基于压电-弹性-流体耦合的压电喷墨打印研究

王屹¹,余心宏¹,张国超¹,董盈升²,余齐严³

(1.西北工业大学,西安 710072; 2.陕西新泓水艺环境科技有限公司,西安 710065; 3.西安翔迅科技 有限责任公司, 西安 710071)

摘要:目的 通过研究双极性梯形波的时间参数和电压幅值对液滴喷射的影响,确定合适的驱动波形, 旨在避免卫星液滴出现的同时提高压电喷墨打印头液滴喷射的速度。方法 利用 ANSYS Workbench 平台 仿真分析压电喷墨过程,对压电-弹性-流体双向流固耦合模型和两相流模型进行分布结构分析,根据液 滴状态及喷射速度优化驱动波形。结果 最终确定双极性梯形波的时间参数为4、14、4、20、4 μs, 电 压幅值为 15 V 和 35 V, 加载该驱动波形, 液滴喷射平均速度达 3.1 m/s, 且液滴状态较好, 无卫星液滴 出现。结论 驱动波形的时间参数和电压幅值对压电喷墨打印头喷射液滴的速度和卫星液滴的控制有一 定的影响,通过对驱动波形进行优化可以提高压电喷墨打印头喷射液滴的质量。 关键词:压电打印头;压电-弹性-流体双向流固耦合;双极性梯形波;ANSYS仿真 中图分类号: TP334.8⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)21-0237-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.21.031

Piezoelectric Inkjet Printing Based on Piezoelectric-Elastic-Fluid Coupling

WANG Yi¹, YU Xin-hong¹, ZHANG Guo-chao¹, DONG Ying-sheng², YU Qi-yan³

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Shaanxi Xinhong Water Technology Co., LTD., Xi'an 710065, China; 3. Xi'an Xiangxun Technology Co., LTD., Xi'an 710071, China)

ABSTRACT: The work aims to determine the appropriate driving waveform by studying the effect of time parameter and voltage amplitude of bipolar trapezoidal wave on droplet injection, aiming to avoid the appearance of satellite droplet and improve the velocity of droplet injection by piezoelectric inkjet printing head. The piezoelectric inkjet process was simulated and analyzed by ANSYS Workbench platform. The piezoelectric-elastic-fluid bidirectional fluid-structure coupling model and two-phase flow model were subject to distribution structure analysis. The driving waveform was optimized according to droplet state and injection velocity. The time parameters of the bipolar trapezoidal wave were determined as 4, 14, 4, 20 and 4 µs, and the voltage amplitude was 15 V and 35 V. When the driving waveform was loaded, the average droplet injection velocity was 3.1 m/s and the droplet state was good without satellite droplet. The time parameters and voltage amplitudes of the driving waveform have a certain effect on the velocity of droplet injection and the control of satellite droplets. The quality of droplet injection by the piezoelectric inkjet printing head can be improved through the optimization of driving waveform.

KEY WORDS: piezoelectric inkjet printing head; piezoelectric-elastic-fluid bidirectional fluid-structure coupling; bipolar trapezoidal wave; ANSYS simulation

收稿日期: 2022-2-15

作者简介:王屹(1996-),女,硕士生,主攻压电喷墨打印头的驱动和液滴喷射仿真。

通信作者:董盈升(1970—),男,工程师,主要从事结构设计及仿真研究。

随着喷墨打印头技术的不断革新,喷墨印刷在印刷行业中的地位越来越高。压电打印头凭借自身独特的优势,如成本低、高效耐用、墨水适用性广泛、液滴可控性好、可喷射材料范围广等,在工业市场占有绝对的主导地位,应用领域还在逐步扩大^[1]。压电式打印头可分为挤压、弯曲、推动、剪切等4种类型,推动式由Stuart Howkins于1984年开发成功,由于腔室体积较小,可以有效实现高密度打印,且利用压电陶瓷的堆叠产生较大的驱动力,可以达到更好的喷射效果^[2]。

压电打印头喷射高质量液滴的核心技术是驱动 波形的设计,合理的驱动波形可以抑制卫星液滴的产 生,控制液滴喷射的速度和体积。近些年来,研究者 们通过实验和仿真研究了不同的驱动波形和液滴喷 射之间的关系。Wang等^[3-4]通过研究了驱动波形和压 力波之间的关系得出驱动波形对液滴喷射的影响较 大;Shin等^[5-10]对单双梯形波分别进行分析,对比得 出双极性梯形波更利于液滴喷射,并利用负反馈的 方法有效抑制了残余振荡的产生;Oke等^[11-12]实现了 从同一喷嘴口喷射出 5 种不同尺寸的液滴;李海宁 等^[13-14]研究了不同的脉冲电压幅值和频率对液滴喷 射的影响;Gao等^[15]提出墨水的喷墨性能与墨水的物 理化学性质和压电喷嘴的驱动波形密切相关的结论。 关于双极性梯形波每阶段的时间和电压幅值对液滴 喷射的影响研究相对较少。

综上,为了提高推动式压电打印头喷射液滴的质量,文中通过有限元仿真软件 ANSYS 建立压电-弹性-流体双向流固耦合模型和两相流模型对液滴喷射 过程进行仿真,研究双极性梯形波各个阶段时间参数 和电压幅值对液滴喷射的影响,优化驱动波形以提高 喷射液滴的质量。

1 驱动波形理论

驱动波形控制着液滴的喷射成形过程和喷射质 量,液滴质量好坏主要依据是否有卫星液滴、喷射速 度的快慢、液滴的形状和大小来判断。为了实现喷墨 并提高喷墨打印的质量,需要设计合理的驱动波形。 常见压电喷墨打印头的驱动波形一般有正弦波、三角 形波、矩形波、梯形波4种,理想的驱动电压波形不 仅要保证压电驱动器能够提供墨水喷射所需的足够 驱动力,还需满足响应速度快、易于调节、残余振荡 小等条件,相较于其他波形梯形波响应速度较快,残 余振动小,且参数易于调节,因此,文中主要围绕梯 形波进行研究。

常见的梯形波主要有单极性梯形波(见图 la) 和双极性梯形波(见图 lb),单极性梯形波在液滴拉 断阶段主要依靠加载下降沿电压时腔室产生的负压 力波在限流部发生反射后转为正压力波拉断液柱形 成液滴,液滴拉断时间难以控制,易产生卫星液滴; 而双极性梯形波采用"拉—推—拉"的方式,第2次上 升沿直接控制液滴的拉断过程,不易产生卫星液滴。 另外,单极性梯形波和双极性梯形波要使液滴喷射的 速度相同,单极性梯形波需要施加较大的电压。综上 所述,双极性梯形波在控制卫星液滴和提高喷射速度 方面更优,因此,文中主要对双极性梯形波各个阶段 时间参数进行优化。



图 1 2 种波形的速度和液滴状态对比 Fig.1 Comparison of velocity and droplet state of 2 waveforms

Bogy 等^[16]指出压电喷墨打印头喷孔入口处的压 力和压电驱动器变形产生的压力波在腔室内的传播 和反射有关。根据波传播理论,推动式压电打印头施 加的电压脉冲使压电驱动器产生轴向的拉伸或收缩, 并带动振动板产生变形,从而引起腔室内压力分布的 瞬时变化使液滴喷出。以双极性梯形波为例进行介 绍,如图 2 所示,实线代表负压力波,虚线代表正压 力波,双极性梯形波在第 1 次电压上升阶段,压电驱 动器变形使腔室扩张产生负压力波,液体充满腔室; 在第 1 次电压保持阶段,这种压力波会分裂,通过扩 展声波的方式分别沿着腔室向喷孔和限流部 2 个相 反的方向传播,在喷孔(闭口端)发生反射后,相位 保持不变,而在限流部(开口端)发生反射后,它的 相位会变为正压力波;在电压下降阶段,压电驱动器 变形使腔室收缩产生正压力波,该正压力波与传播到 限流部方向反射回来的正压力波产生叠加,有效增大 了墨水的喷射速度。在第2次电压保持阶段,叠加的 压力波传递到喷嘴处,足够大的能量能克服喷嘴处液 体的表面能量,喷射出液滴;在第2次电压上升阶段, 腔室再次产生负压,液滴回缩拉断液柱形成液滴。



图 2 腔室内压力波的传播和反射过程 Fig.2 Pressure wave emission and reflection in cavity

2 模型建立

压电喷墨过程是将驱动波形加载到压电陶瓷上, 使振动板产生变形引起与之紧密贴合的墨腔体积发 生形变,从而将液滴喷出。为了保证模拟结果的准确 性,文中对压电喷墨打印头的喷墨过程实行分步结构 分析^[17],即压电打印头的压电--弹性--流体耦合模型和 喷孔处两相流模型分开进行计算模拟,利用每一时间 步中的边界数据进行速度的传递,保证模拟结果的高 精度和可靠性。

2.1 流固耦合模型

文中利用 ANSYS Workbench 平台对压电打印喷 墨过程中压电陶瓷、振动板、流体之间的相互作用进 行压电-弹性-流体双向流固耦合模拟,该模型包括叠 堆压电陶瓷、振动板、流道腔、限流部、喷孔过渡通 道等部分,模型见图 3。此模拟共使用 3 个模块 (Transient Structural、Fluent、System Coupling),通 过 Transient Structural 模块设置压电和振动板的压电 结构耦合;通过 Fluent 模块对流体区域进行设置,并 在各自模块定义其流固耦合面,以实现固体挤压变形 与液体反作用力之间的相互作用;通过 System Coupling 模块实现压电-弹性-流体的双向流固耦合。

压电结构耦合部分为实现堆叠的压电陶瓷在力

学上的串联和电路上的并联,需设置相邻压电陶瓷的 极化方向相反,底层压电陶瓷下表面设置 z 轴的位移 耦合,振动板和压电陶瓷之间的接触设置为 no separation,振动板的 4 个侧面设置为固定约束, Fluid Solid Interface 设置为流固耦合面。

流体区域的出口处由于速度较快,需要进行网格 细化,由于流场形状会随振动板变形而变化,因此需 要设置动网格,为避免负体积的出现需要设置弹簧光 顺法和局部重构法同步,并选择合适的时间步为 1×10⁻⁷ s,设置与振动板接触的区域为流固耦合面, 实现腔室体积随振动板的振动而改变。



图 3 压电-弹性-流体模型 Fig.3 Piezoelectric-elastic-fluid model

2.2 两相流模型

利用 fluent 平台对喷孔内的流体域和外部的空气 域进行两相流模拟,由于实际喷孔是旋转对称结构,且 由压电-弹性-流体双向流固耦合模型模拟结果得出喷 孔入口边界速度也满足对称条件,因此喷孔模型可以简 化为二维模型进行分析,在保证计算精度的同时提升运 算速度,因此文中选择建立平面的二维模型,见图 4。



Fig.4 Two-phase flow model

利用 ANSYS Meshing 划分网格,由于网格划分 较小,所以在 options 下选择 Fluent 双精度瞬态求解 器能达到更高的精度,在 model 中选择 VOF 模型隐 式计算,利用压电-弹性-流体耦合模拟中输出的出口 速度编写 profile 文件,并读入 fluent 中作为两相流的 入口边界条件,实现模型之间的数据传输,出口边界 条件设置为压力出口,并利用 monitor 对液滴进行位 移监测,初始化流场后进行模拟计算。

3 驱动波形仿真结果分析

3.1 驱动波形时间参数的设计

主要对双极性梯形波的上升沿时间 t_{rise1}和 t_{rise2}、 保持时间 t₁和 t₂、下降沿时间 t_{fall}进行调节,研究各 个阶段时间对液滴喷射的影响,从而确定打印头最优 的驱动波形。

在驱动波形第1次电压上升阶段(*t*rise1),振动板向上弯曲,腔室内产生负压,墨水从供墨端通过限流 部吸入墨水,同时喷孔附近的墨水也会被回吸到腔室, 为了避免墨水过吸,应使振动板产生较小的位移量。为 了避免电压变化对结果产生影响,对单独的上升沿时间 进行模拟,上升沿时间分别为1、2、3、4 μs,振动板 最大位移量模拟结果见图5,当上升沿时间为4 μs 时, 振动板最大位移量最小,因此 *t*risel 选择为4 μs。

在驱动波形电压下降阶段(*t*fall),振动板向下凸起,腔室内产生正压,该正压力波与上升阶段喷口处反射回来的正压力波叠加,从而产生放大的正压力 波,该放大的压力波传播到喷孔处使液滴喷出形成液柱,因此,下降沿时间段优化应该使喷孔处速度较大,即振动板位移量较大。同样对下降沿时间进行单独优化,下降沿时间分别为2、3、4、5、6、7 μs 时,振动板最大位移量结果见图5,下降沿时间为4 μs 时,振动板最大位移量最大,因此,*t*fall选择为4 μs。



图 5 振动板最大位移量模拟结果 Fig.5 Simulation results of maximum displacement of vibrating plate

在驱动波形第1次电压保持阶段(*t*₁),上升沿产 生的电压分别沿着腔室左右2个方向传播至限流部 和喷口处,喷口处压力波反射回来的正压力波在某一 时刻与下降沿施加的电压叠加,合适的电压保持时间 使叠加的速度达到最大,从而使液滴的喷出速度较快。为了确定最佳的保持时间,首先设置下降沿开始时刻为 90 μs,进行初步仿真,出口处速度见图 6,上 升沿产生正向速度的峰值为 0.341 m/s、时间为 30 μs, 下降沿产生正向速度的峰值为 2.29 m/s、时间为 106 μs, 因此,保持时间应约为 14 μs。为了验证该方法的合理 性和准确性,在 14 μs 左右进行取值,保持时间分别为 6、12、13、14、15、16、22 μs,出口处速度见图 7。 保持时间为14 μs时,出口处叠加速度最大,为2.61 m/s, 且从出口速度图可以看出,保持时间与 14 μs 相差越 大,叠加速度越小,因此, t₁选择为 14 μs。





在驱动波形第 2 次保持阶段(t₂),液柱不断被拉 长且在电压再次上升时液柱会发生断裂,因此优化第 2 次保持阶段要求液柱断裂时无卫星液滴出现。保持时间 分别为 10、12、14、16、20、22、24 μs 时的液滴状态 见图 8,保持时间为 24 μs 时有明显的卫星液滴,保持 时间为 10、12、14 s、16、18、22 μs 时有少量气泡产 生,保持时间为 20 μs 时液滴状态最佳,无卫星液滴和 气泡,同时可以看出第 2 阶段保持时间对液滴下落速度 几乎没有影响,因此,t₂选择为 20 μs。



图 8 t2 值不同时的喷射液滴云图 Fig.8 Inkjet droplet cloud images with different t_2 values

在驱动波形第 2 次电压上升阶段(trise2), 振动 板再次向上弯曲, 使腔室内产生负压, 液体回流拉 断液滴,拉断的液滴在表面张力的作用下形成液滴, 因此, 电压上升时间(t_{rise2})的优化同样要求液滴断 裂时无卫星液滴的产生。上升沿时间分别为1、2、3、 4 μs 时的出口速度见图 9, 上升时间为 1、2、3 μs 时均有气泡产生,在4 us 时液滴状态最佳。同时弯 液面处的上升速度为下一液滴的喷出做准备,为避 免过吸,速度应较小,从图 9 中可以看出, 4 µs 时弯 液面较低,即速度较小,因此, trise2选择为4 µs。

综上所述,优化后的双极性梯形波电压见图 10, $\leq t_{rise1} = 4 \ \mu s_{\chi} t_1 = 14 \ \mu s_{\chi} t_{fall} = 4 \ \mu s_{\chi} t_2 = 20 \ \mu s_{\chi} t_{rise2} = 4 \ \mu s_{\chi}$ 时,该梯形波电压喷射出的液滴见图 11,无卫星液 滴出现,液滴状态较好。





3.2 驱动波形电压幅值的设计

驱动波形各个阶段的时间长短影响喷射液滴是 否产生卫星液滴,是决定液滴质量好坏的决定性因

素,同时不同驱动波形的电压幅值对液滴喷射的速 度也有一定的影响,因此,文中通过改变优化后梯 形波的电压幅值,研究不同的电压幅值对液滴喷射 的影响规律。

改变梯形波第1次保持阶段电压(电压分别为 5、15、20、25、35、45 V时)的模拟结果如下。 由图 12 可知,当电压为 5、15、20 V时,墨水可以 喷出且液滴状态较好,液滴形状接近圆形,且随着 电压的增大液滴喷射速度加快,液滴直径增大,但 第1次保持阶段电压幅值主要决定液滴吸入腔室的 过程,因此,为了避免过吸,电压不宜选择过大, 电压选择 15 V; 当电压为 25V 时, 墨水可以喷出, 但在特定的距离内无法形成圆形液滴;当电压为 35、45V时,墨水可以喷出,但无法汇聚成液滴且 45 V 时有明显卫星液滴的产生。



图 10 优化后双极性梯形波示意图 Fig.10 Schematic diagram of optimized bipolar trapezoidal wave



图 11 最佳喷射液滴云图 Fig.11 Optimal inkjet droplet cloud images

改变梯形波第 2 次保持阶段电压(电压分别为 10、20、30、35、40、50 V)的模拟结果见图 13。 由图 13 可知,当电压为 10 V时,由于速度较小, 墨水无法喷出;当电压为 20、30、35 V时,墨水可 以喷出且液滴状态较好,液滴形状接近圆形,且随 着电压的增大液滴喷射速度加快,液滴直径增大, 但驱动波形主要控制卫星液滴和速度,形状大小可 以通过液滴黏度和表面张力进行调节,因此,为保 证最大速度,电压应选择 35 V;当电压为 40 V时, 墨水可以喷出但在特定的距离内无法形成圆形液 滴;当电压为 50 V时,墨水可以喷出,但无法汇聚 成液滴且有气泡产生。







图 13 第 2 次保持阶段不同电压喷射液滴云图 Fig.13 Cloud images of inkjet droplet at different voltages in the second holding stage

4 结语

文中通过建立推动式压电打印头实体模型,利用 ANSYS 平台对压电--弹性--流体双向流固耦合模型和两 相流模型进行分布仿真,研究了双极性梯形波各阶段时 间参数和电压幅值对液滴喷射的影响,主要结论如下。

 1)根据波形优化的结果,双极性梯形波各个阶段时间分别为 t_{rise1}=4 μs、t₁=14 μs、t_{fall}=4 μs、t₂=20 μs、 t_{rise2}=4 μs,在此波形下,液滴喷射平均速度为 2.46 m/s 且无卫星液滴,液滴状态较好。

2)通过研究不同电压幅值对液滴喷射的影响,得 出适合喷射液滴的电压为第1次保持阶段电压15V、 第2次保持阶段电压35V,液滴喷射平均速度达3.1m/s 且无卫星液滴,液滴状态较好。

参考文献:

- [1] 佚名. 数码印花喷墨打印头市场的发展现状分析[J].
 网印工业, 2020(12): 50-52.
 ANON. Analysis of the Development Status of Digital Printing Ink Jet Print Head Market[J]. Screen Printing Indµstry, 2020(12): 50-52.
- [2] 黎晨. 压电喷墨打印头振动结构设计制造及工艺优化
 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 6-7.
 LI Chen. Design, Manufacture and Process Optimization of Vibration Structure of Piezoelectric Inkjet Print Head[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 6-7.
- [3] WANG Jian-jun, HUANG Jin, PENG Ju, et al. Piezoelectric Print-Head Drive-Waveform Optimization Method Based on Self-Sensing[J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2019, 299: 1-7.
- [4] LIU Yu-feng, PAI Y F, TSAI M H, et al. Investigation of Driving Waveform and Resonance Pressure in Piezoelectric Inkjet Printing[J]. Applied Physics A, 2012, 109(2): 323-329.
- [5] SHIN P, SUNG J, LEE M H. Control of Droplet Formation for Low Viscosity Fluid by Double Waveforms Applied to a Piezoelectric Inkjet Nozzle[J]. Microelectronics Reliability, 2010, 51(4): 797-804.
- [6] WU Cheng-han, 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(3/4): 630-636.
- [7] 范佃龙. 压电喷墨打印头的模拟优化与测试[D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 31-42.
 FAN Dian-long. Simulation, Optimization and Test of Piezoelectric Inkjet Print Head[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 31-42.

- [8] XIAO Xiao-lei, WANG Xing, CHEN Da, et al. A Waveform Design Method for Piezoelectric Inkjet Printhead with Doppler Vibration Test and Numerical Simulation[J]. Microelectronic Engineering, 2018, 196: 13-19.
- [9] WEI Hong-fang, XIAO Xiao-lei, YIN Zhi-fu, et al. A Waveform Design Method for High DPI Piezoelectric Inkjet Print-Head Based on Numerical Simulation[J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(12): 5365-5373.
- [10] 徐磊. 压电喷墨喷射特性及残余振荡抑制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021: 39-51.
 XU Lei. Study on Piezoelectric Inkjet Jet Characteristics and Residual Oscillation Suppression[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021: 39-51.
- [11] OKE O. An Experimental Study to Control Single Droplet by Actuating Waveform with Preliminary and Suppressing Vibration[J]. Manuf Eng, 2017, 11(4): 1-10.
- [12] OKE O. New Actuation Waveform Design of DoD Inkjet Printer for Single and Multi-Drop Ejection Method[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 52-531.
- [13] 李海宁,王海峰,崔宜梁,等.不同脉冲电压对压电喷墨液滴演化的影响分析[J].青岛大学学报(工程技术版), 2019, 34(4): 6-10.
 LI Hai-ning, WANG Hai-feng, CUI Yi-liang, et al. Analysis of the Influence of Different Pulse Voltage on the Evolution of Piezoelectric Ink Jet[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2019, 34(4): 6-10.
- [14] 刘春格,唐正宁.基于压电喷墨印刷的墨滴速度大小的理论研究[J].包装工程,2010,31(15):36-38.
 LIU Chun-ge, TANG Zheng-ning. Theoretical Research of the Ink Droplet Velocity Based on Piezoelectric Inkjet Printing[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 36-38.
- [15] GAO Cheng-yong. Research on Micro Mechanism of Water-Based Disperse Ink and Optimization of Driving Waveform for Inkjet Ink[J]. Colloids and Surfaces A, 2020, 606: 1-12.
- [16] BOGY D B. Experimental and Theoretical Study of Wave Propagation Phenomena in Drop-on-Demand Ink Jet Devices[J]. IBM, 1984, 28(3): 314-321.
- [17] 王莉, 冯佳华, 原瑞凝, 等. 基于压电效应的流固耦 合和气液两相流的打印头快速分步分析方法[J]. 中国 基础科学, 2020, 22(1): 36-42.
 WANG Li, FENG Jia-hua, YUAN Rui-ning, at al. Fast Step Analysis Method of Print Head Based on Piezoelectric Effect for Fluid-Structure Coupling and Gas-Liquid Two-Phase Flow[J]. China Basic Science, 2020, 22(1): 36-42.