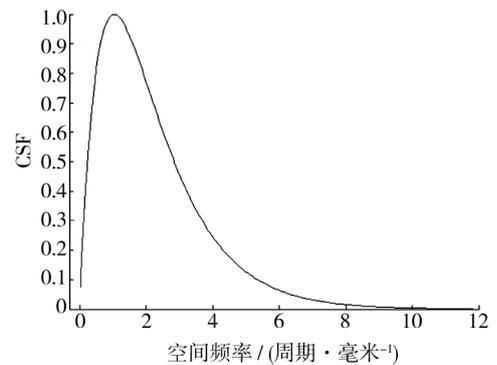


图1 对比度敏感函数曲线

Fig. 1 Contrast sensitive function curve

为了计算数字印刷品的噪声功率谱,需采用基于 CCD 的数字印刷质量检测与评价方法^[16-17],即事先利用高精度平板扫描仪或数字相机把数字印刷品数字化为数字图像,并把待检测的大面积填充区域图像转换为灰度图像。非均匀性综合质量指标计算及其感知质量评价的结构框图与算法流程见图 2。

1.2 非均匀性评价模型的创建与应用

基于噪声功率谱和人眼视觉对比度敏感函数计

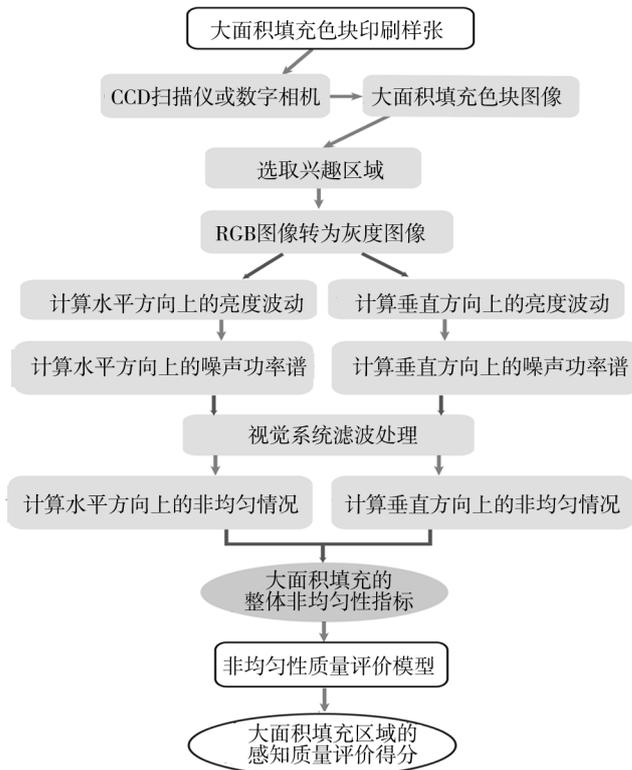


图2 非均匀性评价的算法流程

Fig. 2 Algorithm flowchart for non-uniformity evaluation

算得到大面积填充区域的非均匀性综合质量指标 IUM, 它只是一个定量的数值。该值越小, 说明印刷品中大面积填充区域的空间均匀性越好, 但仍不清楚这个指标值的大小与人眼对印刷品中大面积填充区域的主观评价结果之间的对应关系。

为了了解大面积填充区域的非均匀性综合质量指标 IUM 与人眼的视觉感知结果之间的对应关系, 可事先准备大量具有典型非均匀性表现各类数字印刷色块, 在客观测量获得各色块的非均匀性综合质量指标值的同时, 对这些色块开展主观评价实验, 并根据客观测量值和主观评价得分数据, 利用多项式拟合算法建立大面积填充色块的主观评价得分与非均匀性客观测量指标值之间的关系表达式, 即非均匀性质量评价模型。这样, 只要测量得到了某一色块的非均匀性综合质量指标, 就可根据该质量评价模型计算得到印刷色块对应的感知质量评价得分。

2 实验

2.1 样本准备

为了获得具有不同质量等级和非均匀性表现的

大面积填充色块的印刷样本, 这里选择了多种典型数字印刷机和打印机作为输出设备, 包括 Xerox DocuColor6060 静电照相数字印刷机、Canon C6000 数字印刷机、HP Indigo 5500 数字印刷机、Kodak Nexpress 3000 数字印刷机、EPSON 9800 喷墨打印机、HP 7880 喷墨打印机、HP Z6100 喷墨打印机、Konica Minolta bizhub c203 彩色多功能机、KyoCERa 520i 多功能一体机、OKI C9600 彩色打印机、OCE C900 直接成像数字印刷机、HP 1120 激光打印机、HP 1020 激光打印机、HP 1000s 激光打印机等, 并使用多种不同纸张作为承印材料, 输出了包含不同阶调等级的青、品、黄、黑、红、绿、蓝色块的测试图。承印材料涉及普通激光打印纸、轻涂纸、胶版纸、艺术纸、照片质量打印纸、专用喷墨打印纸等多种类型。同时, 模拟制作了数字印刷机因设备或系统原因而出现条杠、杂点、条纹或纹理现象的色块图像, 并在数字印刷系统或打印机中输出, 由此得到了大量的数字印刷色块检测样本。

从实验输出样本中选取 200 个色块, 其中包含了具有各种非均匀质量表现特征的青、品、黄、黑、红、绿、蓝色块。例如, 有的色块因喷墨印刷材料选择不当, 或输出设置不当, 从而产生溢墨现象引起的色块不均匀; 有的色块因激光打印机缺墨而出现墨粉分布不均匀现象; 有的色块因输出设备成像部件故障而出现条杠; 有的色块则因固态墨粉输出系统所固有的颗粒感而出现不均匀; 也有一些色块属于光洁平滑的喷墨输出色块等。实验所选择的几个印刷色块见图 3, 样本编号依次为 3, 29, 31, 50, 67, 89, 90, 113, 137, 198。

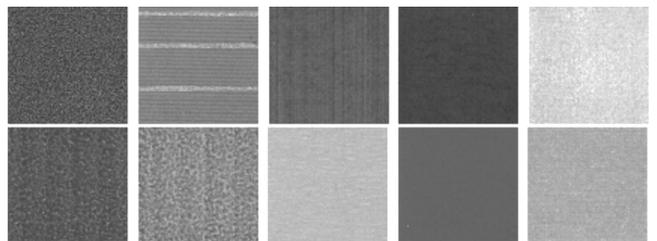


图3 数字印刷输出的色块样例

Fig. 3 Samples of the digital printed color patch

2.2 客观检测

为了开展对大面积均匀填充印刷样本的非均匀性客观检测, 首先利用 Epson expression 1680 扫描仪以分辨率为 600 dpi 将印刷色块转换为数字图像, 并

把每个色块定义为兴趣区域,利用 Matlab 编程计算获得各色块的非均匀性综合质量指标 IUM。图 3 中 10 个色块的非均匀性综合质量指标测量值及其在水平方向和垂直方向上的分量见表 1。

表 1 非均匀性质量指标测量值示例

Tab.1 Samples of the measured non-uniformity quality metric

样本编号	IUM_H	IUM_V	IUM
3	0.5439	0.6443	0.5941
29	0.2253	3.3564	1.7909
31	0.8617	0.3118	0.5868
50	0.2278	0.2184	0.2231
67	0.6609	0.4781	0.5695
89	0.7702	0.3824	0.5763
90	1.1182	0.5903	0.8543
113	0.246	0.355	0.3005
137	0.0854	0.0558	0.0706
198	0.3197	0.6571	0.4884

2.3 主观评价

选择 20 位视力正常的印刷专业研究生和专业教师经适当培训后开展主观评价实验。其中男生 10 人,女生 10 人。主观评价在 cmLite 标准观察箱内进行,标准观察箱光源选用 D65 光源,照度在 1500 lux 左右。为方便对各个印刷色块的独立评价与比较,在开展主观评价实验前首先把 200 个印刷色块从各自的印刷样张上裁剪下来,并粘贴在相同大小的白纸上。

在主观评价过程中,要求每个观察者以左右的距离 25 cm 对各个印刷色块进行观察和评价,并独自根据各个印刷色块内的整体均匀性和非均匀性表现,即根据印刷色块内部颜色是否均匀一致,是否有颗粒感或杂点,是否有条杠、条纹或纹理等缺陷,对各个色块样本进行对比分类。把 200 个印刷色块样本的整体感知质量按“明显不均匀”、“略有不均”、“基本均匀”、“较均匀”、“非常均匀”这 5 种不同等级进行分类,得到 5 组不同等级的样张。实验中的 5 种不同等级分别用 1~5 分来表示,其中 1 分表示“明显不均匀”,2 分代表“略有不均”,3 分表示“基本均匀”,4 分表示“较均匀”,5 分代表“非常均匀”。主观评价实验场景见图 4。

20 位主观评价者对 200 个印刷色块的非均匀性给出主观评判得分后,按观察者筛选方法^[18]对所有主观评价得分的有效性进行分析。结果表明,20 位



图 4 非均匀性评价实验场景

Fig. 4 Scenario for non-uniformity evaluation

评价者的评价得分均有效,把所有评价者评价得分的平均值作为各个印刷色块的最终主观评价得分。

2.4 结果分析与讨论

2.4.1 印刷色块在水平方向和垂直方向上的非均匀性表现分析

从观察 200 个实验用印刷色块的非均匀性质量指标的计算结果可以看出,印刷色块的非均匀性可能出现在水平方向上,也可能存在于垂直方向上,或者在 2 个方向上均存在不均匀现象。例如,90 号等样本的非均匀性质量指标在水平方向要明显高于垂直方向;29 号等样本的非均匀性质量指标在垂直方向上要明显高于水平方向上;3 号和 57 号等样本在水平方向和垂直方向上均存在一定的不均匀现象;137 号等样本在水平方向和垂直方向上都比较均匀。

从以上分析可以看出,印刷色块的非均匀性表现需要从水平方向和垂直方向的综合分析角度来加以评价。这也说明利用文中所提出的从二维角度计算非均匀性综合评价指标 IUM 作为大面积印刷区域的填充质量评价的必要性。

2.4.2 非均匀性综合评价指标与主观评价得分之间的相关性分析

把实验用印刷色块的非均匀性综合质量指标 IUM 的测量值和其对应的主观评价平均得分组合后,按非均匀性综合质量指标 IUM 测量值的降序排列方式对这 2 组数据进行重新排序,得到的对应关系见图 5。图 5 中的横坐标代表印刷色块的非均匀性综合质量指标,纵坐标表示印刷色块的主观评价平均得分。图 5 中的散点描述了 200 个实验色块的非均匀性综合质量指标与其主观评价得分之间的对应关系。

根据图 5 中所示印刷色块的非均匀性综合质量指标与其主观评价得分之间的对应关系数据,采用多

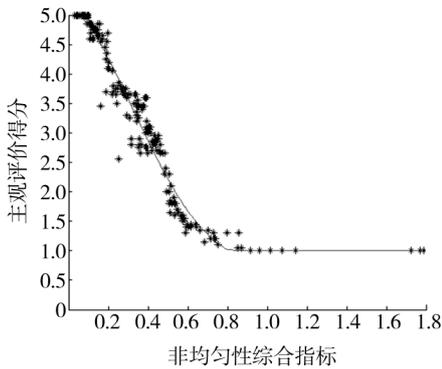


图5 非均匀性质量指标与主观评价得分关系

Fig.5 Correlation between non-uniformity quality metric and its subjective evaluation score

项式拟合算法计算得到印刷色块的非均匀性视觉感知质量与非均匀性综合质量指标之间的关系表达式,见公式(4)。

$$\text{SubScore} = \begin{cases} 2.2282 \times \text{IUM}^5 - 14.642 \times \text{IUM}^4 + 30.43 \times \text{IUM}^3 - \\ 20.953 \times \text{IUM}^2 - 1.2735 \times \text{IUM} + 5.1354 & \text{IUM} \leq 0.8 \\ 1 & \text{IUM} > 0.8 \end{cases} \quad (4)$$

式中:SubScore 为印刷色块的主观感知质量评价分值;IUM 为印刷色块的非均匀性综合质量指标测量值。由公式(4)得到的大面积印刷填充区域的视觉感知质量评价分值与其非均匀性综合质量指标之间的拟合曲线见图5。

从图5可以看出,大面积填充区域的非均匀性综合质量指标与其视觉感知质量评价得分之间具有较好的相关性,公式(4)较好地描述了两者的关系。由此得到了数字印刷大面积填充区域的非均匀性质量评价模型。利用该评价模型就可根据测量得到的非均匀性综合质量指标值,计算获得人们对大面积填充区域非均匀质量的主观感知与评价结果。

2.5 应用实验

选择利用 Kodak Nexpress 3000 在 80 g 双胶纸上输出的一个印刷样张为应用实验对象,该样张在输出前的 RIP 设置中选择了 Optium 加网算法。选取印张中的 10 个中性灰色块作为检测对象,这 10 个色块的扫描图见图6。然后,利用文中所提出的方法计算得到各个色块的非均匀性综合质量指标,并进一步利用公式(4)计算得到其视觉感知质量评价得分,见图7。图7中横坐标表示 10 个色块的编号,从左到右依次

编号为 1—10;纵坐标表示由检测得到的视觉感知质量评价得分,该值越小表示色块的均匀性越差。



图6 10个待评价色块的扫描图

Fig.6 Scanned images of the ten color patches

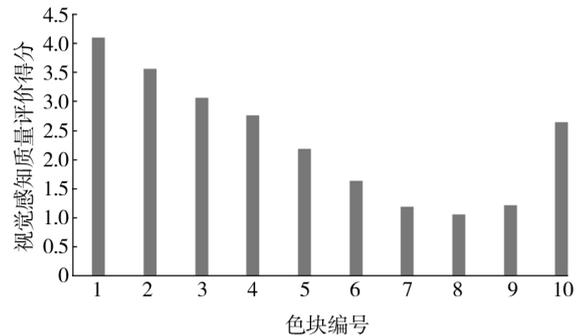


图7 10个色块均匀性感知质量评价得分

Fig.7 Perceptual quality evaluation score of the ten color patches

从图7可以看出,编号为7,8和9的3个色块的非均匀性最显著,6号色块次之,其他色块的非均匀性从低到高依次为编号5,10,4,3,2,1。观察实际印刷样张后可以发现,这个测量结果与实际的目测感觉效果基本一致。

2.6 结论

通过上述实验研究,可以得出以下几点结论。

1) 数字印刷品中大面积填充区域的非均匀性可能会出现在水平方向或垂直方向上,或同时出现在2个方向上。在大面积填充区域的非均匀性质量指标检测算法设计中,只有同时考虑到水平方向和垂直方向上的非均匀性,才能有效开展数字印刷品中大面积填充质量的定量检测与评价。

2) 基于噪声功率谱和人眼对比度敏感函数计算得到的非均匀综合质量指标与人眼的主观感知质量评价结果之间具有很好的相关性,能较好地反映人眼对大面积填充区域的非均匀性感觉结果。

3) 非均匀性质量评价模型可采用三次多项式关系表达式加以描述,实验结果表明文中所创建的非均匀性质量指标检测算法与其质量评价模型在实际的数字印刷品质量检测中是可行的,且具有较好的计算精度。

3 结语

非均匀性是数字印刷品质量要求中必不可少的一项重要属性,文中提出了数字印刷品非均匀性视觉感知质量的综合评价方法。该方法采用印刷企业内拥有的主要输入设备——平板扫描仪或数字相机,把印刷品转换为数字图像,通过计算大面积填充区域经人眼视觉传递函数滤波后的噪声功率谱曲线,并在综合考虑印刷色块的水平方向和垂直方向的非均匀性表现的基础上,提出了非均匀性综合质量指标的概念及其检测算法。同时,基于主客观质量评价实验创建了非均匀性质量评价模型。研究结果表明,非均匀综合质量指标与人眼对印刷色块的非均匀性感受结果具有很好的相关性,非均匀性质量评价模型具有较好的实用性和计算精度。该方法在实际生产中容易实施,不需要印刷企业额外的设备投入,对推广数字印刷质量检测及其评价技术的标准化具有积极的作用。

参考文献:

- [1] KANE P J, BOUK T F, BURNS P D, et al. Quantification of Banding, Streaking and Grain in Flat Field Images [C]//Proc IS & T PICS Conference, 2000: 79—83.
- [2] FAHLCRANTZ C M, JOHANSSON P A, ÅSLUND P. The Influence of Mean Reflectance on Perceived Print Mottle [J]. Journal of Imaging Science & Technology, 2002, 47: 54—59.
- [3] AULTMAN D C, DUMAS R. Automating Jet Quality Analysis Using a Scanner-based System [C]//IS&T's NIP20, 2004: 378—382.
- [4] FAHLCRANTZ C M, JOHANSSON P A. A Comparison of Different Print Mottle Evaluation Models [C]//TAGA Proceedings, San Antonio, 2004.
- [5] DONOHUE K, CUI C, VENKATESH M V. Wavelet Analysis of Print Defects [C]//Proc of IS & T's PICS Conference, 2002: 42—47.
- [6] SADOVNIKOV A, LENSU L. Quantified and Perceived Unevenness of Solid Printed Areas [C]//CIARP 2005, LNCS 3773, 2005: 710—719.
- [7] MANGIN P J, DUBE M. Fundamental Questions on Print Quality Proc of SPIE - IS&T Electronic Imaging [C]//SPIE, 2006.
- [8] EID A H, COOPER B E, RIPPETOE E E. Characterization of Mottle and Low Frequency Print Defects [C]//Proc of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE, 2008.
- [9] LEE K Y, BANG Y, CHOH H K. Quantification of Perceived Macro-uniformity [C]//Proc of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE, 2011.
- [10] ISO/IEC 13660, Information Technology Office Equipment Measurement of Image Quality Attributes for Hardcopy Output Binary Monochrome Text and Graphic Images [S].
- [11] RASMUSSEN D R, KRESS W C, et al. INCITS W1. 1 Standardization for Evaluation of Perceptual Macro-uniformity for Printing Systems [C]//IS & T's PICS Conference, 2003: 96—101.
- [12] RASMUSSEN D R, DONOHUE K D, NG Y S, et al. ISO 19751 Macro-uniformity [C]//Proc. SPIE, Image Quality and System Performance, 2006.
- [13] NG Y S, KUO C H, LAI D. Perceptual Color Graininess of Printed Pages via Flatbed Scanner [C]//ICIS, 2006: 122—125.
- [14] 孔玲君, 刘真. 基于空间频率响应的印刷品清晰度检测 [J]. 包装工程, 2013, 34(15): 120—125.
KONG Ling-jun, LIU Zhen. Measurement of Prints Sharpness Based on Spatial Frequency Response [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 120—125.
- [15] KONG Ling-jun, JIANG Zhong-ming, GAO Xue-ling. Uniformity Assessment of Digital Prints Based on NPS and CSF [C]//Advanced Materials Research, 2011.
- [16] 孔玲君, 刘真, 姜中敏. 基于 CCD 的数字印刷质量检测与分析技术 [J]. 包装工程, 2010, 31(3): 92—95.
KONG Ling-jun, LIU Zhen, JIANG Zhong-min. CCD-based Digital Print Quality Measurement and Analysis Techniques [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 92—95.
- [17] 郑亮, 金张英. 基于 CCD 的静电照相成像数字印刷品质量分析 [J]. 包装工程, 2011, 32(7): 112—116.
ZHENG Liang, JIN Zhang-ying. Quality Analysis of Xerographic Printing Based on CCD [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 112—116.
- [18] 高新波, 路文. 视觉信息质量评价方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 133—135.
GAO Xin-bo, LU Wen. Quality Assessment Methods for Visual Information [M]. Xian: Xidian University Press, 2010: 133—135.