

## 基于SFS算法的网点立体形态的获取与解析

王茜, 王琪

(南京林业大学, 南京 210037)

**摘要:**目的 在印刷传递过程中对网点微观立体形态进行准确提取并解析。方法 在显微测试系统准确采集的网点二维数据的基础上,利用明暗恢复形貌(SFS)原理,构建出不同形状的印刷网点微观三维结构模型。结果 直观并精确地还原了不同形状网点在承印物表面附着的立体形态,网点微观立体特性的不同会对印刷质量产生相应的影响。结论 SFS算法推导过程严谨,构建出的立体模型精度较高,能真实、细致地反映出印刷过程中网点传递的具体形态,是网点立体形态还原的有效方法。精确获取并解析印刷网点微观立体形态,可以直观有效地检测网点传递效果,并能从源头上控制印刷质量,是图像复制质量评价的新方法。

**关键词:** SFS算法; 光反射模型; 网点立体; 微观形态

**中图分类号:** TS801.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)05-0112-05

## Acquisition and Resolution of 3D Dot Form on Basis of SFS Algorithm

WANG Qian, WANG Qi

(Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**ABSTRACT:** The aim of this study was to accurately extract and resolve the dots of 3D micro-morphology in the process of printing transfer. On the basis of accurate collection of 2D dot data by the microscopic test system, the theory of Shape From Shading (SFS) was utilized to construct the 3D model of dot micro-morphology with different printing shape. The 3D form of the printing dot with different shape on the substrate surface was intuitively and accurately restored, and the difference in characteristics of 3D dot micro-morphology caused corresponding effects on the printing quality. The derivation process of SFS algorithm was precise, and the 3D model established had a relatively high accuracy, and could truly and meticulously reflect the specific form of dot transfer in the process of printing, which was therefore an effective method to restore the 3D dot form. Accurate acquisition and analysis of the 3D dot form could intuitively and effectively detect the dot transferring result as well as control the printing quality from the origin, which has become a new method to evaluate image replication quality.

**KEY WORDS:** SFS algorithm; light reflex model; three-dimensional dot; micro-morphology

网点性质直接影响图像的颜色、层次、清晰度等印刷质量<sup>[1]</sup>。考察网点对图像复制质量的影响方法主要有视觉观测法和网点扩大值、密度值、色度值测量法等,这些均属于基于网点的宏观评价方式<sup>[2]</sup>。若从网点传递过程中的形态传递特性这一微观角度去研究图像复制质量,则可以从根本上解决印刷质量问题<sup>[3-4]</sup>。应用网点微观三维结构模型,将使印刷质量控制与评价的研究提高到一个新的水平。目前大多

数对于网点微观特性方面的研究还没有建立网点微观特性与印刷质量的相关性,网点微观立体的恢复仅将灰度作为第三维数据,理论依据不足,缺乏说服力,且图像精度有待考究。由此,笔者将单个网点的形态质量作为研究对象,通过严谨的理论推导,以SFS方法确定表面形状与图像亮度之间的函数关系,对印刷网点微观立体形态进行准确的构建与解析,进而提出一种基于微观的印品质量评价方法。

收稿日期: 2014-07-03

作者简介: 王茜(1991—),女,江苏宿迁人,南京市林业大学硕士生,主攻图像复制及印刷品质量控制。

通讯作者: 王琪(1977—),女,河南上蔡人,博士,南京林业大学副教授,主要研究方向为印刷质量控制、印前图文处理和色彩管理。

## 1 明暗恢复形状(SFS)的原理

明暗恢复形状(SFS)算法的核心思想是,根据单幅数字灰度图像的灰度信息进行亮度分析和转换,进而恢复其表面三维形状<sup>[5]</sup>。这是形貌恢复视觉中的一个重要问题,与成像过程刚好相反,算法需要对二维空间进行虚拟映射,再投影到三维空间中去。整个过程利用一个确定的、假设好的光照反射模型,来确立二维数字图像亮度与物体表面形状之间一一对应的函数关系<sup>[6]</sup>,并根据对物体局部或整体形状的约束条件,来获取其表面各点的表面法向量等参数值,然后在平面坐标系下完成表面法向量到高度值的转换,最终使物体高度信息得以恢复。

## 2 光照反射模型及约束条件

实际数字图像表面点的亮度及其分布,主要受光源参数、物体表面材料形状和性质、观察者相对于物体的方位和距离等因素的影响<sup>[7]</sup>。为使问题简化,SFS算法均进行了假设:观测光源为无限远处的点光源;光照反射模型为具有纯漫反射特性的Lambertian反射模型,该模型的特性是当从任意角度观测时,曲面上同一点的亮度相同;成像投影关系为正交投影。在假定条件下,物体表面某一点亮度 $E$ 仅由该点光源的入射角余弦值决定,即 $E=\cos \alpha$ <sup>[8]</sup>。

设物体表面的法向量为 $\mathbf{p}=(m, n, -1)$ ,点光源 $\mathbf{p}_i$ 方向为 $(m_i, n_i, -1)$ ,光源与物体表面法向量的夹角 $\alpha$ 可根据内积空间性质求得,因而物体表面亮度表达式为:

$$E = \cos \alpha = \frac{\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{p}}{\|\mathbf{p}_i\| \cdot \|\mathbf{p}\|} = \frac{m_i m + n_i n + 1}{\sqrt{m_i^2 + n_i^2 + 1} \sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \quad (1)$$

在观测光源为无限远处点光源、物体表面反射为Lambertian反射,以及成像几何关系为正交投影的前提下,根据Lambertian反射的定义和性质可知, $E_{x,y}$ 只取决于物体的形状,且物体表面点的辐照度函数 $E_{x,y}$ 应与入射光的反射函数 $R_{m,n}$ 一致,即点 $(x,y)$ 处的辐照度(亮度) $E_{x,y}$ 与物体表面对应点的表面法线方向的梯度分量 $m$ 和 $n$ 的反射函数 $R_{m,n}$ 的值相等<sup>[9]</sup>。最终得出物体表面的辐照方程式为:

$$E_{x,y} = R_{m,n} = \frac{m_i m + n_i n + 1}{\sqrt{m_i^2 + n_i^2 + 1} \sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \quad (2)$$

一般情况下,仅仅通过光照反射模型所求解出的

高度值都不是唯一的,即方程的解是病态的,因此需要加入附加约束方程来消除其病态性。现有的绝大部分SFS算法基本都假设研究对象的高度函数 $C_2$ 连续,即认为物体表面为光滑表面<sup>[10]</sup>,而实际这种建立物体光滑表面模型的假设,已经对所求物体的表面进行了光滑性约束,将物体光照反射模型与物体光滑表面模型相结合,再利用物体表面形状的初始边值条件,联立方程组,即可建立SFS的正则化模型,从而恢复物体表面高度。目前,主要有4种算法可以建立正则化模型,分别为线性化方法、最小值方法、线性化方法、演化方法等<sup>[11]</sup>。由于线性化方法的计算效率高,重构效果直观,计算速度快,因此文中选用线性化方法求解物体表面高度。

## 3 求解物体表面高度

三维表面形状可看做一组由非线性方程组构成的曲线集,SFS线性化算法的核心是在求解非线性方程 $f(x)=0$ 时,将其近似线性化后代迭代求解<sup>[12]</sup>。具体过程是:在光滑性约束条件下,采用后向有限差分计算待求物体表面梯度 $(m,n)$ 的近似偏导,并对辐照方程离散化后得到关于表面高度的代数关系式,进而采用Successive Over Relaxation迭代法求解得到三维表面高度 $z_{x,y}$ <sup>[13]</sup>。步骤如下所述。

在利用后向有限差分法对物体表面梯度 $(m,n)$ 进行近似离散化的基础上,对辐照方程进行变形,见公式(3)(4)。

$$m = \frac{\partial z}{\partial x} = z_{x,y} - z_{x,y-1}, \quad n = \frac{\partial z}{\partial y} = z_{x,y} - z_{x-1,y} \quad (3)$$

$$0=f(E_{x,y}, z_{x,y}, z_{x,y-1}, z_{x-1,y})=E_{x,y}-R(z_{x,y}-z_{x,y-1}-z_{x-1,y}) \quad (4)$$

利用公式(4)对给定的数字灰度图像上某点 $(x,y)$ 进行泰勒展开,并根据分辨率为 $d^2$ 的图片,列出 $d^2$ 个线性方程组。通过Successive Over Relaxation迭代法对这 $d^2$ 个方程组求解后,最终表达式简化为公式(5)。令第 $N$ 次迭代后的结果 $z_{x,y}^N = z_{x,y}$ ,则得到公式(6)。将二维灰度图像上任意一点像素的高度初始值假设为 $z_{x,y}^0 = 0$ ,由公式(6)和(7)可以迭代求解出整个图像的高度信息 $z_{x,y}$ ,最后利用高斯平滑对含有物体表面深度的图像处理后,可得到最终的立体图像<sup>[14]</sup>。

$$0 = f(z_{x,y}) \approx f(z_{x,y}^{N-1}) + (z_{x,y} - z_{x,y}^{N-1}) \frac{d}{dz_{x,y}} f(z_{x,y}^{N-1}) \quad (5)$$

$$z_{x,y}^N = z_{x,y}^{N-1} - \frac{f(z_{x,y}^{N-1})}{\frac{\partial f}{\partial z_{x,y}}(z_{x,y}^{N-1})} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z_{x,y}}(z_{x,y}^{N-1}) = \frac{(m+n)(mm_0 + nn_0 + 1)}{\sqrt{m_0^2 + n_0^2 + 1} \sqrt{m^2 + n^2 + 1}} - \frac{m_0 + n_0}{\sqrt{m_0^2 + n_0^2 + 1} \sqrt{m^2 + n^2 + 1}} \quad (7)$$

### 4 实验及结果分析

通过显微图像分析系统准确提取胶印标准样张上不同形状的微观网点二维形态,并根据SFS明暗恢复形貌法则,编写网点立体还原代码,在Matlab中获得图像中每一像素点的高度值z,进而得到每个像素点的坐标(x,y,z),最终得到一系列不同形状网点的三维立体模型、网点密度等值线和网点剖面图形。得到的网点立体模型精度高,凹凸形状明显,细节表现力高,能真实、细致地反映出印刷过程中网点传递的具体形态,解决了现有网点立体形状还原方法中精度不足的问题。见图1—2。

观察标准样张1和标准样张2中各形态网点的立体结构可知,不同形状的调幅网点均保持了原网点形

状,且形状基本规则。网点中间部位着墨量多,从中间部分到边缘处的着墨量呈逐渐降低的趋势,其中边缘处的着墨量最低。网点的整体着墨量不均匀,等密度区域多集中在网点中间较小的区域,同心圆网点的等密度范围极小。方形、圆形、菱形网点的剖面形状类似,均呈中间厚两边薄的趋势。该现象主要是缘于油墨的表面张力作用,单个墨点附着在纸张上,其表面会呈现出一定的弧度,使油墨在网点中间区域分布较多,而在网点边缘区域分布较少,因而导致油墨分布相对不均匀。

同心圆内部的“空白处”也有油墨,但量相对较少,这主要是由油墨的渗透、铺展以及实际印刷中的压力造成的。同心圆网点的着墨情况在整体墨点范围内最均匀,最高着墨量与最低着墨量的差别不明显,变化范围小,密度等值线分布稳定,且印刷表面平滑,有利于细节再现。这是由于在网点面积率相同的情况下,同心圆网点承载油墨的面积小,因而油墨分布均匀<sup>[5]</sup>。在总体范围内同心圆偏离基准平面的程度最低,着墨量相对较小,墨层较薄,可以节省油墨。此外,由于同心圆网点无法形成厚膜的特性,漫反射特征明显而镜面反射量较小,其墨点镜面反射光通量占着墨区总反射量的比例越低,油墨再现的饱和度就越高。同心圆网点立体形态说明了其优于其他形状调

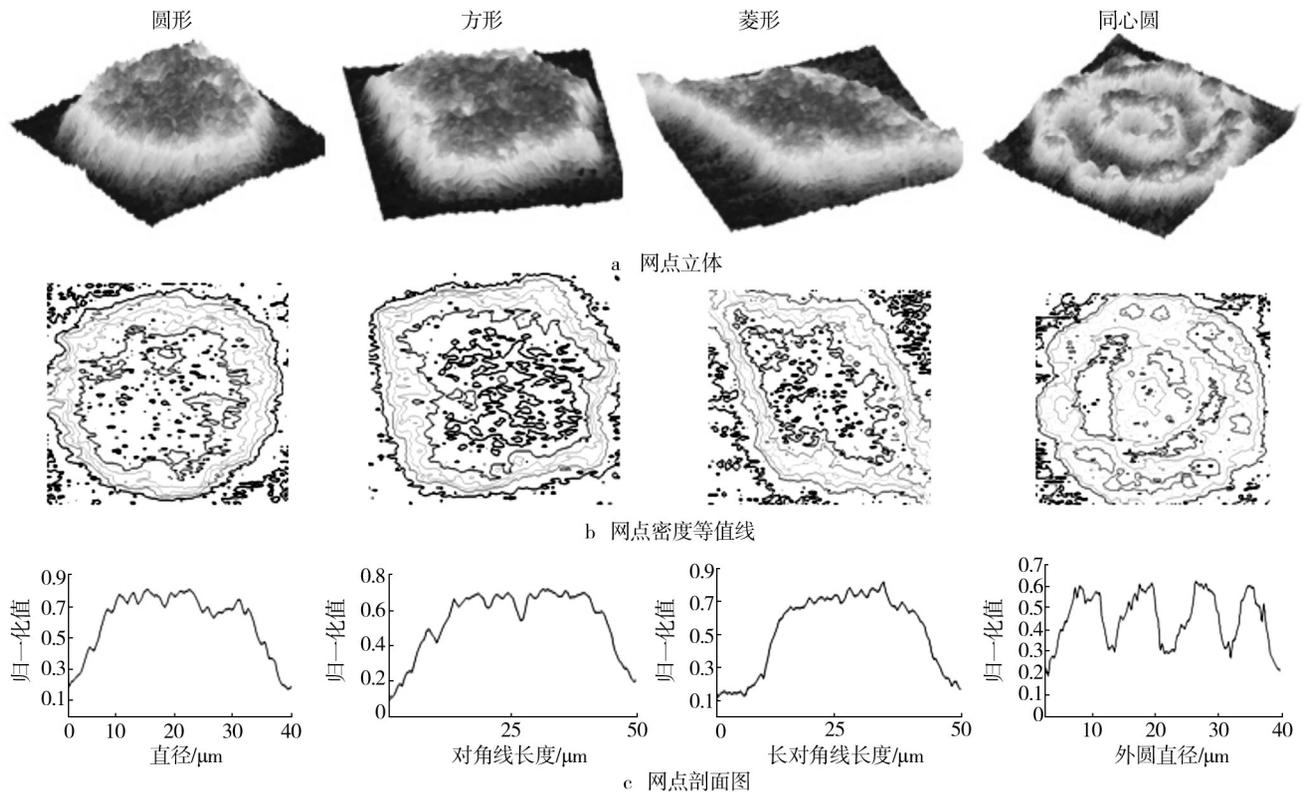


图1 标准样张1网点立体形态提取

Fig.1 Extraction of 3D dot morphology in standard proof 1

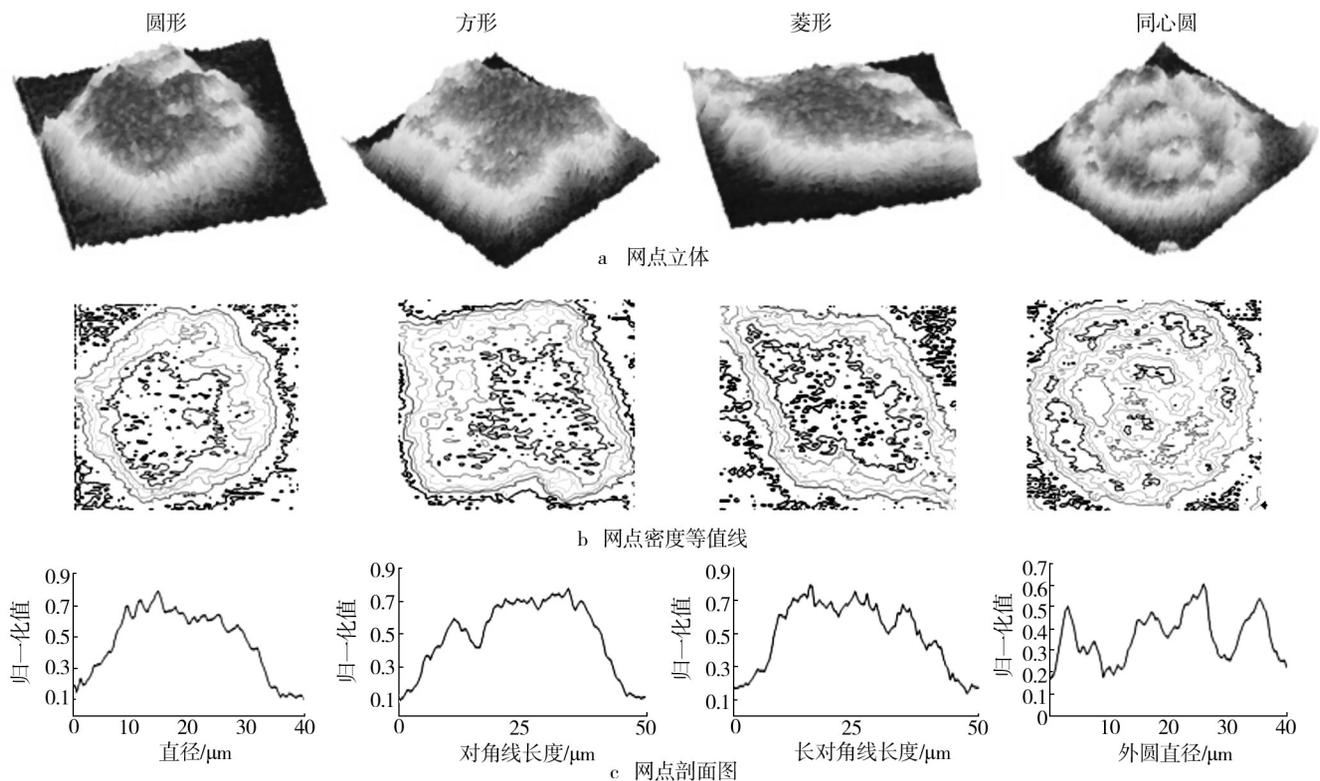


图2 标准样张2网点立体形态提取

Fig.2 Extraction of 3D dot morphology in standard proof 2

幅网点的特性。

比较标准样张1和标准样张2发现,标准样张2的各形状网点边缘有明显的锯齿,整个墨点存在明显凹凸不平的现象,而标准样张1的墨点边缘较平滑,整体形态规整,油墨分布比较均匀,可以说明标准样张1的墨点形态保持得较好。标准样张2中墨点边缘偏薄现象明显比标准样张1中的严重,这可能是由于印版不平整造成的,也有可能是由于印刷速度太快,墨层分离时墨点在轴向被剥离力拖拽,因而形成方向性的墨点偏斜。标准样张1网点表面呈现均匀的凹凸形态,等密度线分布较规则,且剖面图也相对平整,而标准样张2各网点表面的局部形态、密度差异都很大,剖面图不规则,锯齿现象较严重,说明其印刷质量不及标准样张1。

## 5 结语

从单个网点入手,通过SFS方法完成了不同形状网点微观立体图形的构建。结果表明,基于单幅数字图像的SFS算法推导过程严谨,精度较高,细节表现力强,能真实、细致地反映出印刷过程中网点传递的具体形态,可以精确描述出每个网点的形状、立体形态等微观特性,是网点立体形态还原的有效手段。在图

像复制过程中,微观网点的传递质量会对图像复制质量产生根本影响。准确获取网点形状及立体形态的变化,可作为评价或控制印刷质量的根本依据。对网点微观立体模型进行解析,可以评价墨点形态还原的规则度、墨量分布的均匀性,并能对油墨转移等状态进行分析,从而直观地检测网点复制质量,能够显著提高表征和测量网点微观相关指标的准确性。该方法能够从源头上解决图像复制的质量问题,并为图像复制质量的控制提供新思路。

## 参考文献:

- [1] 蒋文燕,司莉莉,李凯. 网点形状对胶印网点复制特性的影响[J]. 包装工程,2010,31(1):83—85.  
JIANG Wen-yan, SI Li-li, LI Kai. Influence of Dot's Shape on Dot Reproduction Attributes of Offset Printing[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(1): 83—85.
- [2] 张旭亮. 网点微观结构解析[J]. 测绘通报,2007(12):21—23.  
ZHANG Xu-liang. Analysis of Dot Microstructure[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2007(12): 21—23.
- [3] 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.  
WANG Qi. Research on the Quality of Image Replication Based on Dot Microscopic Structure[D]. Nanjing: Nanjing For-

- estry University, 2013.
- [4] PFISTER H, ZWICKER M, VANBAAR J. Surfels: Surface Elements as Rendering Primitives[C]// Annual Conference on Computer Graphics, 2000:335—342.
- [5] 何理想. 基于SFS方法的单幅图像的三维原型重建的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2009.  
HE Li-xiang. Research on 3D Reconstruction of a Single Image Based on SFS Methods[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
- [6] 李杨军. 基于单幅数字图像灰度三维物体形状表面恢复的研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2009.  
LI Yang-jun. Research on 3D Object Surface's Shape Recovery Based on a Single Image's Gray-scale[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2009.
- [7] ROBLESKELLY A, HANCOCK E R. A Graph-spectral Approach to Shape from Shading[J]. Image Processing, IEEE Transactions, 2004, 13(7):912—926.
- [8] 蔡钦涛. 基于图像的三维重建技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2004.  
CAI Qin-tao. Research of Image Based 3D Reconstruction[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [9] 俞鸿波, 赵荣椿, 王兵, 等. 单幅图像三维表面重建中的共轭梯度算法[J]. 计算机工程与应用, 2003(35):24—25.  
YU Hong-bo, ZHAO Rong-chun, WANG Bing, et al. Analysis and Realization of the Gradient Algorithms of SFS[J]. Computer Engineering and Applications, 2003(35):24—25.
- [10] TOSHIHARU E, DMITRY I, AKIRA I. Three-dimensional Distribution of Ink-jet Inks in Paper Acquired by Confocal Laser Scanning Microscope[C]// 58th APPITA Annual Conference & Exhibition Proceedings, 2004:577—588.
- [11] LEE M Y. 3D Shape Reconstruction of Hybrid Reflectance Using LMS Algorithm[J]. International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2001:15(4):723—734.
- [12] YANG L. A Unified Model of Optical and Physical Dot Gain in Print Color Reproduction[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2004, 48(4):347—353.
- [13] LUO Zhi. Automatic Color Printing Inspection by Image Processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139:373—378.
- [14] CAPRARI R. Duplicate Document Detection by Template Matching[J]. Image and Vision Computing, 2000(18):633—643.
- [15] 王琪, 周小凡. 基于网点结构形态的印刷色彩再现研究[J]. 包装工程, 2012, 33(23):110—111.  
WANG Qi, ZHOU Xiao-fan. Research of Printing Color Reproduction Based on Dot Structure Form[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23):110—111.

(上接第58页)

- [8] 李朋朋, 梁天珍. 茂金属中密度聚乙烯的性能及加工应用[J]. 工程塑料应用, 2012(6):39—42.  
LI Peng-peng, LIANG Tian-zhen. Properties and Application of Metallocene Medium Density Polyethylene[J]. Engineering Plastics Application, 2012(6):39—42.
- [9] 冯普凌. 国外聚乙烯催化工艺研究进展[J]. 高分子通报, 2010(1):28—33.  
FENG Pu-ling. Progress of Catalysts for Polyethylene Abroad [J]. Polymer Bulletin, 2010(1):28—33.
- [10] 徐梅林. 材料的摩擦因数与温度[J]. 广东印刷, 2005(6):46.  
XU Mei-lin. The Friction Coefficient and the Temperature of the Material[J]. Guangdong Printing, 2005(6):46.
- [11] 叶华, 曾宪通. HDPE/LLDPE/POE薄膜性能的研究[J]. 合成树脂及塑料, 2008(4):58—62.  
YE Hua, ZENG Xian-tong. Study on Properties of HDPE/LLDPE/POE Blown Films[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2008(4):58—62.
- [12] 左建东, 庞纯. UHMWPE共混改性HDPE薄膜性能的研究[J]. 塑料工业, 2006(8):12—15.  
ZUO Jian-dong, PANG Chun. Study on Property of HDPE/UHMWPE Blown Film[J]. Plastics Industry, 2006(8):12—15.
- [13] 田立云. 无溶剂胶复合产品摩擦因数研究[J]. 广东包装, 2011(6):49—50.  
TIAN Li-yun. Study on Friction Coefficient of Solvent-free Adhesive Composite Products[J]. Guangdong Package, 2011(6):49—50.
- [14] 王东京. 谈谈复合包装膜摩擦因数的问题[J]. 广东包装, 2013(6):56—59.  
WANG Dong-jing. Study on the Coefficient of Friction of Composite Packaging Film[J]. Guangdong Package, 2013(6):56—59.
- [15] 黄少云, 李东立, 许文才, 等. 软包装材料摩擦性能实验参数研究[C]// 中国印刷与包装学术会议, 2010:434—438.  
HUANG Shao-yun, LI Dong-li, XU Wen-cai, et al. Experimental Parameter Research on Friction Properties of Flexible Packaging Materials[J]. Proceeding of CACPP, 2010:434—438.