

# 相位调制潜像对图像呈色效果的影响

韩雪莹, 王琪, 葛乃馨

江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室, 江苏 南京 210037

**摘要** 相位调制法通过对局部网点进行位移形成潜像以达到防伪目的,而潜像网点空间位置变化会对图像呈色效果产生影响。通过探索相位调制方案给网点空间分布带来的变化,分析潜像对图像呈色属性的影响。运用相位调制法中的最小位置变换和中心位置变换模型,量化得到因网点位移而对网点分布带来的局部变化量,并以此分析网点分布变化与密度变化对网点呈色效应的影响。结果表明,相位调制潜像法重置网点位置,不同网点排布状态及密度下的颜色属性发生变化,影响了图像呈色效果。因此,合理化相位调制方案是图像色彩再现的有力保障,可为防伪图像质量相关研究提供有价值的理论依据。

**关键词** 图像处理; 呈色效应; 相位调制; 网点空间结构; 颜色属性

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.071011

## Influence of Phase Modulation Latent Image on Color Rendering

Han Xueying, Wang Qi, Ge Naixin

Jiangsu Provincial Key Laboratory of Pulp and Paper Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210037, China

**Abstract** The phase modulation method forms a latent image by displacing the local dot to achieve anti-counterfeiting purposes, but the changes of the spatial position would affect the color rendering. The influence mechanism of the hidden image on the color attribute is analyzed by exploring the changes in the spatial distribution. Based on the minimum position transformation and center position transformation model in phase modulation, the local variation caused by dot displacement is quantified, and the influence of dot distribution and density on dot color rendering are analyzed. The results show that the phase modulation latent image method resets the location of dots, and the color attributes of different dot distributions and density change accordingly, which affects the image color rendering. Therefore, the rationalized phase modulation scheme is a powerful guarantee for the color reproduction, and can provide a valuable theoretical basis for the study of anti-counterfeit image quality.

**Key words** image processing; color rendering; phase modulation; dot space structure; color attribute

**OCIS codes** 100.2810; 100.2960; 100.1160; 100.2000

## 1 引言

随着科学技术的不断进步与市场需求的快速增长,图像防伪已经发展成为一项综合光学、物理学、计算机科学等多门学科和应用技术的新兴图像处理技术。由于防伪包装上的隐藏信息需要通过半色调加网

方式输出,因此,针对半色调防伪技术的研究具有实际应用价值<sup>[1-4]</sup>。半色调图像由细小网点构成,色彩层次变化通过网点大小或疏密程度表达。钟云飞等<sup>[5]</sup>研究网点特征参数对叠栅纹潜像嵌入与识别的影响时发现,单位面积内网点个数越多,潜像识别立体感越好,图像细节层次与阶调再现效果越佳。王琪等<sup>[6]</sup>为了研

收稿日期: 2017-12-27; 收到修改稿日期: 2018-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(31270629)、江苏省制浆造纸科学与技术重点实验室开放基金(201513)、特殊形态网点设计与防伪应用研究(2017NFUSPITP352)

作者简介: 韩雪莹(1993—),女,硕士研究生,主要从事光栅防伪、图像处理等方面的研究。

E-mail: hanxueyingxxsc@163.com

导师简介: 王琪(1971—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事色彩管理与控制技术、印刷防伪技术等方面的研究。

E-mail: wangqi@njfu.edu.cn(通信联系人)

究网点排布状态对色彩再现的影响及彼此之间色彩的差异性,设计了模拟网点并列、完全重叠及部分重叠的样条,测量输出样条中色块的密度、色差和光谱曲线,并进行比较。实验结果表明,在表达同一原稿色时,网点排列方式不同,色彩表现效果存在明显差异。

基于调幅(AM)加网和光栅折射性能的相位调制潜像法,以调整潜像网点位置为基础,通过重置网点分布状态将信息进行隐藏<sup>[7]</sup>,利用叠栅条纹<sup>[8]</sup>原理完成防伪信息的提取。任龙飞等<sup>[9]</sup>基于阈值矩阵的加网方法设计出具有防伪功能的艺术网点,并将隐藏信息嵌入到微结构加网的色版中,以研究微结构网点在图像防伪中的应用。实验结果表明,艺术网点边缘形状不规则,对潜像网点进行微量移动时,极少造成网点重叠现象,故隐藏效果明显好于普通圆形网点,且图像纹理表达精细,色彩再现效果最佳。赵小梅等<sup>[10]</sup>以叠栅效应为基础研究半色调图像防伪时发现,潜像的隐藏与识别能力与图像阶调再现、纹理结构、呈色效应等因素相关。因此,潜像不仅影响防伪效果,而且也会对图像颜色再现产生一定影响。为了探究相位调制潜像影响图像颜色的根源,本文对相位调制方案进行深入剖析,从网点空

间分布角度分析颜色属性变化情况。

## 2 相位调制潜像位移方案

调幅加网网格中心是单个网点的起源,网点空间位置固定,两网点间的中心距  $d$  相等<sup>[11]</sup>。相位调制法以调幅加网为基础,在加网过程中将隐形图文内的网点进行微量位移以实现潜像嵌入。根据网点移动路径,可建立最小位置变换和中心位置变换两种模型。如图 1 所示,最小位置变换是将网点平移至两相邻网点的中间位置( $A$  点),中心位置变换是将网点移动到与周围三个网点组成的正方形的中心位置( $B$  点)。由相位调制模型知:将网点调制到  $A$  点时,调制角度与加网角度一致,网点位移量为  $1/2d$ ;将网点调制到  $B$  点时,调制角度与加网角度呈  $45^\circ$ ,网点位移量为  $\sqrt{2}/2d$ 。

采用最小位置变换和中心位置变换将防伪标识隐藏至母版<sup>[12]</sup>形成防伪图像,网点形状设为圆形,加网线数设为 150 lpi(每英寸的网线数),母版加网角度设为  $0^\circ$ 。如图 2 所示,潜像标识隐藏至宿主图像后,潜像区域色彩相貌出现失真,标识轮廓肉眼可识。

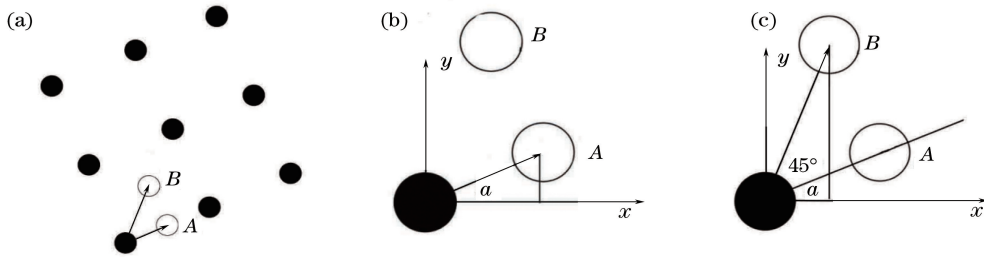


图 1 网点位置变换示意图。(a)调幅网点;(b)最小位置变换;(c)中心位置变换

Fig. 1 Schematic of dot position transformation. (a) AM screening; (b) minimum position transformation; (c) center position transformation

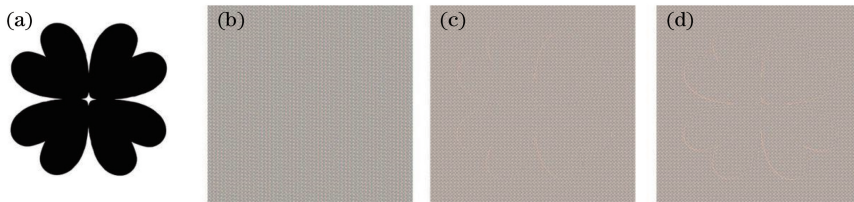


图 2 嵌入潜像示意图。(a)潜像标识;(b)宿主图像;(c)最小位置变换;(d)中心位置变换

Fig. 2 Schematic of embedded latent image. (a) Latent sign; (b) host image; (c) minimum position transformation; (d) center position transformation

## 3 图像颜色质量评价

颜色由亮度和色度共同表示,亮度反映颜色明暗程度,色度反映色调和饱和度。基于相位特征的

FSIMC (feature similarity of color)<sup>[13]</sup>算法将亮度与色度信息融合,能够综合评价彩色图像的颜色质量。FSIMC 以原始图像和失真图像的相位一致性<sup>[14-16]</sup>为特征,提取与图像相位保持高度一致性的

底层特征,并对亮度信息与色度信息进行整合,能够较好地评价图像色彩质量。

FSIMC算法中的相位一致性(PC)模型<sup>[17-18]</sup>是相位信息一致性的度量标准之一,其原理是假定图像傅里叶分量最一致的点为特征点,如此就能通过相位信息准确检测到图像特征。设图像一维信号为 $f(x)$ , $M_n^e$ 和 $M_n^o$ 分别表示尺度为 $n$ 的偶对称滤波器和奇对称滤波器,它们共同构成一个镜像滤波器对<sup>[19]</sup>。

在 $x$ 位置上,镜像滤波器与信号 $f(x)$ 的卷积为 $[e_n(x), o_n(x)] = [f(x) \times M_n^e, f(x) \times M_n^o]$ 。(1)

幅度值为

$$A_n(x) = \sqrt{e_n^2(x) + o_n^2(x)}. \quad (2)$$

局部能量函数表达式如下:

$$E(x) = \sqrt{F^2(x) + H^2(x)}, \quad (3)$$

$$F(x) = \sum e_n(x), \quad (4)$$

$$H(x) = \sum o_n(x). \quad (5)$$

由此,图像一维信号的PC值可以表示为

$$P_{PC}(x) = \frac{E(x)}{\epsilon + \sum_n A_n(x)}. \quad (6)$$

采用高斯函数作为扩展函数,从不同方向对图像一维信号进行分析,得到二维信号PC值:

$$P_{PC}(x) = \frac{\sum_j E_{\theta_j}(x)}{\epsilon + \sum_n \sum_j A_{n,\theta_j}(x)}, \quad (7)$$

式中 $\theta_j = j\pi/J$ , $j = \{0, 1, \dots, J-1\}$ 表示滤波器的方向角, $J$ 表示方向数。

CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black)颜色模式是一种专门针对印刷业设定的颜色标准,其颜色来源于反射光线,色彩评价算法极少应用于CMYK颜色模式。针对彩色图像的图像质量评价(IQA)方法一般适用于RGB模式(工业界的一种颜色标准),或将RGB转换成其他更符合人类视觉系统(HVS)的色彩模式,如文献[20]将RGB转换成能分离亮度和色度的YIQ (Luminance, In-phase, Quadrature-phase)颜色模式,然后将色度信息融合到亮度信息特征相似性算法(FSIM)中得到FSIMC。由此,运用FSIMC评价呈色质量前,须先将CMYK颜色模式转换为RGB颜色模式,再转换成YIQ颜色模式, $Y$ 分量表示图像的亮度信息, $I$ 和 $Q$ 两个分量代表色度信息,转换公式<sup>[21]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (8)$$

提取原始图像 $y_0$ 和失真图像 $y$ 的亮度信息,计算PC和梯度幅值(GM)局部特征相似图。

$$S_{PC}(y_0, y) = \frac{2P_{PC}(y_0) \times P_{PC}(y) + T_1}{P_{PC}^2(y_0) + P_{PC}^2(y) + T_1}, \quad (9)$$

$$S_{GM}(y_0, y) = \frac{2G_{GM}(y_0) \times G_{GM}(y) + T_2}{G_{GM}^2(y_0) + G_{GM}^2(y) + T_2}, \quad (10)$$

式中 $T_1$ 、 $T_2$ 均为常数,引入它们的目的是为了避免因分母为零而出现不稳定的情况。融合(9)式和(10)式得到亮度信息的局部特征图:

$$S_L(y_0, y) = S_{PC}(y_0, y) \cdot S_{GM}(y_0, y). \quad (11)$$

引入色度信息 $S_I(y_0, y)$ 与 $S_Q(y_0, y)$ :

$$S_I(y_0, y) = \frac{2I(y_0) \cdot I(y) + T_3}{I^2(y_0) + I^2(y) + T_3}, \quad (12)$$

$$S_Q(y_0, y) = \frac{2Q(y_0) \cdot Q(y) + T_4}{Q^2(y_0) + Q^2(y) + T_4}, \quad (13)$$

式中 $I$ 和 $Q$ 两个色度信息的动态范围相近,取 $T_3 = T_4$ 。结合(9)、(10)式,定义色度相似性为

$$S_C = S_I(y_0, y) \cdot S_Q(y_0, y). \quad (14)$$

在FSIMC算法基础上合并色度信息,得到 $V_{FSIMC}$ 为

$$V_{FSIMC} = \frac{\sum_{y_0, y \in \Omega} S_L(y_0, y) \cdot [S_C(y_0, y)]^{\lambda} P_{PC_m}(y_0, y)}{\sum_{y_0, y \in \Omega} P_{PC_m}(y_0, y)}, \quad (15)$$

式中 $P_{PC_m}(x, y) = \max[P_{PC}(y_0), P_{PC}(y)]$ 表示两幅图像的相位一致性加权。

由算法意义知,FSIMC值越接近1,颜色再现越准确。借助MATLAB编程,评估图2中两幅防伪图像色彩再现效果。图3中,潜像网点位移量为 $1/2d$ 和 $\sqrt{2}/2d$ 的FSIMC值分别为0.9113和0.8629,即网点进行最小位置调整的图像色彩再现性为91.13%,中心位置调整的色彩再现性为86.29%,说明两种相位调制方案下的图像颜色均不能准确再现,调整局部网点位置影响色彩再现效果,且网点位移量大时颜色真实再现程度差。

## 4 潜像影响图像色彩的机理

### 4.1 潜像对网点空间分布的影响

根据文献[10],图文信息隐藏在亮调或中间调

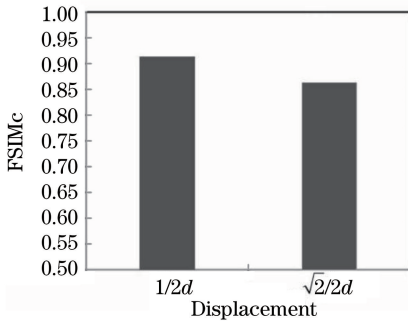


图3 不同相位调制模型下的色彩质量评价

Fig. 3 Color quality evaluation of different phase modulation models

不易出现网点搭接现象,故本研究选取低密度网点

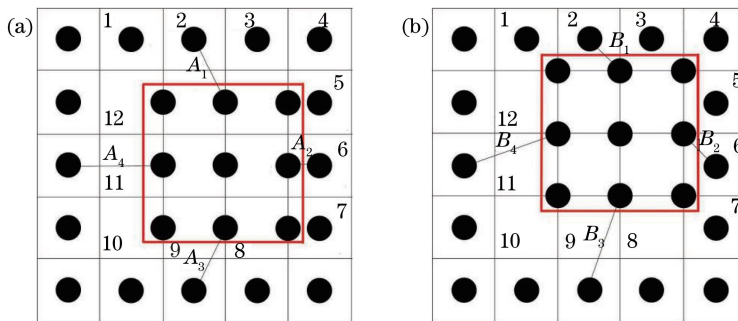


图4 相位调制潜像网点图。(a)最小位置变换;(b)中心位置变换

Fig. 4 Dot of phase modulation latent image. (a) Minimum position transformation; (b) center position transformation

区域网点稀疏, $A_2$ 区域网点密集,网点分布不均匀。假设原图中网点大小相等且每个网格中的网点面积为 $S$ ,计算网格1~12的网点覆盖率发现,网格5、6、7、10、11、12内的网点面积改变,网点面积率 $S_{a5}$ 、 $S_{a6}$ 、 $S_{a7}$ 、 $S_{a10}$ 、 $S_{a11}$ 、 $S_{a12}$ 分别为

$$S_{a5} = S_{a6} = S_{a7} = 1.5S, \quad (19)$$

$$S_{a10} = S_{a11} = S_{a12} = 0.5S. \quad (20)$$

同理求得图4(b)中潜像临界网点与相邻背景网点的中心距 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 及网格1~12的网点面积率 $S_{b1} \sim S_{b12}$ 为

$$B_1 = B_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}d, \quad (21)$$

$$B_3 = B_4 = \frac{\sqrt{10}}{2}d, \quad (22)$$

$$S_{b1} = S_{b4} = S_{b7} = 1.25S, \quad (23)$$

$$S_{b2} = S_{b3} = S_{b5} = S_{b6} = 1.5S, \quad (24)$$

$$S_{b8} = S_{b9} = S_{b11} = S_{b12} = 0.5S, \quad (25)$$

$$S_{b10} = 0.25S. \quad (26)$$

## 4.2 潜像对呈色效应的影响

### 4.2.1 网点排布状态对呈色效应的影响

半色调图像中,网点是表达颜色与层次的基础

进行分析。图4为嵌有潜像的网点模拟图,线框内网点为潜像网点,线框外网点为图像背景网点。相位调制后,原位置规则性的网点被打乱,潜像边界网点与相邻背景网点间距发生变化。

图4(a)中, $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 分别表示网点中心距,根据网点位移量求得:

$$A_1 = A_3 = \frac{\sqrt{3}}{2}d, \quad (16)$$

$$A_2 = \frac{1}{2}d, \quad (17)$$

$$A_4 = \frac{3}{2}d. \quad (18)$$

由(17)、(18)式可知, $A_4$ 为 $A_2$ 的3倍,故 $A_4$

单元,网点空间分布对图像呈色特性的影响尤为明显。基于网点分布位置,可将原色网点排布状态分为并列、叠合两种形式<sup>[22]</sup>。信息隐藏时,青色版内潜像网点按照相位调制模型进行微量位移,其他通道网点维持固定位置。青网点变换位置后,并列点子会变为重合点子,重合点子会分散成并列点子,排布状态发生变化。网点并列和网点重叠呈色原理不同,颜色属性也存在差异,具体表现如下。

1) 网点并列。网点并列呈色遵循色光加法。以黄网点与青网点并列为例,当白光照射到黄网点和青网点时,黄网点选择性地吸收白光中的蓝光而反射出红光和绿光,青网点吸收红光而反射绿光和蓝光。反射出的红光、蓝光与等量绿光组成白光,余下绿光反射出来,生成绿色,呈色原理光路图如图5(a)所示。同理,品红网点与黄网点并列形成较亮的红色,青网点与品红网点并列形成较亮的蓝色。当黄、品、青三网点并列时,每种原色网点在白光照射下都能吸收补色光而反射另外两种色光,即反射出两个单位的红、绿、蓝光,也就相当于两个单位的白光,白光减弱后在视觉中形成灰色。

2) 网点叠合。网点叠合呈色遵循减法混合原

理,即两种以上色相网点叠合形成另一种色彩时,混合色明度降低<sup>[23-24]</sup>。以黄网点与青网点叠合为例,重叠呈色原理图如图 5(b)所示。白光入射到叠合层时,黄网点吸收蓝光、青网点吸收红光,由此绿光被反射出来,黄网点与青网点叠合呈现绿色。白光入射到非叠合部分时,黄点只吸收蓝光,反射的绿

光和红光经混合后,在视觉中生成黄色刺激;青点子吸收红光,反射绿光和蓝光,形成青色。当三原色网点完全重叠时,白光中红、绿、蓝三种成分色光分别透射到黄、品、青网点,黄网点吸收蓝光、品网点吸收绿光、青网点吸收红光,白光全部被吸收后呈现黑色,光路图如图 5(c)所示。

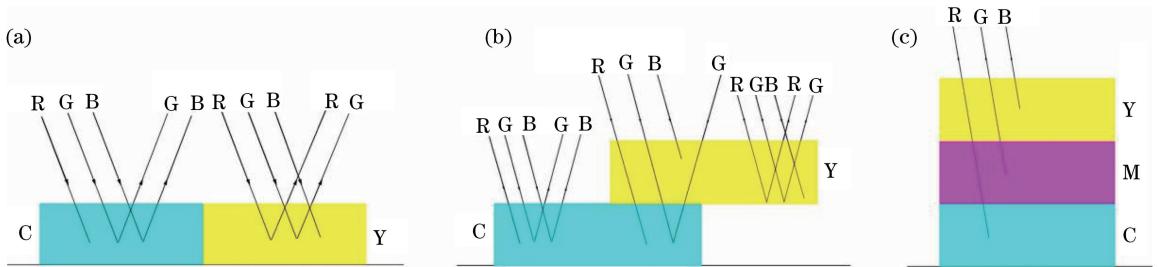


图 5 网点呈色光路图。(a)网点并列;(b)网点部分重叠;(c)网点完全重叠

Fig. 5 Optical path of dots color rendering. (a) Dots juxtaposition; (b) dots part overprint; (c) dots all overprint

综上,网点排列形式不同,呈色效果不同。网点并列排布时,所呈颜色亮度增加且不再现网点原色;网点重合时,重合部分的混合色亮度降低,非重合部分再现网点原色。如此,重置潜像位置后,网点呈色效应随排列状态的改变而变化,由于排布形式变化随机且必然,故空间位置上的颜色变化量具有不一致性,造成图像色彩无法真实呈现。

#### 4.2.2 网点密度对呈色效应的影响

半色调图像中,通过控制网点覆盖率实现颜色和阶调的连续变化。图像的阶调变化由印品表面的光学反射率决定,光学反射率不同,颜色明暗程度不同。假设纸张的光学反射率为  $P_w$ ,油墨的反射率为  $P_s$ ,单位面积内油墨所占的面积比例为  $s$ ,则总光学反射率为

$$P = (1 - s) \times P_w + s \times P_s. \quad (27)$$

根据(27)式可知,当原色网点面积率  $s$  取一系列不同数值时,图像就会产生不同比例的颜色刺激,从而混合出不同的颜色感觉。网点密度大,颜色深暗;网点密度小,颜色明亮。由(19)、(23)、(24)式可知,潜像边缘区域的网点密度与对应原区域相比,增加了 50%、25%,则色彩明度属性减小,颜色变暗;由(20)、(25)、(26)式可知,单位面积内网点密度减小了 50%与 75%,该区域明度增加,颜色变亮。图 2 中,潜像网点沿着某一路径移动后,与位移方向相反的轮廓区域存在网点缺失现象,三色混合的明度减弱,沿位移方向的临界区域网点密度上升,亮度增加。

调制相位后的潜像网点分布不均匀,网点密度

发生变化,高密度区域亮度增加,低密度区域亮度降低,从而影响了图像阶调的连续性。

## 5 结 论

建立最小位置变换和中心位置变换模型,运用评价算法得到不同模型下防伪图像的色彩真实度,分别为 0.9113 和 0.8629,表明含有潜像的图像颜色存在失真现象。分析不同位移路径下的网点分布特征,计算得到网点间距及网点密度变化量,结果表明相位调制模型以重调网点分布位置为前提,移动网点位置改变了网点排列状态。基于网点排布状态对网点呈色效应的影响,分析得到网点排列方式与分布密度的变化导致颜色相貌、明度等出现偏差,因此图像色彩再现效果受相位调制潜像影响。实施相位调制方案必会对网点位置分布产生影响,而网点分布规律影响图像呈色质量。因此,下一步应重点优化潜像位移方案,以提高图像呈色效应。

## 参 考 文 献

- [1] Wu X T, Sun W. Visual data hiding in dot diffusion images [C]. 2010 5th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology (ICCIT), 2010: 588-593.
- [2] Wang D S, Qi D X. A new hiding scheme of digital image [J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23 (9): 949-952.  
王道顺, 齐东旭. 一种新的数字图像隐藏方案 [J]. 计算机学报, 2000, 23(9): 949-952.
- [3] Zhuge X, Nakano K. Halftoning based algorithms

- for image hiding [J]. Journal of Communication and Computer, 2009, 6(9): 39-45.
- [4] Chang Y F, Feng J B, Tsai C S, *et al.* New data hiding scheme using pixel swapping for halftone images [J]. The Imaging Science Journal, 2008, 56(5): 279-290.
- [5] Zhong Y F, Zhu Z Y, Liu C Y. Color security printing based on moire patterns [J]. Optical Technique, 2014, 40(2): 128-132.  
钟云飞, 朱志勇, 刘春燕. 彩色印刷品莫尔纹防伪技术研究 [J]. 光学技术, 2014, 40(2): 128-132.
- [6] Wang Q, Zhou X F, Zhang L, *et al.* Research on differences of color reproduction based on dots distribution state [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 89-92, 111.  
王琪, 周小凡, 张琳, 等. 基于网点排布状态的色彩再现差异性研究 [J]. 包装工程, 2011, 32(7): 89-92, 111.
- [7] Liu Z, Ren L Y. Study of anti-counterfeit printing with cylindrical lens sheet basic on screening copy [J]. China Printing and Packaging Study, 2010, 2: 155-158.  
刘真, 任乐义. 基于加网复制的光栅防伪技术研究 [J]. 中国印刷与包装研究, 2010, 2: 155-158.
- [8] Feng Y Q, Wang Q H, Sun Y, *et al.* Interpolation error correction of moiré fringe photoelectric signals in the approximate form of triangle wave [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0812001.  
冯英翘, 万秋华, 孙莹, 等. 近似三角波莫尔条纹光电信号的细分误差修正 [J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812001.
- [9] Ren L F, Guo L H, Wang Y, *et al.* Halftone information hiding technology of microstructure dot [J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(8): 1004-1009.  
任龙飞, 郭凌华, 王崑, 等. 微结构网点的半色调信息隐藏技术 [J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(8): 1004-1009.
- [10] Zhao X M, Xie B. Moiré effect based halftone image processing method of security [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2012, 27(2): 66-69.  
赵小梅, 谢兵. 基于莫尔效应的半色调图像处理防伪方法 [J]. 天津科技大学学报, 2012, 27(2): 66-69.
- [11] Wang C L. Research on halftoning and hybrid screening technology [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.  
王成林. 半色调混合加网技术研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [12] Wang T M, Wang Q, Liu H H. Evaluation of latent image anti-counterfeiting effect based on sub-channel phase adjustment [J]. Packaging Engineering, 2015(5): 117-121.  
王天马, 王琪, 刘洪豪. 分通道相位调制潜像法防伪效果的评价 [J]. 包装工程, 2015(5): 117-121.
- [13] Ma Y M, Chen H Y, Liu G J. General mean pooling strategy for color image quality assessment [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021007.  
马月梅, 陈海英, 刘国军. 彩色图像质量评价的广义平均池化策略 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021007.
- [14] Chen Y, Fan R S, Wang J X, *et al.* Segmentation of high-resolution remote sensing image combining phase consistency with watershed transformation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 092803.  
陈洋, 范荣双, 王竞雪, 等. 结合相位一致和分水岭变换的高分辨率遥感影像分割方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 092803.
- [15] Hou C P, Ma T T, Yue G H, *et al.* Multiply-Distorted image quality assessment based on high-order phase congruency [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 071001.  
侯春萍, 马彤彤, 岳广辉, 等. 基于高阶相位一致性的混合失真图像质量评价 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 071001.
- [16] Yuan W Q, Fan Y G, Ke L. Palmprints recognition method based on the phase consistency combined with Log-Gabor filter [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 147-152.  
苑玮琦, 范永刚, 柯丽. 相位一致性和对数 Gabor 滤波器相结合的掌纹识别方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(1): 147-152.
- [17] Yang D W, Yu S Q. Image quality assessment based on phase congruency [J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(2): 16-20.  
杨迪威, 余绍权. 利用相位一致性的图像质量评价方法 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(2): 16-20.
- [18] Liu Z, Laganière R. Phase congruence measurement for image similarity assessment [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, 28(1): 166-172.
- [19] Zhang F, Zhang R Y, Li Z Z. Image quality assessment based on symmetry phase congruency [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 101003.  
张帆, 张偌雅, 李珍珍. 基于对称相位一致性的图像

- 质量评价方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 101003.
- [20] Zhang L, Zhang L, Mou X Q, *et al.* FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2378-2386.
- [21] Yang C, Kwok S H. Efficient gamut clipping for color image processing using LHS and YIQ [J]. Optical Engineering, 2003, 42(3): 701-711.
- [22] Wang Q. Research on the quality of image replication based on dot microscopic structure [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.  
王琪. 基于网点结构形态的图像信息印刷复制研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [23] Zhu Y H. Analysis of densitometric and colorimetric evaluation methods for ink trapping [J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 64-68.  
朱元泓. 油墨叠印的密度与色度评价方法分析[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 64-68.
- [24] Zhang X L, Zhu Y H. Research of colorimetric evaluation methods for ink trapping [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(4): 499-503.  
张旭亮, 朱元泓. 油墨叠印的色度评价方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(4): 499-503.