

文章编号: 0253-2239(2007)02-0365-6

半色调荧光图像的光谱反射与透射模型

张逸新¹ 杜艳君²

(¹ 江南大学理学院, 无锡 214122
² 江南大学信息工程学院, 无锡 214122)

摘要: 荧光油墨半色调印刷品的显色预测规律是彩色成像领域内十分关键的课题。把荧光半色调印刷品反射出来的光分成两个独立的部分, 即由最初入射光组成的主光流和由于吸收了主光流而产生的荧光流; 并且采用了一个指数矩阵来描述墨层产生的荧光光强, 从而得出了荧光半色调图像色彩的光反射规律。考虑到入射光中从一种颜色油墨入射后再由同色油墨出射的概率要比从其它色油墨出射的概率要大的事实, 讨论中引入权重因子描述从同色油墨出射部分与从整个表面出射部分比例不同的现象, 建立了荧光油墨半色调图像的 Clapper-Yule 新光谱反射率模型。

关键词: 色彩预测; 荧光; Clapper-Yule 模型; 多重反射

中图分类号: O433.1 文献标识码: A

Clapper-Yule Spectral Reflection and Transmission of Halftone Color Fluorescent Image

Zhang Yixin¹ Du Yanjun²

(¹ School of Science, Southern Yangtze University, Wuxi 214122
² School of information Technology, Southern Yangtze University, Wuxi 214122)

Abstract: The color prediction law of fluorescent ink half tone is a pivotal problem in the region of color imaging processing. The reflective law of color fluorescent ink half tone is generalized by utilizing the idea that the reflected light by fluorescent print is divided into two parts: primary streams which consist of originally incident light and fluorescent streams which are created by absorption of the primary stream. And an exponential matrix modeling the layer of fluorescent ink is utilized to compute the energy of fluorescence. The weighted factor is introduced to describe the phenomenon that the proportion is different between the exit light from the same colorant and from whole surface by taking into account the fact that proportionally more incident light through a given colorant surface is reflected back onto the same colorant surface than onto other colorant surfaces. And an improved spectral reflection Clapper-Yule model is presented for the fluorescent ink halftone.

Key words: color prediction; fluorescence; Clapper-Yule model; multiple reflections

1 引 言

近 50 年来, 图像处理工作者都致力于研究建立一个能准确描述半色调图像的色彩以及光学光谱反射率模型^[1~4]。1953 年 Yule 和 Clapper 考虑了发生在纸张内部的光横向散射以及发生在空气-纸张(墨像)界面上的多重内部反射, 建立了著名的 Clapper-Yule 模型^[3]。实际运用中, 人们发现, 根据 Clapper-Yule 模型预测出来的反射光谱普遍都偏暗。对纸张的调制传递函数^[6]和高斯线形传播函数^[7]研究结果表明: 有 95% 的光在涂层纸张中传播

的距离都不会超过 0.13 mm, 对于加网频率为 20~60 line/cm 的半色调图像来说, 光从一色墨像进入又从同色墨像穿出的概率远远大于这色墨像的网点面积率, 因此, Clapper-Yule 模型中关于光从一色墨像出射的概率等于此色墨像的覆盖率的假设是不满足的, 这样就造成了 Clapper-Yule 模型的不精确性。于是, R. D. Hersch 通过假设光在墨像(像基)内传输所通过的光程可以分为长程与短程的分程近似, 建立了分程 Clapper-Yule 模型^[1,2]。但是, 现有的应用于普通墨像的 Clapper-Yule 光谱预测模型

张逸新(1956—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光无线通信、纸张光学方面的研究。

E-mail: zyx@sytu.edu.cn

收稿日期: 2006-02-14; 收到修改稿日期: 2006-09-11

对荧光墨像却并不实用。

本文依据荧光油墨的光吸收与辐射规律,根据光线在半色调图像内多次反射过程满足长短分程规律的近似,研究并建立了半色调荧光图像的光谱反射率新模型。

2 基本近似

为了避免 Clapper-Yule 模型预测反射率低于实际反射率的问题,假设从半色调图像出射的光线中有 b 部分光是从某给定颜色层进入并从同色颜色层出射,而有 $1-b$ 部分光服从 Clapper-Yule 模型所假设的传输规律进入图像层后从整个图像表面出射。进一步假设固体墨像的透射率为 t_v , 图像基的透射率 $t_g=1$ 。

再次设光通过厚度为 d 的荧光图像层后出射光强满足下述规律^[8,9]:

$$I(d) = \exp(Mcd) \cdot I_0, \quad (1)$$

式中 I_0 是入射光的光强, c 是墨像荧光物质的浓度, d 是墨像的厚度, M 是荧光密度矩阵, 由反映墨像吸收的吸收矩阵 A 和所产生的荧光矩阵 F 迭加构成^[8,9]:

$$M = A + F =$$

$$-2 \ln 10 \left\{ \begin{bmatrix} \epsilon(\lambda_1) & \cdot & 0 \\ \cdot & \epsilon(\lambda_i) & \cdot \\ 0 & \cdot & \epsilon(\lambda_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{i,j} & \cdot & 0 \end{bmatrix} \right\}, \quad (2)$$

式中 $K_{i,j} = -\epsilon(\lambda_j) f(\lambda_i) \Delta\lambda \frac{Q}{2}$, $\epsilon(\lambda_j)$ 是墨像的消光系数, $f(\lambda_i)$ 是荧光分子的归一化荧光光谱, λ 是光波波长, Q 是荧光墨像的量子产出率^[10]。

设在半色调荧光图像中传输的光由与入射光对应的主光流和荧光物发射的荧光流构成。由(1)式能够得出光通过厚度为 d 的荧光图像时, 因图像吸收而减少的主光流光强 I_1 和被吸收光能而产生的荧光流的光强 I_2 :

$$I_1(d) = \exp(Acd) I_0, \quad (3)$$

$$I_2(d) = \exp(Fcd) I_0, \quad (4)$$

由于这是在实地印刷的基础上进行的, 而我们的模型针对的是半色调印刷, 所以荧光光强和入射光的衰减都和网点面积率 a 成正比, 所以

$$I_1(d) = \exp(Acd) I_0 a, \quad (5)$$

$$I_2(d) = \exp(Fcd) I_0 a, \quad (6)$$

分析表明^[8,9], 向上、向下方向传输的荧光应该大小相等, 即

$$I_{u\uparrow} = I_{u\downarrow} = I_2(d) = \exp(Fcd) I_0 a, \quad (7)$$

式中 $I_{u\uparrow}$ 是整个墨像层产生的向上的荧光强度, $I_{u\downarrow}$ 是整个墨像层产生的向下的荧光强度。

3 荧光墨像半色调模型

3.1 荧光墨像透射率 t_v 的计算

根据光入射到介质分界面时的反射与通过介质时的吸收规律可知, 当光入射到荧光图像层表面的时候, 图像层外表面将首先反射部分光 $I_0 r_s$, 余下的光 $I_0(1-r_s)$ 将进入图像层内部并被图像介质材料按式(3)表示规律部分吸收, 然后在图像(层)基与空气构成的界面处发生多重内反射, 在每次反射过程中将有部分光从上、下两表面透射出来, 假设不考虑油墨的吸收, 那么出射光分布将如图 1 所示。

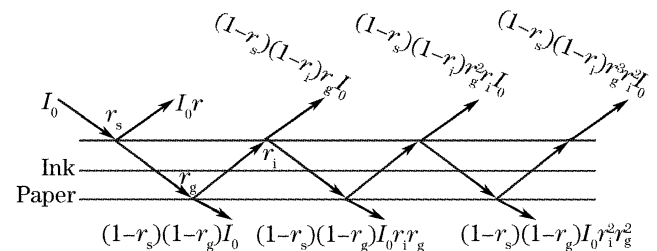


图 1 没有吸收下的多次反射

Fig. 1 Multiple reflections without absorption

对所有上、下表面出射光进行叠加求和, 可得出

$$I_{\uparrow} = I_0 r_s + \frac{(1-r_s)(1-r_i)r_g I_0}{1-r_i r_g},$$

$$I_{\downarrow} = \frac{(1-r_s)(1-r_g) I_0}{1-r_i r_g},$$

其中 r_s 是印刷品的内反射率, r_g 是承印基质的底面反射率, r_i 是墨像与空气构成界面的内反射率(见图 1)。

但是事实上, 考虑到入射光穿过油墨层的时候会有一部分光被油墨层吸收, 于是假设入射光进入油墨内部一开始就被荧光分子吸收了 $I_1(d) = \exp(Acd) I_0$ [(3) 式] 这么多光强, 接着, 剩下的光才开始如图 1 所示开始多重内部反射, 所以, 用 $I_0 - I_1(d)$ 代替图 1 中的 I_0 就可以得到在有吸收情况下, 由纸张底部透射出来的光强和从印刷品表反射出来的光强:

$$I'_{\uparrow} = [I_0 - I_1(d)] \left[r_s + \frac{(1-r_s)(1-r_i)r_g}{1-r_i r_g} \right],$$

$$I'_{\downarrow} = [I_0 - I_1(d)] \frac{(1-r_s)(1-r_g)}{1-r_i r_g}. \quad (8)$$

考虑到荧光图像在吸收光后将产生可见波段的可见荧光, 可以通过积分的方式计算出了厚度为 d 的荧光墨像产生的荧光流的强度^[8,9]。进一步考虑

到荧光墨像所产生的荧光是从光入射到荧光图像表面开始直到图像层底部才结束。为了简化分析,设荧光图像的光吸收与荧光的产生是均匀的,因此可把荧光层等效为位于图像层中间,即离表面为 $d/2$ 的处的 c 面,所有的荧光物质产生的荧光(向上和向下的)均由此面所产生,到达墨层上下界面的荧光的大小为 $I_2(d) = \exp(Fcd/2)I_0$,如图 2。

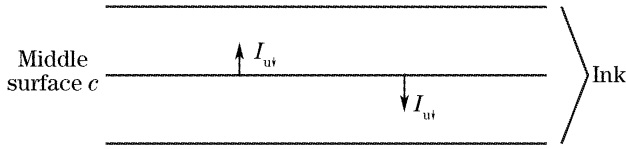


图 2 荧光产生面

Fig. 2 Fluorescence emission surface

假设所产生的可见荧光在图像层中穿行时不被墨层再次吸收。向下散射的荧光到达墨层下表面时将被像基向上反射并开始在墨像层内发生多重反射,同样,向上散射的荧光到达空气与图像(或基)构成的界面时也将发生向下散射,并从此开始多重内反射(图 3)。

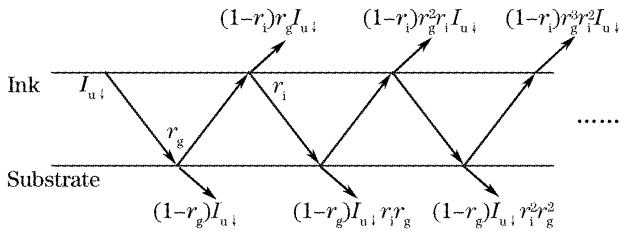


图 3 向下散射的荧光的传播过程

Fig. 3 Propagation of downward fluorescent light

由图 3,在图像上下表面出射的光强为

$$I_{u\downarrow\uparrow} = \frac{I_2 r_g (1 - r_i)}{1 - r_g r_i}, \quad I_{u\uparrow\downarrow} = \frac{I_2 (1 - r_g)}{1 - r_g r_i}, \quad (9)$$

同理,对于向上散射荧光而言也有相似的传播:

$$I_{u\uparrow\uparrow} = \frac{I_2 (1 - r_i)}{1 - r_g r_i}, \quad I_{u\downarrow\downarrow} = \frac{I_2 r_i (1 - r_g)}{1 - r_g r_i}. \quad (10)$$

由(9)式与(10)式,就可以计算出整个荧光部分由墨像底层透射出来的光量:

$$I_{ut} = I_{\downarrow\downarrow} + I_{u\uparrow\downarrow} = \frac{I_2 (1 - r_g) (1 + r_i)}{1 - r_g r_i}, \quad (11)$$

而荧光图像层的透射率就为

$$t = \frac{I_0 - I'_{\uparrow} + I_{ut}}{I_0} = [1 - \exp(Acd)] \frac{(1 - r_s) (1 - r_g)}{1 - r_i r_g} + \frac{\exp(Fcd) (1 - r_g) (1 + r_i)}{1 - r_g r_i}, \quad (12)$$

(12)式中第一项代表了只考虑主光流的减少而不考虑荧光流的增加这种情况下油墨的透射率,前两项一起,即方程(12)代表了既考虑主光流的减少又考虑荧光流的增加这种情况下油墨的透射率,这才是荧光油墨真正的透射率。

3.2 荧光图像 Clapper-Yule 反射率

设荧光图像的荧光光谱和吸收光谱并不明显重合,即所产生的荧光不会被荧光分子再次吸收。因此,将荧光图像的反射光分为独立的两部分,即被荧光分子吸收而减少的主光流和吸收主光流而产生的可见荧光流,这两部分光互不干涉互不影响。

所谓荧光流的 Clapper-Yule 模型其实就是用可见荧光来代替入射光后得到的 Clapper-Yule 模型。由整个图像层的荧光都是由中间 c 面产生的近似,就可以把向上和向下散射的荧光以及它们在图像以及纸张内部的传播过程用图 4 和图 5 表示。

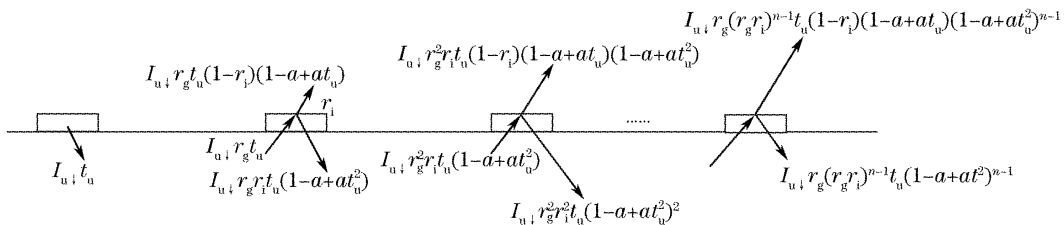


图 4 半色调图像中向下传输荧光多次反射消光

Fig. 4 Attenuation of downward fluorescent light by reflections on a halftone image

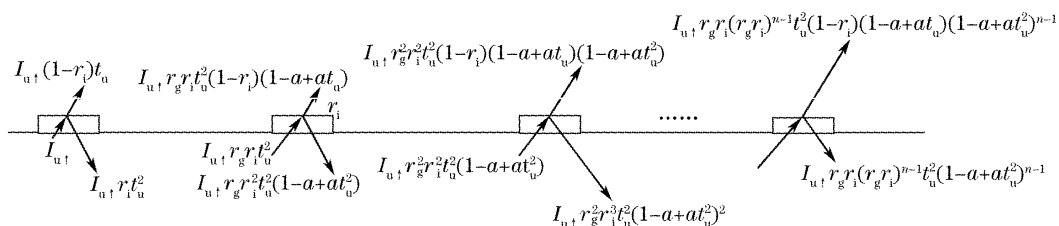


图 5 半色调图像中向上传输荧光多次反射消光

Fig. 5 Attenuation of upward fluorescent light by reflections on a halftone image

虽然我们针对的是一个半色调印刷,但是这里只考虑荧光,当荧光第一次被纸基底面以 r_g 反射回去的时候,是用 $1-a+at_u$ 这个量来表达它从半色调印刷品中第一次出射的部分。如果仔细分析就可以发现,第一次被纸基底面以 r_g 反射回去的光如果是从墨像部分出射的话,因为墨像对荧光不产生吸收,那么将是整个光除了被 r_i 向下反射的外都将透射出去,因此这里的透射率 r_u 实际上等于 1,于是 $1-a+at_u=1-a+a=1$,即光从墨像处透射和空白处透射是没有区别的,这时的半色调图像则相当于一个实地图像。因此将各部分相加求和并化简可以得到

$$I_{u\downarrow\uparrow} = \frac{(1-r_i)I_2 r_g}{2(1-r_g r_i)}, \quad I_{u\uparrow\uparrow} = \frac{(1-r_i)I_2}{2(1-r_g r_i)}, \quad (13)$$

所以,向上散射的荧光出射的光量加上向下散射的荧光出射的光量就是整个荧光由印刷品上表面出射的光量,由此可得此时的反射率为

$$R(\lambda) = \frac{I_{u\downarrow\uparrow} + I_{u\uparrow\uparrow}}{I_2} = \frac{(1-r_i)(1+r_g)}{2(1-r_g r_i)}, \quad (14)$$

从(14)式也可以看出,荧光的反射只与纸张的底面反射率 r_g 以及内部反射率 r_i 有关而与墨像数量和种类无关。那么,即使用黄品青三色印刷,整个印刷品产生的荧光的反射率依旧为 $R(\lambda)$,也就是说在这里,单色印刷和多色印刷没有区别。

3.3 荧光墨像的新色彩预测模型

由分层 Clapper-Yule 模型^[1,2]分析方法,入射光将分解为两部分,一部分光 b 从一色墨像进入由同色墨像出射;另一部分光 $1-b$ 按照 Clapper-Yule 模型描述光传播方式那样传播。 b 部分光在墨像内部传播后由表面出射的这部分光量,我们认为是荧光部分和入射光中未被吸收部分叠加的结果,所以:

首面反射的光为 bKr_s ,其中 K 是测量系数。
第一次出射的光:

$$b\{I_0(1-r_s)(1-r_i)r_g(1-a+at_v^2) + I_{u\downarrow}(1-r_i)r_g + I_{u\uparrow}(1-r_i)\}$$

第二次出射的光:

$$b\{I_0(1-r_s)(1-r_i)r_g(1-a+at_v^2 t_v^2)(r_g r_i) + I_{u\downarrow}(1-r_i)r_g^2 r_i + I_{u\uparrow}(1-r_i)r_i r_g\},$$

第三次出射的光:

$$b\{I_0(1-r_s)(1-r_i)r_g[1-a+at_v^2 t_v^4](r_g r_i)^2 + I_{u\downarrow}(1-r_i)r_g^3 r_i^2 + I_{u\uparrow}(1-r_i)r_i^2 r_g^2\},$$

.....

第 n 次出射的光:

$$b\{I_0(1-r_s)(1-r_i)r_g[1-a+at_v^2 t_v^{2(n-1)}](r_g r_i)^{n-1} + I_{u\downarrow}(1-r_i)r_g(r_g r_i)^{n-1} + I_{u\uparrow}(1-r_i)(r_i r_g)^{n-1}\}.$$

上式第一项是主光流出射的光,第二项是向下散射的荧光流出射的光,第三项是向上散射的荧光流出射的光,三项相加,就是整个荧光图像中,由一色墨像进同色墨像出这部分入射光中出射的光了。对 n 次出射的光求和并代入方程(7)有

$$I_{b\uparrow} = bI_0 K r_s + bI_0(1-r_s)(1-r_i) \left[\frac{(1-a)r_g}{1-r_i r_g} + \frac{a r_g t_v^2}{1-r_i r_g t_v^2} \right] + b \frac{I_2(1-r_i)(1+r_g)}{1-r_g r_i}, \quad (15)$$

其中 t_v 是仅考虑荧光物质的光吸收而不考虑荧光的透射率。根据前面已经计算出来的结果, t_v 就等于(12)式的第一项,即:

$$t_v = [1 - \exp(Acd)] \frac{(1-r_s)(1-r_g)}{1-r_i r_g}. \quad (16)$$

下面计算按照 Clapper-Yule 模型假设的那样,由整个表面出射的这 $1-b$ 部分入射光它出射的光强。主光流的这部分光强的计算可以直接应用文献[1]的结果,下面需要做的就是求出荧光流的这部分光强。由于荧光不会被再次吸收这个事实,我们认为荧光部分出射的光强和有无油墨覆盖、覆盖油墨厚度、覆盖率等因素都不相关,而只与图像基底面反射率以及内部反射率有关。这表示无论荧光是从同色墨像出射(光的中短距离传播)还是从整个表面出射(光的长距离传播),情况都是一样的。那么, $1-b$ 这部分荧光的出射光强所遵循的规律类似于这部分荧光的出射光强。所以有

$$I_{(1-b)\uparrow} = (1-b)I_0 K r_s + (1-b)I_0 \frac{(1-r_s)(1-r_i)r_g(1-a+at_v)^2}{1-r_i r_g(1-a+at_v^2)} + (1-b) \frac{I_2(1-r_i)(1+r_g)}{2(1-r_g r_i)}, \quad (17)$$

对两部分光进行加权求和之后就可以得到

$$I_{\uparrow} = I_{b\uparrow} + I_{(1-b)\uparrow} = I_0 K r_s + b I_0 (1 - r_s)(1 - r_i) \left[\frac{(1 - a)r_g}{1 - r_i r_g} + \frac{a r_g t_v^2}{1 - r_i r_g t_v^2} \right] + (1 - b) I_0 \frac{(1 - r_s)(1 - r_i)r_g(1 - a + a t_v^2)}{1 - r_i r_g(1 - a + a t_v^2)} + \frac{I_2(1 - r_i)(1 + r_g)}{2(1 - r_g r_i)}, \quad (18)$$

代入(5)式和(6)式。于是,就可以得出荧光墨像半色调模型的反射光谱:

$$R(\lambda) = \frac{I_{\uparrow}}{I_0} = K r_s + b(1 - r_s)(1 - r_i) \left[\frac{(1 - a)r_g}{1 - r_i r_g} + \frac{a r_g t_v^2}{1 - r_i r_g t_v^2} \right] + (1 - b) \frac{(1 - r_s)(1 - r_i)r_g(1 - a + a t_v^2)}{1 - r_i r_g(1 - a + a t_v^2)} + \frac{\exp(Fcd)(1 - r_i)(1 + r_g)a}{1 - r_g r_i}, \quad (19)$$

将其扩展到黄品青三色荧光油墨半色调图像,就有

$$R(\lambda) = K r_s + \frac{\exp(Fcd)(1 - r_i)(1 + r_g)a}{1 - r_g r_i} + (1 - r_s)(1 - r_i)r_g \left[b \sum_{j=1}^8 \frac{a_j t_{vj}^2}{1 - r_i r_g t_{vj}^2} + (1 - b) \left(\sum_{j=1}^8 a_j t_{vj} \right)^2 / \left(1 - r_i r_g \sum_{j=1}^8 a_j t_{vj}^2 \right) \right]. \quad (20)$$

4 模拟与讨论

由于实验条件有限,我们推导出来的模型只能用计算机软件模拟的方式进行一个初步的验证。

通过对相关资料的查找,我们找到方程中需要的部分已知量,比如首面反射率、内反射率、承印物基质反射率以及荧光墨像的量子产出率等,并代入模型就能求出需要的印刷品的反射率。以下就是在 Matlab 中描绘的横轴为网点面积率 a ,纵轴为反射率 R 的曲线图(图 6)。

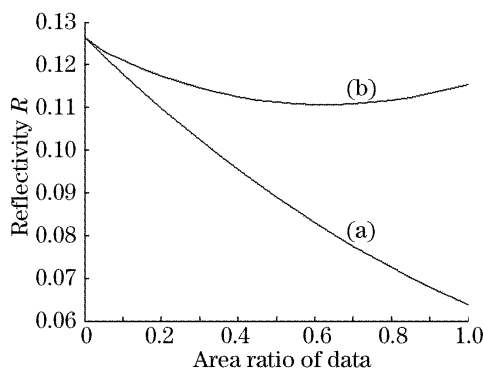


图 6 经典 Clapper-Yule 模型(a)与新 Clapper-Yule 模型(b)的反射率曲线

Fig. 6 Curves of classical Clapper-Yule model (a) and new Clapper-Yule model (b)

图 6 中上方的曲线是由我们推导的新模型计算出来的,下方的是由经典 Clapper-Yule 模型计算出来的曲线。从计算出来的曲线可以得出以下结论:

1) 在网点面积率为 0,即没有油墨印刷在承印物上的时候,新的模型和经典 Clapper-Yule 模型的结果一样,这说明此时,模型清楚地表达了空白纸张的反射率。

2) 经典 Clapper-Yule 模型的反射率是随着网点面积率的增加而减小的,而针对荧光油墨印刷品的新模型的反射率并不是随着网点面积率单一地减小,而是先随着网点面积率的增加而减小,而当网点面积率达到一定值时又随着其增加而增加,这是由于荧光物质的增多导致产生的荧光增多而逐渐造成的。

3) 新模型预测的反射率普遍比用经典 Clapper-Yule 模型预测的反射率要高,这是由于使用了荧光油墨而增加的荧光造成的。

5 结 论

本文假设了光在荧光图像中传输时存在短程和长程的区别,即部分光的横向传输距离远小于半色调网距周期的短程和部分光横向传输距离远大于半色调图像网距周期的长程,建立了荧光半色调图像的光谱反射率预测模型,通过这个模型,可以预测任意光源照明下荧光物浓度不同的半色调图像的光谱反射率。

参 考 文 献

- 1 R. D. Hersch, P. Emmel. Spectral reflection and dot surface prediction models for color halftone prints[J]. *J. Electronic Imaging*, 2005, **14**(3): 033001-1~033001-12
- 2 R. D. Hersch, F. Collaud, F. Crétel et al.. Spectral prediction and dot surface estimation models for halftone prints[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5293**: 356~369
- 3 F. R. Clapper, J. A. C. Yule. The effect of multiple internal reflections on the densities of halftone prints on paper[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1953, **43**(7): 600~603
- 4 G. Rogers. A generalized Clapper-Yule model of halftone reflectance[J]. *Color Res. Appl.*, 2000, **25**(6): 402~407
- 5 Du Yanjun, Zhang Yixin. The classical models of color printing [J]. *Packaging Engineering*, 2006, **27**(2): 99~101 (in

Chinese)

杜艳君,张逸新. 经典色彩呈色模型[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 99~101

6 S. Inoue, N. Tsumara, Y. Miyake. Measuring MTF of paper by sinusoidal test pattern projection[J]. *J. Imaging Sci. Technol.*, 1997, 41(6): 657~661

7 F. R. Ruckdeschel, O. G. Hauser. Yule-Nielsen effect in printing: a physical analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1978, 17(21): 3376~3383

8 P. Emmel, R. D. Hersch. A "one channel" spectral color prediction model for transparent fluorescent ink on a transparent

support [C]. *Proc. the IS&T/SID 5th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*, Scottsdale, Arizona, USA, 70~77, Nov, 17~20, and 1997

9 P. Emmel, R. D. Hersch. Spectral color prediction model for a transparent fluorescent ink on paper[C]. *Proc. the IS&T/SID 6th Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*, Scottsdale, Arizona, USA, 116~122. Nov, 17~20, 1998

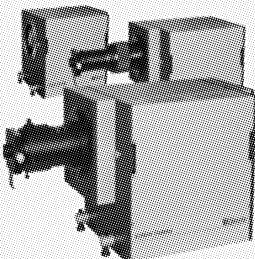
10 J. C. Scaiano. *CRC Handbook of Organic Photochemistry* [M]. Volume I, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1989, 233~236



www.HRTLaser.com

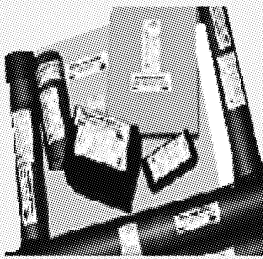
专业的激光全息解决方案提供商和系统集成商

条纹相机



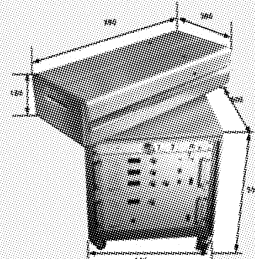
可至2ps的时间分辨率
8-35mm的光阴极
高至4MHz的触发扫描
高至250MHz的同步扫描

全息干板



单色和全色全息材料可选
分辨率大于3000线对/毫米
45%-75%的衍射效率
乳胶颗粒大小8-40纳米

激光器



可同时输出多段波长
TEM00基模辐射
低至20ps的脉冲宽度
最大输出能量120毫焦

主要提供: 条纹相机、全息干板、科研级皮秒激光器、超高速CCD相机、光电子设备、全息3D打印机等



HRT — 卓越创新 高效规范

Tel: +86-755-83460 457/597
Fax: +86-755-83460 401
E-mail: sales@hrtlaser.com
www.hrtlaser.com