

# 压电喷墨驱动波形和残余振荡研究

武秋敏,李 飒,马依礼,朱慧敏,徐 磊

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院,陕西 西安 710054)

**摘 要:**压电喷墨打印头的结构、驱动波形等直接影响墨滴的喷射特性和打印精度。运用数值仿真软件 COMSOL 建立了压电喷墨打印头系统模型,研究了驱动参数(电压幅值、电压停留时间、工作频率)对喷射特性(液滴速度和体积)的影响规律。最后,设计了双极驱动波形来抑制残余振荡。结果表明,该消振波形能有效地抑制残余振荡,提高了喷墨打印头的工作频率和稳定性。

**关键词:**压电喷墨;流体仿真;驱动波形;墨滴特性;残余振荡

**中图分类号:**TN384;TS853.5 **文献标识码:**A

## Research on Piezoelectric Inkjet Drive Waveforms and Residual Oscillations

WU Qiumin, LI Sa, MA Yili, ZHU Huimin, XU Lei

(Faculty of Printing, Packing Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology,  
Xi'an 710054, China)

**Abstract:**In a piezo inkjet system, the print head structure, driving waveform, and other factors directly influence the jetting characteristics and printing accuracy. In this study, the numerical simulation software COMSOL was employed to establish a model of piezoelectric inkjet printhead system. The influence of driving parameters—voltage amplitude, voltage residence time, and operating frequency—on jetting characteristics was investigated, specifically droplet velocity and volume. Additionally, a bipolar driving waveform was designed to suppress the residual oscillation. The results demonstrate that the damping waveform effectively suppresses the residual vibration of the pressure wave, significantly improving the working frequency and printing accuracy of the inkjet printhead.

**Key words:**piezoelectric inkjet; fluid simulation; drive waveform; ink droplet characteristics; residual oscillation

### 0 引言

喷墨打印技术因其精度高、成本低、高效环保和材料兼容性广等特点,被广泛应用于众多工业领域<sup>[1-3]</sup>。在压电喷墨打印过程中,压电陶瓷在驱动电压的作用下发生变形,并在腔室内产生压力波,当喷嘴孔处的压力波足够大时,油墨会克服阻力,从喷嘴孔喷出,最终形成墨滴<sup>[4]</sup>。墨水喷射后,墨水通道内的残留压力波需要一段时间才能衰减完毕,若在残留压力波完全衰减前喷射下一个墨滴,则所得墨滴的飞行速度和体积受到明显影响,严重的甚至产生二次喷射<sup>[5]</sup>。

近年来,诸多学者研究了驱动波形和驱动参数对液滴喷射特性的影响。文献[6]建立打印头的物理模型,研究了梯形波形各时间参数对喷嘴压力的影响,并基于实验结果进一步优化;文献[7]提出了一种闭环机器学习方法,用于设计以目标速度进行无卫星喷墨打印的最佳驱动波形;文献[8]通过搭建墨滴喷射的实验平台,研究了驱动波形的电压幅值、脉冲宽度等对墨滴体积和喷射速度的影响。本文研究了驱动参数对墨滴喷射特性的影响,并在此基础上设计优化了消振波形抑制残余振荡,以提高喷墨打印的喷射频率和稳定性。

收稿日期:2024-03-28

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目(2022JZ-30);陕西省教育厅重点科研计划项目(20JY054);国家自然科学基金项目(52075435)

作者简介:武秋敏(1977-),女,山东省潍坊市人,高级工程师。

## 1 压电喷墨系统模型的建立

压电喷墨过程涉及压电域、固体域、流体域和气液两相流等多物理场的耦合。本文利用数值仿真软件 COMSOL, 分别建立了压电喷墨系统的压电驱动器、压电打印头和喷嘴两相流模型。压电驱动器是压电打印头的核心部件, 其结构主要由  $\text{SiO}_2$  振动板、钛酸铅酸铅 (PZT) 压电薄膜和聚对二甲苯 (Parylene) 保护膜等组成, 本文选择 PZT-5H 为压电薄膜材料, 因为与其他压电材料相比, PZT-5H 压电材料能为压电驱动器提供更强的驱动力。将由压电喷墨打印头模型计算得到的喷孔入口处的流体速度作为入口条件导入喷孔两相流模型中, 从而将两个模型耦合在一起组成完整的压电喷墨打印系统模型, 如图 1、2 所示。

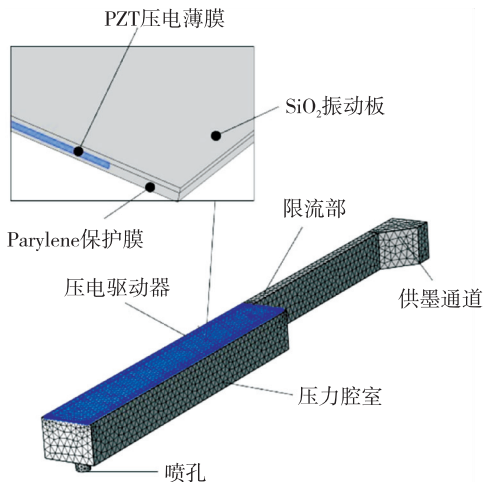


图1 压电喷墨打印头数值仿真模型

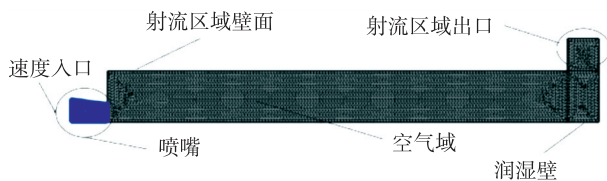


图2 两相流有限元分析模型

## 2 驱动参数对墨滴喷射特性的影响

对墨滴喷射特性影响的关键因素有驱动电压幅值  $U$ 、梯形波的电压停留时间  $t_{\text{dwell}}$  和操作频率。

### 2.1 电压幅值对墨滴成形的影响

驱动电压幅值直接决定墨水喷射时获得的能量大小, 进而对墨水喷射时的速度和流量产生影响。仿真分析了驱动电压为 10 V、20 V、30 V、40 V 时墨滴的成形过程, 该过程压电打印头加载的梯形波上升时间  $t_{\text{rise}} = 4 \mu\text{s}$ , 停留时间  $t_{\text{dwell}} = 8 \mu\text{s}$ , 下降时间  $t_{\text{fall}} = 3 \mu\text{s}$ , 如图

3 所示。计算仿真结果如图 4、5 所示。

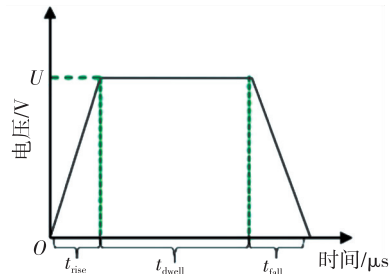
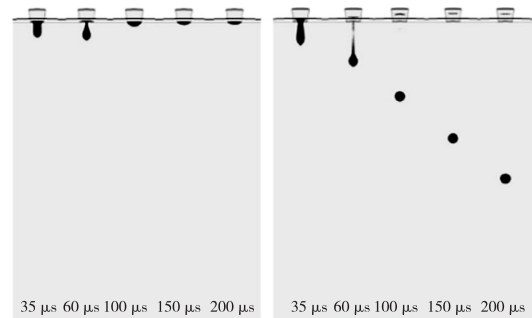
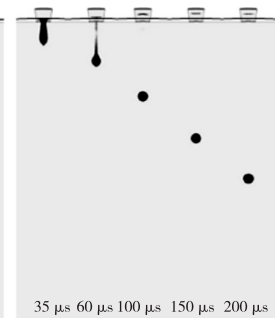


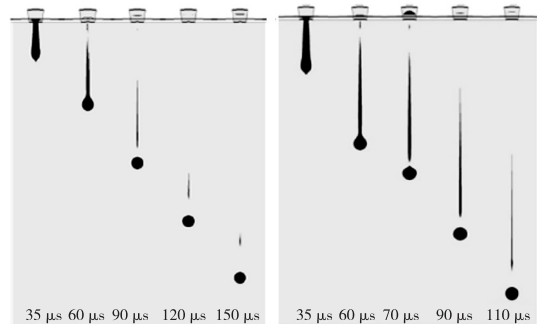
图3 梯形驱动波形



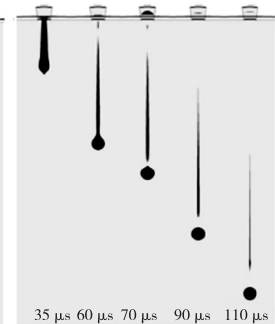
(a) 驱动电压10 V



(b) 驱动电压20 V

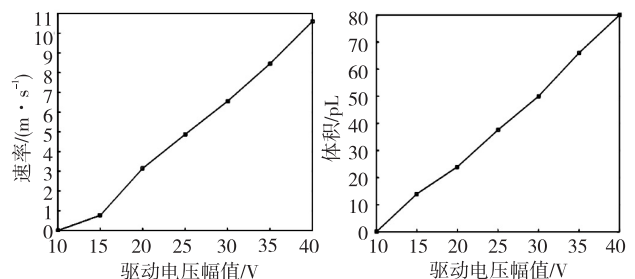


(c) 驱动电压30 V



(d) 驱动电压40 V

图4 驱动电压幅值对喷射效果的影响



(a) 墨滴飞行速度

(b) 墨滴体积

图5 驱动电压与墨滴飞行速度和体积的关系

由计算结果可知, 随着驱动电压幅值的增大, 液柱长度增加, 墨滴的飞行速度和体积增大。因为驱动电压增大, 压电驱动器位移也随之增大, 造成压力腔室体积变化加大, 产生较大的压力, 将油墨从喷嘴处挤出。当驱动电压为 40 V 时, 墨滴存在较长的拖尾。当驱动电压为 10 V 时无墨滴喷射, 这是因为驱动电压过小, 腔室内的流体不能获得足够的

能量克服黏度和表面张力等因素产生的阻力,因而无法被喷出喷嘴形成墨滴。

## 2.2 电压停留时间对墨滴成形的影响

保持其他参数不变,仅改变  $t_{\text{dwell}}$  ( $4\ \mu\text{s}$ 、 $6\ \mu\text{s}$ 、 $8\ \mu\text{s}$ 、 $10\ \mu\text{s}$ 、 $12\ \mu\text{s}$ ),分析了电压停留时间对墨滴成形的影响,结果如图6、7所示。

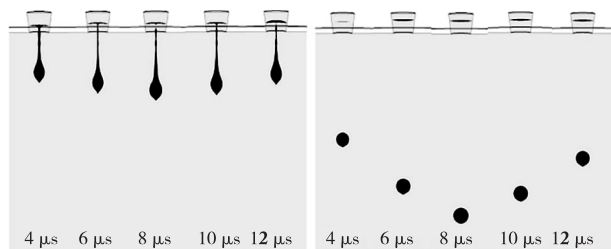


图6 不同电压停留时间的墨滴成形对比图

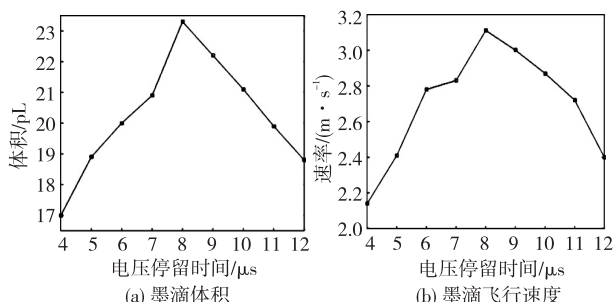


图7 电压停留时间与墨滴飞行速度和体积的关系

由图6、7可知,随着电压停留时间的增加,墨滴速度和体积先增大后减小,当停留时间  $t_{\text{dwell}} = 8\ \mu\text{s}$  时,形成的液柱长度最长,墨滴的飞行速度和体积达到最大。

## 2.3 操作频率对墨滴成形的影响

操作频率决定墨滴的生成速度。图8为不同操作频率下墨滴的喷射效果。

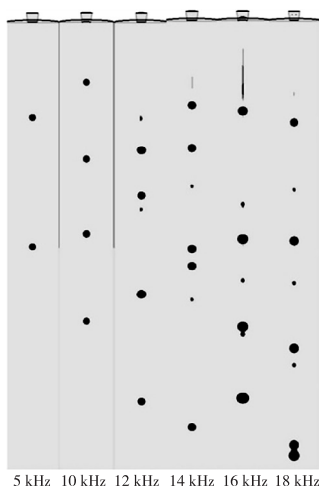


图8 不同操作频率下墨滴的喷射效果

由图8可知,当频率为5 kHz和10 kHz时,墨滴均能有效喷出,且无卫星墨滴。当频率逐渐增大,墨滴喷射速度明显增大,但卫星墨滴数目也逐渐增多。

## 3 残余振荡的抑制

### 3.1 残余振荡

压电打印头内压力波的残余振荡限制了打印头的喷射效率。当墨水在压力波的作用下喷射后,墨水通道内的残留压力波需要经过一段时间才能衰减完毕。图9为理想流体速度和实际流体速度对比图。由图可知,在墨滴喷射出去后(红点位置),仍有残留的压力波在腔室内传播,约  $130\ \mu\text{s}$  后才完全消散。在残留压力波完全衰减之前喷射下一个墨滴,则所得的墨滴特性将与前一个墨滴不同,严重的甚至会产生墨水二次喷射。因此,墨滴只有以低频(残余振荡完全衰减后)喷射时,墨滴的速度和体积才会保持恒定。

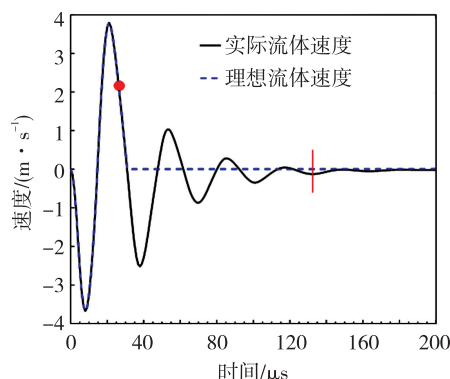


图9 喷孔处流体速度对比图

### 3.2 消振波形的优化设计

为抑制压力波的残余振荡,需要对前述的梯形波(称为标准波形)进行设计,以达到残余振荡快速衰减的目的。

本文设计的消振波形采用双极驱动波形,如图10所示。图中,  $t_{\text{riseR}}$ 、 $t_{\text{fallR}}$ 、 $t_{\text{riseQ}}$ 、 $t_{\text{fallQ}}$  分别为标准波与抑制波上升和下降的时间,  $t_{\text{dwellR}}$  为标准波形的电压停留时间,  $t_{\text{dell}}$  为抑制波形和标准波形之间的时间间隔,  $t_{\text{dwellQ}}$  为抑制波形的电压停留时间,  $U_R$ 、 $U_Q$  分别为标准波形与抑制波形的电压幅值。在标准波形的基础上添加了一个抑制波形,使之产生的压力波与标准波形的压力波相互抵消,从而抑制残余压力波。其中标准波形用于形成和喷射墨滴。

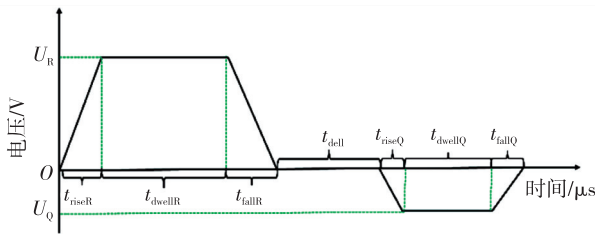


图10 消振波形

图11为根据波叠加原理使压力波相互抵消的原理图。当喷孔处速度由第一正峰恢复到0后,在压电驱动器上加载抑制波形,其产生的压力波能与标准波形的残余压力波相互抵消,从而抑制压力波的残余振荡。

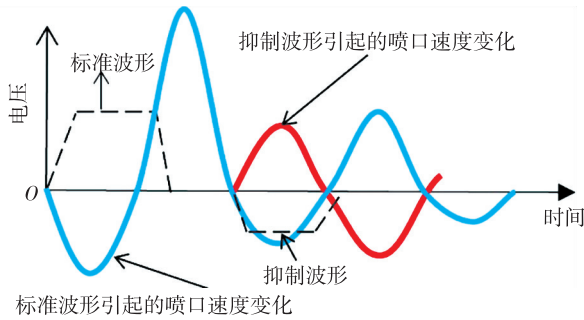


图11 速度波叠加抵消原理图

标准波形的  $t_{riseR} = 4 \mu s$ ,  $t_{dwellR} = 8 \mu s$ ,  $t_{fallR} = 3 \mu s$ 。根据波叠加原理可知,抑制波形最佳的启动时间约等于速度波的基本周期,抑制波形电压上升和下降时间( $t_{riseQ}$ 、 $t_{fallQ}$ )对压力波残余振荡的影响较小,为简化波形设置,抑制波形电压上升和下降时间( $t_{riseQ}$ 、 $t_{fallQ}$ )与标准波形电压上升和下降时间( $t_{riseR}$ 、 $t_{fallR}$ )相等。因此,本文主要对抑制波形的电压停留时间  $t_{dwellQ}$  和电压幅值  $U_Q$  进行优化。

### 3.2.1 抑制波形电压幅值 $U_Q$ 的确定

首先,分析抑制波形电压幅值  $U_Q$  对残留压力波振荡的抑制作用。设置  $t_{riseQ} = t_{riseR} = 4 \mu s$ ,  $t_{dell} = 8 \mu s$ ,  $t_{fallQ} = t_{fallR} = 3 \mu s$ ,  $U_R = 10 V$ ,  $t_{dell} = 16 \mu s$ 。设置抑制波形的电压停留时间为  $8 \mu s$ ,对抑制波形电压幅值  $U_Q$  进行参数化分析,参数变化范围为  $1.8 \sim 3 V$ ,步长为  $0.1 V$ 。计算得到了不同抑制波形电压对应的喷孔入口速度曲线,如图12所示。由图可看出,随着抑制电压  $U_Q$  的逐渐增大,压力波的残余振荡逐渐衰减。当电压为  $2 V$  时,压力波残余振荡的抑制效果最好。因此,确定抑制波形电压  $U_Q = 2 V$ 。

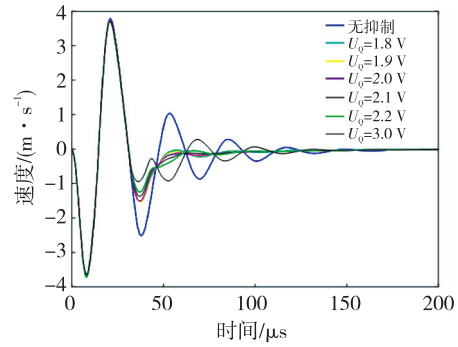
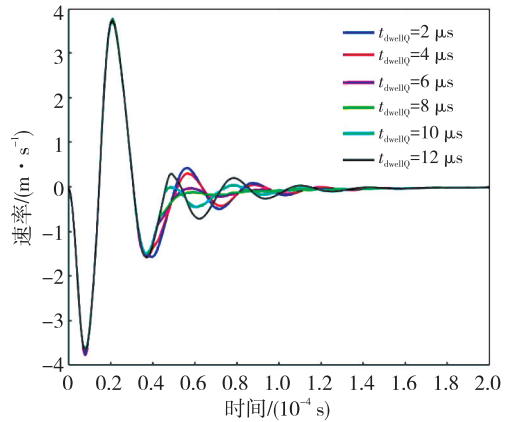


图12 不同抑制波形电压的喷孔处流体速度-时间曲线

### 3.2.2 $t_{dwellQ}$ 的确定

仿真分析  $t_{dwellQ}$  对残留压力波振荡抑制作用。设置  $t_{dwellQ} = 2 \sim 12 \mu s$ ,步长为  $2 \mu s$ ,其他参数不变,计算得到电压停留时间对应的喷孔入口速度曲线,如图13所示。随着  $t_{dwellQ}$  的逐渐增大,对残余压力波的抑制作用是先增大后减小,当  $t_{dwellQ} = 8 \mu s$  时,对压力波残余振荡的抑制效果最好。

图13 不同  $t_{dwellQ}$  的速度-时间曲线

### 3.3 消振波形对压电打印头性能的影响

确定消振波形的  $t_{riseR} = 4 \mu s$ ,  $t_{dwellR} = 8 \mu s$ ,  $t_{fallR} = 3 \mu s$ ,  $t_{dell} = 16 \mu s$ ,  $t_{riseQ} = 4 \mu s$ ,  $t_{dwellQ} = 8 \mu s$ ,  $t_{fallQ} = 3 \mu s$ ,  $U_R = 10 V$ ,  $U_Q = 2 V$  后,将优化后的消振驱动波形加载在压电打印头,得到喷孔处流体速度-时间曲线,如图14所示。当喷孔处流体速度剩余峰值低于最高峰值的  $\pm 5\%$  时,其影响可忽略。由图可看出,在施加标准波形时,喷孔处流体速度余峰低于最高峰值  $\pm 5\%$  的时间为  $106 \mu s$  (红色虚线位置,对应频率为  $9.43 kHz$ )。施加消振波形后,喷孔处流体速度余峰低于最高峰值  $\pm 5\%$  的时间为  $55 \mu s$  (红色实线位置,对应频率为  $18.2 kHz$ )。在该压电打印头模型中,消振波形操作频率比标准波形的操作频率约高1倍。



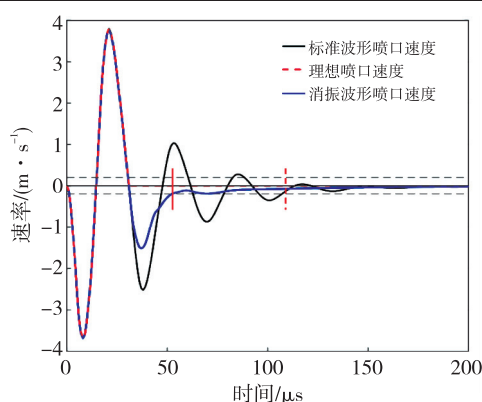


图 14 施加抑制波形前后喷孔处流体速度-时间曲线

在压电喷墨打印头印刷过程中,要求在不同驱动频率下能够以恒定的速度喷射墨滴。基于此,引入 DoD 曲线,它是墨滴速度与喷射频率关系(DoD 频率)的函数。理想情况下,DoD 曲线是平坦的,但在实际工作中,由于压力波残余振荡的影响,DoD 曲线存在较大波动。本文以不同的喷射频率连续喷射两个墨滴,绘制了喷射第二个墨滴时喷孔处流体速度峰值与喷射频率的关系曲线,如图 15 所示。由图可知,在标准波形驱动下,无法使墨水通道内的残留压力波快速衰减,随着 DoD 频率的增加,喷孔处流体速度峰值波动越大。在施加消振驱动波形后,发现喷孔处流体速度峰值随 DoD 频率的增加变化不大,基本保持稳定,说明消振波形具有良好的抑制残余振荡的作用。

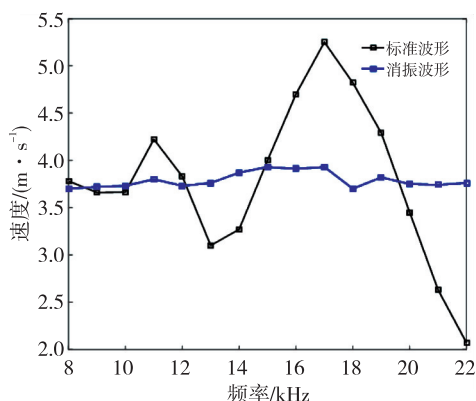


图 15 不同喷射频率下的喷孔处流体速度峰值

为了更直观地体现消振驱动波形对提高压电喷墨的工作频率(喷墨速度)及墨滴的一致性的作用。仿真分析了加载标准波形和消振驱动波形时的墨滴喷射情况,结果如图 16 所示。图中,  $t$  为墨滴从喷墨出来的时间。由图 16(a)可看出,当加载标准波形时,第一周期内压力波的残余振荡对第二周期墨滴的喷射造成严重干扰,使得两个周期喷射的墨滴

存在明显差异(墨滴体积分别为 22 pL、10.4 pL);加载消振波形时,第一、二周期喷射的墨滴则表现出良好的一致性(22 pL、21.7 pL)。该结果说明消振波形有效地抑制了压力波的残余振荡,提高了喷墨打印头的工作频率和稳定性。

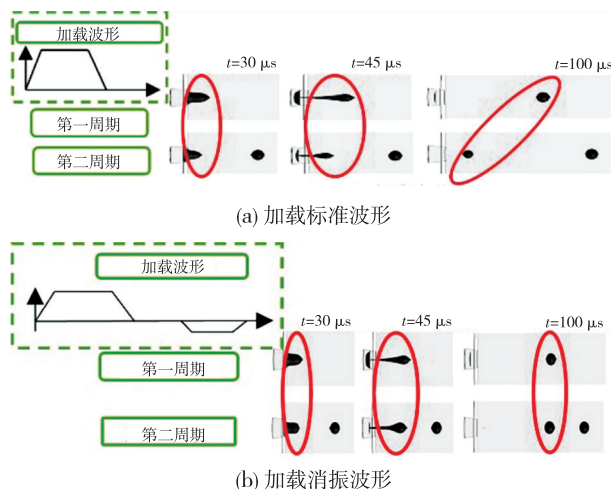


图 16 压电喷墨打印头 2 个周期内的墨滴喷射状态

#### 4 结论

1) 利用所建立的压电喷墨系统模型分析了驱动电压幅值、电压停留时间以及操作频率等驱动参数对墨滴喷射特性的影响规律,得到了不同驱动参数条件下墨滴飞行速度和体积变化特性。

2) 研究了压力波残余振荡产生的原因及影响,利用波叠加原理设计消振波形,并对抑制波形的电压幅值和电压停留时间进行了参数化分析,最终确定了消振波形的各时间分量,即  $t_{\text{riseR}} = 4 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{dwellR}} = 8 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{fallR}} = 3 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{dell}} = 16 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{riseQ}} = 4 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{dwellQ}} = 8 \mu\text{s}$ ,  $t_{\text{fallQ}} = 3 \mu\text{s}$ ,  $U_R = 20 \text{ V}$ ,  $U_Q = 2 \text{ V}$ 。

通过对比仿真分析,验证了消振波形的抑制作用。结果表明,消振波形能有效地抑制压力波的残余振荡,提高了墨滴喷射的效率和稳定性。

#### 参考文献:

- [1] 刘训. 应用于电路板封装的数字微喷技术基础研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
- [2] SAUNDERS R E, DERBY B. Inkjet printing biomaterials for tissue engineering: bioprinting[J]. International Materials Reviews, 2014, 59(8): 430-448.
- [3] 赵翔. 高粘度微细墨滴 3D 打印复合驱动喷射系统关键技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [4] 仲作金, 褚祥诚, 陈海超, 等. 瓷砖装饰用压电喷墨打印头关键技术研究[J]. 压电与声光, 2016, 38(2):

- 221-226.
- ZHONG Zuojin, CHU Xiangcheng, CHEN Haichao, et al. Research on key technology of piezoelectric inkjet print head for tile decoration [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2016, 38(2): 221-226.
- [5] CHEN Y S, HUANG Y L, KUO C H, et al. Investigation of design parameters for droplet generators driven by piezoelectric actuators[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2007, 49(6): 733-740.
- [6] LIU N, SHENG X, ZHANG M, et al. Squeeze-type piezoelectric inkjet printhead actuating waveform design method based on numerical simulation and experiment[J]. *Micromachines*, 2022, 13(10): 1695.
- [7] KIM S, CHO M, JUNG S. The design of an inkjet drive waveform using machine learning[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 4841.
- [8] 王敏,刘轶,徐国强,等. 驱动波形参数对压电喷墨墨滴的影响[J]. *铸造设备与工艺*, 2022(5): 29-31.
- WANG Min, LIU Yi, XU Guoqiang, et al. Effects of driving waveform parameters on piezoelectric inkjet droplets[J]. *Foundry Equipment and Process*, 2022(5): 29-31.
- 
- (上接第 575 页)
- [19] AHMAD A, MUKHERJEE J. Broadside scanning comb-line leaky-wave antenna with gain enhancement and reduced cross-polarization [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2023, 65(10): 2778-2784.
- [20] 范文颖, 侯庆文, 陈先中. 77 GHz 宽带低副瓣毫米波微带天线设计[J]. *西安电子科技大学学报*, 2022, 49(5): 109-116.
- FAN Wenying, HOU Qingwen, CHEN Xianzhong. Design of the 77 GHz broadband low sidelobe millimeter wave microstrip antenna[J]. *Journal of Xidian University*, 2022, 49(5): 109-116.
- [21] HAUPT R L, ATEN D W. Low sidelobe arrays via dipole rotation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(5): 1575-1579.
- [22] DIB N. Design of planar concentric circular antenna arrays with reduced side lobe level using symbiotic organisms search[J]. *Neural Computing & Applications*, 2018, 30(12): 3859-3868.