

油墨特性与残余波动对墨滴成形的影响分析

沈旭峰, 钱军浩, 李俊锋

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 为得到期望的喷射墨滴, 分别针对油墨特性中 3 个具有代表性的参数: 韦伯数、雷诺数及奥内佐格数进行了分析, 给出了适用于新技术领域的油墨特性范围, 同时针对标准脉冲在喷墨头上应用所存在的残余波动问题, 通过建立离散时间模型的方法设计出了一种优化脉冲, 然后根据墨滴喷射时弯液面速度的变化情况, 将标准脉冲和优化脉冲下墨腔中残余波动的影响进行了实验对比分析, 发现在优化脉冲驱动下喷射出的墨滴更符合实际需求。

关键词: 残余波动; 优化脉冲; 流变性能; 弯液面速度; 标准脉冲

中图分类号: TS802.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)13-0123-05

Influence of Ink Characteristics and Residual Fluctuation on Droplet Formation

SHEN Xu-feng, QIAN Jun-hao, LI Jun-feng

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To achieve desired jet drops, Weber number, Reynold number and Ohnesorge number, which are the three representative parameters of ink characteristics, were analyzed respectively and the new ink characteristics range applicable to the new technology area were given. An optimizing pulse was designed by establishing discrete time model method to solve the existing residual fluctuation problem caused by standard pulse in inkjet head. According to the change of curved liquid surface speed during drop injection process, the residual fluctuations in the ink cavity were compared and analyzed under the standard pulse and optimizing pulse. It was proved that the ink drops driven by optimizing pulse is more in accord with actual needs.

Key words: residual fluctuation; optimal pulse; rheological property; meniscus velocity; standard pulse

喷墨印刷具有成本低廉、数据可变、承印材料广泛等优点, 被广泛地应用于显示器、印刷电路板、太阳能电池板等功能性元器件的研发和制造^[1-2]。按需(DOD)喷墨印刷的印制过程可分为墨滴的喷射成形、飞行、撞击、铺展和固化等 5 个步骤。其中, 墨滴的喷射成形是指喷墨头在驱动脉冲下, 通过压电元件驱动将墨腔内油墨喷射出来形成墨滴的过程。它决定着喷墨墨丝断裂后墨滴的初始速度, 以及后续撞击过程中对基材的冲击力等, 对其后续的 4 个过程有着重要的影响^[3], 因此, 研究影响墨滴成型的因素, 提出最优化的墨滴成形控制方案, 对于喷墨印刷的质量管理和应用推广有着重要的意义。

为了使墨滴喷射能有良好的表现行为, Xi Wang 等人提出了采用双脉冲波形的方法来抑制低粘度油

墨在喷墨过程中产生的不良现象^[4], N. Ramakrishnan 等人提出了压电喷墨中胶质悬浮液的墨滴形成^[5]。除此之外, 墨滴的喷射成型过程还受油墨特性和喷墨墨腔内部的残余波动影响, 笔者对这 2 个因素分别进行研究。

1 油墨特性分析

油墨特性对墨滴成形的影响主要体现在油墨的流变特性上, 而油墨的流变特性取决于墨滴形成过程中的物理性能和流变力。该流变特性可用雷诺数(Re)、韦伯数(We)、奥内佐格数(Oh)表示:

$$Re = \frac{v\rho a}{\eta} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-05-07

作者简介: 沈旭峰(1986—), 男, 安徽亳州人, 江南大学硕士生, 主攻印刷工艺、印刷质量检测与控制。

$$We = \frac{v^2 \rho a}{\gamma} \quad (2)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\eta}{(\gamma \rho a)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

式中： ρ 、 η 和 γ 分别为油墨的密度、动态粘度和表面张力； v 为油墨喷射速度； a 表示其油墨的特征长度，即墨滴形成后的直径。

Re 是用以衡量作用于油墨流体上的惯性力与黏性力相对大小的无量纲相似参数； We 代表惯性力和表面张力效应之比，韦伯数愈小代表表面张力愈重要； Oh 则表示喷墨头中与墨滴形成特性相对应的物理常数。

奥内佐格数(Oh)是与墨滴形成特性相对应的物理常量，同墨滴速度无关，常可用 $Z = 1/Oh$ 替代。一般情况下，形成稳定墨滴的范围为 $1 < Z < 10$ 。当 $Z < 1$ 时，粘性损耗将阻止墨滴从喷头中喷出；当 $Z > 10$ 时，卫星墨滴将会伴随着主墨滴的形成而产生^[6]。

仅采用奥内佐格数评价喷墨印刷流体的稳定性是不太准确的，为了产生期望的墨滴，墨滴被喷射出喷墨头时必须克服其表面张力和相关的拉普拉斯应力，这里可以通过韦伯数来进行描述。当 $We < 4$ 时，油墨的动力不足以克服表面张力，不能分裂成形；当超出条件给定的界限 $(We)^{\frac{1}{2}} Re^{\frac{1}{4}} > 50$ 时^[7]，墨滴将发生飞溅、出现卫星墨滴等不良现象。对应的极限范围及可适用于 DOD 喷墨印刷的区域见图 1。墨滴速度

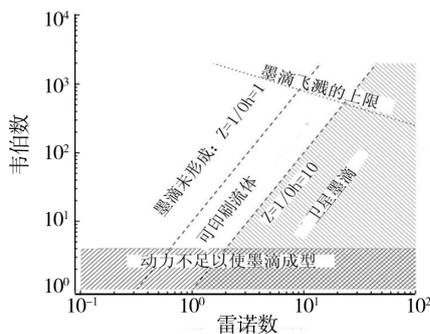


图 1 可适于 DOD 喷墨印刷的区域及界限

Fig. 1 Suitable area and limit for DOD inkjet printing

沿着斜对角上升，图 1 中所示下界和上界分别为墨滴喷射和飞溅的极限条件。与速度正交的即为 Oh 值，它定义了油墨特性的临界条件。图 1 可看作是对压电式 DOD 喷墨印刷中流体性质和墨滴动态一致性的标准准则^[8]。

墨滴喷射过程驱动脉冲的选择与墨滴特性有着

一定的相关性，不同的驱动脉冲适用于对应的油墨特性。如低粘度的油墨在选择驱动脉冲时，考虑到其流动性较好，易在喷射过程中产生附加的卫星墨滴，因此驱动脉冲的幅度应偏小，降低卫星墨滴产生的概率。由此，在对驱动脉冲进行优化之前，应对油墨特性进行分析，从而选择出与优化后的脉冲相对应的油墨特性范围。

2 压电驱动脉冲特性分析及优化

基于以上对油墨特性的分析及给出的可适用于喷墨的油墨特性范围，从中可选择出具有良好特性的油墨，以用于驱动脉冲的优化设计。压电式喷墨通过给喷头上的压电驱动元件一个脉冲，使驱动元件产生一定变形，将油墨挤压出墨腔，从而使墨滴喷射出来。传统的标准脉冲波形为单一梯形的波形。当喷墨印刷驱动装置采用该标准脉冲进行打印时，不可避免地在墨腔中产生残余波动，从而无法保证喷射出墨滴的速度、大小等特性的一致性。下面设计一种可消除此类影响的优化脉冲，使连续喷射的墨滴能够保持其特性的一致性，满足实际生产制造或是传统印刷的需求。具体设计中，采用可控制的系统化模型即离散时间模型 $H(q)$ ^[9]，它能使输入的压电电压与弯液面的特性相关联，可通过弯液面处的速度来反映墨腔的受力。下面针对不同类型的喷墨印刷油墨进行压电脉冲的设计和优化。

2.1 牛顿流体油墨的优化脉冲

综合考虑成本控制、研究方法的难度等问题，在设计最优驱动脉冲时，选择窄隙模型来描述压电输入电压 U 与弯液面速度 y 之间的动态关系。

在该模型中，系统的频率响应 $H(\omega)$ 可通过正弦扫描方法计算出来。该方法通过求解在某一频率 (ω_1) 下正弦曲线输入信号 $(u(t))$ 的波形方程和弯液面速度方程 $(y(t))$ 来获得系统频率 $H(\omega)$ ：

$$|H(\omega)| \Big|_{\omega=\omega_1} = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{|y| \sin(\omega_1 t + \phi_2)}{|u| \sin(\omega_1 t + \phi_1)} \quad (4)$$

$$\angle H(\omega) \Big|_{\omega=\omega_1} = \phi_2 - \phi_1 \quad (5)$$

其中，系统的频率响应 $H(\omega)$ 可通过正弦扫描方法计算出来，并可以在一定的频率网格上得到一条频率响应的实线，见图 2。

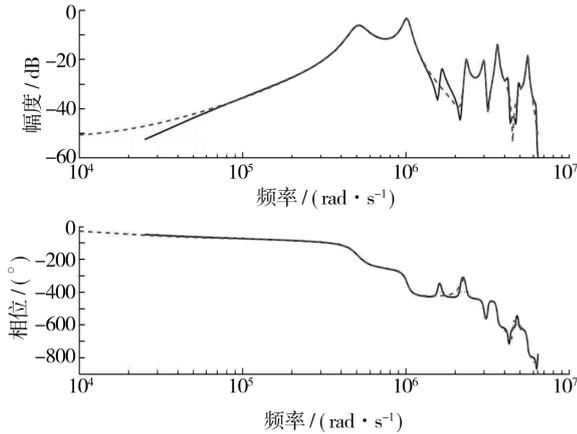


图2 窄隙模型及相似转移函数的频率响应分布曲线
Fig. 2 Frequency response curves of narrow-gap model $H(\omega)$ and approximated transfer function $H(q)$

图2中极小区域轨迹可通过MATLAB中系统识别工具第16级离散时间转移函数 $H(q)$ 来近似替代分析模拟的函数 $H(\omega)$,即图2中虚线部分。这里,对应于离散时间转移函数的采样时间 t_s 设定为 $0.1\ \mu\text{s}$ 。

由于Wijshoff中的窄隙模型是在墨腔内部声学性能是线性的基础上得到的,因此,这种模型只适用于油墨材料属于牛顿流体的传统印刷行业,而在一些新兴的产业中,多数油墨都属于非牛顿流体,采用基于非线性喷墨系统模型的优化脉冲更符合实际的需求。下面针对非牛顿流体下的优化脉冲进行研究分析。

2.2 非牛顿流体下的优化脉冲

鉴于实验中所使用的打印头控制性能有限,引入了一种前馈控制机制对墨腔的动态特性进行控制^[9]。一般情况下,优化的驱动脉冲由2类脉冲构成:谐振脉冲和猝熄脉冲。上升时间为 t_r ,停留时间为 t_w ,下降时间为 t_f ,脉冲的振幅为 V ,谐振脉冲和猝熄脉冲之间的时间间隔用 t_{dQ} 表示。驱动脉冲 $u=(k,\theta)$ 可由矢量参数 $\theta=[t_{rR}, t_{wR}, t_{fR}, V_R, t_{dQ}, t_{rQ}, t_{wQ}, t_{fQ}, V_Q]$ 表示,见图3。这里时间的变量(t_r, t_w, t_f, t_{dQ})都是采样时

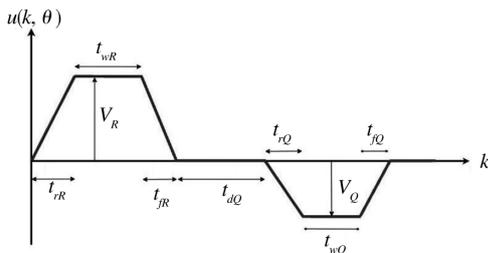


图3 设计驱动脉冲的波形
Fig. 3 The shape of designed driving pulse

间 t_s 的整数倍。

矢量参数 θ_{opt} 的最优化问题,可通过弯液面速度设定一个模型函数 $y_{ref}(k)$ 来精确定义。首先,假定标准脉冲在初始化矢量参数为 $\theta_{std}=[1.5\ 2.5\ 1.5\ 25\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 时其轨迹见图4。

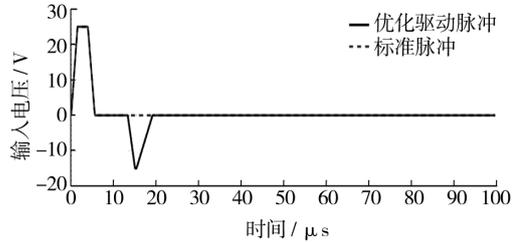


图4 标准脉冲与优化脉冲的输入波形
Fig. 4 The shape of standard pulse input and optimal pulse input

模型 $H(q)$ 对标准脉冲的反应见图5,弯液面速

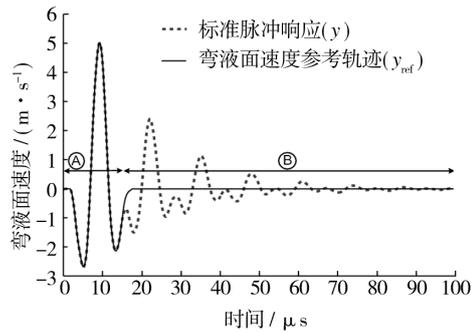


图5 弯液面速度的参考轨迹
Fig. 5 Reference trajectory of meniscus velocity

度 $y(k)$ 的轨迹特征可分为2部分:A部分显示了墨滴在期望的速度下喷射;B部分代表残余波动影响下的速度分布,它是非期望的。因此,理想的弯液面速度模型 $y_{ref}(k)$ 应当满足墨滴能在期望的速度下喷射,同时墨腔内的残余波动也能快速消除。这样,弯液面速度 $y(k)$ 就可与 $y_{ref}(k)$ 保持一致,为在高喷射频率下墨滴的喷射创造了条件^[11]。

针对有关优化压电输入的最优化问题。优化输入即为梯形输入 $u=(k,\theta)$,它能使参考轨迹 $y_{ref}(k)$ 和弯液面速度 $y(k)$ 差别极小化。精确地定义即为目标函数方程:

$$\Gamma(\theta) = \sum_{k=0}^N w(k) \{y_{ref}(k) - y[k, u(k, \theta)]\}^2 \quad (6)$$

$$\Gamma(\theta) = \sum_{k=0}^N w(k) [y_{ref}(k) - H(q)u(k, \theta)]^2 \quad (7)$$

其中： $N=T/t_s$ ， t_s 为采样时间， t 为 $100 \mu s$ ， $w(k)$ 为时间范畴的加权值， $H(q)$ 为压电输入与弯液面速度关系的离散时间模型， q 在这里代表顺向移动运算符， $u(k, \theta)$ 是含有矢量参数 θ 的驱动脉冲参数。对矢量参数 θ 进行如下求解可得到优化驱动脉冲参数 θ_{opt} ：

$$\theta_{opt} = \min_{\theta} \Gamma(\theta) \quad (\theta_{LB} < \theta < \theta_{UB}) \quad (8)$$

这里， θ_{LB} 和 θ_{UB} 都是矢量，代表矢量参数 θ 的高低边界。

3 优化模拟及实验分析

DOD 频率为 38 kHz 时喷射 10 个墨滴后的墨腔的反应见图 6，初始驱动脉冲之间的时间间隔为 1/38

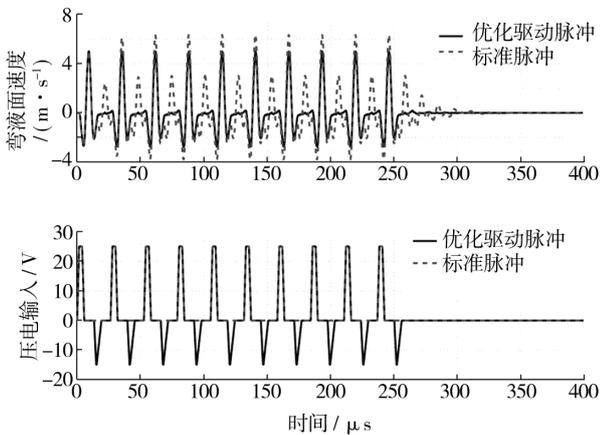


图 6 DOD 频率为 38 kHz 时对 10 个墨滴喷射过程的模拟
Fig. 6 Simulation for jetting of 10 drops at DOD frequency 38 kHz

ms。从图 6 中标准脉冲和优化脉冲下弯液面速度的对比可知，在标准驱动脉冲下，弯液面速度在喷射墨滴之后不能快速恢复，导致其后续的驱动脉冲的初始条件发生了变化，影响了各个点上的速度临界值。由于速度临界值是一个重要的特征，当速度临界值发生变化时，喷射的墨滴会出现不同的速度。而在优化压电驱动脉冲下，各个墨滴喷射前初始条件基本相同。在这种条件下产生的速度临界值的差别基本可以忽略，因此，喷射的墨滴也都基本保持相同的速度。

不同的 DOD 频率下喷射墨滴的速度临界值见图 7。由于速度的临界值与喷射墨滴的速度相同，因此，图 8 的曲线相当于 DOD 曲线。鉴于标准脉冲不能使墨腔快速恢复，当提高 DOD 频率后，残余波动消失的

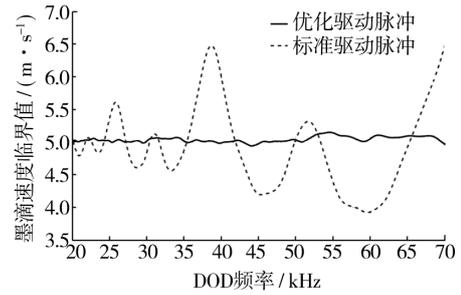


图 7 DOD 曲线模拟
Fig. 7 Simulated DOD curve

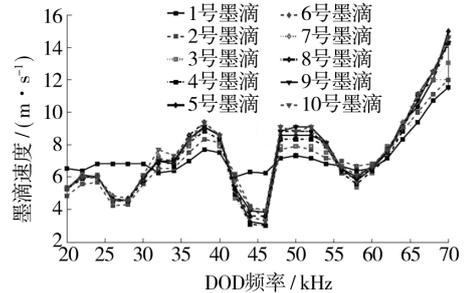


图 8 标准脉冲下实验绘制的 DOD 曲线
Fig. 8 Experimental DOD curves with the standard pulse

时间相应变大，相应地弯液面速度的临界点随着频率增高而变大；而优化脉冲下对应的速度临界点的变化则很小。

标准脉冲和优化脉冲在不同频率(20~70 kHz，步进为 2 kHz)下，喷墨头喷射出的前 10 个墨滴的速度变化对比见图 8 和 9。从图 9 可以看出，在优化脉

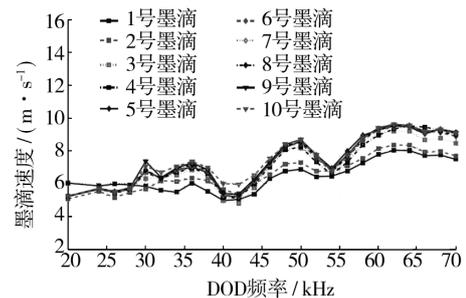


图 9 优化驱动脉冲下实验绘制成的 DOD 曲线
Fig. 9 Experimental DOD curves with the optimal driving pulse

冲下，各墨滴的速度变化比标准脉冲小，且同一频率处，各墨滴的速度基本相似，但图 8 中速度的变化较大。此外，标准脉冲下墨滴喷射速度的整体一致性也较差，这将对印刷质量产生影响。从以上对比可知，

优化脉冲可使得残余波动绝大部分被消除,从而产生一条平整的 DOD 曲线。但在实际操作过程中使用优化脉冲时,产生的曲线也不是完全的平整,见图 7,这可能是由于在分析过程中忽略了该过程中的动态特性造成的。

4 结论

喷墨印刷技术之所以能受到新兴技术领域的青睐,关键在于喷墨精度高,特别是在一些对元件尺寸等物理结构精度要求较高的产业中,该技术的应用十分普遍。为了获得期望的喷射墨滴,对不同流体特性的油墨进行了分析,并给出了可适用于新技术领域的油墨特性范围,同时针对在喷墨驱动脉冲方面存在的问题,提出了一种基于系统化基础上的优化脉冲,使得喷射出的墨滴更符合实际的需求。然而,在现有的技术条件下,优化脉冲的应用仍有些许的不足,如提出的窄隙模型 $H(\omega)$ 与打印头的几何结构以及油墨材料的特性相关,导致其不具有普遍适用性。尽管如此,仍可以通过重复以上步骤来获取与条件相匹配的离散时间转移函数 $H(q)$ 。除此之外,优化脉冲在添加了额外的猝熄脉冲之后,导致脉冲持续时间较长,在高频率的情况下,将使得各个脉冲之间产生部分重叠,不利于喷墨印刷,下一步的研究可以从这些方面着手。

参考文献:

- [1] 王灿才. 喷墨印刷质量的分析与研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 55—57.
WANG Can-cai. Analysis and Investigate the Quality of Inkjet Printing[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 55—57.
- [2] 郭润兰, 龚俊, 辛舟, 等. 数字喷墨印刷技术在瓦楞纸板上的应用[J]. 包装工程, 2004, 25(1): 62—64.
GUO Run-lan, GONG Jun, XIN Zhou, et al. Application of the Digital Inkjet Printing Technology in Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2004, 25(1): 62—64
- [3] 颜进华, JOYCE M. 用于聚碳酸酯基材的喷墨打印油墨特性研究[J]. 包装工程, 2008, 29(6): 52—54.
YAN Jin-hua, JOYCE M. Research of Inkjet Printing Ink Properties on Polycarbonate Substrate[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 52—54.
- [4] Xi WANG, W W CARR, D G BUCKNALL, et al. Drop-on-demand Drop Formation of Colloidal Suspensions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 38: 17—26.
- [5] N RAMAKRISHNAN, P K RAJESH, P PONNAM-BALAM, et al. Studies on Preparation of Ceramic Inks and Simulation of Drop Formation and Spread in Direct Ceramic Inkjet Printing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169: 372—381
- [6] JANG D, KIM D, MOON J. Influence of Fluid Physical Properties on Ink-jet Printability[J]. Langmuir, 2009, 25: 2629—35
- [7] STOW C D, HADFIELD M G. An Experimental Investigation of Fluid-flow Resulting from the Impact of a Water Drop With an Unyielding Dry Surface[C]. Proc R Soc Lond Ser A, 1981, 373: 419—41.
- [8] DERBY B, REIS N. Inkjet Printing of Highly Loaded Particulate Suspensions[J]. MRS Bull 2003; 28: 815—8.
- [9] WIJSHOFF H. Structure and Fluid-Dynamics in Piezo Inkjet Printheads[D]. University of Twente, 2008.
- [10] WASSINK M G. Inkjet Printhead Performance Enhancement by Feedforward input Design Based on Two-Port Modeling[D]. Delft University of Technology, 2007.
- [11] KWON K. Waveform Design Methods for Piezo Inkjet Dispensers Based on Measured Meniscus Motion[J]. Journal of Microelectromechanical System, 2009, 18(5): 1118—1125.
- [12] SOBRAL P J A, MENEGALLI F C, HUBINGER M D, et al. Mechanical, Water Vapor Barrier and Thermal Properties of Gelatin-based Edible Films [J]. Food Hydrocolloid, 2001(15): 423—432.
- [13] KIM K W, KO C J, PARK H J. Mechanical Properties, Water Vapor Permeabilities and Solubilities of Highly Carboxymethylated Starch-based Edible Films[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(1): 218—222.
- [14] 段林娟, 卢立新. 甘油含量对 MC/WG 可食性复合膜性能的影响[J]. 包装工程, 2011, 32(1): 43—45.
DUAN Lin-juan, LU Li-xin. Effects of Glycerol Content on Properties of MC/WG Edible Film[J]. Package Engineering, 2011, 32(1): 43—45.

(上接第 52 页)