

文章编号: 1009-038X(1999)04-0080-07

# 非涂料纸印刷网点尤尔 - 尼尔逊效应的理论研究

唐正宁, 张逸新, 周春霞

(无锡轻工大学计算科学与信息传播系, 江苏无锡 214036)

摘要: 从光信息的传递函数角度, 研究了图文复制过程中非涂料纸印刷网点半色调系统的尤尔 - 尼尔逊效应. 把非涂料纸表面的印刷网点粗糙墨层等价于随机透射屏; 把非涂料纸表面斑点等价于随机吸收屏, 分别建立相应的光学传递函数和调制传递函数, 以修正受到非涂料纸特性因素影响的半色调系统尤尔 - 尼尔逊效应.

关键词: 印刷网点; 调制传递函数; 非涂料纸; 网点扩大.

中图分类号: TS801.1 文献标识码: A

在胶印工艺中, 印刷品能真实再现原稿阶调、色彩的最主要控制手段是保证印刷密度与网点面积率的对应关系, 然而由于印刷品墨层的边缘效应<sup>[1]</sup>, 光线在纸张内层的反射和墨层对光线的吸收效应等一系列因素影响所产生的光学网点扩大, 即尤尔 - 尼尔逊效应, 使得理论计算的某一点网面积率所对应的密度值与实际印刷所得的积分密度测量值之间有一定差距. 目前, 在进行印刷密度与印刷网点面积率转换时, 广泛采用尤尔 - 尼尔逊公式. 文献 [1] 指出了尤尔 - 尼尔逊公式仅仅是一个经验公式, 没有从理论上揭示光学网点扩大的本质规律; 文献 [2] 用傅立叶级数形式描述了理想半色调一维网点系统, 并用油墨层的调制传递函数  $MTF_i$  和纸面特性的调制传递函数  $MTF_p$ . 修正理想状态下的半色调系统, 以得到更符合实际状态的网点面积与印刷密度之间的变换关系, 然而不同的印刷材料调制传递函数  $MTF$  会有不同, 所以应该进一步分析不同印刷材料的调制传递函数, 以得到更具体的尤尔 - 尼尔逊效应, 即得到更准确的网点面积率与印刷密度之间的变换关系.

## 1 尤尔 - 尼尔逊效应理论模型的建立

在半色调图像的复制过程中, 一定大小的网点面积率  $F_i$  所对应单位面积上的反射率  $R(F_i)$  之间的关系, 可以从光能守恒定律而得到默里 - 戴维斯公式:

$$R(F_i) = F_i R_{\infty} + (1 - F_i) R_p$$

然而实际测得的  $R_c(F_i)$  总是小于默里 - 戴维斯公式的计算值  $R_j(F_i)$ , 这个现象被称为尤尔 - 尼尔逊效应. 而目前广泛应用的是一个非线性的经验公式, 即尤尔 - 尼尔逊公式:

$$R(F_i) = [F_i R_{\infty}^{1/n} + (1 - F_i) R_p^{1/n}]^n$$

收稿日期: 1999-06-4; 修订日期: 1999-11-10

作者简介: 唐正宁 (1963年 3月生), 男, 江苏太仓人, 工学硕士, 讲师

公式中的  $n$  值要通过实验确定,以不同的印刷材料、网屏线数等因素的影响,但尤尔-尼尔逊公式并没有从理论上揭示尤尔-尼尔逊效应的规律性和影响因素。

近几年,许多学者对尤尔-尼尔逊效应进行了深入、具体的研究,从印刷纸张的光学性能、油墨的流变性等方面进行了分析,文献 [1] 指出了尤尔-尼尔逊公式在理论上是不正确的;文献 [2] 提出了半色调系统在某一网点面积率  $F_i$  与对应墨层部分的反射率  $R_i$  和网点间纸面的反射率  $R_p$  之间的关系式

$$R_p(F_p) = R_g [G_p(F_p)(1 - T_i) + T_i]^\circ [G(F_p)(1 - T_i + T_i)] \quad (1)$$

$$R_i(F_i) = R_g [H_p(F_i)(1 - T_i) + T_i]^\circ [H_i(F_i)(1 - T_i + T_i)] \quad (2)$$

其中:

$$G_p(F_p) = F_p \sum_{iF=-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2(nF_p) \text{MTF}_i(nk_0) \text{MTF}_p(nk_0) \quad (3)$$

$$G(F_p) = F_p \sum_{iF=-\infty}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \text{sinc}^2(nF_p) \text{MTF}_i(nk_0) \quad (4)$$

$$H_p(F_i) = 1 - F_i \sum_{iF=-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2(nF_i) \text{MTF}_i(nk_0) \text{MTF}_p(nk_0) \quad (5)$$

$$H_i(F_i) = 1 - F_i \sum_{iF=-\infty}^{\infty} \text{sinc}^2(nF_i) \text{MTF}_i(nk_0) \quad (6)$$

式中  $\text{MTF}_i$  和  $\text{MTF}_p$  分别为具体油墨和纸张的调制传递函数。

可见,要准确计算出  $F_i$  与  $R$  之间的对应关系,必须得到油墨和纸张的调制传递函数,然而不同的油墨和纸张会有不同的调制传递函数,作者就印刷墨层粗糙度和非涂料纸表面斑点这两个方面进行讨论,并建立相应的调制传递函数。

## 2 非涂料纸印刷墨层的调制传递函数 $\text{MTF}_i$

非涂料纸在很多物理性能方面与涂料纸有较大差别,其中很重要的一个性能指标是表面粗糙度。在胶印过程中,油墨从橡皮布滚筒表面经历了拉丝、断裂后转移到纸张表面,刚从橡皮布滚筒表面分离出来的墨层具有粗糙的表面,而为了提高印刷速度,要求油墨层在极短的时间内干燥,但油墨在干燥前很难流展平,所以最终干燥固着于纸面的墨层具有一个较粗糙的表面,其粗糙程度则由油墨的粘着性、拉丝性、干燥速度和纸张特性等因素所决定,而墨层与纸张的结合面的粗糙程度则决定于纸张压印后的平滑度。如图 1 所示。

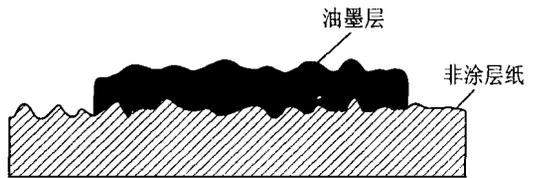


图 1 非涂料纸表面墨层示意图

当光线照射在印刷墨层表面时,有一部分光线在墨层表面反射,即首层表面反射,而大部分光线穿过油墨层,经过油墨的选择性吸收后,再由纸张的表面反射出来,形成主色光。首层表面反射的光线降低了主色光的饱和度,而主色光则决定了成像质量。现就粗糙墨层对主色光成像质量的影响进行讨论。

把粗糙的印刷墨层等价于薄随机透射屏,用  $t(x, y)$  表示随机透射屏的振幅透射率,人眼观察由粗糙墨层形成彩色像的过程可由图 2 等效的成像系统表示。

由近代光学理论可知,非相干光照明光学系统的成像质量可用光学系统的光学传递函

数来描述.为简明扼要,作者研究系统对可见波段平均波长  $\bar{\lambda}$  的成像性质.图 2 所示系统的光学传递函数<sup>[4]</sup>为:

$$H_0(u, v) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) p^*(x - \bar{\lambda}fu, y - \bar{\lambda}fv) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} |p(x, y)|^2 dx dy} \quad (7)$$

式中  $p$  是复瞳函数.

由于具有振幅透射率  $t_s(x, y)$  的随机透射屏放在成像系统的光瞳内,瞳函数就被修正,得到一个新的光瞳函数

$$P(x, y) = p(x, y) t_s(x, y) \quad (8)$$

考虑到放入随机屏的作用,光学传递函数变成  $H(u, v)$ .

$$H(u, v) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) p^*(x - \bar{\lambda}fu, y - \bar{\lambda}fv) t_s(x, y) t_s^*(x - \bar{\lambda}fu, y - \bar{\lambda}fv) dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} |p(x, y)|^2 |t_s(x, y)|^2 dx dy} \quad (9)$$

由于缺乏关于每一点上  $t_s(x, y)$  的具体数值的信息,  $H(u, v)$  不可能得到确定性分析,有希望做到的是利用关于  $t_s$  的统计知识去计算系统的平均频率响应的某种量度.当然,成像系统的平均性能一般并不和系统有一具体屏时的实际性能相符合.但是缺乏关于随机屏的结构知识,只能描述平均性能.

计算平均光学传递函数的方法是,可以直接对  $t_s$  用一个适合的统计模型,然后简单求出  $H(u, v)$  期望值.从平均光学传递函数的另一定义出发,则可得到平均光学传递函数的定义<sup>[4]</sup>:

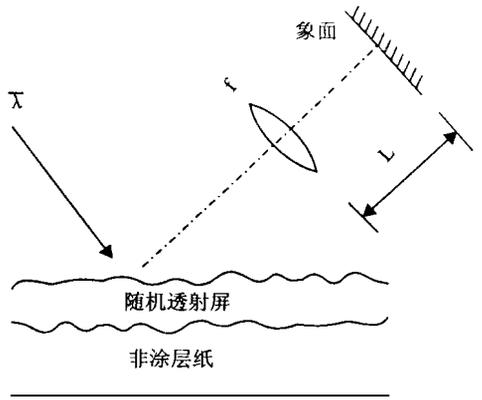


图 2 油墨层抽象为随机透射屏的成像系统

$$\overline{H(u, v)} = \frac{E[H \text{ 的分子}]}{E[H \text{ 的分母}]} \quad (10)$$

$E[ \quad ]$  是期望值算符.

将式 (9) 的分子和分母代入式 (10), 交换积分与求平均的次序, 可得

$$\overline{H(u, v)} = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} p(x, y) p^*(x - \bar{\lambda}fu, y - \bar{\lambda}fv) E[t_s(x, y) t_s^*(x - \bar{\lambda}fu, y - \bar{\lambda}fv)] dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} |p(x, y)|^2 E[|t_s(x, y)|^2] dx dy} \quad (11)$$

假设随机屏的空间统计是广义平稳的, 因此期望值与  $x$  和  $y$  无关, 因而可以提出积分号, 结果平均光学传递函数可由下式给出

$$\overline{H(u, v)} = H_0(u, v) \overline{H_s(u, v)} \quad (12)$$

式中  $H_0$  是无随机屏时系统的光学传递函数 (式 (7)), 而  $\overline{H_s(u, v)}$  可以看成粗糙油墨透射率

起伏部分的平均光学传递函数,它由下式给出

$$\overline{H_s}(u, v) = \frac{\Gamma_r(\bar{\lambda}fu, \bar{\lambda}fv)}{\Gamma_r(0, 0)}, \quad (13)$$

式中  $\Gamma_r$  是随机透射屏的空间自相关函数,有

$$\Gamma_r(\Delta x, \Delta y) \equiv E[t_s(x, y)t_s^*(x - \Delta x, y - \Delta y)]. \quad (14)$$

这就证明了一个在光瞳内具有空间平稳随机屏的非相干成像系统的平均光学传递函数可以分解成两个因子的乘积,一个是无屏时系统的光学传递函数,另一个是和随机屏相联系的平均光学传递函数.而平均光学传递函数只不过是屏的振幅透射率的空间自相关函数.

用平均传递函数的构成原理,把印刷的油墨层看成由两个部分组成:一个部分是透射率一定,即平均高度偏差为 0 的等厚度的油墨层;另一个部分是透射率随机分布的粗糙油墨层.如图 3 所示.

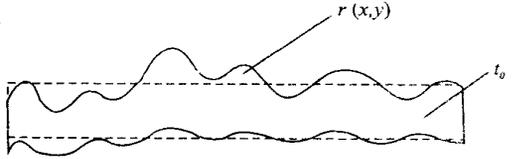


图 3 粗糙墨层的分解

进一步讨论这样的随机透射屏的特性可以

发现,振幅透射率  $t_s(x, y)$  是纯实数并且非负,其值介于 0 与 1 之间,可以认为这个屏的振幅透射率为两部分

$$t_s(x, y) = t_0 + V(x, y). \quad (15)$$

$t_0$  是实数的非负的偏置值,介于 0 与 1 之间;而  $r(x, y)$  则取成一个空间平稳、零均值的实值随机过程,其值限于下述范围

$$-t_0 \leq r(x, y) \leq 1 - t_0. \quad (16)$$

式 (12) 指出,有随机屏系统的平均光学传递函数是无屏时的光学传递函数和屏的归一化自相关函数的乘积.容易看出,屏的自相关函数是

$$\Gamma_r(\Delta x, \Delta y) = E\{[t_0 + r(x, y)][t_0 + r(\Delta x, \Delta y)]\} = t_0^2 + \Gamma_r(\Delta x, \Delta y), \quad (17)$$

式中  $\Gamma_r$  是  $r(x, y)$  的自相关函数,所需的归一化常数是

$$\Gamma_r(0, 0) = t_0^2 + \overline{r^2} = t_0^2 + \sigma_r^2, \quad (18)$$

而随机过程  $r(x, y)$  的归一化自相关函数的定义为

$$\overline{V_r}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\Gamma_r(\Delta x, \Delta y)}{\sigma_r^2}. \quad (19)$$

和随机屏相联系的平均光学传递函数具有如下形式

$$\overline{H_s}(u, v) = \frac{t_0^2}{t_0^2 + \sigma_r^2} + \frac{\sigma_r^2}{t_0^2 + \sigma_r^2} \overline{V_r}(\bar{\lambda}fu, \bar{\lambda}fv). \quad (20)$$

整个系统的平均光学传递函数可以通过上面这个平均光学传递函数和无随机吸收屏时系统的光学传递函数相乘而得到,即

$$\overline{H_s}(u, v) = \frac{t_0^2}{t_0^2 + \sigma_r^2} H_0(u, v) + \frac{\sigma_r^2}{t_0^2 + \sigma_r^2} H_0(u, v) \overline{V_r}(\bar{\lambda}fu, \bar{\lambda}fv). \quad (21)$$

对于半色调网点系统,则可以把网屏线数  $k$  作为载波频率来代替二维系统中的空间频率变量  $(u, v)$ ,则印刷墨层的粗糙表面的光学传递函数可以写成网屏线数  $k$  的函数.

$$\overline{H}(k) = \frac{t_0^2}{t_0^2 + \sigma_r^2} H_0(k) + \frac{\sigma_r^2}{t_0^2 + \sigma_r^2} H_0(k) \overline{V_r}(\bar{\lambda}fk). \quad (22)$$

由于式 (22) 归一化后为 0 到 1 的值,没有虚部,  $\overline{H}(k)$  即为粗糙墨层的平均调制传递函

数  $\overline{MTFi}$ ,  $H_0(k)_i$  则为不受粗糙墨层起伏部分干扰的调制传递函数  $MTFi$ .

$$\overline{MTFi}(k) = \frac{t_0^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} MTF_i(k) + \frac{\epsilon_r^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} MTF_i(k) V_r(\lambda f k). \quad (23)$$

用随机透射屏描述了粗糙表面油墨层对光线的随机透射性能,从而建立墨层的调制传递函数式(式 23).注意到两个性质:1)粗糙墨层的  $\overline{MTFi}$  与网屏线数  $k$  和墨层的表面粗糙度  $\epsilon_r$  有关;对很高的网屏线数  $k$ ,  $V_r(\lambda f k) \rightarrow 0$ ,

$$\overline{MTFi}_s = \frac{t_0^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} \quad (24)$$

如果  $\epsilon_r^2 \ll t_0^2$ , 则  $\frac{t_0^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} \rightarrow 1$ , 即  $\overline{MTFi} = MTF_i$ , 表示半色调系统油墨层的表面粗糙度对系统的成像质量几乎没有影响;如果  $\epsilon_r^2 \gg t_0^2$ , 则  $MTFi$  很小, 这表示很高网线数  $k$  受到随机屏很强的抑制, 图像细节部分将受到墨层表面粗糙度的很大影响, 严重影响复制品的质量.

### 3 非涂料纸表面调制传递函数 $MTF_p$

非涂料纸张表面没有改变纸张印刷性能和成像性能的涂层,所以非涂料纸的印刷和成像性能完全取决于造纸纤维特点.在制浆、打浆、施胶、加填和染色等纸张制造过程中所形成且存在于纸面的着墨性差的斑点等缺陷常常会出现在纸张表面,在半色调网点成像系统中,这些缺陷会干扰印刷品成像,使印刷质量大大降低.

按信息传输理论,图文复制(即印刷)实际上是一种图文信息的传递过程,即把原稿信息传递到复制品的过程,纸张的光信号传输性质是影响复制品图像再现质量的一个重要因素.所以可把非涂料纸张上所含有的斑点等缺陷等效为一张透射率空间频率随机分布的随机吸收屏进行研究,这样人们观察复制品的成像光路可用图 4 的等效系统表示,这里的物面是理想复制品.

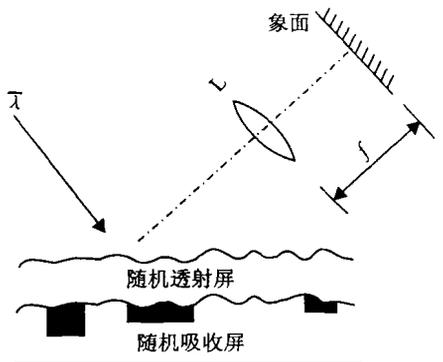


图 4 复制品观察等效光路

现在分析非涂料纸表面特性对半色调成像系统的影响.考虑到斑点对光线传输的阻碍作用和网点特性,把纸面分割成  $N$  个  $l \times l$  方格,  $l$  是斑点的平均线度,设斑点的透射率非 0 即 1,即斑点构成阶跃式棋盘随机吸收屏,如图 5 所示.

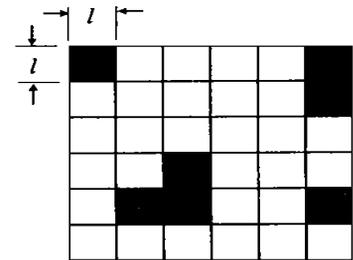


图 5 矩形缺陷纸面随机吸收屏

设有  $t_s = 1$  (全透) 的概率为  $p$ ,  $t_s = 0$  (斑点) 的概率为  $1-p$ . 由概率理论可知,  $N$  个方格中有  $m$  个白格(全透)的概率由二项式分布表示.

$$P_N(m) = \frac{N!}{(N-m)! m!} p^m (1-p)^{N-m}. \quad (25)$$

白格数量平均值为  $\bar{m} = Np$ , 方差  $\epsilon_m^2 = Np(1-p)$ , 那么

可得

$$t_0 = \frac{\bar{m}}{N} = p, \quad \epsilon_r^2 = \frac{\epsilon_m^2}{N} = p(1-p), \quad \overline{t_s^2} = t_0^2 + \epsilon_r^2 = p.$$

进而得到

$$\frac{t_0^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} = p, \quad (26)$$

$$\frac{\epsilon_r^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} = 1 - p. \quad (27)$$

而  $V_r(\bar{\lambda}fu, \bar{\lambda}fv)$  可以表示为

$$V_r(\bar{\lambda}fu, \bar{\lambda}fv) = \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fu}{l}\right|\right) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fv}{l}\right|\right). \quad (28)$$

那么网点复制品纸张的平均光学传递函数为

$$\bar{H}(u, v) = \frac{t_0^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} H_0(u, v) + \frac{\epsilon_r^2}{t_0^2 + \epsilon_r^2} H_0(u, v) V_r(\bar{\lambda}fu, \bar{\lambda}fv). \quad (29)$$

将式 (26)~ (28) 代入 (29), 则

$$\bar{H}(u, v) = p H_0(u, v) + (1 - p) H_0(u, v) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fu}{l}\right|\right) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fv}{l}\right|\right), \quad (30)$$

式中随机吸收屏相联系的平均光学传递函数具有如下形式

$$\bar{H}_s(u, v) = p + (1 - p) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fu}{l}\right|\right) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fv}{l}\right|\right). \quad (31)$$

$\bar{H}_s(u, v)$  也就是纸张表面缺陷组成的随机吸收屏的平均光学传递函数。

同样, 对于一维半色调系统, 用网屏线数  $k$  作为载波频率, 则非涂料纸表面的光学传递函数为

$$\bar{H}(k) = p H_0(k) + (1 - p) H_0(k) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fk}{l}\right|\right). \quad (32)$$

式 (32) 归一化后为 0 到 1 的值, 没有虚部,  $\bar{H}(k)$  即为非涂料纸表面的平均调制传递函数  $\overline{MTF}_p$ ,  $H_0(k)$  则为理想纸面的调制传递函数  $MTF_p$ .

$$\overline{MTF}_p(k) = p MTF_p(k) + (1 - p) MTF_p(k) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fk}{l}\right|\right), \quad (33)$$

其中与随机吸收屏相联系的  $\overline{MTF}_p$  为

$$\overline{MTF}_p(k) = p + (1 - p) \left(1 - \left|\frac{\bar{\lambda}fk}{l}\right|\right). \quad (34)$$

设印刷网点的大小  $L \times L$ , 那么理想复制的调制传递函数

$$\overline{MTF}_p = \left(1 - \left|\frac{k}{2k_0}\right|\right), \quad (35)$$

其中  $k_0 = \frac{L}{\lambda f}$  是截止频率。

以上可见, 调制传递函数不仅能反映其频率特性对成像的影响, 而且能通过一些光学特性参数分析, 反映出对成像质量的影响。如不考虑人眼的影响, 若  $p \approx 1, L \gg l$ , 则斑点对复制品图像信息的传递影响较小; 而当  $p$  下降,  $l \gg L$ , 则纸面斑点明显影响复制品图像再现的质量。

## 4 结论

通过以上分析, 可以得到非涂料纸印刷网点粗糙墨层的调制传递函数  $\overline{MTF}_i$ , 非涂料纸表面特性的调制传递函数  $\overline{MTF}_p$ , 代入式 (3)~ (6), 则可分别求得  $G(F_p)$ 、 $G(F_p)$  和  $H_p(F_i)$ 、 $H_i(F_i)$ , 再代入式 (1) 和式 (2), 可以得到非涂料纸的网点墨层和网点纸间纸面的反

射率  $R_i$  和  $R_p$ , 再运用默里 - 戴维斯公式, 就可以从理论上求得某一网面积率下的反射率  $R(F_i)$ . 从上述关系可见, 影响半色调系统反射率  $R_i(F_i)$  或  $R_p(F_p)$  的因素除了网屏线数  $k$  和网点面积率  $F_i(F_i = 1 - F_p)$  以外, 还有网点和网点间纸面的调制传递函数, 而不同的油墨和不同的纸张就会有不同的调制函数, 要得到准确的半色调系统的反射率  $R(F_i)$ , 则必须得到油墨和纸张的调制传递函数, 以准确确定在具体印刷材料上的印刷密度.

## 参考文献:

- [1] ARNEY J S, ENGELDRUM P G. An expanded Murry - Davies model of tone reproduction in halftone imaging [J]. J Imaging Sci Technol, 1995, 39: 502
- [2] ARNEY J S, ENGELDRUM P G. Modeling the Yule-Nielsen Halftone Effect [J]. Imaging Science Technology, 1996, 40: 233.
- [3] ARNEY J S, ENGELDRUM P G. An MTF Analysis of papers [J]. J Imaging Science Technology, 1996, 40: 19.
- [4] 顾德门 J W. 统计光学 [M]. 詹达三译. 北京: 科学出版社. 1992.
- [5] 庄松林. 光学传递函数 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [6] 冯瑞乾. 印刷油墨转移原理 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 1987.

## Yule-Nielsen Effect of Noncoated Paper for Printing Dot

TANG Zheng-ning, ZHANG Yi-xin, ZHOU Cun-xia

(Department of Computing Science and Information Communication, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036)

**Abstract** The Yule-Nielsen effect of noncoated copy paper is studied with the optical information theory in the resolution and tone reproduction characteristics of images printed on paper. This article focuses on the halftone system of the noncoated paper and the rough dot is abstractly taken as the random transparency screen. Similarly, the surface of the noncoated paper on which there are the defect like the dark spot can be abstractly taken as the random absorption screen. The MTF corresponding to the random transparency and absorption screen has been obtained in order to modify the idealized halftone system printed on the surface of the noncoated copy paper. The reflectance of the dots and the paper between the dots with the fractional dot area for the noncoated paper can be obtained respectively based on the idealized halftone line system modified by MTF, and the Yule-Nielsen effect for the noncoated copy paper can be modeled.

**Key words** printing dot; modulation transfer function; noncoated paper; dot gain