

文章编号 1004-924X(2019)09-1990-12

基于柔顺机构的压电式微喷点胶 系统设计与性能分析

胡俊峰*, 梁 龙, 赵永祥

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要:基于柔顺机构设计了一种新型压电式微喷点胶系统,该系统由供胶装置、驱动装置和撞针阀组成。点胶系统的运动特征是利用柔顺机构的弹性变形驱动撞针往复直线运动实现撞针阀的开启和闭合,完成微喷点胶功能。采用伪刚体方法得到点胶系统的驱动力、输出位移和频率特性,结果表明,系统的最大驱动力、输出位移和频率分别为 56.4 N, 808 μm , 245 Hz,说明所设计的点胶系统能满足所需的驱动力、行程和点胶速度。制作样机,通过实验分析驱动电压信号的占空比、幅值、频率和胶液黏度对胶滴直径的影响,得到了正常胶滴形成需满足的条件。实验结果表明:系统的最高点胶频率为 210 Hz,最小胶滴直径为 630 μm ,胶滴一致性误差为 5.62%,说明所设计的点胶系统具有较好的性能,为微喷点胶系统设计和应用提供新的思路。

关键词:微喷点胶系统;柔顺机构;压电驱动器;伪刚体方法

中图分类号:TH703; TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192709.1990

Design and performance analysis of piezoelectric micro-spray dispensing system based on compliant mechanism

HU Jun-feng*, LIANG Long, ZHAO Yong-xiang

(School of Mechanical & Electrical Engineering, Jiangxi University of
Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

* Corresponding author, E-mail: hjfsuper@126.com

Abstract: A novel piezoelectric microspray dispensing system was designed based on a compliant mechanism. The system consisted of a glue supply device, driving device, and pin-impact valve. The motion characteristic of the dispensing system was that the elastic deformation of the compliant mechanism drove the colliding needle to move in a straight line to and fro, so that the opening and closing of the colliding needle valve could perform the function of microspray dispensing. The driving force, output displacement, and frequency characteristics of the dispensing system were obtained by using a pseudo-rigid-body method. The results show that the maximum of driving force, output displacement, and frequency of the system are 56.4 N, 808 μm , and 245 Hz, respectively. Thus, the driving force, stroke, and dispensing speed of the dispensing system can be guaranteed. The prototype was

收稿日期:2019-01-07;**修订日期:**2019-03-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51565016, 51865016);江西省杰出青年人才资助计划资助项目(No. 20171BCB23063);江西省自然科学基金资助项目(No. 20171BAB206029);江西省教育厅科学技术研究项目(No. GJJ160612);江西理工大学清江青年英才支持计划资助项目(No. JXUSTQJBJ2018006)

built and the effects of duty cycle, amplitude, frequency of driving voltage signal, and viscosity of glue on the droplet diameter were analyzed experimentally; the conditions for the formation of normal droplets were also determined. The experimental results show that the highest dispensing frequency of the system is 210 Hz, the minimum diameter of the droplets is 630 μm , and the consistency error of the droplets is 5.62%. In a word, the advantages of the proposed dispensing system are verified, which provides a new concept for the design and application of microspray dispensing system.

Key words: micro-spray dispensing system; compliant mechanism; piezoelectric actuator; pseudo rigid body method

1 引言

近年来,微喷点胶系统在生命科学^[1]、电子封装^[2-3]、快速制造等尖端领域具有广泛的应用。随着液体分配要求的不断提高^[4-5],这些领域对液体分配的速度、精度和液体体积等性能的要求有所不同,如在电子封装领域,胶黏剂、银浆等高黏性液体材料的微量喷射点胶操作是表面贴装、引线连接、微结构制造等电子工业领域不可或缺的技术手段,是制约电子封装技术向高密度、微型化、立体化方向发展的瓶颈之一,对微滴分配操作的精度、速度和胶滴尺寸提出了更高的要求。随着微小电子元器件的广泛应用,喷射胶滴直径需要小至 100 μm ,分配速度要求达到 200 点/秒甚至更高。但是,传统的点胶系统受工作原理和驱动方式的限制,存在点胶速度慢、胶滴体积大等缺点,其胶液分配精度和速度难以满足精准快速分配的要求。所以,需要设计能满足性能要求的微喷点胶系统。

目前,微喷点胶系统多采用撞针式喷射原理,以压电陶瓷驱动器作为驱动源,通过不同的传递方式将驱动器的输出位移传递至撞针,实现胶液的微量喷射,常用的传递方式采用液压传动和杠杆机构。Khan 和 Nguyen^[7-8]设计了一种通过传统杠杆机构和液压相结合的方式实现微喷射点胶系统,满足了快速点胶的需求。路崧等^[9-10]设计了一种基于液压放大原理将压电陶瓷输出位移放大的微喷射点胶系统,能满足喷射中低黏度胶液。Deng^[11]通过在杠杆的两端各放置一个压电陶瓷驱动器分别驱动连杆末端向上和向下运动,实现撞针的双向驱动。但是,上述微喷射点胶系统的

应用范围有限,采用杠杆机构传递压电陶瓷驱动器输出位移,响应速度较快但撞针行程小,难以满足高黏度胶液喷射,并且在喷射过程中杠杆机构的构件之间的摩擦力,点胶精度不高;采用液压方式驱动撞针,在点胶系统运行过程中,液压腔内液体温度升高会导致点胶系统的胶滴一致性较差;杠杆机构和液压相结合的传递方式结构复杂,系统体积较大,环境适应性较差。柔顺机构是一种利用构件自身的弹性变形来实现力和位移传递的特殊机构,具有无摩擦力、无运动副间隙、运动精度高优点^[12-13],因此,柔顺机构适用于精度高、响应快的微喷射点胶系统。

本文利用柔顺机构设计了一种微喷射点胶系统,建立反映微喷系统性能的理论模型,制作样机,并分析了微喷射点胶系统的性能。所设计的微喷射点胶系统能实现微量、快速、精确分配不同黏度的胶体材料。

2 微喷点胶系统设计

微喷点胶系统组成和工作原理如图 1 所示,它由阀体、撞针、供胶装置和驱动装置组成。胶滴通过阀体的喷嘴喷出,利用撞针使喷嘴处于闭合和开启状态,撞针连续往复上下运动使喷嘴处于开启-闭合-开启的循环状态,喷嘴将胶液切断成为一系列胶滴滴落,完成连续点胶操作。供胶装置与阀体的胶液入口相连接,为点胶机供给胶液。驱动装置与撞针相连,驱动撞针上下往复运动。驱动装置采用压电式柔顺机构实现,当对压电陶瓷驱动器施加电压,在驱动器的作用下利用柔顺机构的弹性变形带动撞针向上运动,喷嘴开启;当驱动器不施加电压,利用柔顺机构的回弹特性使

撞针回落,喷嘴闭合。也就是说,当对压电陶瓷驱动器施加方波信号时,驱动装置可利用柔顺机构的弹性变形实现撞针上下往复运动。

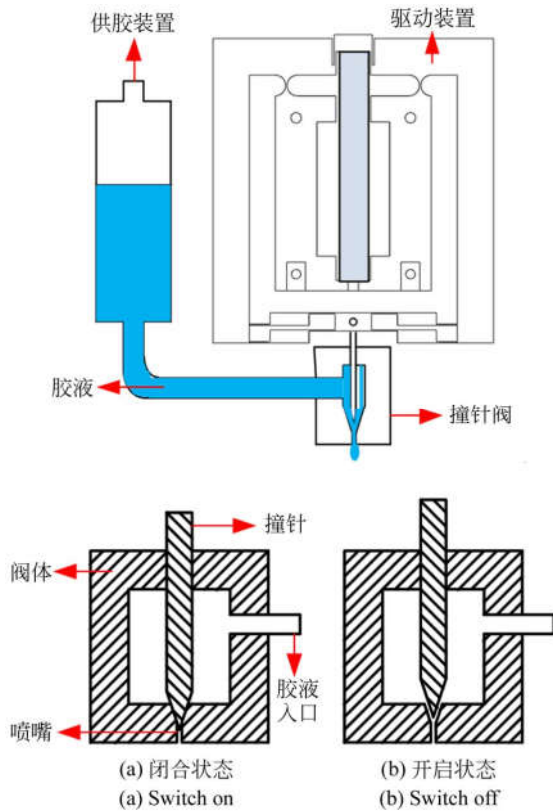


图 1 微喷点胶系统组成和工作原理

Fig. 1 Composition and working principle of micro-spray dispensing system

点胶速度和胶滴质量主要取决于喷嘴的开口程度和开口频率。柔顺机构能将压电陶瓷驱动器的位移和力传递给撞针,鉴于压电陶瓷驱动器行程小、输出力大的特点,柔顺机构采用杠杆机构与桥式机构相结合方式,设计原理如图 2 所示。在输入端施加输入位移,输入位移通过杠杆机构 ABC 放大传递至桥式放大机构 CDEF。为了提高输出端沿 y 方向的位移精度,采用具有导向作用的复合桥式机构,可以减小输出端沿 x 方向的位移。如图 2 所示,用直圆型柔性铰链和直梁型柔性铰链实现转动副^[14 15],A 处铰链用于将压电陶瓷输入位移传递至杠杆机构,采用直梁型铰链使结构紧凑;B 处铰链用于将杠杆机构的输出位移传递至复合桥式机构,采用直圆型柔性铰链可提高其运动精度;C、D、E、F 处采用直梁型铰链

可使复合桥式机构具有更大的位移放大倍数,得到如图 3 所示的驱动装置。其结构参数尺寸如图 3 所示,所有铰链厚度均为 0.5 mm,宽度为 9 mm。所设计的驱动机构采用慢走丝电火花加工,加工精度为 0.005 mm,加工误差对系统特性的影响可忽略不计。供胶装置由空压机和储胶桶组成,供胶装置的出胶通道与撞针阀相连,储胶桶固定于支架上。供胶装置利用空压机提供的高压气体从储胶桶挤出胶液进入撞针阀,撞针阀型号为 QLH-21A,撞针阀通过螺栓与驱动装置相连接,微喷点胶系统样机如图 4 所示。

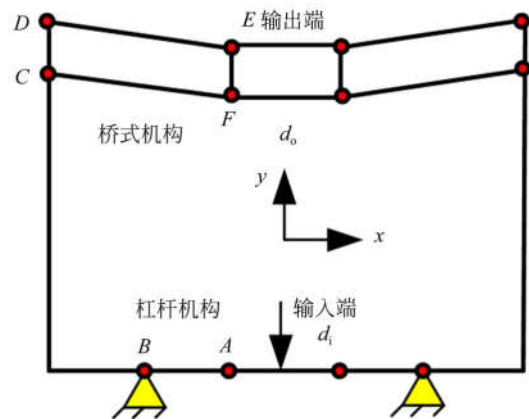


图 2 驱动装置设计原理

Fig. 2 Design principle of driving device

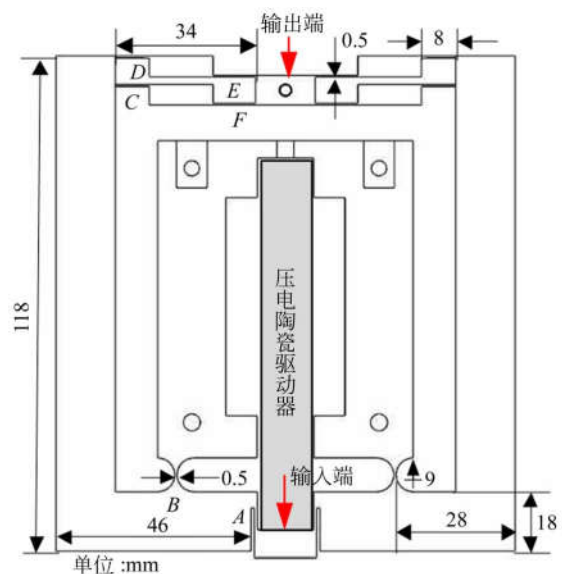


图 3 驱动装置

Fig. 3 Driving device

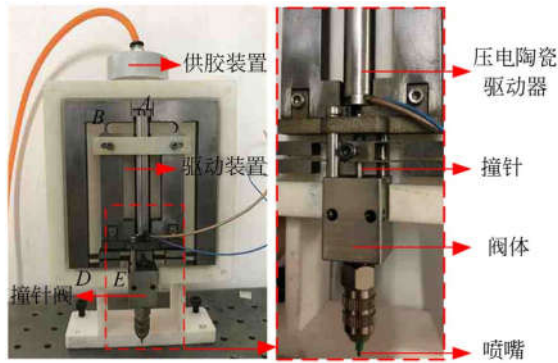


图 4 微喷点胶系统样机

Fig. 4 Prototype of micro-spray dispensing system

3 微喷点胶系统性能分析

3.1 理论模型

为了设计能实现点胶系统进行喷胶所需的运动行程、力和响应快速性,需要建立驱动装置这些性能与结构参数之间的关系。本文采用伪刚体法建立其模型。由图 3 可知,驱动装置为对称结构,取一半进行分析,铰链 A 的作用是将压电陶瓷驱动输入力 F_i 传递至杠杆结构,将各柔性铰链视为理想的转动副,由于驱动装置的输出端沿 y 方向的运动,滑块表示该运动,驱动装置的伪刚体模型如图 5 所示。图 5 中, L_1 和 L_2 表示压电陶瓷驱动器的作用位置, L_3 表示点 B 和点 C 之间的长度, L_4 表示点 D 和点 F 之间的长度,角度 α 和 β 分别表示 BD, DF 与 x 轴之间的夹角。如图 3 所示, $L_1, L_2, L_3, L_4, \alpha$ 和 β 的计算值分别为 12 mm, 15 mm, 130 mm, 103 mm, $125^\circ, 25^\circ$ 。

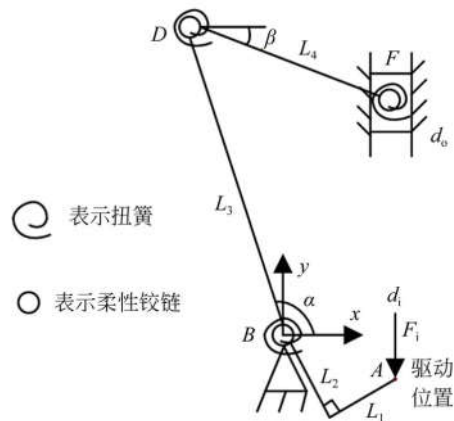


图 5 驱动机构的伪刚体模型

Fig. 5 Pseudo-rigid body model of driving mechanism

由图 5 可知,矢量 \mathbf{BA} 在坐标系 $B-xy$ 下可表示为:

$$\mathbf{BA} = (-L_2 \cos \alpha + L_1 \sin \alpha)\mathbf{i} - (L_2 \sin \alpha + L_1 \cos \alpha)\mathbf{j}. \quad (1)$$

驱动机构的输入位移 d_i 为矢量 \mathbf{BA} 沿 y 方向的位移分量,将式(1)沿 y 方向的位移分量对 α 求偏导可得输入位移为:

$$d_i = (-L_2 \cos \alpha + L_1 \sin \alpha)\delta\alpha, \quad (2)$$

式中: $\delta\alpha$ 为 α 的微小变化量。同理,矢量 \mathbf{BF} 可表示为:

$$\mathbf{BF} = (L_3 \cos \alpha - L_4 \cos \beta)\mathbf{i} + (L_3 \sin \alpha - L_4 \sin \beta)\mathbf{j}. \quad (3)$$

驱动机构的输出位移 d_o 为矢量 \mathbf{BF} 沿 y 方向的位移分量,将式(3)沿 y 方向的位移分量对 α 和 β 求偏导可得输出位移:

$$d_o = L_3 \delta\alpha \cos \alpha - L_4 \delta\beta \cos \beta, \quad (4)$$

式中 $\delta\beta$ 为 β 的微小变化量。由于矢量 \mathbf{BF} 和 \mathbf{BA} 沿 x 方向的位移分量相等,则:

$$L_3 \cos \alpha - L_4 \cos \beta = -L_2 \cos \alpha + L_1 \sin \alpha. \quad (5)$$

对式(5)两边同时求偏导可得 $\delta\alpha$ 和 $\delta\beta$ 之间的关系为:

$$\delta\alpha = -\frac{L_4 \sin \beta}{L_1 \cos \alpha - (L_2 + L_3) \sin \alpha} \delta\beta, \quad (6)$$

联立式(2),式(4)和式(6)求得驱动机构的位移放大倍数 λ 为:

$$\lambda = \left| \frac{d_o}{d_i} \right| = \left| \frac{L_3 \cos \alpha - \cot \beta (L_2 \sin \alpha + L_3 \sin \alpha - L_1 \cos \alpha)}{L_1 \sin \alpha - L_2 \cos \alpha} \right|. \quad (7)$$

当驱动装置推动撞针时,设压电陶瓷驱动器对驱动机构的输入力为 F_i ,驱动机构的驱动力为 F_o 。由式(2)和式(4)可得输入力和驱动力所做的虚功为:

$$\delta W_i = F_i (L_1 \sin \alpha - L_2 \cos \alpha) \delta\alpha, \quad (8)$$

$$\delta W_o = F_o (L_3 \delta\alpha \cos \alpha - L_4 \delta\beta \cos \beta). \quad (9)$$

柔性铰链 B, D, F 处扭簧的虚功可表示为:

$$\delta W_1 = -2 \times \frac{1}{2} K_b (\delta\theta_1)^2 - 2 \times \frac{1}{2} K_q [(\delta\theta_2)^2 + (\delta\theta_3)^2], \quad (10)$$

式中: K_b 为圆型柔性铰链 B 的转动刚度, K_q 为直梁型柔性铰链的转动刚度^[16 17], $\delta\theta_1, \delta\theta_2$ 和 $\delta\theta_3$ 分别为柔性铰链 B, D, F 的虚角位移,可近似表

示为:

$$\begin{aligned} \delta\theta_1 &= \delta\alpha \\ \delta\theta_2 &= \delta\alpha - \delta\beta, \\ \delta\theta_3 &= \delta\beta \end{aligned} \quad (11)$$

联立式(2),式(6)和式(11)可得:

$$\begin{aligned} \delta\theta_1 &= C_1 d_i \\ \delta\theta_2 &= C_2 d_i, \\ \delta\theta_3 &= C_3 d_i \end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{L_1 \sin \alpha - L_2 \cos \alpha}, \\ C_2 &= \\ &= \frac{1}{L_1 \sin \alpha - L_2 \cos \alpha} - \frac{L_1 \cos \alpha - L_2 \sin \beta - L_3 \sin \alpha}{L_1 L_4 \sin \alpha \sin \beta - L_4^2 \cos \alpha \sin \beta}, \\ C_3 &= \frac{L_1 \cos \alpha - L_2 \sin \beta - L_3 \sin \alpha}{L_1 L_4 \sin \alpha \sin \beta - L_4^2 \cos \alpha \sin \beta} \end{aligned}$$

将式(10)代入式(12)可得:

$$\delta W_1 = -[K_b C_1^2 + K_q(C_2^2 + C_3^2)]d_i^2. \quad (13)$$

由虚功原理可知:

$$\delta W = \delta W_1 + \delta W_o + \delta W_2 = 0. \quad (14)$$

联立式(8),式(9),式(13)和式(14)可得:

$$\frac{F_o}{F_i} = \frac{C_1 - K_b C_1^2 - K_q(C_2^2 + C_3^2)}{C_1 \cos \alpha - L_4 \cot \beta [L_1 \cos \alpha - (L_2 + L_3) \sin \alpha]}. \quad (15)$$

为了分析微喷点胶的动态过程,需要建立反映驱动装置动态性能的传递函数。将驱动机构等效为质量-弹簧-阻尼系统, M_p 为驱动机构的质量, K 为驱动机构的刚度, μ 为其阻尼系数; 压电陶瓷驱动器等效为 RC 电路, C, R, K_a, u, V 分别为压电陶瓷驱动器的等效电容、等效电阻、放大系数、输入电压和输出电压。则驱动装置可等效为如图 6 所示的模型。

由 Kirchhoff 定理可得 u 到 V 的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{V(s)}{u(s)} = \frac{K_a}{Ts + 1}, \quad (16)$$

式中: $T=RC$, 为时间常数。

压电陶瓷驱动器输入电压和输出位移之间的传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{X(s)}{u(s)} = \frac{k_p}{Ts + 1}, \quad (17)$$

式中: $k_p = nd_{33} k_a, d_{33}$ 为应变系数, n 为压电陶瓷片的数量。该一阶惯性系统的参数 T 和 k_p 可以通过阶跃响应实验测得, 在施加阶跃信号 u_a 的情

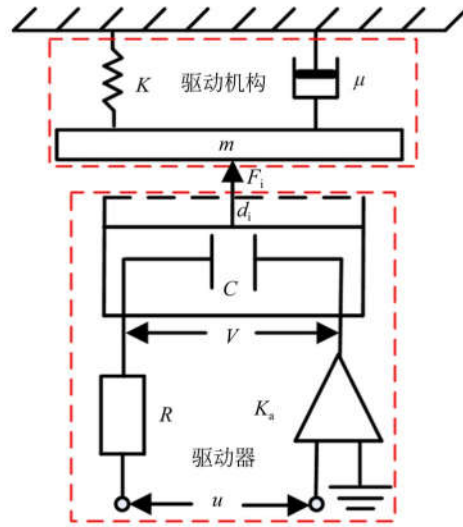


图 6 驱动装置的等效模型

Fig. 6 Equivalent model of driving device

况下, 当 $t=4T$ 时, 一阶系统响应值达到稳态值的 98%, 实际中可视为系统达到稳态值, 达到 98% 稳态值所需时间为 t_s , 则有:

$$T = t_s/4$$

$$k_p = x(t_s)/u_a. \quad (18)$$

压电陶瓷驱动器作用在撞针上的输出力为:

$$F_1 = nk_p d_{33} V = k_p x. \quad (19)$$

驱动机构的动力学方程可表示为:

$$M_p \ddot{d}_o + \mu \dot{d}_o + K d_o = F_1 = k_t d_i, \quad (20)$$

式中 k_t 为压电陶瓷驱动器的刚度。

将式(20)进行拉氏变换可转化为:

$$G_3(s) = \frac{k_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (21)$$

式中: ω_n 为驱动器的无阻尼固有频率, k_1 为放大系数, ξ 为阻尼比, ω_n, k_1 和 ξ 可通过阶跃响应实验计算得出。

联合式(16)和式(21)可得驱动装置的传递函数为:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K_a}{Ts + 1} \frac{k_1 \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (22)$$

3.2 性能分析

为测试微喷点胶系统的性能, 搭建如图 7 所示的测试系统。该系统由微喷点胶机样机、驱动电源、位移传感器、位移信号调理器、D/A 卡、A/D 卡、工控机和测力计组成。其中, 压电陶瓷驱动

器为哈尔滨芯明天公司生产的 PSt150/7/80VS12,其电压为 0~150 V,标称行程为 80 μm;驱动电源为芯明天生产的 XE-501;D/A 卡和 A/D 卡为 NI 公司生产的 PCI-6713;位移传感器和信号调理器分别为 PI 公司生产的 D-E20.200 和 E-712;推拉力计为伊莱科公司生产的 ELK-200。分析微喷点胶系统的驱动力与输出位移的实验过程如图 8 所示,采用软件 LabVIEW 产生电压信号,该信号通过 D/A 卡输出给驱动电源,将该电压放大后作用于驱动装置,采用位移传感器测量撞针的实时位移,将该位移信号通过信号调理器采用 A/D 卡采集;采用推拉力计测量驱动机构输出端对撞针的驱动力。

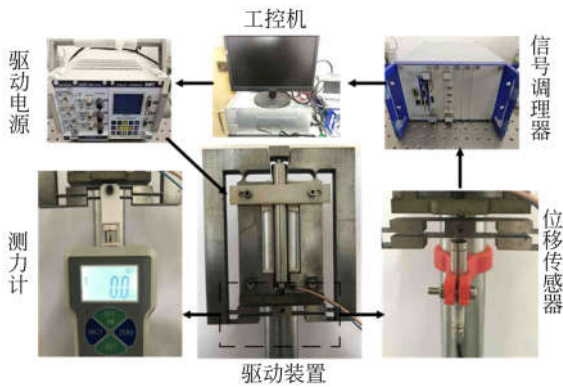


图 7 微喷点胶系统性能测试实验配置

Fig. 7 Experimental setup for performance test of micro-spray dispensing system

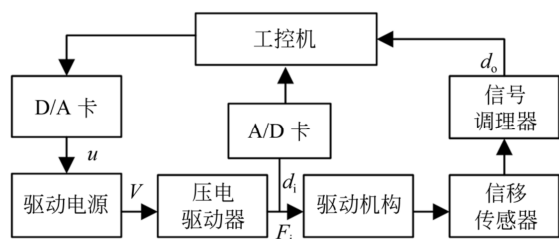


图 8 微喷点胶系统性能测试实验过程

Fig. 8 Experimental process of performance test of micro-spray dispensing system

为了分析驱动力与电压之间的关系,对压电陶瓷驱动器施加电压为[0~120]V,步长为 5 V 的电压序列,测量每组电压所对应的驱动力,将每组电压分别代入式(15)可得驱动力理论值,其结果如图 9 所示。由图 9 可知,驱动力与电压呈线性正比关系,驱动力为[0~56.4] N。驱动撞针

运动所需的力为 3~9 N^[11],说明所设计的驱动装置能驱动撞针运动。

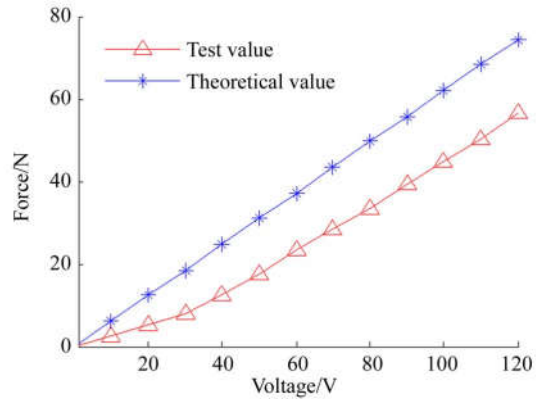


图 9 点胶系统的驱动力

Fig. 9 Driving force of dispensing system

为了分析驱动装置输入位移与输出位移之间的关系,对驱动机构输入位移为[5~80] μm,步长为 5 μm 的输入位移序列,采用电容式位移传感器测量驱动装置的输出位移,由式(7)可得出输出位移的理论值,其结果如图 10 所示。由图 10 可知,输出位移与输入位移呈线性正比关系;实验测得的位移放大倍数为 10.3,理论计算所得为 10.2,输出位移的实验值与理论值接近;输出位移为[50~808] μm,能满足不同尺寸胶滴的喷射要求。

驱动装置的传递函数可通过测试驱动机构和压电陶瓷驱动器的阶跃响应得到^[16],实验过程如图 8 所示,由工控机给定的阶跃电压信号 $u_0 = 4$ V 经 D/A 卡和功率放大输出给压电陶瓷驱动器的

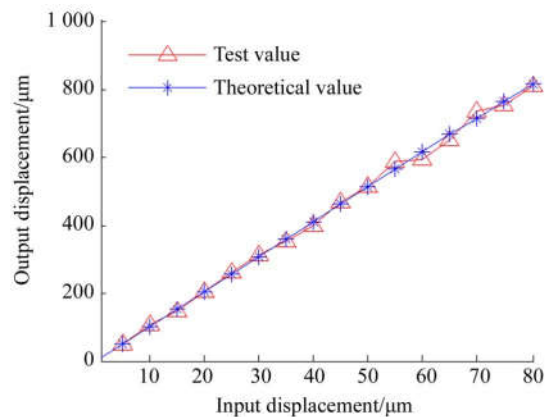


图 10 点胶系统的输出位移

Fig. 10 Output displacement of dispensing system

电压为 60 V, 分别通过驱动器的内置位移传感器和外置电容式位移传感器测得压电陶瓷驱动器的输出位移 d_i 和驱动机构的输出位移 d_o 。由压电陶瓷驱动器的阶跃响应实验得到 $t_s = 2$ ms, 稳态响应值为 $36.2 \mu\text{m}$, 由式(18)求得参数 $T = 0.0005$ s, $k_p = 9.05$; 由驱动机构的阶跃响应实验得到: 驱动机构的阶跃响应稳态值为 $375 \mu\text{m}$, 系统的超调量 $M_p = 4\%$, 峰值时间 $t_p = 0.015$ s, 则二阶系统的超调量和峰值时间为:

$$M_p = e^{-\frac{\pi}{\xi\sqrt{1-\xi^2}}} \times 100\% = 4\%,$$

$$H = \frac{5\ 835\ 534.12}{\sqrt{(599.84\pi f - 0.004\pi^3 f^3)^2 + (620\ 001 - 4.536\pi^2 f^2)^2}} \quad (25)$$

为了验证所得模型的正确性, 给驱动装置施加幅值为 7.5 V, 频率为 $[0 \sim 400]$ Hz 的正弦扫频电压信号, 测得驱动装置在不同频率电压信号的输出位移和由式(25)计算得到的输出位移如图 11 所示。由图 11 可知, 测试所得幅值和计算所得幅值最大值对应的频率分别为 229 Hz 和 245 Hz, 说明所建立的模型正确性; 最大输出位移所对应的频率区间为 $[205 \sim 245]$ Hz, 所以该点胶系统能满足快速喷胶速度。

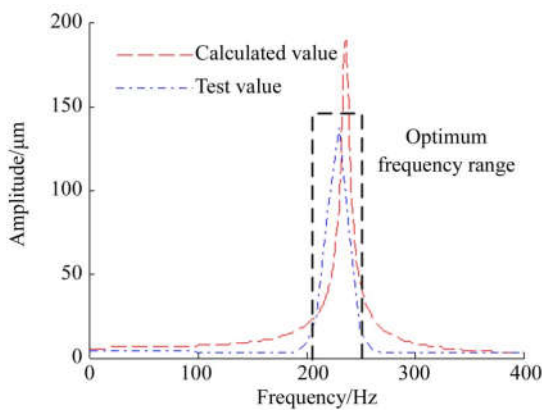


图 11 点胶系统的幅频特性

Fig. 11 Amplitude frequency characteristic of dispensing system

4 胶滴喷射实验分析

4.1 实验系统

由于在点胶过程中可能会出现如图 12 所示

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} = 0.015. \quad (23)$$

由式(23)求得驱动机构的放大系数 $k_1 = 10.4$, 固有频率 $\omega_n = 249$ Hz, 阻尼比 $\xi = 0.54$ 。

将式(23)求得的参数代入式(22), 可得驱动装置的传递函数为:

$$G(s) = \frac{5\ 835\ 534.12}{0.0005s^3 + 1.134s^2 + 299.92s + 620\ 001} \quad (24)$$

将 $s = j2\pi f$ 代入式(24)得到驱动装置的幅频特性为:

的非正常胶滴, 这里分析驱动电压信号的占空比、频率、幅值和胶液黏度对胶滴质量的影响, 搭建如图 13 所示的实验测试系统。该系统由微喷点胶机样机、驱动电源、工控机、空压机和胶滴检测装置组成, 胶滴检测装置为比目公司生产的 9XBPC 显微镜。在进行点胶实验时, 点胶机的驱动信号为方波信号, 供胶压力为 0.4 MPa, 喷嘴直径为 0.3 mm, 撞针直径为 3 mm。胶滴直径是衡量点胶机性能的主要指标, 为了减小实验误差的影响, 在测试所喷射胶滴的直径时, 用显微镜测量连续喷射的 5 个胶滴的直径, 取其平均值为该状态下的胶滴直径。



图 12 非正常胶滴现象

Fig. 12 Abnormal droplet phenomena

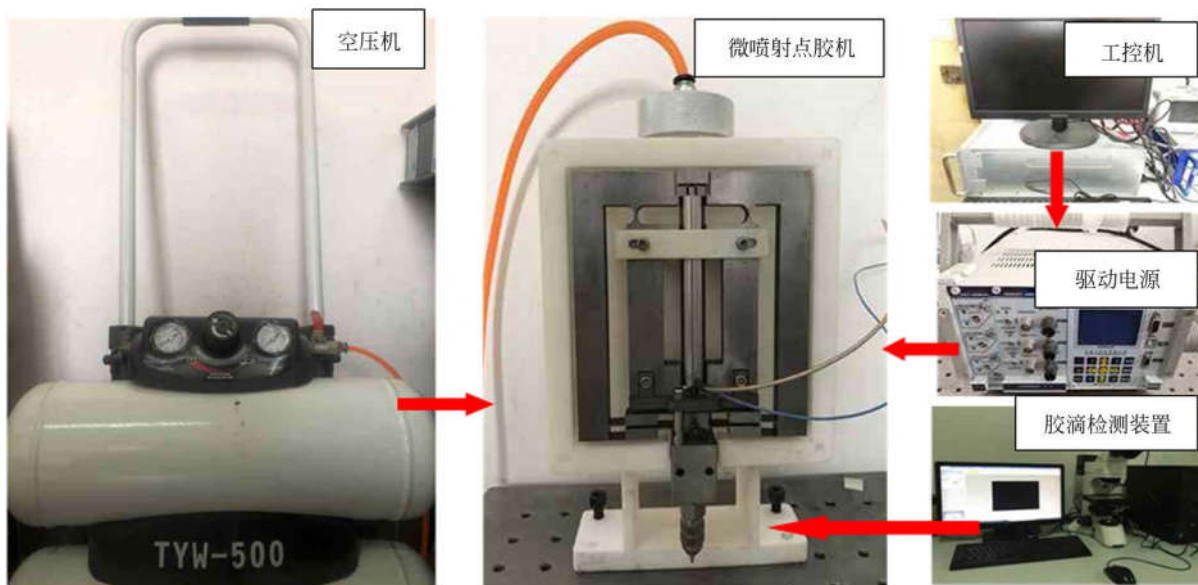


图 13 微喷射点胶系统组成

Fig. 13 Photos of micro-injection dispensing system

4.2 占空比与胶滴直径的关系

占空比决定了喷嘴的开启时间,会影响胶滴直径。为了分析驱动电压信号的占空比对胶滴直径的影响,设驱动电压幅值为 80 V、频率为 50 Hz、占空比为 10%~90%,步长为 10%,对胶液黏度为 120 mPa·s 的胶液进行实验,各占空比所对应的胶滴直径如图 14 所示。由图 14 可知,当占空比由 10%增大至 90%时,胶滴直径由 1.8 mm 增至 2.7 mm,胶滴直径随占空比的增大而增大;当占空比为 10%时,会出现黏滞现象,主要是由于此时喷嘴开启时间过短,胶滴难以成型,胶滴

粘在喷嘴处;当占空比为 90%时,会出现射流和卫星滴,由于此时喷嘴关闭的时间过短,导致撞针无法及时阻断胶液,喷嘴处出现射流现象。

4.3 频率与胶滴直径的关系

为了分析驱动电压信号的频率对胶滴直径的影响,设驱动电压幅值为 80 V、占空比为 50%,频率分别为 1, 50, 100, 150, 200 和 250 Hz,对胶液黏度为 120 mPa·s 的胶液进行实验,各频率所对应的胶滴直径如图 15 所示。由图 15 可知,胶滴直径随频率的增大而减小,由于点胶频率越高,对应的喷嘴开启时间越短,喷嘴喷射的胶滴越

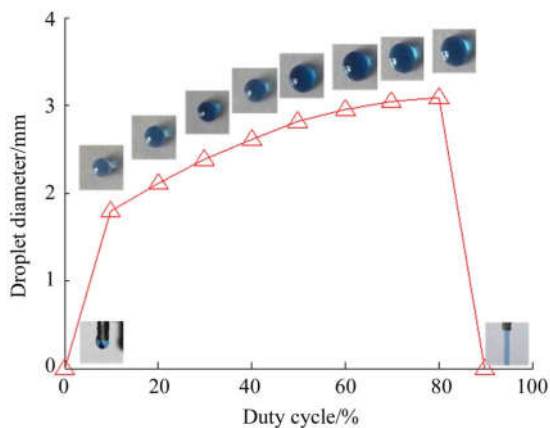


图 14 占空比与胶滴直径之间的关系

Fig. 14 Relationship between duty cycle and droplet diameter

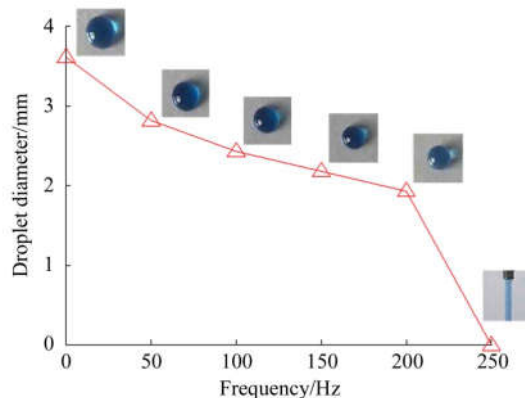


图 15 频率与胶滴直径之间的关系

Fig. 15 Relationship between frequency and droplet diameter

少,则胶滴直径越小;但当频率为 250 Hz 时,喷嘴在还未完全闭合时又重新开启,出现胶滴射流现象。

4.4 电压幅值与胶滴直径的关系

为了分析驱动电压与胶滴直径的关系,设占空比 50%,频率 50 Hz,电压为[50~120] V,步长为 10 V 的电压序列,测量对应各电压的胶滴直径,得到电压与胶滴直径的关系,如图 16 所示。由图 16 可知,胶滴直径变化为[1.9~3.1] mm,胶滴直径随电压的增大而增大,但当电压超过 90 V 时,胶滴直径变化较小。由于电压越高,驱动力和撞针位移越大,撞针与阀体间的开口位移越大,则胶滴直径越大。

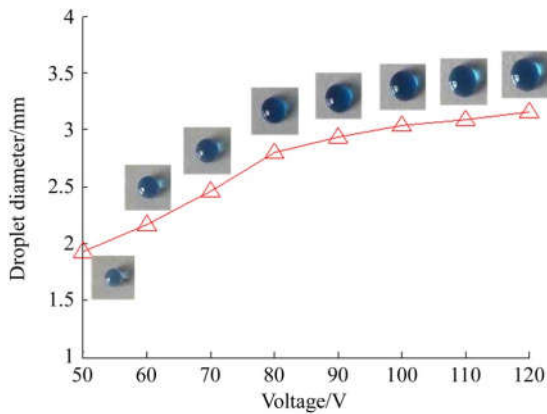


图 16 电压与胶滴直径之间的关系

Fig. 16 Relationship between voltage and droplet diameter

为了分析形成胶滴时驱动信号的电压和频率要满足的要求,图 17 表示当驱动信号的电压不同时,要形成胶滴所对应的最大频率。由该图可知,电压小于 50 V 时,任意频率均不能形成胶滴;当电压大于 50 V 时,电压越高,形成胶滴的最大频率越大,即频率范围越大,当电压为 120 V 时最大频率达 240 Hz。

4.5 胶液黏度与胶滴直径的关系

在点胶过程中,胶液的物理特性会对胶滴的喷射产生较大的影响,其中对喷射效果影响最大的一个因素就是胶液黏度。为了分析胶液黏度与胶滴直径之间的关系,设驱动电压信号的幅值、频率及占空比分别为 80 V,50 Hz,50%。由于甘油在不同浓度时具有不同的黏度,当温度为 20 °C

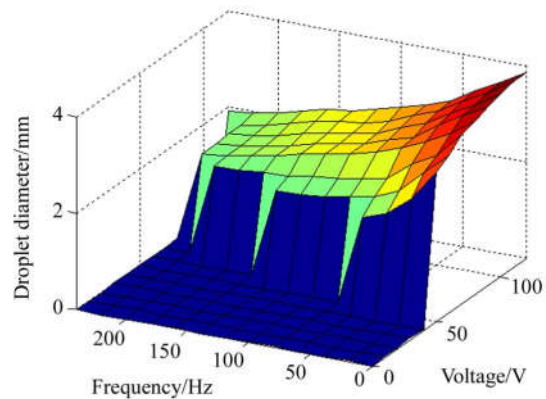


图 17 形成胶滴所对应的电压和频率

Fig. 17 Voltage and frequency used for droplet formation

时,甘油浓度分别为 69%,89%,94%,96%,97%和 98%时所对应的黏度为[20~1 000] mPa·s。图 18 表示 6 组不同黏度胶液与胶滴直径之间的关系,由该图可知,胶滴直径随胶液黏度增大而减小。胶液黏度越高,其流动性越差,流动速度更慢,单位时间流出的胶液少,导致所喷射的胶滴直径越小。

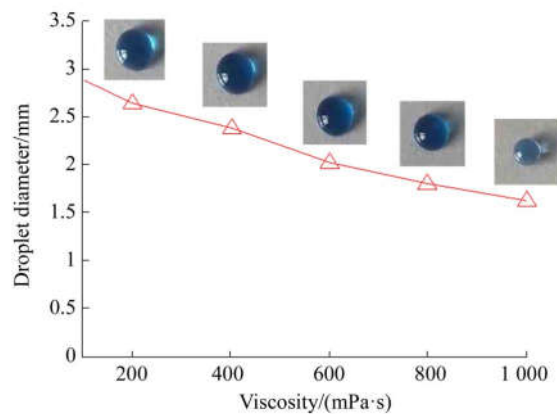


图 18 胶液黏度与胶滴直径之间的关系

Fig. 18 Relationship between viscosity of glue and droplet diameter

4.6 正交实验分析

胶滴直径与占空比、频率、电压和胶液黏度等因素有关,采用正交实验设计方法分析各因素对胶滴直径的影响程度,并找到能获得最小胶滴直径的因素组合。根据图 14~图 18 的实验结果选

取各因素的取值范围,各因素分别取 5 个水平,如表 1 所示。因此,选取 4 因素 5 水平的正交表 $L_{25}(5^4)$ 进行实验,得到 25 组对应不同因素组合的胶滴直径,如表 2 所示。为了分析各因素对胶滴直径的影响,将各因素处于同一种水平下的各组胶滴直径求和并取其平均值,得到各因素在不同水平下胶滴直径的平均值,如图 19 所示。由图 19 可知,胶液黏度对胶滴直径的影响最大,占空比次之,频率和电压幅值对胶滴直径的影响较小;选取各因素对应的最小胶滴直径的一组因素水平组合,即图 19 中方框表示的水平组合,该组合对应的占空比、频率、电压幅值和胶液黏度的水平分别为 1,5,1,5,由表 1 可知各因素的值分别为 30%,180 Hz,80 V,1 000 mPa·s。由实验可得,在这种水平组合下胶滴直径可达 0.63 mm,该值均比表 2 中胶滴直径更小,说明在该组合下能获得最小的胶滴直径。

表 1 正交实验的因素水平

Tab. 1 Factor level in orthogonal test

水平	占空比/%	频率/Hz	电压/V	黏度/(mPa·s)
1	30	60	80	200
2	40	90	90	400
3	50	120	100	600
4	60	150	110	800
5	70	180	120	1 000

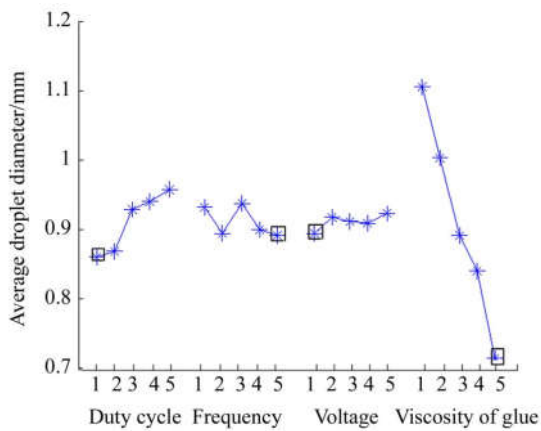


图 19 各因素对胶滴直径的影响

Fig. 19 Influence of various factors on droplet diameter

表 2 正交试验结果

Tab. 2 Results of orthogonal test

试验号	占空比	频率	电压	黏度	胶滴直径
1	1	1	1	1	1.04
2	1	2	2	2	0.96
3	1	3	3	3	0.86
4	1	4	4	4	0.77
5	1	5	5	5	0.67
6	2	1	2	3	0.88
7	2	2	3	4	0.78
8	2	3	4	5	0.72
9	2	4	5	1	1.03
10	2	5	1	2	0.94
11	3	1	3	5	0.74
12	3	2	4	1	1.12
13	3	3	5	2	1.04
14	3	4	1	3	0.92
15	3	5	2	4	0.82
16	4	1	4	2	1.04
17	4	2	5	3	0.91
18	4	3	1	4	0.87
19	4	4	2	5	0.74
20	4	5	3	1	1.14
21	5	1	5	4	0.96
22	5	2	1	5	0.71
23	5	3	2	1	1.19
24	5	4	3	2	1.04
25	5	5	4	3	0.89

4.7 胶滴一致性检验

胶滴的一致性衡量微喷射点胶系统性能的一个重要指标。为了测试微喷射点胶系统的胶滴一致性,在点胶频率为 100 Hz,占空比为 50%,驱动电压幅值为 80 V 的情况下进行了 50 次重复实验,这些实验分为 10 组,每组取 5 个胶滴直径的

平均值作为该组的胶滴直径,胶滴直径分布如图 20 所示。由图 20 可知,胶滴直径在 2.34 mm 上下浮动,胶滴直径的一致性误差为 5.62%,说明点胶系统具有较好的胶滴一致性。

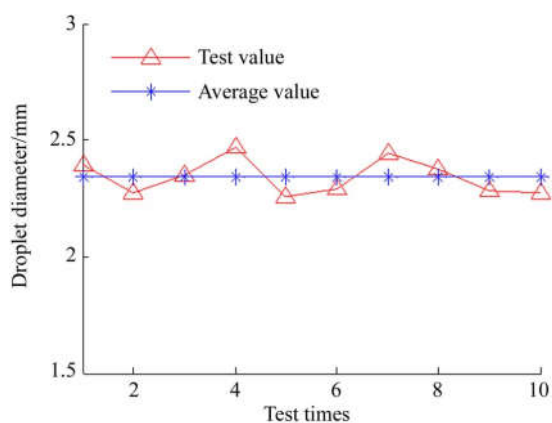


图 20 胶滴直径分布

Fig. 20 Distribution of droplet diameter

参考文献:

- [1] 姚玉峰, 路士州, 刘亚欣, 等. 微量液体自动分配技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 140-153.
YAO Y F, LU SH ZH, LIU Y X, *et al.*. Research on automated micro-liquid dispensing technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(14): 140-153. (in Chinese)
- [2] 张勤, 徐策, 徐晨影, 等. 超微量点胶方法与实验[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2071-2078.
ZHANG Q, XU C, XU CH Y, *et al.*. Approach and experiment of ultra-micro dispensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2071-2078. (in Chinese)
- [3] KUNCHALA P, KAPPAGANTULA K. 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers [J]. *Materials & Design*, 2018, 155: 443-450.
- [4] 孙道恒, 高俊川, 杜江, 等. 微电子封装点胶技术的研究进展[J]. 中国机械工程, 2011, 22(20): 2513-2519.
SUN D H, GAO J CH, DU J, *et al.*. Advances in fluid dispensing technology for micro-electronics packaging [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(20): 2513-2519. (in Chinese)

5 结 论

本文基于柔顺机构设计了一种新型压电式微喷点胶系统,该系统由供胶装置、驱动装置和撞针阀组成。驱动装置采用压电式柔顺机构实现,利用柔顺机构的弹性变形实现撞针的上下往复运动。采用伪刚体法得到点胶系统的驱动力、输出位移和频率特性,结果表明点胶系统的驱动力、输出位移和频率分别为 56.4 N, 808 μm , 245 Hz, 说明该点胶系统能满足不同胶滴的喷射要求。制作微喷点胶系统样机,分析驱动电压信号的占空比、频率、幅值和胶液黏度对胶滴质量的影响。实验结果表明,电压越高,频率越低,胶滴直径就越大;胶液黏度越高,占空比越低,胶滴直径越小,最小胶滴直径为 0.67 mm,胶滴一致性误差为 5.62%,并分析得到胶滴形成应满足的条件,为微喷点胶系统提供了设计思路。

- [5] 姚玉峰, 路士州, 刘亚欣, 等. 微量液体自动分配技术研究综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49(14): 140-153.
YAO Y F, LU SH ZH, LIU Y X, *et al.*. Research on automated micro-liquid dispensing technology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(14): 140-153. (in Chinese)
- [6] 史亚莉, 李福东, 杨鑫, 等. 用于微胶接的 pL 级点胶方法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2744-2750.
SHI Y L, LI F D, YANG X, *et al.*. pL class adhesive dispensing approach for micro bonding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2744-2750. (in Chinese)
- [7] KHAN S, NGUYEN T P, LUBEJ M, *et al.*. Low-power printed micro-hotplates through aerosol jetting of gold on thin polyimide membranes [J]. *Microelectronic Engineering*, 2018, 194: 71-78.
- [8] NGUYEN Q H, HAN Y M, CHOI S B, *et al.*. Dynamic characteristics of a new jetting dispenser driven by piezostack actuator [J]. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2008, 31(3): 248-259.
- [9] 路崧, 江海, 顾守东, 等. 液压式压电驱动喷射点胶阀设计与实验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(3): 167-173.

- LU S, JIANG H, GU SH D, *et al.*. Experiment and design for the hydraulic and piezoelectric driven jet dispensing valve[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(3): 167-173. (in Chinese)
- [10] 顾守东, 杨志刚, 江海, 等. 压电驱动液压放大式喷射系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1627-1634.
- GU SH D, YANG ZH G, JIANG H, *et al.*. Piezoelectric driven hydraulic amplification jetting system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1627-1634. (in Chinese)
- [11] DENG G L, CUI W J, ZHOU C, *et al.*. A piezoelectric jetting dispenser with a pin joint[J]. *Optik*, 2018, 175: 163-171.
- [12] MITCHELL-SMITH J, SPEIDEL A, BISTEROV I, *et al.*. Electrolyte multiplexing in electrochemical jet processing[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 68: 483-487.
- [13] 余跃庆, 李清清. 一种新型柔性铰链的设计、制作与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(13): 79-85.
- YU Y Q, LI Q Q. On the design, manufacturing and experiment of a new type flexural joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(13): 79-85. (in Chinese)
- [14] 李耀, 吴洪涛, 杨小龙, 等. 圆弧柔性铰链的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1370-1379.
- LI Y, WU H T, YANG X L, *et al.*. Optimization design of circular flexure hinges[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1370-1379. (in Chinese)
- [15] 胡俊峰, 杨展宏. 尺蠖式直线微驱动器的设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 122-131.
- HU J F, YANG ZH H. A novel inchworm linear micro actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(1): 122-131. (in Chinese)
- [16] 胡俊峰, 徐贵阳, 郝亚洲. 基于响应面法的微操作平台多目标优化[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(4): 1096-1104.
- HU J F, XU G Y, HAO Y ZH. Multi-objective optimization of micro-manipulation stage based on response surface method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1096-1104. (in Chinese)

作者简介:



胡俊峰(1978—),男,江西临川人,博士,副教授,硕士生导师,2010年于华南理工大学获得博士学位,主要从事柔顺机构及振动控制的研究。E-mail: hjfsuper@126.com



梁龙(1994—),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要从事柔顺机构的研究。E-mail: 2833772790@qq.com



赵永祥(1993—),男,河南南阳人,硕士研究生,主要从事柔顺机构的研究。E-mail: 969197563@qq.com