基于噪声功率谱印刷图像质量分析

周颖梅[1]，姜中敏[2]，郑亮[1]
（1. 上海出版印刷高等专科学校，上海 200093；2. 上海理工大学，上海 200093）

摘要：目的 从噪声功率谱角度分析加网方式对图像质量产生的影响。**方法** 采用对比和验证试验方法，分析平网区域和人物图像在不同网点结构下的噪声功率能量值与视觉效果的关系。**结果** 青、品、黄、黑等4色平网区域的噪声功率能量值在10%~100%之间有一定规律，将人物图像平滑去噪后噪声能量值与视觉效果对比有一致性。**结论** 噪声功率谱可作为图像质量评价的综合分析指标，平网区域不能作为评价印刷质量的唯一测试指标，网点对图像产生的视觉效果与噪声功率谱能量值也应作为指标，以全面有效地评价印刷品质量。

关键词： 噪声功率谱；功率能量；加网方式；视觉评价
中图分类号： TS807 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3563(2014)21-0091-05

Image Analysis Based on Print Noise Power Spectrum

ZHOU Ying-mei[1], *JIANG Zhong-min*[2], *ZHENG Liang*[1]
(1. Shanghai Publishing and Printing College, Shanghai 200093, China;
2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093, China)

ABSTRACT: Objective In this paper, the noise power spectrum (NPS) was used to analyze the effects of screen rules on image quality. **Methods** The relationship between NPS and visual perceptual was analyzed under different screen structures, specially referring to dot area and portraits, using comparative and validating experimental methods. **Results** The rules for noise power energy in the range of 10% ~ 100% were measured in Cyan, Magenta, Yellow and Black dot areas. The noise power data was consistent with visual perceptual after deleting the noise of the image. **Conclusion** NPS could be used as a comprehensive analysis index for evaluation and analysis of image quality, while flat screen area could not be used as the sole test index for evaluating printing quality. Visual perceptual and NPS data produced by printing dots should also be used as indices for comprehensive and effective evaluation of the quality of prints.

KEY WORDS: noise power spectrum; power energy; screen rules; perceptual evaluation

近年来，人们对印刷品质量的要求越来越高，更多关于印刷品面积区域质量的研究在于对密度或反射系数波动的定量分析[1]，特别是在2001年提出的ISO/IEC 13660[2]规定了相应的标准和方法之后。就图像而言，噪声成为影响图像质量的重要因素之一。噪声的大小与实地或半色调面积区域的油墨转移有关，也与纸张的表面结构有关，还与半色调网点结构有很大关系。由于数字印刷过程的复杂性，特定的成像机制、转印技术和材料等方面的因素导致某些数字印刷品的质量与传统印刷品质量相比仍有差距[3]。目前，

收稿日期： 2014-03-04
基金项目： 上海市教育委员会科研创新基金(12yz198)
作者简介： 周颖梅(1978—)，女，江苏南通人，硕士，上海出版印刷高等专科学校讲师，主要研究方向为数字印刷及其质量评价、印刷电子等。
通讯作者： 姜中敏(1980—)，男，河北承德人，硕士，上海理工大学工程师，主要研究方向为图像处理、数字印刷等。

部分数字印刷机还停留在采用600 dpi的分辨率进行成像，如果要提高印刷品网点阶调复制效果，在无法改变印刷机物理分辨率的情况下，只有通过改变图像噪声来提高图像的阶调层次，因此有必要测量图像的噪声指标。

根据国际数字印刷标准ISO 13660的定义，颗粒度和斑点都属于噪声范畴，并且提供了利用空间域图像数据测量和计算相关规范[5]，但是没有考虑主观感受，整体的评价图像需要以客观测量数据与主观测试数据结合起来[6]。与颗粒度、斑点和条带等度量印刷图像空间非均匀性的质量测度相比，颗粒度和斑点噪声的获取，是通过密度或反射系数波动的定量分析获得，二者的分界是以0.4周/mm周期密度波动产生的空间频率为阈值，这说明空间非均匀性仅仅以密度或反射系数波动的标准离差来描述是不够的，噪声功率谱不仅提供对于印刷图像密度或反射系数随机波动的统计描述，也可用于分析半色调网点结构差异引起的不同空间非均匀性，以给出对印刷图像噪声的综合性评价。

1 基于噪声功率谱的原理与数据处理

1.1 噪声功率谱计算原理

噪声功率谱测量的根本目的是确定输入信号经过输入系统或数字输出系统作用后，不同频率成分幅值波动的变化。评价印刷图像质量时，必须测量经过印刷系统的测试图，而测试图中必然包含所有必要的频率成分，但印刷系统可能没有足够能力复制这些频率成分，输出信号会有不同程度的衰减，见图1。以印刷显影过程为例，输入信号图文信息在显影过程中直接利用激光快速曝光，水平扫描与光导鼓旋转运动一旦出现问题，输墨精度就失去保证，输出信号在印刷

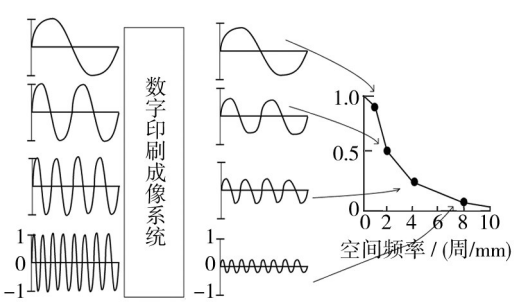


图1 空间频率响应测量

Fig. 1 Measurement of spatial frequency response

系统的作用下可能丢失某些频率成分。

测量和评价图像噪声必须通过数字印刷机或打印机输出样张，通过数字成像设备获取数字图像信息，而数字成像设备和印刷系统必然引起噪声叠加。假设图像可以用连续函数表示，根据数字图像捕获特点，假定图像可以用连续的函数表示，并认为对于图像的每个位置(x,y)总存在与该位置关联的信号$f(x,y)$。根据数字图像的捕获特点，以$f(x,y)$表示的信号应该为随机变量。考虑到随机变量的功率信号特点，正常情况下噪声功率谱测量只能使用有限区域实现，定义为：

$$W^*(u,v) = \lim_{\substack{x\to\infty\\ y\to\infty}}\left\{\frac{1}{2x}\frac{1}{2y}\cdot \left|\int_{-x}^{x}\int_{-y}^{y}\Delta f(x,y)\,\mathrm{e}^{-2\pi j(ux+vy)}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right|^2\right\} \tag{1}$$

式中，$W^*(u,v)$为噪声功率谱或维纳谱；u为沿水平轴的空间频率；v为沿垂直轴的空间频率。

实际的噪声功率谱估计是以多次平均的法则定义的：

$$W(u,v) = \frac{1}{2x}\frac{1}{2y}\cdot \left|\int_{-x}^{x}\int_{-y}^{y}\Delta f(x,y)\,\mathrm{e}^{-2\pi j(ux+vy)}\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y\right|^2 \tag{2}$$

式中，$W(u,v)$为简单实现的维纳谱；n为样本的维纳谱数量。

离散采样成像系统产生数组$g(m,n)$，其中的m和n均取整数，表示成像系统采样点的索引编号。可以按离散时间、离散空间和数字过程等直接处理噪声功率谱，但需注意采样间隔应该足够小，以至于可以近似表示连续过程。如果信号带宽有限，能够准确地恢复连续过程，则通过式(3)可以使连续过程与离散过程关联起来。

$$f(x,y)=\sum_m\sum_n g[m,n]\,d(x-m_0)\,d(y-ny_0) \tag{3}$$

式中，x_0，y_0为采样间隔；d可以选择为迪拉克函数、矩形(方波)函数或sinc函数。

离散随机变量的离散噪声功率谱定义为：

$$W_d(u,v) = \lim_{\substack{N_x\to\infty\\ N_y\to\infty}}\left\{\frac{x_0y_0}{N_xN_y}\cdot \left|\sum_m\sum_n\Delta g[m,n]\,\mathrm{e}^{-2\pi j(umx_0+vny_0}\right|^2\right\} \tag{4}$$

式中：N_x为兴趣区域内沿水平轴的像素编号；N_y

为兴趣区域内沿垂直轴的像素编号。

离散频率$u=k/N_{xx0}$和$v=l/N_{yy0}$的有限区域样本的噪声功率谱$W(k,l)$按式(5)计算：

$$W_d^*(k,l)=\frac{x_0y_0}{N_xN_y}\cdot\left|\sum_m\sum_n\Delta g[m,n]\,e^{-2\pi j(km/N_x+ln/N_y)}\right|^2 \quad (5)$$

1.2　测量噪声功率谱的数据处理

噪声功率谱测量应该像颗粒度和斑点测量那样针对大面积填充区域，只要设计包含实地和平网填充区域的测试图，以数字印刷机或打印机输出测试图，再利用数字照相机或平板扫描仪从测试图印刷样张转换到数字图像[7]，就可以测量噪声功率谱了。

从测试图印刷样张转换到数字图像仅仅完成了噪声功率谱测量的第1步，为了确保结果的正确性，扫描仪应该尽可能扫描大的面积区域，为保证所捕获图像数据的正确性，这里采用简单有效的平滑处理方法。设理论状况扫描仪捕获的是无噪声的数字图像，可以用连续函数$f(x,y)$表示，假设扫描仪自身因素引起的噪声为互不相关的加性噪声，并以$n(x,y)$表示噪声，则携带的噪声图像$g(x,y)$可写为：

$$g(x,y)=f(x,y)+n(x,y) \quad (6)$$

假设扫描捕获M幅图像，理论上扫描仪可捕获的无噪声图像为$f(x,y)$，则对M幅图像进行平均计算的算式为：

$$\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}f_i(x,y)=f(x,y) \quad (7)$$

通过平滑处理图像，在于去除数字图像的像素值上的噪声数据，得到干净的图像，避免干扰噪声功率谱测量数据。

此外，测试图转换到数字图像的平板扫描仪应经过空间频率响应测量，确保扫描仪对任意空间频率的响应能力高于数字印刷机，这样能保证此后的数据处理与噪声功率谱无关。

2　测量实验

2.1　测试准备与处理

考虑到颗粒度和斑点的本质是噪声，因而噪声功率谱测量完全可以借鉴ISO 13660规定的大面积填充区域尺寸，在Illustrator环境下制作级差等于10%以及从10%变化到100%的青色、品红、黄色和黑色的阶调梯尺，这意味着设计用于测量噪声功率谱的测试图时应该包含面积不小于21.1 mm × 21.2 mm的均匀填充区域[8—11]。且为了保证测量数据的可靠性和可比性，将各色块的尺寸定义为相同大小；同时，测试图中设置了国际标准ISO 300规定的人物图像作为视觉感受的测量目标。通过固体墨粉显影的佳能image Press C6000彩色静电照相数字印刷机分别按照不同加网方式输出到同一种铜版纸上。

佳能image Press有7种预设的加网方式，其中，包括基于线型高分辨率（Resolution ）、基于点型渐变（Gradation）、误差抖动方式（Error Diffusion）和标准方式（Standard）等。

2.2　结果分析

由PIAS II测量和分析得到的噪声功率谱数据[12]，包含青、品、黄、黑等4色梯尺色块的噪声功率谱测量数据，选取其中3种不同加网方式。测试图中的标准人物图像进行平滑处理后，明显发现噪声有改善，见图2。

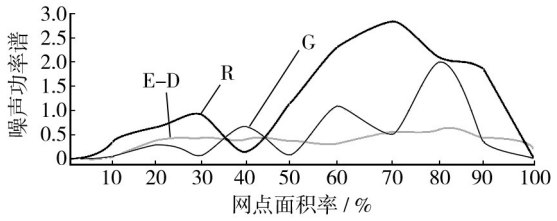
a 平滑处理前　　b 平滑处理后

图2　平滑处理前后对比

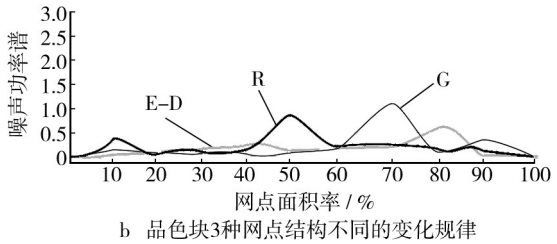
Fig.2 Comparison of images before and after smoothing process

在图2中，a图像明显有颗粒感，而b图像细节比较清晰，且能观察出其与原稿几乎相似，因而以该信息为分析基础具有一定的准确性。

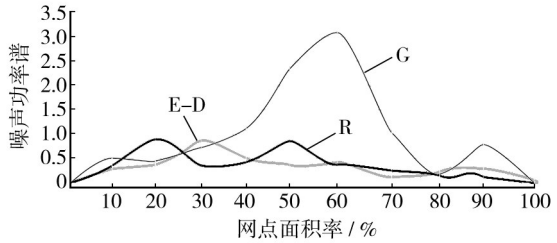
色块噪声功率对比见图3。由于噪声功率谱是一种能量的表示[13]，此处没有单位。从图3可以看出，无论哪种加网方式，在30%~70%区域不同程度地出现峰值。这充分表明网点面积率对噪声的影响是不容忽视的。同时可以看出，实地区域的噪声几乎可以忽略不计，可以理解为墨粉融化后的均匀性在该款Cannon机器上有良好的表现[14—15]。阶调梯尺网点面积率和噪声功率基本规律可视为，随着半色调信息的增加，噪



a 青色块3种网点结构不同的变化规律



b 品色块3种网点结构不同的变化规律



c 黄色块3种网点结构不同的变化规律

图3 CMY色噪声功率对比

Fig.3 Comparison of noise power of color cyan, magenta and yellow

声能量迅速提升，到达最大后又开始迅速下降，直至实地区域降为零。

综合色块的噪声能量见图4，Graduation网点和Resolution网点比Error Diffusion网点明显表现出更多的噪声能量，针对该指定型号的铜版纸其加网方式似乎更适合后者。

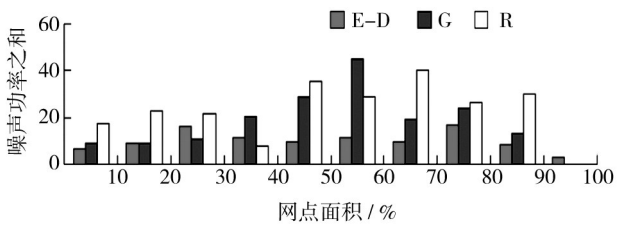
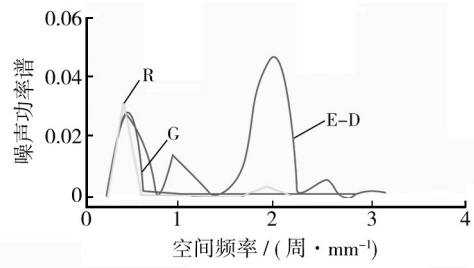


图4 噪声能量总和直方图

Fig.4 Sum of noise power

以所选用的人物头像为分析验证目标，3种加网方式人脸噪声功率谱值与视觉对比见图5。主观观察结果与数据定量分析有一定差异，G和R加网方式的主观结果基本一致，在阶调梯尺处表现噪声能量最少的E-D网点视觉上却不够理想，分析其原因可能是成像部件形成静电潜像与输纸机构速度不同步，融化滚筒发出的热量分布不均匀，纸张表面结构的微观不平整等对图像复制的空间均匀性产生影响。单独测量面积区域的色块空间非均匀性表现不够明显，但是叠加信息之后就能反应出客观的噪声功率。对于不同加网方式，机器供应商在设计时就提供了不同网点针对不同原稿的解决方案，这个实验就很好证明了这一点。



a 噪声功率谱值对比

b 视觉对比

图5 3种加网方式人脸噪声功率谱值与视觉对比

Fig.5 Comparison of visual and measured NPS data of portraits with three different screen rules

3 结语

借助与图像捕获设备和噪声功率的测量原理以及图像处理技术，根据ISO 13660标准中建议的颗粒度、斑点等非均匀指标的测量方式量取色块，根据该标准系统中定义的原理进行评价。待测数字印刷品采用固体墨粉的数字印刷机分别以3种不同的加网方式输出网点。借助于基于扫描仪的数字印刷质量检测系统对待测印品进行测量，并结合ISO 13660标准对所得数据进行分析与评价。

1）印刷后扫描的图像需要经过平滑处理，这样可以滤去扫描仪自身的噪声能量，从而得到干净的图像。图像处理前后仅仅从视觉上就已经能够基本判断，处理后的图像具有更好的细节和清晰的层次表现。此外，将处理后的图像与电子文件进行对比，还存在视觉上的差异。通过对处理前后图像的测量发现，虽然存在定量噪声，但是能量趋势与视觉保持一致性。

2）总体来说,数字印刷机加网方式具有可选择性,从印刷色的单色面积率变化来分析,峰值的出现在30%~70%之间,这与网点扩大存在一定关系,虽然纸张本身也存在噪声,但在此不做探讨,在网点0%处视为零。随着网点信息量的加大,墨粉颗粒溶于纸张逐渐增大,噪声能量也随之增加,最大后又逐渐下降,直至变为实地,噪声能量降至0。E-D加网方式相对于G和R比较平缓,这与该方式的算法相关,而G和R在青色与黄色的平网区域分别表现出最高峰。从图3的综合4色叠加能量来看,这二者的噪声能量基本持平,说明G在表现青色时候会比较均匀,R在表现黄色时会相对均匀。

3）测试图中R和G人物面部视觉比较接近,E-D方式面部有颗粒感,定量数据表明,E-D方式的人物表现图像噪声峰值比其他2种都明显,且量值较大,R和G方式在峰值上比较接近。该分析结果说明,针对人物面部网点表现需选择适当的加网方式,视觉结果与噪声功率谱的一致性。

4）不同结构的平网网点转印到纸张后,在纸张表面表现出不同的非均匀性,直接产生噪声能量的差异,同时,印刷机成像部件形成静电潜像与输纸机构速度不同步,以及融化滚筒发出的热量分布不均匀等因素都会产生能量差异。

参考文献:

[1] EMMEL P, HERSCH R D. A Unified Model for Color Prediction of Halftoned Printed[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2000, 44(4): 351—359.

[2] RONG Xiao-ying. Quality Comparison of HP Indigo to Offset Lithography[C]// NIP25 and Digital Fabrication, 2009: 478—480.

[3] ISO 16067-1: 2003, Photography-Spatial Resolution Measurements of Electronic Scanners for Photographic Images-Part 1: Scanners for Reflective Media[S].

[4] 臧冬娟,刘逸新,刘春林. Clapper-Yule 光谱预测模型[J]. 包装工程,2007,28(4):51—53
ZANG Dong-juan, ZHANG Yi-xin, LIU Chun-lin. Clapper-Yule Prediction Model[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(4): 51—53.

[5] International Standard ISO 13660, Information Technology — Office Equipment—Measurement of Image Quality Attributes for Hardcopy Output —Binary Monochrome Text and Graphic Images[S], 2001.

[6] 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.

[7] PIASTM-II A Second Generation Portable Image Analysis System, QEA[EB/OL]. [2014-01-12]. http://www. qea. com or infor@qea.com.

[8] 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

[9] 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(2): 92—95.
KONG Ling-jun, LIU Zhen, JIANG Zhong-min. CCD Based Digital Print Quality Measurement and Analysis Techniques [J]. Packaging Engineering,2010,31(2): 92—95.

[10] 陈亚军,张二虎. 基于图像处理的印刷缺陷在线检测系统研究[J]. 包装工程, 2005, 26(6): 64—65.
CHEN Ya-jun,ZHANG Er-hu. Research On-line Defect Detection System for Printed-matter Based on Image Processing [J]. Packaging Engineering,2005,26(6):64—65.

[11] 周颖梅,姜中敏. 纸张类型对数字印刷品噪声的影响[J]. 中国印刷与包装研究,2012(2):83—89
ZHOU Ying-mei, JIANG Zhong-min. Effect of Paper Types on the Digital Printing Noise[J]. China Printing and Packaging Study,2012(2):83—89

[12] 孙小鹏,孔玲君. 基于图像处理的数字印刷线条质量检测方法研究[J]. 包装工程,2013,34(7): 84—89.
SUN Xiao-peng, KONG Ling-jun. Research on Measurement Method of Digital Printed Line Quality Based on Image Processing[J]. Packaging Engineering,2013,34(7):84—89.

[13] ZHOU Ying-mei, JIANG Zhong-min. Analysis of Area Field Quality Based on ISO 19751 and ISO 13660[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,262:129—133.

[14] 姚海根. 线条边缘质量建议测量规程[J]. 中国印刷与包装研究,2011,3(5):28—33.
YAO Hai-gen. Proposed Test Regulation to Edge Quality of Lines[J]. China Printing and Packaging Study, 2011, 3(5): 28—33.

[15] ZHOU Ying-mei, RONG Xiao-ying. Analyzing Print Quality of Large Printed Area of Toner-Based Press[C]// NIP 28 Conference,2012:375—378.