

DOI: 10.7652/xjtuxb201401023

压电驱动撞针式微喷系统的键合图建模

路士州¹, 刘亚欣^{1,2}, 姚玉峰¹, 孙立宁¹

(1. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室, 150001, 哈尔滨;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了快速、精确地分配微量高黏性液体,以及研究系统参数对分配过程的影响,设计了一种压电驱动撞针式微喷系统,并构建了该系统的键合图模型。将压电致动器与撞针式微喷阀相结合,利用压电致动器高频振动来带动撞针运动,以此对微量液体的高速、精确分配进行操作。通过耦合各能域变量及不同液路通道的键合图图元参数,以及整合机电模块、液气模块的子键合图模型,得到微喷系统的整体键合图模型。仿真结果表明:液体喷射速度幅值与电压信号幅值和频率成正比比例关系,喷射体积随储液筒上部气压升高而线性增加;液体流速与撞针振动速度成线性关系,这在难以直接测量流速的场合,可通过测量撞针振动速度来间接监测液体流速。实验验证了微喷系统键合图模型及关键结论的正确性,研究成果能够为微喷系统的结构设计、控制参数的优化提供理论指导。

关键词: 高黏性;微喷;撞针式;键合图;压电致动器

中图分类号: TP24;TP6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0133-06

Bond Graph Modeling of Needle Typed Jet Dispensing System Driven by Piezoelectric Actuator

LU Shizhou¹, LIU Yaxin^{1,2}, YAO Yufeng¹, SUN Lining¹

(1. Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To dispense high viscosity micro-droplets accurately and speedily, and investigate the dispensing effects affected by system parameters, a kind of needle typed jet dispensing system driven by piezoelectric actuator is designed, whose bond graph model is also constructed. Combining piezoelectric actuator and needle typed jet dispenser, the system utilizes the piezoelectric actuator to vibrate the needle, which drives the droplets squirt from the nozzle. The system model validated experimentally is obtained by coupling variables from different energy fields, and sub-models of electrical and liquid-gas parts constructed following bond graph parameters in different dispensing channels. The simulations show that the jetting speed and volume depend on the drive voltage and gas-pressure linearly. And the dispensing speed also linearly relates to the needle vibration speed, and it means that the dispensing speed can be monitored indirectly by testing needle vibration.

Keywords: high viscosity; jet dispensing; needle typed; bond graph; piezoelectric actuator

在生命科学、电子封装、快速制造等领域,经常 需要快速、精确地分配转移各类液体材料^[1-3],尤其

近几年来,随着各领域研究水平的提高,一些高黏性难分配的液体材料不断成为实验研究对象,使用的液体体积不断减小到 10×10^{-9} L 甚至 10×10^{-12} L 级别,要求的分配速度越来越高^[4-6]。这些都对微量液体的分配操作提出了更快速、精确、微量、适用性广的要求。

撞针式微喷阀依靠撞针振动驱动液体喷射,具有驱动力大的特点,适合分配高黏度的液体材料^[7]。目前,已商品化的撞针式微喷阀均依靠脉冲式空气驱动撞针振动,由于空气的压缩性、换向阀门的迟滞性等严重限制了撞针运动精度和振动频率的提高,因此也使液体分配精度和速度很难得到进一步提高^[7-8]。

针对高黏性液体材料要求快速、精确、微量分配的需求,以及空气脉冲驱动撞针式分配阀分配效率难以提高、液滴尺寸操控能力有限的问题,本文充分利用压电致动器振动频率高、输出位移精确的特点,提出了一种压电驱动撞针式微喷系统。该系统利用电信号激励压电致动器高频振动,当撞针跟随振动时通过端部挤压以及外部气压的复合驱动,驱使部分黏性液体从喷嘴内高速喷出。

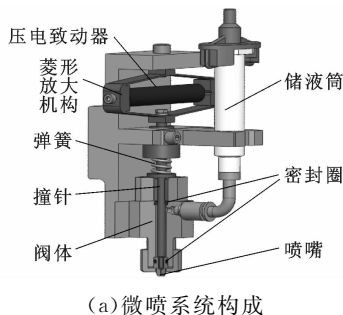
键合图理论借助一整套二元符号和概念体系,能够将各能域系统的理论、概念统一起来,并且具有直观性好、信息含量丰富、数学关系严格的特点^[9-10],因此非常适合对微喷系统的建模分析。在分析压电驱动撞针式微喷系统的构成及工作原理的基础上,本文先构建了液体在不同通道内的键合图模型,并通过耦合各能域变量,来获取整体键合图模型及状态方程;然后仿真研究了系统参数对喷射速度和液滴体积等分配指标的影响;最后,通过实验验证了微喷系统键合图模型及关键结论的正确性。

1 压电驱动撞针式微喷系统原理

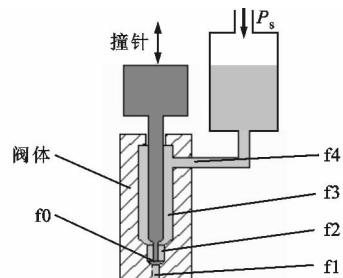
如图 1a 所示,压电驱动撞针式微喷系统主要由压电致动器、菱形放大机构、撞针、喷嘴和储液筒组成。在电信号激励下,压电致动器沿横向输出相应的位移,菱形放大机构对位移量放大后带动撞针沿竖直方向振动。储液筒上部连接高压气源装置,在高压空气驱动下,液体沿供液管道不断挤入阀体液流通道内。

如图 1b 所示,当撞针快速向下运动时,将挤压基座区内的液体,驱使部分液体沿喷嘴高速喷出;当撞针向上运动时,将导致基座区压力减小,促使喷嘴内液体与喷出液体断流后回流到基座区,已喷出液

体便以液滴形式分配到基板上;同时,回流区及上部液体在 P_s 作用下,将及时填充基座区空间。在具体分配操作中,电信号、气压、撞针运动、腔体结构等系统参数均会影响液体的喷射效果。



(a) 微喷系统构成



(b) 液流通道示意图

f0: 基座区; f1: 喷嘴区; f2: 回流区; f3: 喷腔区; f4: 供液管道;
 P_s : 储液筒上部气压

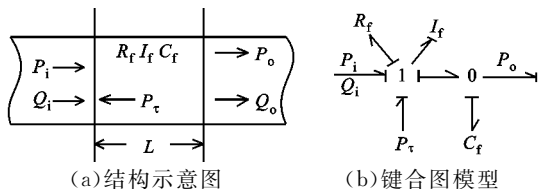
图 1 微喷系统构成及液流通道示意图

2 微喷系统的键合图建模

由图 1b 可知, f0、f1、f4 相当于圆形通道, f2、f3 相当于环形通道, 在不同通道内, 液流状态差别很大, 因此有必要研究不同通道内的液流键合图模型。

2.1 不同通道内液体流动的键合图模型

如图 2 所示, 在压力的作用下, 液体沿圆形通道的流动过程受到黏滞力、压缩性及自身惯性的作用, 实际应用中, 大部分液体材料都是非牛顿流体, 而 Bingham 流体在表示非牛顿流体特性方面, 应用最为广泛^[11]。液体在圆形通道内流动的键合图模型



(a) 结构示意图

(b) 键合图模型

P_i 、 Q_i : 入口处的压力和流量; P_o 、 Q_o : 出口处的压力和流量;
 L : 圆形通道的长度; P_t : 克服流体屈服应力而损失的压力;
 R_f 、 I_f 、 C_f : 液阻、液感、液容

图 2 圆形通道示意图和键合图模型

如图 2b 所示。键合图模型的液阻、液容、液感表达式如下

$$\left. \begin{aligned} R_f &= 8\mu_b L / \pi r^4 \\ C_f &= AL / B_b \\ I_f &= \rho_b L / A \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Bingham 流体的剪切力为

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma} \quad (2)$$

液体在通道内流动时克服 Bingham 流体屈服应力而损失的压力为

$$P_\tau = -8L\tau_y / 3r \quad (3)$$

式中: μ_b 、 B_b 、 ρ_b 分别为 Bingham 流体的黏度、体积模量和密度; A 、 r 分别为圆形通道的截面积、半径; $\dot{\gamma}$ 、 τ_y 、 K 分别为 Bingham 流体剪切率、屈服应力和表观黏度。

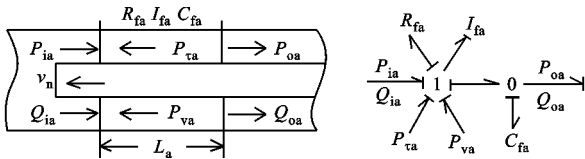
在 f_2 、 f_3 中, 液流区域相当于环形通道(见图 3a), 液体在环形通道内流动的键合图模型如图 3b 所示。流阻、流容、流感参数为

$$\left. \begin{aligned} R_{fa} &= \frac{8\mu_b L_a \ln(r_a / r_n)}{\pi(r_a^4 - r_n^4) \ln(r_a / r_n) - (r_a^2 - r_n^2)^2} \\ C_{fa} &= A_a L_a / B_b \\ I_{fa} &= \rho_b L_a / A_a \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当液体流动时, 为克服流体屈服应力, 撞针运动与液体摩擦而损失的压力为

$$\left. \begin{aligned} P_{\tau a} &= -C\tau_y \frac{L_a}{r_a - r_n} \\ P_{va} &= -\frac{4\mu_b L_a [r_a^2 - r_n^2 - 2r_n^2 \ln(r_a / r_n)] v_n}{(r_a^4 - r_n^4) \ln(r_a / r_n) - (r_a^2 - r_n^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: r_n 、 r_a 分别为撞针半径和通道半径; A_a 为环形通道的截面积; v_n 为撞针运动速度; C 为阻尼系数, 取值在 2.0~3.07 之间^[7]。



(a) 结构示意图

(b) 键合图模型

P_{in} 、 Q_{in} : 环形通道入口处压力和流量; P_{oa} 、 Q_{oa} : 环形通道出口处压力和流量; L_a : 环形通道的长度

图 3 环形通道示意图和键合图模型

2.2 微喷系统的键合图模型

压电驱动撞针式微喷系统是集机、电、液、气于一体的多能域耦合系统, 并且液流区域包含多段圆形和环形通道, 键合图按一定的规则将各能域变量耦合统一起来, 构建的整体模型如图 4 所示。

在图 4 中, 比例系数 K_1 、 K_2 和 K_3 分别为

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= -K_p x_p \\ K_2 &= -\frac{4\mu_b L_{f2} [r_{f2}^2 - r_n^2 - 2r_n^2 \ln(r_{f2} / r_n)]}{(r_{f2}^4 - r_n^4) \ln(r_{f2} / r_n) - (r_{f2}^2 - r_n^2)^2} \\ K_3 &= -\frac{4\mu_b L_{f3} [r_{f3}^2 - r_n^2 - 2r_n^2 \ln(r_{f3} / r_n)]}{(r_{f3}^4 - r_n^4) \ln(r_{f3} / r_n) - (r_{f3}^2 - r_n^2)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: K_p 为压电致动器刚度; x_p 为压电系数; L_{f2} 、 L_{f3} 分别为 f_2 、 f_3 的通道长度; r_{f2} 、 r_{f3} 分别为 f_2 、 f_3 的通道半径。在键合图模型中, 规定液体喷出方向为正方向, 则电信号激励压电致动器横向伸长并带动撞针沿负方向运动。

由图 1 可知, 微喷系统利用菱形放大机构对压电致动器位移进行放大, 其放大倍数为^[12]

$$\beta = 1 / \tan \theta \quad (7)$$

式中: θ 为菱形放大机构斜壁梁与水平方向的夹角。

2.3 状态方程的建立

选取具有积分因果关系的惯性和容性元件的广义动量 p_{13} 、 p_{20} 、 p_{22} 、 p_{30} 、 p_{38} 和广义位移 q_2 、 q_9 、 q_{15} 、 q_{27} 、 q_{34} 为状态变量, 选取 V 、 F_n 、 $P_{\tau 1}$ 、 $P_{\tau 2}$ 、 $P_{\tau 3}$ 、 $P_{\tau 4}$ 和 P_s 为输入变量。具有积分因果关系的广义矩阵为

$$\mathbf{X} = [q_2, q_7, p_{13}, q_{15}, p_{22}, q_{27}, p_{30}, q_{34}, p_{38}]^T$$

设输入矩阵

$$\mathbf{U} = [V, F_n, P_{\tau 1}, P_{\tau 2}, P_{\tau 3}, P_{\tau 4}, P_s]^T$$

则由因果关系和功率流方向可以列写出相应的流方程和势方程

$$\dot{q}_2 = p_{13} / \beta A_n I_{f1} \quad (8)$$

$$\dot{q}_7 = p_{13} / A_n I_{f1} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{p}_{13} &= \frac{K_1}{\beta A_n K_{13}} V + \frac{1}{A_n K_{13}} F_n - \frac{K_p}{\beta A_n K_{13}} q_2 - \\ &\quad \frac{K_s}{A_n K_{13}} q_7 - \frac{\beta^2 R_n + R_p}{\beta^2 A_n^2 I_{f0} K_{13}} p_{13} - \frac{1}{C_{f0} K_{13}} q_{15} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\dot{q}_{15} = \frac{1}{I_{f0}} p_{13} - \frac{1}{I_{f1}} p_{20} - \frac{1}{I_{f2}} p_{22} \quad (11)$$

$$\dot{p}_{20} = P_{\tau 1} + \frac{1}{C_{f0}} q_{15} - \frac{R_{f1}}{I_{f1}} p_{20} \quad (12)$$

$$\dot{p}_{22} = P_{\tau 2} + \frac{K_2}{A_n I_{f0}} p_{13} + \frac{1}{C_{f0}} q_{15} -$$

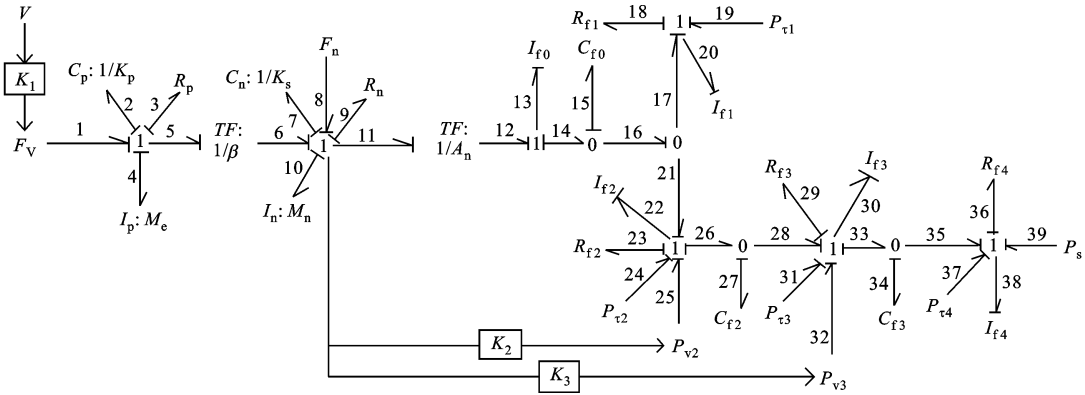
$$\frac{R_{f2}}{I_{f2}} p_{22} - \frac{1}{C_{f2}} q_{27} \quad (13)$$

$$\dot{q}_{27} = \frac{1}{I_{f2}} p_{22} - \frac{1}{I_{f3}} p_{30} \quad (14)$$

$$\dot{p}_{30} = P_{\tau 3} + \frac{K_3}{A_n I_{f0}} p_{13} + \frac{1}{C_{f2}} q_{27} -$$

$$\frac{R_{f3}}{I_{f3}} p_{30} - \frac{1}{C_{f3}} q_{34} \quad (15)$$

$$\dot{q}_{34} = \frac{1}{I_{f3}} p_{30} - \frac{1}{I_{f4}} p_{38} \quad (16)$$



V :激励电信号; F_V :压电致动器受到的力; R_p 、 R_n :压电致动器、撞针的阻尼系数; M_e :压电致动器等效质量,为实际质量的 1/3;
 M_n :撞针的质量; K_p 、 K_s :压电致动器、弹簧刚度系数; F_n :弹簧预压力; A_n :撞针端部截面积; R_{fi} :通道的液阻, $i=1\sim 4$;
 I_{fi} :通道的液感, $i=0\sim 4$; C_{fi} :通道的液容, $i=0,2,3$; P_{ci} :克服 Bingham 流体屈服应力损失的压力,
 $i=1\sim 4$; P_{v2} 、 P_{v3} :通道 f2、f3 区克服撞针运动损失的压强; $1\sim 39$:功率键

图 4 压电驱动撞针式微喷系统的键合图模型

$$\dot{p}_{38} = P_{\tau 4} + P_s + \frac{1}{C_{f3}}q_{34} - \frac{R_{f4}}{I_{f4}}p_{38} \tag{17}$$

在式(10)中,系数

$$K_{13} = 1 + \frac{M_e}{\beta^2 A_n^2 I_{f0}} + \frac{M_n}{A_n^2 I_{f0}} \tag{18}$$

式(8)~式(17)的矩阵形式为

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{U} \tag{19}$$

式(19)即为微喷系统的状态方程。

表 2 液流通道参数 mm

通道区域	撞针半径	撞针长度	阀体半径	阀体长度
f0			1.50	0.5
f1			0.25	1.5
f2	1	6	1.50	6.0
f3	2	25	2.50	25.0
f4			3.00	50.0

3 模型仿真分析研究

液体喷射速度和液滴体积是应用中最关注的指标。本文基于系统状态方程,在 Matlab 仿真环境下,研究了系统参数对分配速度和液滴体积的影响。用于仿真的模型参数如表 1、表 2 所示。

表 1 微喷系统的相关部件参数

部件	参数	取值
压电致动器	M_p/g	18.0
	$R_p/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	1.5
	$K_p/\text{MN}\cdot\text{m}^{-1}$	8.0
菱形放大机构	$\theta/(\text{^\circ})$	6
撞针	$\rho_n/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 800
	$R_n/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	6
弹簧	$K_s/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	12.5
液体	$\rho_b/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1 258.0
	$\mu_b/\text{mPa}\cdot\text{s}$	1 490.0
	B_b/GPa	1.0
	τ_y/Pa	4.5

在微量液体应用领域,往往需要系统喷射一系列体积的液滴,图 5 为从喷嘴端部喷出的液体体积 V_d 随时间的变化情况。在条件①下, $P_s=0\text{ MPa}$, $V=75+75\sin(400\pi t-\pi/2)$, t 为液体喷射时间;在条件②下, $P_s=0.15\text{ MPa}$, $V=0$;在条件③下, $P_s=0.15\text{ MPa}$, $V=75+75\sin(400\pi t-\pi/2)$ 。

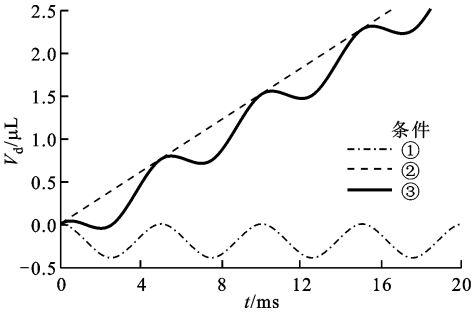


图 5 不同条件下的液体喷射体积

由图 5 可知:在条件①下,单位周期内流入、流出基座区的液体体积相同,导致从喷嘴端部实际喷出的体积为 0;在条件②下,从喷嘴端部喷出的液体

体积随时间线性增加,但单位周期内的体积增量与条件③时相同;在条件③下,流入喷嘴的体积大于回流体积,其体积差即为实际喷出的液滴体积。由以上现象可知,在系统尺寸确定的情况下,通过调控 V 、 P_s 可以调整液体流入和流出基座区的液体体积,而在单位周期内从喷嘴端部喷出的液体体积与在 P_s 驱动下的射流体积相同。

当仅在 P_s 驱动下时,喷嘴处的流量为

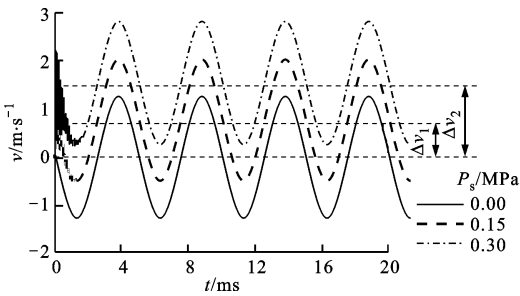
$$Q = \frac{P_s - \sum_{i=1}^4 P_{\tau i} - \sum_{i=2}^3 P_{vi}}{\sum_{i=1}^4 R_{fi}} \tag{20}$$

在一个喷射周期 T 内喷出的液体体积为

$$V_d = \int_0^T Q dt \tag{21}$$

式(21)即为压电驱动撞针式微喷系统喷射的液滴体积公式。液体喷射速度 v 对液滴的形成和脱离过程影响很大,只有在合适的喷射和回流速度范围内,才能形成液滴喷射^[13-15]。

图 6 为在 $V = 75 + 75\sin(400\pi t - \pi/2)$ 和不同 P_s 条件下液体喷射速度随时间的变化情况。在图 6 中,当流速小于 0 时,为回流速度,反之为喷射速度。由图 6 可知,当气压为 0 时,液体回流速度幅值和喷射速度幅值相同,导致单位周期内实际喷射体积为 0。随着 P_s 的增大,液体回流速度不断减小,喷射速度相应增大,因此气压 P_s 是调控速度偏移程度的重要参数。



Δv_1 、 Δv_2 : 偏移速度

图 6 液体喷射速度随时间的变化曲线

喷射速度均值的偏移量

$$\Delta v = Q/A_{\text{fl}} \tag{22}$$

式中: A_{fl} 为喷嘴截面积。当 $P_s = 0$ MPa 时,不同电信号的幅值、频率对撞针振动速度、液体流速幅值的影响见表 3。由表 3 可知,流速幅值 v_b 与电信号幅值、频率成正比例关系,液体流速与撞针振动速度 v_a 成线性关系。

表 3 电信号对分配过程的影响

V/V	f/Hz	$v_a/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_b/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
75	100	0.08	0.31
75	200	0.16	0.61
75	300	0.26	0.93
150	50	0.08	0.30
150	100	0.16	0.60
150	200	0.34	1.25

4 实验验证

利用已搭建的压电驱动撞针式微喷系统进行微量液体分配实验,实验中用精密天平秤提取喷出的液体质量,并根据密度转换为液滴体积。图 7 的实验条件为: $V = 50 + 50\sin(40\pi t - \pi/2)$, $P_s = 0.012$ MPa,其他参数按表 1、表 2 设置。可见,仿真与实验结果的一致性较好,表明微喷系统键合图模型能够对液体喷射过程进行较为准确的模拟。

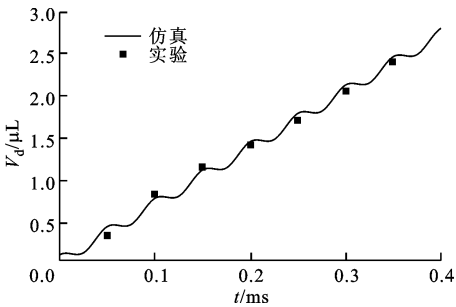


图 7 喷出液体体积随时间变化的仿真和实验结果

由式(20)、式(21)可知,液体质量与气压呈正比例关系。图 8 的实验条件为: $V = 50 + 50\sin(40\pi t - \pi/2)$,其他参数按表 1、表 2 设置。由图 8 可知,实际喷射液体质量随着 P_s 的升高而呈线性增大,与仿真结果相符。

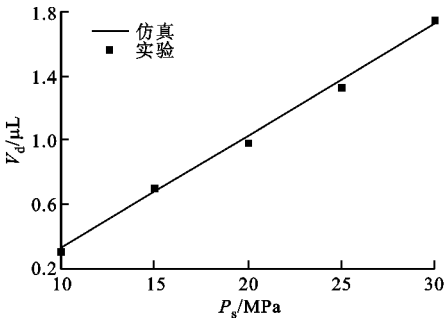


图 8 液体体积随 P_s 变化的仿真和实验结果

5 结 论

本文将压电致动器与传统撞针式微喷阀相结合,并利用菱形放大机构对压电致动器振幅进行放大,设计了一种具有高速、精确、微量分配特点的压电驱动撞针式微喷系统。根据键合图理论,通过耦合不同液路通道的图元参数,以及整合机电模块、液气模块的子键合图模型,得到了微喷系统整体键合图模型。利用该模型和搭建的微喷系统实验平台进行仿真和实验研究,结果表明:本文建立的模型正确,能够用于模拟微喷过程;液体喷射速度幅值与电信号幅值、频率成正比关系,喷射体积随储液筒上部气压升高而线性增加;液体流速与撞针振动速度成线性关系,在不能直接测量流速的场合,为通过间接手段监测流速提供了途径。

参考文献:

- [1] MACARRON R, HERTZBERG R P. Design and implementation of high throughput screening assays [J]. *Molecular Biotechnology*, 2011, 47(3): 170-285.
- [2] KONG Fanwei, YUAN Liang, ZHENG Y F, et al. Automatic liquid handling for life sciences: a critical review of the current state-of-the-art [C]// *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 480-486.
- [3] CALVACHE L C P, MORA F A R, DIANA N, et al. Manufacture and characterization of a mixture of bone powder and bioceramic: a 3D-printing method process [J]. *Universidad Del Norte*, 2009, 26: 22-36.
- [4] LIU Yaxin, YAO Yufeng, CHEN Ligu. Robotic liquid handling system for microdispensing of highly viscous reagent [C]// *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 171-174.
- [5] MASAMI U, TOMOMI S, TOSHISHIGE S, et al. Novel packaging technology for microelectromechanical-system devices [J]. *Japanese Journal of Applied Physics: Part 1 Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, 2005, 44(11): 8177-8181.
- [6] KAZUYA K, OHMI F. A development of dispenser for high-viscosity liquid and pick and place of micro objects using capillary force [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 516: 48-53.
- [7] NGUYEN Q H, CHOI S B. Performance evaluation of a high-speed jetting dispenser actuated by a ring-typed piezostack [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 2009, 223(6): 1401-1413.
- [8] NGUON B, JOUANEH M. Design and characterization of a precision fluid dispensing valve [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24(1/2/3/4): 251-260.
- [9] 刘旸, 江平宇, 刘峥. 基于微元件键合图库的微机电系统动态建模与仿真 [J]. *西安交通大学学报*, 2005, 39(7): 744-748.
LIU Yang, JIANG Pingyu, LIU Zheng. Dynamic system modeling and simulation using bond graph based micro components library for micro electro mechanical systems [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 39(7): 744-748.
- [10] 王艾伦, 刘云. 复杂机电系统动力学相似分析的键合图法 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(1): 74-78.
WANG Ailun, LIU Yun. Bond graph method for the dynamic similarity analysis of complex electromechanical system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 74-78.
- [11] CHEN X B. Modeling and control of fluid dispensing processes: a state of the art review [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(1/2/3/4): 276-286.
- [12] 徐志科, 鄢珂, 金龙. 一种正交型压电位移放大机构的研究 [J]. *压电与声光*, 2009, 31(2): 207-212.
XU Zhike, YAN Ke, JIN Long. Research of orthogonal micro displacement amplifier with piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2009, 31(2): 207-212.
- [13] KOLTAY P, ZENGERLE R. Non-contact nanoliter and picoliter liquid dispensing [C]// *IEEE International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 165-170.
- [14] 李杨, 齐乐华, 罗俊, 等. 金属熔滴气动按需喷射特性试验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(5): 69-73.
LI Yang, QI Lehua, LUO Jun, et al. Experimental study on characteristics of molten metal pneumatic drop-on-demand ejection [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(5): 69-73.
- [15] YAO Yufeng, LU Shizhou, LIU Yaxin. Numerical simulation of droplet formation in contact micro-liquid dispensing [C]// *Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 709-712.

(编辑 管咏梅)