

9-1-2020

PID Closed Loop Control Performance Analysis of Piezostack-driven Jet Dispensing Valve

Yunbo Fu

1. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;;

Xinbo Li

1. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;;

Guojun Liu

2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

Jianfang Liu

2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

PID Closed Loop Control Performance Analysis of Piezostack-driven Jet Dispensing Valve

Abstract

Abstract: A new type of piezostack-driven jetting dispenser was proposed which used hydraulic magnification, and analyzed its injection process and injection condition. The open loop model of dispensing system was built by AMESim software. The simulation proved the feasibility. *The closed loop control system with PID (Proportion Integration Differentiation) algorithm was set up to improve performance of open loop dispensing system, and the open and closed loop control performance was compared under the simulation environment.* Analysis shows that PID closed loop system can improve performance of piezostack-driven jetting dispensing system. When nozzle diameter is 0.1mm and syringe pressure is 8 bar, by closed loop control, the achieved average flow rate is 0.023L/min and the minimum diameter of stable droplets is 0.8 mm.

Keywords

piezoelectric driven, AMESim simulation, jet dispensing, hydraulic magnification

Authors

Yunbo Fu, Xinbo Li, Guojun Liu, Jianfang Liu, and Yaowu Shi

Recommended Citation

Fu Yunbo, Li Xinbo, Liu Guojun, Liu Jianfang, Shi Yaowu. PID Closed Loop Control Performance Analysis of Piezostack-driven Jet Dispensing Valve[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 1152-1157.

压电喷射点胶系统 PID 闭环控制仿真分析

付云博¹, 李新波¹, 刘国君², 刘建芳², 石要武¹

(1. 吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林大学机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 介绍了一种新型液压放大压电点胶系统的结构和原理, 分析了该系统的喷射过程和喷射条件, 结合 AMESim 仿真软件, 搭建了该系统的开环仿真模型, 仿真实验验证了系统结构的可行性。针对开环点胶系统的不足, 重点引入 PID(比例积分微分)控制算法, 构成闭环控制点胶喷射系统, 在仿真环境下, 对开环和闭环系统的性能进行了对比, 分析表明, PID 闭环控制可以改进和提高压电喷射点胶系统的性能, 在喷嘴直径为 0.1 mm, 胶体腔压强 8 bar 下, 可以得到点胶速度为 0.023 L/min、液滴直径为 0.8 mm 的稳定喷射液滴。

关键词: 压电驱动; AMESim 仿真; 喷射点胶; 液压放大

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 05-1152-06

PID Closed Loop Control Performance Analysis of Piezostack-driven Jet Dispensing Valve

Fu Yunbo¹, Li Xinbo¹, Liu Guojun², Liu Jianfang², Shi Yaowu¹

(1. School of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A new type of piezostack-driven jetting dispenser was proposed which used hydraulic magnification, and analyzed its injection process and injection condition. The open loop model of dispensing system was built by AMESim software. The simulation proved the feasibility. The closed loop control system with PID (Proportion Integration Differentiation) algorithm was set up to improve performance of open loop dispensing system, and the open and closed loop control performance was compared under the simulation environment. Analysis shows that PID closed loop system can improve performance of piezostack-driven jetting dispensing system. When nozzle diameter is 0.1mm and syringe pressure is 8 bar, by closed loop control, the achieved average flow rate is 0.023L/min and the minimum diameter of stable droplets is 0.8 mm.

Keywords: piezoelectric driven; AMESim simulation; jet dispensing; hydraulic magnification

引言

非接触喷射点胶是现代终端电子产品芯片装配不可缺少的工艺环节, 它通过某种方式瞬间提高喷射腔内压力, 使胶液得到足够大的动能, 从而摆

脱与喷嘴之间的黏性力, 喷射到基板上。由于在胶液喷射过程中, 喷头无需纵向移动, 可以较大程度缩短胶液的喷射周期, 提高喷射频率, 且喷射胶点均匀稳定。

针对非接触式喷射点胶技术, 国内外一些研究机构及公司已对该项技术进行了深入研究, 部分成果已转化为实际产品, 但喷射稳定性、胶点频率及胶点大小等还需改进和提高。非接触式喷射点胶技术主要分为电磁式喷射点胶和压电式喷射点胶



收稿日期: 2014-05-03 修回日期: 2014-10-28;
基金项目: 国家自然科学基金(51375207); “863”高技术研究发展计划项目(2011AA040406); 吉林省青年科研基金(20140520064JH);
作者简介: 付云博(1991-), 男, 赤峰, 硕士生, 研究方向为压电驱动控制; 李新波(通信作者 1980-), 男, 吉林人, 博士, 讲师, 研究方向为阵列信号处理、压电驱动控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1152 •

两大类。彭志勇^[1]提出了电磁驱动喷射点胶方案并根据电磁驱动喷射点胶的工作特点, 设计、改进了驱动电路, 实现了粘度为 1.2 Pa·s 的胶液六滴 / 秒的喷射点胶; 中南大学的李辉^[2]利用电磁驱动和柔性铰链放大机构, 设计了一套含柔性放大臂电磁驱动喷射系统, 实现低剪切速率下粘度为 1 Pa·s 胶液的稳定喷射, 最大工作频率可达 20 Hz; 刘华勇^[3-4]利用电磁阀控制气体的通断, 气体作用在活塞上, 驱动撞针运动, 达到喷射胶液的目的, 得到了最小直径为 0.35 mm 的胶点。电磁式喷射点胶系统虽然应用广泛易于控制, 但是受限于其物理结构, 很难得到较高的工作频率, 提高效率, 而压电式喷射系统却能弥补这一缺点。韩国的 Nguyen 等^[5-7]利用集总参数模型方法构建了其点胶系统的数学模型, 以压电叠堆作为驱动电源, 分别利用液压放大和共振原理放大压电叠堆位移, 驱动撞针实现胶液的喷射, 得到了最小直径为 0.35 mm、喷射频率 700 Hz 的胶点, 并将胶点的一致性误差控制在 5% 以内; 美国 Nordson EFD 的 PICO 压电式喷射点胶系统, 通过采用压电技术在提供高速生产率的同时拥有优异的点胶精度和工艺控制功能, 是目前比较成熟的商用压电式喷射点胶设备; 吉林大学的刘建芳^[8-9]提出了一种压电/气体混合驱动式非接触喷射点胶阀, 实现了 5 000 mPa·s 中高粘度环氧树脂胶结剂的喷射点胶。

已有喷射点胶技术多为开环控制系统, 具有局限性, 控制精度会受到限制。为了实现精确喷射, 本文采用经典 PID 控制算法, 研究了一种压电喷射点胶系统的闭环控制方法, 并利用 AMESim 软件搭建了该闭环控制的仿真系统。

1 结构与原理

压电点胶系统的原理图如图 1 所示, 该喷射点胶阀结构参照 Nguyen^[5]的结构搭建, 不同的是本文将其液压放大结构中用到的膜结构改为了 AMESim 中更易于实现且线性化程度更高的 T 形阀结构, 由于位移放大结构中液体为湍流, 所以 T

形在设置时采用它的 constant 模式。其中, 压电叠堆是点胶系统的驱动机构, 为点胶系统提供动力。由于压电叠堆的作用力较大但输出位移过小, 故采用液压放大结构来提高其输出位移。液压放大机构由锥阀、T 形阀和在其之间的液压液构成, 由于锥阀处面积大于 T 形阀面积, 所以 T 形阀位移要大于锥阀位移。叠堆通过连杆连接到锥阀, 喷射腔内包含一个回复弹簧, 喷射腔外部连接胶体腔, 胶体腔给喷射腔提供恒定压力的胶液。压电叠堆的驱动方式为正弦波驱动, 当驱动电压上升时, 压电叠堆伸长带动锥阀, 通过液压放大机构将位移放大, 此时喷射腔中与 T 形阀相连的球阀快速向下冲击, 胶液从喷射腔中喷出。当驱动电压下降时, 叠堆缩短、锥阀上提, 在回复弹簧的作用下喷射腔的球阀上提, 胶液从胶体腔中重新填满喷射腔。在正弦波电压的高低电平交替作用下, 喷嘴不断打开关闭, 从而实现高速喷射点胶。通过控制高电平和低电平的作用时间可以方便的控制点胶频率和作用时间。

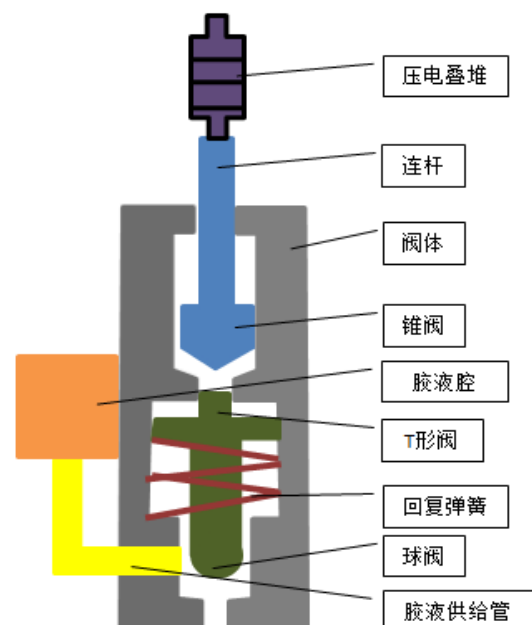


图 1 点胶系统结构图

实现胶滴的稳定喷射还需满足一定条件。胶液流过喷嘴流层之间存在相对位移, 即速度梯度时, 在速度不等的流层之间会产生黏性力:

$$F_u = \nu du \quad (1)$$

式中: F_u 为粘性力, N; u 为流体的动力黏度, Pa s; v 为胶液的速度, m/s; d 为喷嘴直径, m。

胶液喷出喷嘴的惯性力为^[10]:

$$F_i = \rho v^2 d^2 \quad (2)$$

式中: F_i 为惯性力, N; ρ 为胶液的密度, kg/m³。

要使胶滴从喷嘴喷出, 则需胶液喷出时的惯性力大于流层之间的粘性力, 即:

$$F_i > F_u \quad (3)$$

由式(1)~(3)不难看出, 想要实现喷射, 胶液的速度必须达到一定的数值。易得胶液的最大速度需满足:

$$v > \frac{u}{\rho d} \quad (4)$$

本文所选胶液黏度为 1.2 Pa s, 密度为 850 kg/m³, 喷嘴直径为 0.1 mm, 所以由以上分析可得胶液喷射最大速度应超过 14.1 m/s。

2 点胶系统的 AMESim 模型仿真

传统喷射点胶系统的研究大多经大量实验测试, 在实验中不断改变系统结构或参数, 观察这些变量对点胶结果的影响, 实验复杂耗时, 成本高。应当需求一种仿真环境来模拟实际点胶系统, 从而在系统设计时提供合理的解决方案。AMESim 软件是一个多学科领域复杂系统建模仿真平台, 许多实际系统的模型模块均能在该软件中得到, 且有相应的数学模型描述, 可以使得用户从繁琐的数学建模中解放出来从而专注于物理系统本身的设计。另外, AMESim 软件与 MATLAB/Simulink 间具有完善的程序接口, 使得将多种控制算法引入喷射点胶系统更加容易。本文利用该软件模拟和构建了液压放大式压电点胶喷射系统, 并采用 PID 控制算法实现了喷射点胶过程的闭环控制。

2.1 开环点胶系统搭建及性能分析

AMESim 中有 4 种工作模式: (1) 草图模式: 使用目录中的元件搭建系统草图; (2) 子模型模式: 匹配元件子模型; (3) 参数模式: 设置子模型参数; (4) 运行模式: 仿真并分析仿真结果, 要完

成点胶系统的建模和仿真就需要依次分别对 4 种模式进行配置。

首先在草图模式下根据实际系统搭建点胶系统模型。图 2 是点胶系统在 AMESim 中搭建的结构图: 1 为压电叠堆与驱动电压和保护电阻相连; 2 和 3 等效锥阀的刚度和质量; 4 为锥阀的具体结构; 5 和 6 为液压放大机构上腔和下腔的结构; 7 是一个 T 形阀与回复弹簧相连; 8 是回复弹簧; 9 代表的是球阀和回复弹簧的质量; 10 是喷射腔的容积; 11 为球阀具体结构; 12 为外部胶液腔提供的压力。

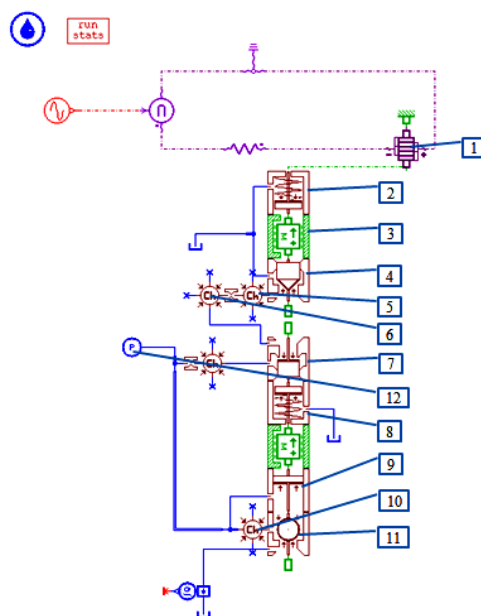


图 2 点胶系统 AMESim 结构图

该系统在子模型模式中, 1 压电叠堆选择 EMPA03-linear pzt stack actuator (standard IEEE description), 其他元件可以选择首选子模型。

仿真系统初始条件为: 连杆和压电叠堆的刚度 $K_1=37\ 000$ N/mm, 回复弹簧刚度 $K_2=150$ N/mm, 胶体腔压强 $P_j=8$ bar, 压电叠堆: 叠堆层数 $n=700$, 叠堆横截面积 $S=25$ mm², 压电片厚度 0.05 mm, 叠堆质量 $m_d=32.5$ g, 连杆和锥阀质量 $m_l=44.1$ g, 喷射腔球阀和回复弹簧质量 $m_q=63.6$ g, 球阀直径 $D_q=2$ mm, 喷嘴直径 $D_p=0.1$ mm。驱动电压是峰值 50 V、频率为 100 Hz 的正弦波。

参数模式下结构图 2 中, 1 处设置叠堆参数, 使 number of wafers = 700, area of a wafer = 25 mm², thickness of a wafer = 0.05 mm; 2 处设置连杆和压电叠堆的刚度, 使 spring stiffness = 37 000 N/mm; 3 处设置为锥阀连杆和叠堆的质量和, 使 mass = 0.076 6 kg; 4 处设置锥阀参数, 使 diameter of poppet = 30 mm, diameter of hole = 7.5 mm, poppet half angle = 80 degree; 5 处设置液压放大上半腔容积, 使 dead volume = 0.02 cm³; 6 处设置液压放大下半腔容积, 使 dead volume = 0.006 28 cm³; 7 处设置 T 形阀参数, pressure acting in the flapper seat area 选择 constant 模式、internal diameter of the nozzle (hole) = 7.5 mm, diameter of the flapper = 9 mm; 8 处设置回复弹簧刚度, 使 spring stiffness = 150 N/mm; 9 处设置球阀连杆的质量和, 使 mass = 0.063 6 kg; 10 处设置喷射腔容积, 使 dead volume = 0.003 246 cm³; 11 处设置球阀参数, 使 seat diameter = 0.1 mm, ball diameter = 2 mm, rod diameter (opposite to seat) = 2 mm; 12 处设置胶体腔压力, cyclic 选择 no, time at which duty cycle starts 为 0 s, pressure at start of stage 1 = 8 bar, pressure at end of stage 1 = 8 bar, duration of stage 1 = 1 × 10⁶ s。

在运行模式中设置结束时间为 0.1 s、采样时间为 10~5 s, 最后进行仿真。系统仿真结果如图 3~5 所示。

图 3 是系统仿真运行时, 锥阀和球阀随时间变化的曲线, 其中实线是锥阀位移时变曲线, 锥阀与叠堆直接连接, 其位移相对较小; 图 3 中虚线为球阀位移时变曲线, 它是经过液压放大之后所表现出来的位移。图 4 为胶液在喷嘴处的流速, 其大小决定胶液是否能在喷嘴处喷出, 可以看出喷嘴处胶液的流速并非正弦波这与喷嘴结构已经胶液之间运动的耦合有关但其最大流速绝对值约为 60 m/s, 满足式(4)中形成液滴对流速的基本要求, 故液滴可以顺利喷出。在该系统结构图中设定向上为正方向, 故图 3、图 4 以及后面的图 8 中曲线数值为负。图 5 是喷嘴喷出胶液体积, 图中曲线表现为阶梯状,

其中间隔就是喷出一滴胶液的体积。由以上仿真结果可知, 本文设计的点胶结构可以保证胶液顺利喷出, 点胶速度比较平稳, 但此时喷射胶液液滴的体积较大, 这对于实际的小芯片装配是不满足的, 所以需要进一步提高其性能。

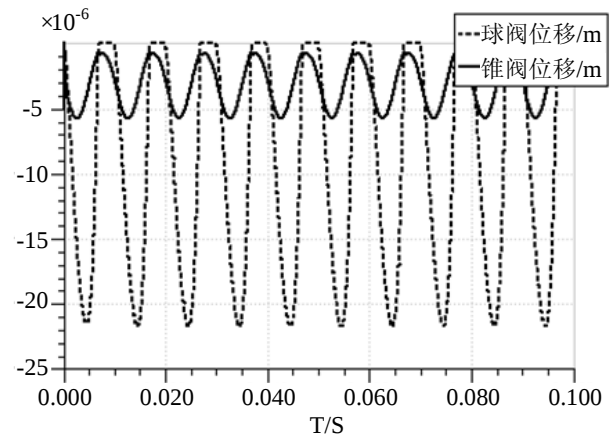


图 3 锥阀和球阀的位移对比

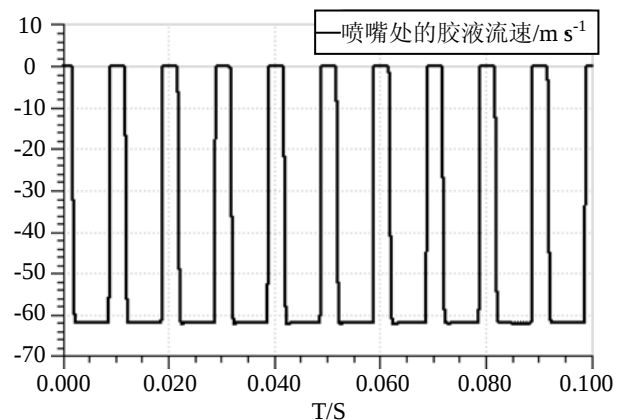


图 4 喷嘴处的胶液流速

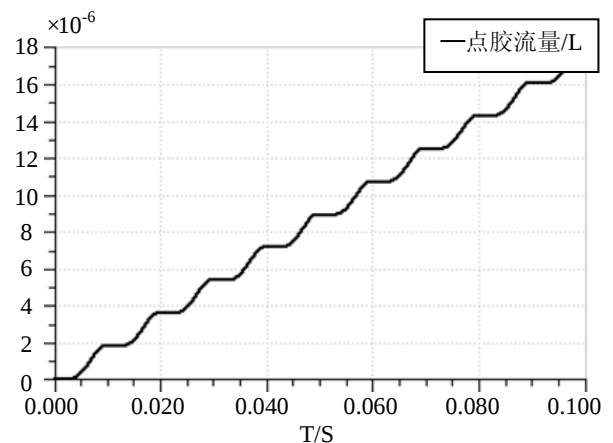


图 5 点胶流量

2.2 PID 闭环点胶系统搭建及性能分析

为满足实际需要, 本文为设计的点胶系统引入增量式离散 PID 控制算法, 形成闭环控制, PID 控制器如下:

$$\begin{aligned}\Delta u(n) &= q_0 e(n) + q_1 e(n-1) + q_2 e(n-2) \\ q_0 &= K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T}\right) \\ q_1 &= -\frac{K_p}{1 + 2\frac{T_d}{T}} \\ q_2 &= K_p \frac{T_d}{T} \\ u(n) &= u(n-1) + \Delta u(n)\end{aligned}\quad (5)$$

在式(5)中 K_p 为比例系数、 T 为调节时间、 T_i 是积分时间常数、 T_d 是微分时间常数, 在 AMESim 中 PID 控制器设置的是比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d , 其中 $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$, $K_d = K_p \frac{T_d}{T}$ 。

为了提高点胶量的稳定性和一致性, 并考虑实际应用环境, 点胶速度由传感器直接测量的成本及安装复杂性较高, 不宜作为被控量。不过, 球阀位移和点胶速度存在一定的对应关系, 且球阀位移较容易获取, 因此本文以球阀位移为被控量, 通过控制球阀位移来得到理想的喷射速度。控制系统方框图如图 6 所示。

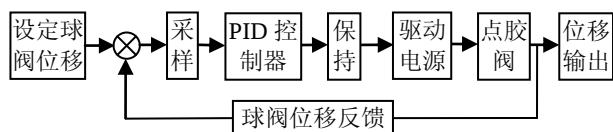


图 6 控制系统结构

由图 3 的球阀位移时变曲线可知, 理想的球阀位移表现为正弦运动, 且单位为 m:

$$x = -10 \times 10^{-6} - 10 \times 10^{-6} \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

由于球阀位移过小, 将其直接作为给定不利于控制, 再引入反馈之前将其放大-106 倍, 所以给定信号设定为:

$$x = 10 + 10 \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

为了控制点胶速度的稳定性, PID 控制器需进行参数整定。适当增大比例系数 K_p 有助于提高系统的快速响应, 但又不宜过大, 否则控制稳定性将下降, 折中选择 K_p 为 2.5; 系统的稳定性对微分系数 K_d 非常敏感, 也不宜加大, 且适度的 K_d 有助于系统消除随机误差, 故 K_d 选为 0.023; 此外, 还需要合适的 K_i 来尽可能地消除静差, 选取 K_i 过大会影响系统的快速响应能力, 故 K_i 选为 0.12。整个控制过程中, 比例系数 K_p 起主要控制作用, 微分系数 K_d 和积分系数 K_i 依情况适度调节控制输出, 3 个要素均为喷射流量的稳定控制发挥积极作用。从以下的仿真结果看, 也能够证实这一点。

闭环控制点胶系统在 AMESim 中的仿真结构图如图 7 所示, 它是在图 2 的基础上, 从球阀 11 处加一个位移传感器, 位移传感器串联一个运算放大器作为反馈, 然后在输入和驱动电压之间加入一个 PID 控制器。然后对闭环仿真结构进行仿真分析。图 8 为球阀的位移时变曲线, 球阀位移非常稳定与式(6)中理想的正弦运动吻合; 图 9 为闭环点胶系统的点胶速度也就是每分钟喷射的胶液量, 可以看出点胶速度非常平稳, 最高点胶速度保持在 0.023 L/min 基本不变。图 10 闭环系统的点胶流量, 由图可知液滴体积无抖动现象, 胶液液滴体积大小均匀, 直径大约为 0.8 mm, 满足要求。

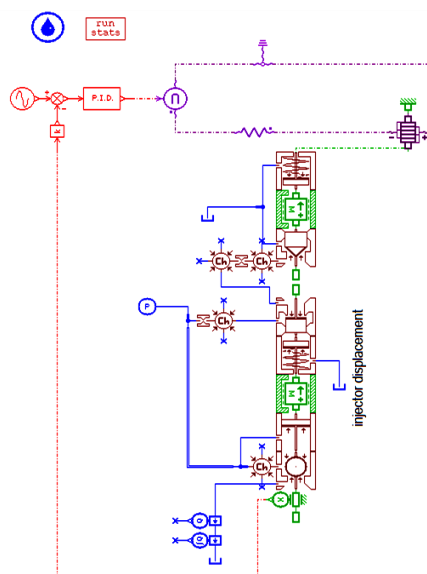


图 7 闭环点胶系统仿真结构图

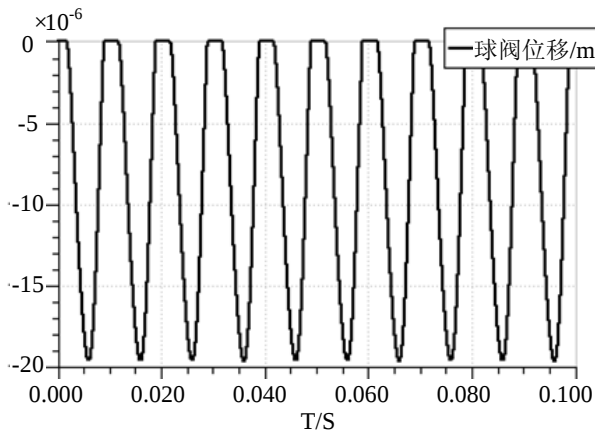


图 8 闭环系统球阀位移

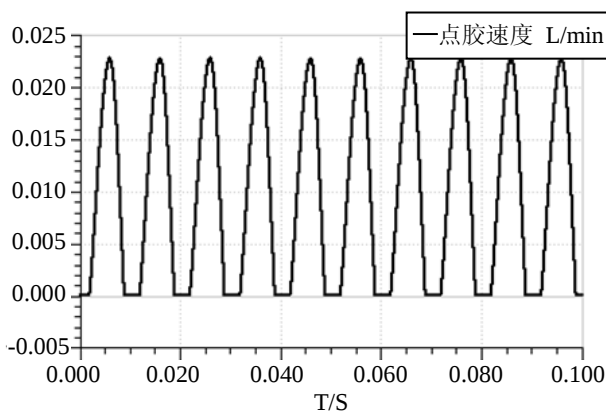


图 9 闭环系统点胶速度

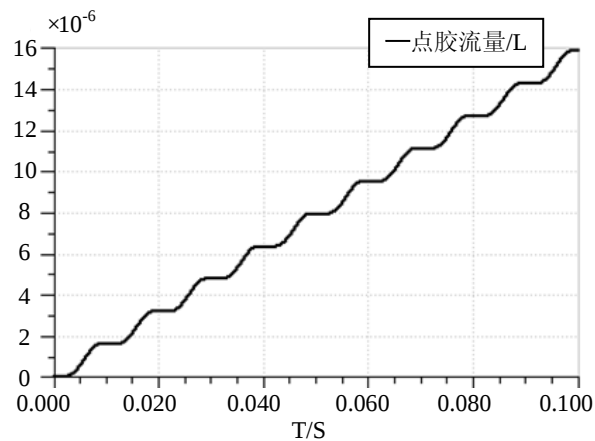


图 10 闭环系统点胶流量

3 结论

微滴喷射技术有着广泛的应用前景, 压电非接触式微滴喷射点胶技术在微电子封装方面正发挥着越来越重要的作用。本文对压电驱动微滴喷射条件进行了理论分析, 基于 AMESim 仿真软件平台,

对压电喷射点胶系统进行了系统搭建和仿真分析, 对比了锥阀位移和经过液压放大后的球阀位移, 测试了放大效果, 验证了结构的合理性。对压电点胶系统引入 PID 控制算法, 实现闭环控制。仿真分析表明, PID 闭环控制有着更优的控制效果, 在喷嘴直径为 0.1 mm 和胶体腔压强为 8 bar 时, 可以实现点胶速度为 0.023 L/min、液滴直径为 0.8 mm 的稳定喷射液滴。

参考文献:

- [1] 彭志勇. 电磁驱动点胶阀的工作特性分析与优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [2] 李辉. 含柔性放大臂电磁驱动喷射阀设计及研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [3] Shu X Y, Zhang H H, Liu H Y, *et al.* Experimental study on high viscosity fluid micro-droplet jetting system [J]. Science China: Technological Sciences (S1674-7321), 2010, 53(1): 182-187.
- [4] 刘华勇. 高黏度流体微量喷射与控制技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [5] Nguyen Q H, Choi M K, Choi S B. A new type of piezostack-driven jetting dispenser for semi-conductor electronic packaging: Modeling and control [J]. Smart Materials and Structures (S0964-1726), 2008, 17 (015033): 1-13.
- [6] Nguyen Q H, Choi M K, Yun B Y, *et al.* Design of a novel jetting dispenser featuring piezostack actuator and linear pump [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures (S1045-389X), 2008, 19(3): 39-41.
- [7] Nguyen Q H, Han Y M, Choi S B. Dynamic characteristics of a new jetting dispenser driven by piezostack actuator [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing (S1521-334X), 2008, 31(3): 248-259.
- [8] 焦晓阳, 刘建芳. 压电气体混合驱动式喷射点胶阀的设计与实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 34(11): 1445-1449.
- [9] 焦晓阳, 刘建芳. 压电喷射点胶阀的喷射性能分析及实验研究[J]. 四川大学学报(工程版), 2013, 45(2): 193-198.
- [10] 孙慧. 高黏性微量液滴非接触式分配技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.