

利用设计打印规则提升喷墨制造精度

高志强¹, 崔大鹏¹, 孙诚^{1,2}

(1.天津科技大学, 天津 300222; 2.天津职业大学, 天津 300410)

摘要: **目的** 设计一种打印规则, 在喷墨技术作为一种高效的生产工具被用于先进制造时提高其喷墨打印精度。**方法** 通过墨滴观测系统分析喷点火频率对喷射状态的影响; 分析串扰对喷嘴间的影响, 获得高频连续喷射参数, 并用高精度打印平台对不同模式进行测试。表征方法包括传统的图像质量分析方法以及喷墨制造获得的导电网格的导电性能对比。**结果** 使用提出的打印规则, 喷墨点火频率达到 78 kHz, 打印样张网点面积率误差小于 1%, 竖线粗糙度方差约等于 $3 \mu\text{m}^2$ 。宏观和微观的视觉效果得到提升, 打印制作的柔性触摸屏网格线条均匀线宽约 $65 \mu\text{m}$, 导电性良好。**结论** 优化后的打印规则可以弱化残余振动和串扰对其他喷嘴的影响, 在提升打印效率的同时提高打印精度和点火频率, 有效地促进压电喷头在喷墨制造领域的应用。

关键词: 喷墨; 墨滴速度; 点火频率; 墨滴质量; 打印模式

中图分类号: TS853+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)03-0170-05

Manufacturing Accuracy of Inkjet Improved by Means of Designed Printing Rules

GAO Zhi-qiang¹, CUI Da-peng¹, SUN Cheng^{1,2}

(1.Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China;

2.Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China)

ABSTRACT: The work aims to design a kind of printing rules to improve the inkjet printing accuracy when the inkjet technology is used for advanced manufacturing as an efficient production tool. Through ink droplet observation system, the effect of inkjet ignition frequency on the injection state was analyzed. By analyzing the influence of crosstalk on the part between nozzles, the continuous high-frequency injection parameters were obtained. Meanwhile, the high-precision printing platforms were used to test different modes. Characterization methods included traditional image quality analysis method and conductivity comparison on conductive grid obtained through inkjet manufacturing. With the printing rules put forward, the inkjet ignition frequency was up to 78 kHz, the dot area coverage error of printing paper samples was less than 1% and the vertical line roughness variance was approximately equal to $3 \mu\text{m}^2$. The macroscopic and microscopic visual effects were improved. The uniform line of printed flexible touch screen grid line was about $65 \mu\text{m}$ wide with good electrical conductivity. The optimized printing rules can weaken the influence of the residual vibration and crosstalk on other nozzles. The printing accuracy and ignition frequency are enhanced while improving the printing efficiency, which effectively promotes the application of electric nozzle in the inkjet manufacturing field.

KEY WORDS: inkjet; drop speed; ignition frequency; ink droplet; printing mode

在 2016 德鲁巴展会中, 数字印刷和大型喷墨印刷机器成为重要内容, 同时喷墨技术作为一种先进生产制造方式, 被应用在生物医疗, 印刷电子, 光学器件, 显示屏制作, 刻绘触摸屏面板等领域。在这些新

型领域里面, 更注重墨水材料的功能实现, 并不是图像的视觉效果。对喷墨的要求是按需喷射 DOD, 即定量的墨水材料沉积在目标位置完成器件的制造, 喷墨打印精度是十分重要的。

收稿日期: 2016-07-13

作者简介: 高志强 (1988—), 男, 天津科技大学博士生, 主要研究方向为喷墨技术和印刷电子。

喷墨技术能够在新型技术领域获得产业化应用的前提是生产效率高，喷墨精度高。德鲁巴展会中 Dimatix, Xaar, Epson 等厂家推出了高分辨率和高点火频率的工业喷头以提升生产效率。喷墨精度包括着弹位置精度和材料定量精度，与之对应的喷墨参数为墨滴飞行速度和墨滴大小（质量或体积）。影响喷墨打印的因素很多，包括墨水流体性质、承印基材、环境条件、控制方法等^[2-6]，文中仅仅讨论压电喷墨打印头打印过程控制对喷墨精度的影响。

为了提升点火频率的同时提升喷墨精度，很多方案被提出来：双脉冲波形^[7]、自身传感^[8-10]、弯月面位置控制^[11]、前置反馈^[12]等。这些调整都是针对单次扫描，没有考虑实际生产条件和宏观打印过程。容错率低的新颖技术领域会选择多次扫描的打印模式，以弥补或降低喷嘴异常状态造成的损失。

该研究将在多次扫描的打印方式下，针对高分辨率和高点火频率的压电喷头，研究影响喷射的因素，包括单个喷嘴的残余振动，以及喷嘴间的串扰干涉。发现 DOD 打印模式下，点火频率对墨滴质量和飞行速度影响很大，喷嘴排布影响喷嘴间的串扰干涉。基于以上现象提出一种高频连续喷射的喷墨打印规则。该规则包括 3 个方面的内容：选取稳定的点火频率；选取恰当的喷射参数；制定喷嘴和像素点的对应规则。

测试表征喷墨精度时，研究使用了印刷质量评价方法如网点面儿率、粗糙度等作为衡量指标；同时将喷墨方法用于蚀刻柔性触摸屏网格，对比不同喷射规则对器件功能的影响。

1 实验

1.1 仪器与材料

实验设备：电子天平、电子显微镜、QEA 图像分析仪、万用表、墨滴观测系统（JetXpert，希科电子，用于观测墨滴飞行速度）、高精度的喷墨设备（NT221-116A，Nanothink，用来进行参数测试和图案化打印测试）、压电喷墨打印头（Samba，Dimatix FujiFilm）。

实验材料：颜色墨水，粘度为 4.5 mPa·s，表面张力为 39 mN/m；承印基材为有沙目的铝板基，涂布纳米 ZnO 疏水层；蚀刻墨水；导电薄膜为涂布纳米银线的 PET 薄膜。

实验环境：步入式恒温恒湿实验室（RWER0018-000EFM，天津荣信立），设定温度为 20 ℃，相对湿度为 40%。

1.2 实验内容

1.2.1 测试点火频率对墨滴速度、质量的影响

使用墨滴观测系统量化点火频率对墨滴速度和

质量的影响。选择墨滴抵达距离喷嘴 0.5 mm 处的瞬时速度作为参考。电子天平测试不同点火频率下的喷射 2 百万次喷墨，获得墨滴的平均质量。绘制成点火频率-速度/质量曲线。

1.2.2 测试串扰对落点精度影响

测试图由不同间隔和线宽的多组竖线组成，调用所有喷嘴使用单次扫描打印的方式输出测试图。打印后测试竖线粗糙度，表征落点精度变化，据此反映喷嘴间的串扰程度。具体粗糙度测量方法为：QEA 读取图像，软件会对竖线边缘拟合，形成虚拟直线。此处粗糙度定义为打印竖线边缘线和虚拟直线间距离的方差（ISO 13660），见图 1。

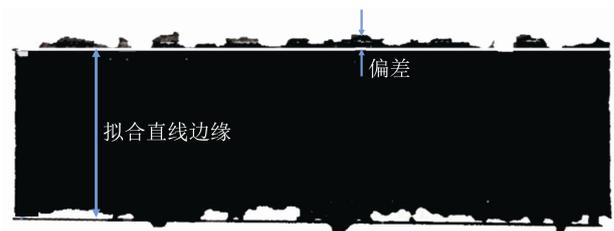


图 1 粗糙度定义
Fig.1 Definition of roughness

1.2.3 不同打印模式测试

压电喷墨是一种 DOD 喷墨方式，在有图案需求的地方进行喷墨。打印时字车的移动速度、图像分辨率和最大点火频率是直接相关的，最大点火频率 F 数值上等同于单位时间扫描过的像素数 N 。计算公式如下：

$$N = V \times R \tag{1}$$

式中： F 为最大点火频率（kHz）； N 为单位时间扫描过的像素； V 为字车移动速度（m/s）； R 为图像分辨率（dpi）。

一般情况下扫描次数 p 等同于打印同一排像素点所用的喷嘴数。最简单常见的方案是顺序喷射，这里定义为模式 1。像素点随机分配给 p 个喷嘴，定为模式 2，见图 2。该研究提出一种连续间隔模式：在运动方向上直线以 m 个连续像素，示例 $m=4$ 划分为一个单元。同一个喷嘴连续喷射的最小工作间隔数为 L ， L 的原则是大于残余振动消散的时间，来规避对后续喷射的影响。划分后的单元随机分配给各个喷嘴。



图 2 不同打印模式喷嘴工作顺序排布
Fig.2 Arrangement of nozzle in different print modes

图2中,每个方格为单个墨滴或图像像素点。示例中字车运动方向的横线为4个喷嘴,扫描4次打印完成。其中A, B, C, D是4个喷嘴所喷射的墨点排布规则。在连续间隔模式中,对于连续数小于 m 的像素群,有可能出现同一个喷嘴工作间隔小于 L 。为防止出现该情况,对图像中独立像素进行智能判断,划分给与之临近的单元,这种增加了智能判断的模式定义为模式3。

2 结果和讨论

2.1 点火频率-速度/质量曲线

图3可以看出伴随点火频率的变化,速度出现波动。从图4中可以看出,质量和速度伴随频率的变化有一定相关性。速度变化最大值和最小值差距达到4 m/s。墨滴质量波动达到±20%以上,并且频率越高,其变化波动越大。

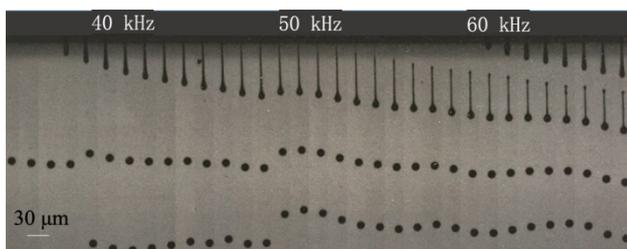


图3 不同点火频率的墨滴观测截图
Fig.3 Droplets image in different fire frequencies

造成这种现象主要因素是喷嘴内的残余振动。对喷嘴施加脉冲波形,墨滴喷射飞出,喷嘴内部的残余振动耗散会持续数微秒甚至数十微秒。在图4中可以发现低于15 kHz时,喷射状态很稳定。因为在低频打印时,喷射间隔时间较长,有充分的时间消解残余振动,不会影响下一次的喷射。如果下一个脉冲在压力波耗散之前施加,那么得到的墨滴的飞行形态会区别于前面的墨滴。点火频率决定了喷射之间的时间间隔,也就决定了残余压力波的影响程度。由于喷嘴内腔体共振的作用,曲线出现较为强烈的周期性起伏变化。点火频率固定的情况下,残余振动的前后影响一致,飞行速度稳定。可以认为使用固定频率,能够提升单个喷嘴的打印精度。

在打印应用中,如果打印喷嘴扫过所有像素,喷嘴会在一个稳定的频率 F 下进行喷射。常见的DOD图像并不需要每个像素点都打印,分散排布的像素点导致喷头会在数值为 F/n 的任一频率下进行工作,此处的 n 为整数。想要稳定的打印性能,那就要求 F 和 $F/2, F/3...F/n$ 有接近的墨滴飞行速度和质量。综合分析速度曲线和质量曲线,不存在频率 F 使 F/n 速度和质量相同。只能选择幅值相对接近的最大点火频率

$F=78$ kHz,当点火频率为39, 19.5 kHz时具有较为接近的速度和质量。测试图像分辨率为2400 dpi,根据式(1)获得字车最大速度为0.825 m/s。

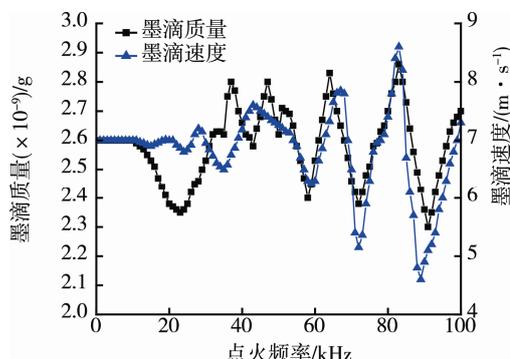


图4 点火频率和墨滴速度/墨滴质量曲线
Fig.4 Fire frequency-droplets' speed/mass curve

2.2 串扰造成的粗糙度变化

串扰分为2种情况,直接串扰和压力波串扰。压电陶瓷是电压驱动元件,施加电压的时候,电场会影响到临近通道,发生直接串扰。压力波串扰是压力波通过墨水传递,进入与其他喷嘴连通的供墨通道,影响临近喷嘴的供墨稳定或喷射压力传递^[2,11,15]。无论哪种情况,都具有喷嘴越近受串扰影响越严重的特点。

打印大幅面图像时,不同的连续喷射数量 m 和最小喷射间隔 L 都会影响串扰的强度。理论上 m, L 的值越大,那么临近喷嘴工作概率越低,串扰越小。实际生产中如果某个喷嘴异常,比如堵塞或斜喷, m, L 值增大会放大这种异常,因此测试中将 m 设定小于等于5, L 小于等于8。在此范围内, m, L 的数值越小,越有利于避免喷墨缺陷。

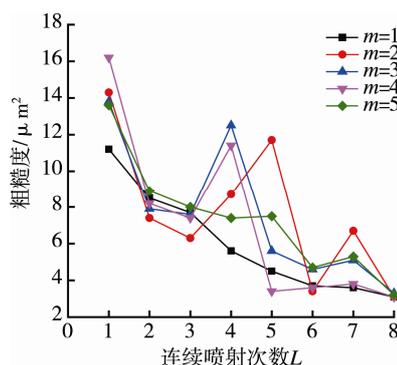


图5 不同 m, L 值对直线粗糙度的影响
Fig.5 The influence of m, L on roughness

理论上 m, L 值越大,竖线粗糙度越低。图5中测试发现,在设定范围内粗糙度整体呈现下降趋势,但并不是递减的。这主要是因为打印的竖线为喷嘴投影形成,但是喷嘴并非线性排布,喷嘴间距也就不一致。如图6,打印中通过控制喷嘴的点火时机,实现墨滴排布形成线。不同的 m 值会影响点火时机和串

扰区域，对直线度影响也就没有固定趋势，因此 m, L 值优化有助于多个喷嘴协同效果的提升。

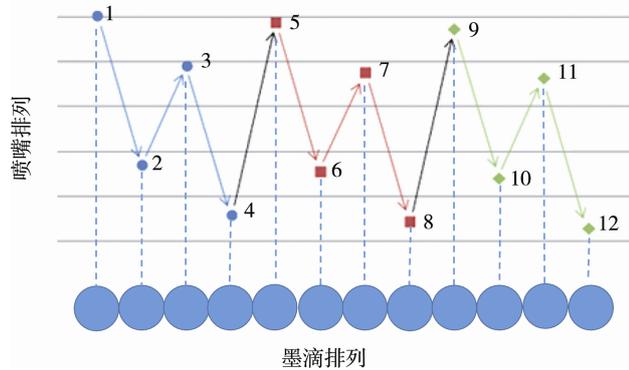


图 6 喷嘴排列和投影
Fig.6 Nozzle arrangement and projection

数据显示，伴随 L 增大，竖线粗糙度降低； $L=8$ 时，所有粗糙度都在 3 左右。 $m=1$ 时，连续喷射方法不成立； m 取值 2, 3, 4 时，都存在较大的幅值振荡； $m=5$ 时，整体的粗糙度偏大。综合来看 $m=4, L$ 大于 5 时，可以规避大幅震荡，竖线的粗糙度都比较低且平稳，因此最终选择 $m=4, L=5$ 为后续测试参数。

2.3 不同模式打印对比

2.3.1 印品质量测试

通过高精度的喷墨打印系统使用模式 1、模式 2、模式 3 分别输出标准测试图。根据 2.1, 2.2 节实验结果中的参数：点火频率为 78 kHz，扫描速度为 0.825 m/s，其中模式 3 中连续喷墨数 $m=4$ ，最小喷墨间隔 $L=5$ 。打印后选取相关元素进行对比见图 7，分别是 25% 网点、50% 方形网点、渐变部分网点。可以看出模式 3 打印的图像边缘更清晰，内部无露白。随机打印和一般模式都出现了网点内部露白和边缘不整齐的情况。模式 2 效果最差，特别是网点内部出现大量的白点，这是由于墨滴落点不准，墨点间出现空隙。

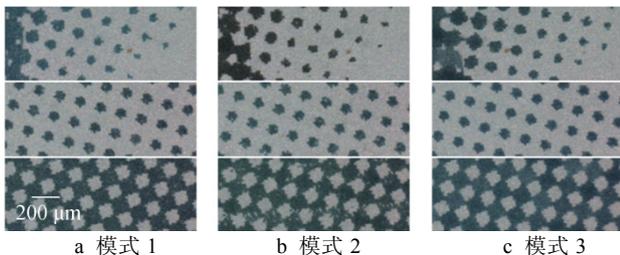


图 7 不同模式的微观效果（放大 50 倍）
Fig.7 Microscopic images of different modes ($\times 50$)

从整体版面效果看，模式 3 最好，模式 1 最差。虽然在放大镜下模式 1 好于模式 2，但是在宏观上由于模式 2 的落点是随机的，出现的落点不准的分布情

况也是随机的，缺陷被匀化。模式 1 下斜喷等缺陷分布具有周期性，视觉上很容易被发现。

测得网点面积率减去原测试图网点面积率得到网点面积率差值，结果见图 8。可以看出模式 3 打印的网点稳定。模式 1 整体偏高，而模式 2 在 40% ~ 60% 时偏高，浅网和深网偏低。该现象也可以被上述落点偏移的理论解释。另外，当网点面积接近 100% 时，由于墨水的铺展作用，实地基本被覆盖，网点面积率误差并不大。

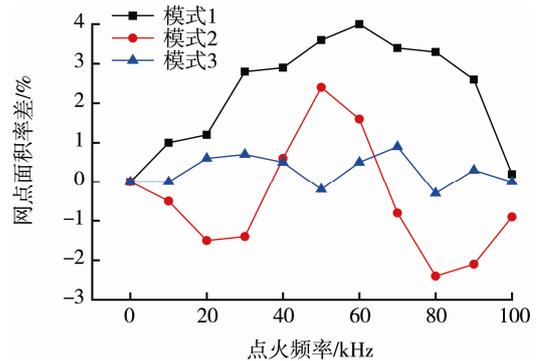


图 8 网点面积率差值随点火频率变化
Fig.8 Change of dot area rate error with fire frequency

2.3.2 制备纳米银线网格对比

纳米银线涂布薄膜在喷墨蚀刻前后均为无色透明的状态，而且蚀刻区域线宽仅为 60 ~ 90 μm ，肉眼无法分辨，也不能使用传统印刷用仪器测试。调节亮度和曲线后，数码显微镜截取的蚀刻导电网格局部照片见图 9，深色部分为被蚀刻区域，浅色有亮点的为纳米银线区域。可以看出模式 1 边缘整齐，但是宽度较大平均约 88 μm ；模式 2 边缘为锯齿型，且宽窄不一，波动范围为 50 ~ 75 μm ；模式 3 整体均匀，宽度平均约 65 μm 。之前已经讨论了不同打印模式网点面积率变化的情况，其表现和蚀刻导电网格有相似的地方：模式 1 落点较准但是存在扩大的情况；模式 2 落点偏移最明显，波动较大；模式 3 落点准确，几乎没有扩大。

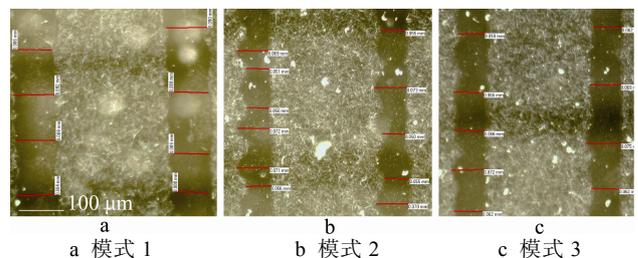


图 9 喷墨蚀刻纳米银线网格（100 倍）
Fig.9 Inkjet etch network for silver nanowire ($\times 100$)

将长度 20 cm 的导电网格作为标准，测试平均电阻值发现模式 1 获得平均阻值为 13 k Ω 。模式 2 虽然蚀刻宽度较窄，但是电阻较大且浮动范围为 11.5 ~

13.5 k Ω ，主要是因为薄膜电阻主要取决于材料自身方阻和平面特征。平面特征中包含长度、宽度和线条边缘整齐度等特点，其中边缘整齐度会严重影响负载电流，导致不稳定性。模式3电阻稳定约11 k Ω 。研究中的导电薄膜网格用于电容型多点触摸屏、网格均匀性和导电性影响电容特征，因此模式3蚀刻方式模式优于其他模式。

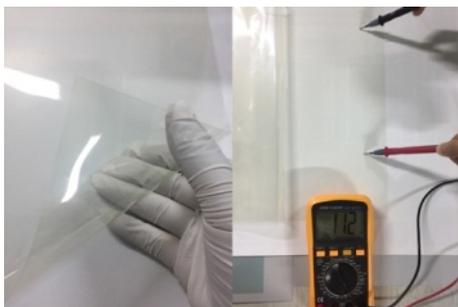


图10 喷墨蚀刻纳米银线网格用于柔性触摸屏

Fig.10 Inkjet etch network for silver nanowire used for flexible touch screen

3 结语

研究根据压电喷头的特性设计打印规则：针对同一个喷嘴，数十微秒的工作时间内点火频率唯一，获得稳定的喷墨状态；针对多个喷嘴间，调整连续喷射次数和喷射间隔等参数，弱化喷嘴之间的串扰。为了实现上述设定，在扫描打印过程中，制定喷嘴和像素点的对应规则，最终提升墨滴的着弹位置精度和材料定量精度。实验结果证明，利用研究设计的喷墨规则，喷墨墨滴质量稳定、直线度提升、网点面积率稳定；打印图像的宏观和微观效果都有改善。使用该规则制备触摸屏网格，获得的网格边缘更整齐，导电率低且稳定。结论认为，优化宏观打印规则可以有效地提升喷墨精度。

文中的意义在于提供了一种思路，即将喷墨技术应用于新兴领域时，需有与之相适应的喷墨规则提升打印效率和打印精度。喷墨技术作为一种新的制造手段，不能仅依赖材料科学发展，还要从工艺角度开发。传统印刷领域积累了大量的方法和经验，值得借鉴到新的应用开发过程中。这种宏观优化的思路也可以用来促进喷头的开发工作，促使厂商针对应用需求来优化喷头结构，在喷嘴的控制和排布规则上降低串扰和残余振动对打印质量的影响。

参考文献：

- [1] DERBY B. Inkjet Printing of Functional and Structural Materials: Fluid Property Requirements, Feature Stability, and Resolution[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2010, 40: 395—414.
- [2] SCHNEIDER M, TÜRKE A, FISCHER W J, et al. Determination of the Wine Preservative Sulphur Dioxide with Cyclic Voltammetry Using Inkjet Printed Electrodes[J]. *Food Chemistry*, 2014, 159(11): 428—432.
- [3] GENINA N, JANBEN E M, BREITENBACH A, et al. Evaluation of Different Substrates for Inkjet Printing of Rasagiline Mesylate[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2013, 85(3): 1075—1083.
- [4] WANG M W, PANG D C, TSENG Y E, et al. The Study of Light Guide Plate Fabricated by Inkjet Printing Technique[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(3): 1049—1055.
- [5] WIJSHOFF H. The Dynamics of the Piezo Inkjet Print-head Operation[J]. *Physics Reports*, 2010, 491(4): 77—177.
- [6] WIJSHOFF H. Structure and Fluid-dynamics in Piezo Inkjet Printheads[M]. University of Twente, 2008.
- [7] WU C H, HWANG W S. The Effect of the Echo-time of a Bipolar Pulse Waveform on Molten Metallic Droplet Formation by Squeeze Mode Piezoelectric Inkjet Printing[J]. *Microelectronics Reliability*, 2015, 55(3): 630—636.
- [8] KWON K S, KIM W. A Waveform Design Method for High-speed Inkjet Printing Based on Self-sensing Measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 140(1): 75—83.
- [9] KWON K S. Waveform Design Methods for Piezo Inkjet Dispensers Based on Measured Meniscus Motion[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2009, 18(5): 1118—1125.
- [10] KWON K S, CHOI Y S, GO J K. Inkjet Jet Failures and Their Detection Using Piezo Self-sensing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 201(5): 335—341.
- [11] WU H C, LIN H J. Effects of Actuating Pressure Waveforms on the Droplet Behavior in a Piezoelectric Inkjet[J]. *Materials Transactions*, 2010, 51(12): 2269—2276.
- [12] KHALATE A A, BOMBOIS X, BABUŠKA R, et al. Performance Improvement of a Drop-on-demand Inkjet Printhead Using an Optimization-based Feedforward Control Method[J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(8): 771—781.
- [13] 沈旭峰, 钱军浩, 李俊锋. 油墨特性与残余波动对墨滴成形的影响分析[J]. *包装工程*, 2012, 33(13): 123—127.
SHEN Xu-feng, QIAN Jun-hao, LI Jun-feng. Analysis of Ink Characteristics and Residual Fluctuations Affects on Droplet Formation[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(13): 123—127.
- [14] 常莹莹, 唐正宁, 李俊锋. 压电式喷墨的建模与分析[J]. *包装工程*, 2012, 33(17): 122—125.
CHANG Ying-ying, TANG Zheng-ning, LI Jun-feng. Modeling and Analysis of Piezoelectric Ink Jet[J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(17): 122—125.
- [15] 魏大忠, 张人佶, 吴任东, 等. 压电微滴喷射装置的设计[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2004, 44(8): 1107—1110.
WEI Da-zhong, ZHANG Ren-ji, WU Ren-dong. Design of a Piezoelectric Droplet Ejection Device[J]. *Tsinghua University(Natural Science Edition)*, 2004, 44(8): 1107—1110.