

文章编号 1004-924X(2015)06-1627-08

## 压电驱动液压放大式喷射系统

顾守东, 杨志刚, 江 海, 刘建芳\*, 路 崧, 柳 沁  
(吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025)

**摘要:** 为了实现高速度高精度的非接触喷射式点胶, 设计了一种压电驱动液压放大式喷射系统。该系统采用压电叠堆作为驱动源, 基于液压放大原理放大压电叠堆的输出位移来实现胶液的喷射。对液压放大单元进行了理论分析, 并结合压电叠堆的输出位移对液压放大单元进行了参数化设计; 然后, 利用激光测微仪分别测量了撞针和压电叠堆的位移, 得到了液压放大单元在不同电压下的输出位移。最后, 搭建了喷射系统实验平台, 选用黏度为 1 000 cps 的环氧树脂进行点胶性能测试, 得到了驱动电压和高低电平时间对胶点体积的影响规律。实验显示, 该喷射系统可稳定地实现每秒喷射 143 个胶点, 胶点的体积误差可控制在  $\pm 3.11\%$  以内, 是适用于电子封装行业的高效、高精度点胶方法。

**关键词:** 电子封装; 压电叠堆; 喷射式点胶; 压电驱动; 液压放大

**中图分类号:** TN405; TP67 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1627

## Piezoelectric driven hydraulic amplification jetting system

GU Shou-dong, YANG Zhi-gang, JIANG Hai, LIU Jian-fang\*, LU Song, LIU Qin

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

\* Corresponding author, E-mail: jfliu@jlu.edu.cn

**Abstract:** To pursue a more accurate non-contact dispensing in a higher speed, a piezoelectric-driven hydraulic amplification jetting system is designed. The system uses a piezostack as the driving source and amplifies the output displacement of piezostack based on the hydraulic amplifier principle to implement the jet glue. Through theoretical analysis of hydraulic amplification module, the structure parameters of the module are designed by combining with the analysis of output displacement of the piezostack. Then, the displacements of the needle and the piezostack are measured by a laser micrometer, and the magnifications of the hydraulic amplifier module on different voltages are obtained. Finally, a jetting system platform is set up, the epoxy with a viscosity of 1 000 cps is chosen to check its property of dispensing, and the relations between the driving voltage, high-low voltage time and the volume of droplet are obtained. The experiments show that the jetting system can stably jet 143 glue dots per second and the volume error of each dot is within  $\pm 3.11\%$ , which is a more efficient and accurate dispensing method for the electronic packaging.

**Key words:** electronic packaging; piezostack; jetting dispensing; piezoelectric driving; hydraulic amplifying

收稿日期: 2014-11-21; 修订日期: 2015-02-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50605027); 科技部科技基金型中小企业技术创新基金资助项目 (No. 12C26212201364)

## 1 引言

流体点胶是一种以受控方式对流体进行精确分配的过程,是电子封装行业的关键技术<sup>[1-2]</sup>。传统的接触式点胶技术<sup>[3-4]</sup>依靠点胶针头将胶液粘附于基板上,但该技术需要准确控制针头下降和抬起的高度,且点胶速度慢,胶点重复精度较差。随着电子产品的微型化,高集成化和高密度化,对流体点胶技术要求越来越高,流体黏度范围越来越大,点胶空间狭窄至 0.1 mm,流体分配的速度需要大于 45 000 point/h,因此传统的接触式点胶已经不能满足市场需求,而是逐渐向非接触喷射式点胶转变<sup>[5-7]</sup>。非接触喷射式点胶主要是通过某种方式获取瞬间高压作用在点胶喷口附近的胶液上,使胶液通过喷口喷射到基板上<sup>[8-9]</sup>,其具有点胶速度快,液点体积小,胶点一致性高,操作柔性强,且无需 Z 轴运动等特点<sup>[5,10-11]</sup>,被视为下一代电子封装技术<sup>[12-13]</sup>。

目前,国内外的许多大学和研究机构都对非接触喷射式点胶技术进行了研究。华中科技大学张鸿海<sup>[8]</sup>等提出一种机械式喷射点胶系统,利用压缩气体驱动撞针运动实现高黏度液体的喷射点胶,并对影响喷射过程的参数进行了研究,但该系统结构复杂,工作频率较低。哈尔滨工业大学陈立国等<sup>[14]</sup>以压电叠堆为驱动源,利用菱形放大机构将叠堆位移放大,获得的喷针位移达到 0.3 mm,实现了胶液的稳定喷射。厦门大学的王凌云等<sup>[15-16]</sup>利用杠杆放大机构对压电叠堆的输出位移放大,实现阀门的快速打开和关闭,获得的胶点直径为 1.07 mm,频率可达 65 Hz。韩国 Inha University 机械工程学院的 Nguyen 和 S B Choi 研究设计的双压电叠堆喷射阀<sup>[17]</sup>,利用柔性杠杆机构对叠堆进行位移放大,获得的撞针最低位移为 0.15 mm。吉林大学的焦晓阳等<sup>[18]</sup>提出了一种压电气体混合驱动式喷射点胶阀,获得的最小胶点直径为 0.5 mm,胶点一致性误差在 5% 内,该结构具有频率响应快的优点,但该装置结构复杂,且由于气体的可压缩性,得到的胶点一致性较差。

为了实现高速度高精度的非接触喷射式点

胶,本文提出了一种新型的压电驱动液压放大式喷射系统。考虑压电叠堆响应速度快、分辨率高、输出力大、输出位移稳定<sup>[19-20]</sup>但输出位移较小的特点,本文基于液压放大的原理,对压电叠堆的位移进行放大,以满足胶液喷射对撞针行程的需求。分析了压电液压放大式喷射系统的结构组成,对喷射系统中的液压放大单元进行了理论分析,并结合压电叠堆输出位移设计了液压放大单元的基本结构参数;随后,利用激光测微仪对撞针的位移进行测量并得到不同电压下的输出位移;最后对喷射系统进行点胶实验,得到了液压放大式压电喷射系统的喷射性能。

## 2 喷射系统的结构组成与工作原理

### 2.1 喷射系统的结构组成

压电驱动液压放大式喷射系统主要由压电驱动单元、液压放大单元和喷射单元组成,其结构如图 1 所示。压电驱动单元主要包含用于驱动撞针运动的压电叠堆,由液压腔和面积不同的上下膜片组成。喷射单元主要由驱动弹簧、撞针和喷嘴等构成。

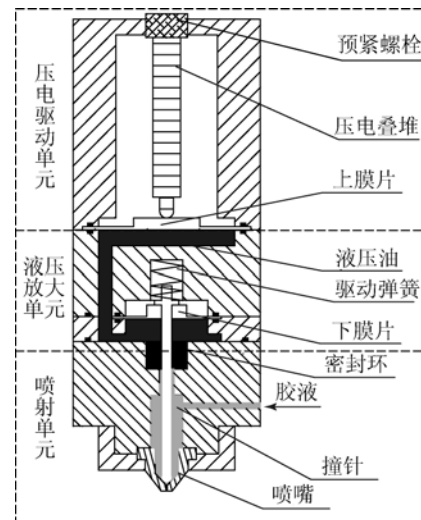


图 1 喷射系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of jetting system

### 2.2 喷射系统的工作原理

图 2 所示为该系统的工作原理:初始状态下,叠堆处于低电平信号,撞针在驱动弹簧作用下与

喷嘴紧密闭合,阀处于关闭状态;当叠堆受到高电平信号时,叠堆伸长推动上膜片变形,上膜片向下挤压液压油,液压油推动下膜片向上运动,下膜片带动撞针向上运动并与喷嘴分离,同时,胶液在外部压力的作用下流向喷嘴,如图 2(a)所示;随后,叠堆所受电平由高变低,叠堆缩短,驱动弹簧压缩撞针向下运动并挤压撞针与喷嘴之间的胶液,使其中一部分胶液回流至腔内,另一部分胶液从喷嘴喷出,如图 2(b)所示;当信号变成低电平后,叠堆和液压放大单元恢复到初始状态,撞针与喷嘴快速闭合并切断从喷嘴喷射出的胶液形成单独的胶点,至此便完成一次喷射。通过控制脉冲电平的大小和时间,可方便地控制喷射点胶的速度和体积。

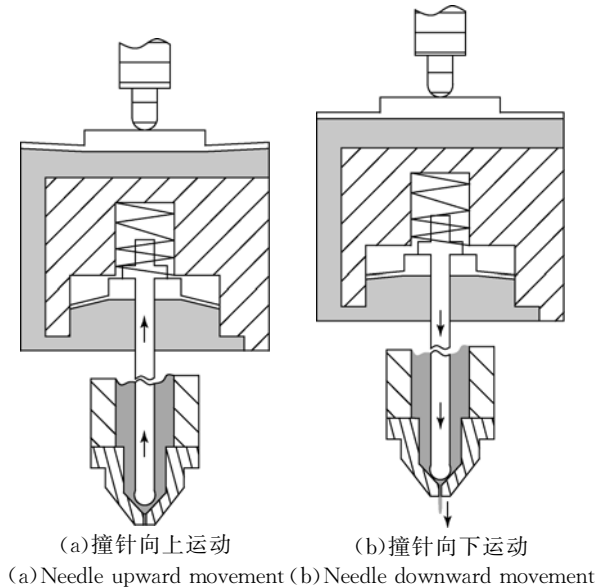


图 2 喷射系统工作原理

Fig. 2 Working principle of jetting system

### 3 液压移放大单元的结构设计

#### 3.1 液压放大单元的结构分析

图 3 所示为液压放大单元的简化模型。上膜片(大面积)在压电叠堆的推动下变形,挤压液压腔内的液压油,液压油压力和体积的变化驱动下膜片(小面积)产生较大变形,从而输出较大的位移。

液压放大单元中的上下膜片,可看作由中间硬芯和周围的弹性膜片构成。因此由上下膜片中

心位移所引起的体积变化可分别看作是平顶圆锥体的体积:

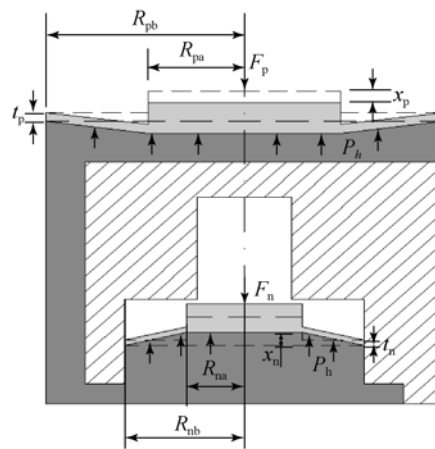
$$V_p = \frac{1}{3} \pi x_p (R_{pb}^2 + R_{pa} R_{pb} + R_{pa}^2), \quad (1)$$

$$V_n = \frac{1}{3} \pi x_n (R_{nb}^2 + R_{na} R_{nb} + R_{na}^2). \quad (2)$$

假设液压油不可压缩,根据液压腔体内液压油体积变化量建立平衡方程:

$$dV_p + dV_n = 0, \quad (3)$$

其中:  $V_p$ 、 $V_n$  分别为上下膜片变形所引起的体积变化。



$R_{pa}$  - 上膜片内径,  $R_{pb}$  - 上膜片外径,  $t_p$  - 上膜片厚,  $R_{na}$  - 下膜片内径,  $R_{nb}$  - 下膜片外径,  $t_n$  - 下膜片厚度,  $x_p$  - 上膜片中心位移,  $x_n$  - 下膜片中心位移,  $F_p$  - 上膜片中心受力,  $F_n$  - 下膜片中心受力,  $P_h$  - 液压腔内压强

图 3 液压放大单元简化模型

Fig. 3 Simplified model of hydraulic amplification unit

由式(1)~(3)得到液压放大系统的位移放大倍数为:

$$n = \frac{x_n}{x_p} = \frac{R_{pb}^2 + R_{pa} R_{pb} + R_{pa}^2}{R_{nb}^2 + R_{na} R_{nb} + R_{na}^2}. \quad (4)$$

上膜片的中心位移  $x_p$  等于压电叠堆的输出位移,上膜片的中心受力  $F_p$  等于压电叠堆的输出力,而压电叠堆的输出位移和输出力存在如下关系<sup>[21]</sup>:

$$x_p = x_0 - \frac{F_p}{K}, \quad (5)$$

其中:  $x_0$  为压电叠堆空载时的输出位移,  $K$  为压电叠堆等效刚度。

由式(4)、(5)可得液压放大单元的输出位

移为:

$$x_n = n x_p = \frac{R_{pb}^2 + R_{pa} R_{pb} + R_{pa}^2}{R_{nb}^2 + R_{na} R_{nb} + R_{na}^2} \left( x_0 - \frac{F_p}{K} \right). \quad (6)$$

由式(6)可知,在膜片几何尺寸一定的情况下,液压放大单元的输出位移  $x_n$  与上膜片中心受力  $F_p$  呈负相关性,因此上膜片中心受力  $F_p$  不宜过大。

在喷射过程中,膜片在外力和液压腔内压力的共同作用下产生变形,根据膜片中心挠度相关的运动方程,忽略动态过程中膜片的惯性影响,可得出上、下膜片中心位移与其中心受力的关系分别为:

$$k_p x_p = F_p - \pi R_{pb}^2 P_h, \quad (7)$$

$$k_n x_n = F_n - \pi R_{nb}^2 P_h. \quad (8)$$

对式(7)和(8)进行化解可得:

$$F_p = \frac{R_{pb}^2}{R_{nb}^2} F_n + k_p x_p - \frac{R_{pb}^2}{R_{nb}^2} k_n x_n, \quad (9)$$

式中:  $k_p$ 、 $k_n$  分别为上下膜片的抗弯刚度<sup>[22]</sup>:

$$k_p = \frac{4\pi E_p t_p^3 (R_{pb}^2 - R_{pa}^2)}{3(1 - \nu_p^2) [(R_{pb}^2 - R_{pa}^2) - 4R_{pa}^2 R_{pb}^2 (\ln R_{pb} - \ln R_{pa})^2]},$$

$$k_n = \frac{4\pi E_n t_n^3 (R_{nb}^2 - R_{na}^2)}{3(1 - \nu_n^2) [(R_{nb}^2 - R_{na}^2) - 4R_{na}^2 R_{nb}^2 (\ln R_{nb} - \ln R_{na})^2]},$$

式中:  $E_p$ 、 $E_n$  分别为上下膜片的弹性模量,  $\nu_p$ 、 $\nu_n$  分别为上下膜片的泊松比。

该喷射系统上下膜片材料分别为不锈钢和橡胶 ( $E_n = 8 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ,  $\nu_n = 0.4$ ),机械封装式压电叠堆由锆钛酸类的压电陶瓷材料制造,其型号为 PSt150/7/120VS12。在上、下膜片材料和叠堆参数确定的情况下,由式(6)和(9)可知,影响液压放大单元输出位移的主要有上、下膜片的厚度  $t_p$ 、 $t_n$ ,上、下膜片内外半径  $R_{pa}$ 、 $R_{pb}$ 、 $R_{na}$  和  $R_{nb}$ 。

为了实现胶液的喷射,撞针的运动位移需达到 0.3 mm 左右<sup>[15]</sup>,对液压放大单元结构进行设计,获得了上、下膜片的结构参数如表 1 所示。由式(4)可得到液压放大单元的放大倍数为 3.49。

表 1 膜片结构参数

Tab. 1 Structure parameters of diaphragm (mm)

上膜片			下膜片		
$R_{pa}$	$R_{pb}$	$t_p$	$R_{na}$	$R_{nb}$	$t_n$
12	18	0.3	6	10	0.5

### 3.2 输出位移测试

撞针的运动位移是非接触式喷射点胶系统的重要参数,它决定喷射系统的性能<sup>[23]</sup>,因此撞针的运动位移是衡量喷射系统性能的一个重要指标。文中搭建实验平台测量了撞针的位移特性,图 4 所示为撞针位移测量原理图。

利用驱动电源给压电叠堆施加方波信号,其中低电平为 0 V,分别调至不同电压的高电平,然后利用激光测微仪(LK-H020)分别测量撞针的输出位移和压电叠堆位移,得到特性曲线如图 5 所示。液压放大系统对压电叠堆的位移有了明显的放大,当驱动电压为 110 V 时,压电叠堆的位移输出值为 0.095 mm,而对应的撞针位移可达 0.36 mm,此时液压放大单元的放大倍数为 3.31,略小于理论值。这是由于受到液压油的可压缩性和加工精度的影响致使压电驱动液压放大单元的实际放大倍数低于理论计算值。

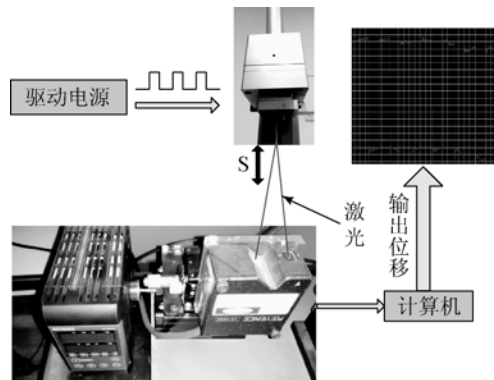


图 4 撞针位移测试原理图

Fig. 4 Block diagram of needle displacement test

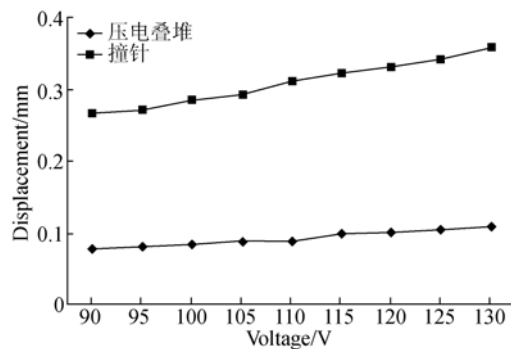


图 5 压电叠堆和撞针的电压-位移输出特性曲线

Fig. 5 Voltage-displacement output characteristics of piezostack and needle

## 4 胶点喷射的实验与分析

### 4.1 搭建测试试验台

图 6 所示为喷射系统试验台示意图,驱动电源可为压电叠堆提供可调的方波信号;PC 控制系统可以控制三维运动台的运动和驱动电源信号发出信号,从而使安装在三维运动台上的喷射系统在指定的位置作业;供胶系统可为喷射系统提供稳定连续的胶液。实验均是以喷射 500 个胶点为研究对象,利用精密电子秤(精度为 0.1 mg)测量其总质量,再通过计算得到胶点的平均体积。

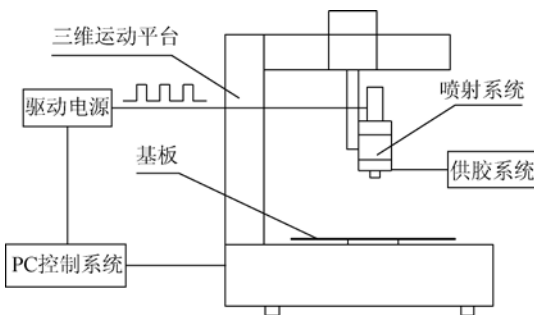


图 6 喷射系统实验台示意图

Fig. 6 Framework of jetting system bench

### 4.2 压电叠堆驱动电压对胶点体积的影响

压电叠堆的驱动电压越大,经液压放大单元后输出的位移越大,撞针抬起高度增加,则供给到撞针与喷嘴间的胶液增多,因此从喷嘴喷射出的胶点体积也会相应的增大。

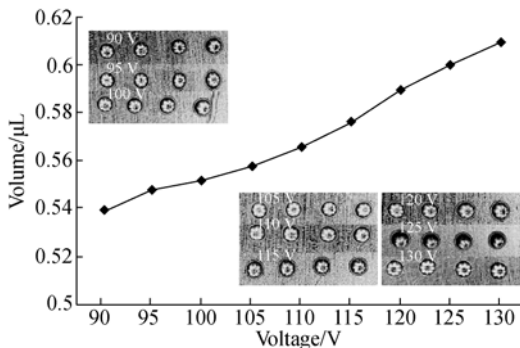


图 7 驱动电压与胶点体积关系曲线图

Fig. 7 Effect of driving voltage on volume of droplets

实验调配黏度为 1 000 cps 环氧树脂为喷射

对象,供胶气压设定为 0.2 MPa,控制电源设定高电平时间为 3 ms,低电平时间为 5 ms,电压为不同 V 值(低电平 0 V)的方波电压,根据电子秤测量的胶点质量计算出胶点的体积,胶点体积和驱动电压的关系如图 7 所示。点胶喷射量与压电叠堆驱动电压成正比,电压越大,胶点体积越大。值得注意的是,当电压小于 80 V 时,由于撞针行程减小,弹簧作用力小,撞针产生的速度不足以将胶液喷出,会出现喷嘴挂滴现象。

### 4.3 高低电平时间对胶点的影响

作用在压电叠堆上的脉冲信号可控制阀口的开启与关闭时间,影响了腔内胶液的供胶效果,从而对喷射出的胶点大小有较大影响。

实验调配黏度为 1 000 cps 的环氧树脂为喷射对象,供胶气压设定为 0.2 MPa,压电叠堆输入低电平为 0 V,高电平为 110 V,压电叠堆控制电源设定不同的高电平时间,低电平时间为 5 ms 进行测试,根据实验测量结果求取出胶点平均体积,如图 8 所示。

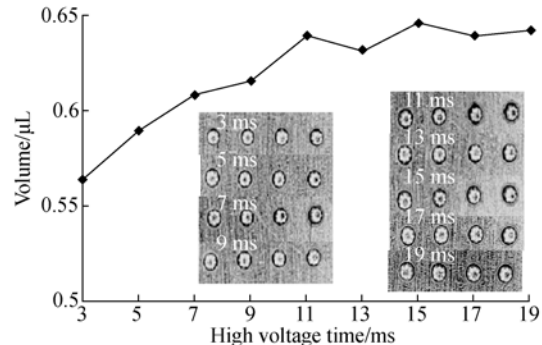


图 8 胶点体积与高电平时间的关系曲线图

Fig. 8 Effect of high voltage time on volume of droplets

由图 8 可知,在其它实验条件不变的情况下,胶点体积随着高电平时间的增加而增大。因为高电平时间越长,喷射系统的开启时间越长,在喷射腔有空间的前提下,就会增加喷射出的胶液体积。当喷射空间被填满时,即使增加高电平时间,喷射量也不会有明显变化。实验还发现当高电平时间在 3 ms 以下时,点胶胶点就会出现卫星滴,还会因为撞针来不及抬起而导致胶液喷射不出的现象。

在高电平时间与胶点体积的实验测试基础上,

测试低电平时间对胶点体积的影响,设定高电平时间为 3 ms,设定不同的低电平时间进行测试,根据实验测量结果求取出胶点平均体积,如图 9 所示。

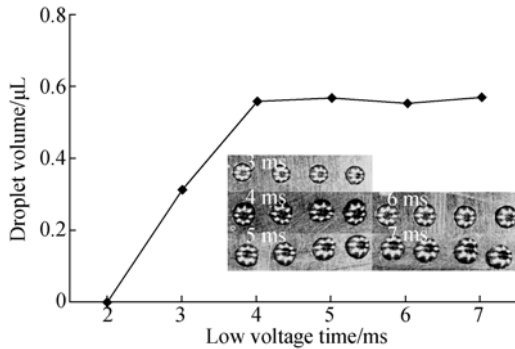


图 9 胶点体积与低电平时间的关系曲线图

Fig. 9 Effect of low voltage time on volume of droplets

由图 9 可知,当低电平时间在 2 ms 及以下时,无胶点喷出。当低电平时间设置为 3 ms 时,喷出的胶点体积为  $0.315 \mu\text{L}$ ,当低电平时间在 4 ms 及以上时,胶点的体积几乎一致。这主要是因为低电平作用时间太短,撞针来不及撞击喷嘴就被抬起,喷嘴一直处于半开启状态,撞针的撞击力较小,导致喷射的胶点体积减少,直至喷射不出。

#### 4.4 胶点一致性分析

实验调配黏度为 1 000 cps 环氧树脂为喷射对象,供胶气压设定为 0.2 MPa,驱动电源设定高电平时间为 3 ms,低电平时间为 4 ms,电压为 110 V,重复测试 20 组并计算胶点平均体积,实验采集次

数和胶点体积的关系如图 10 所示,胶点的平均体积为  $0.564 \mu\text{L}$ ,体积误差可控制在  $\pm 3.11\%$  以内。

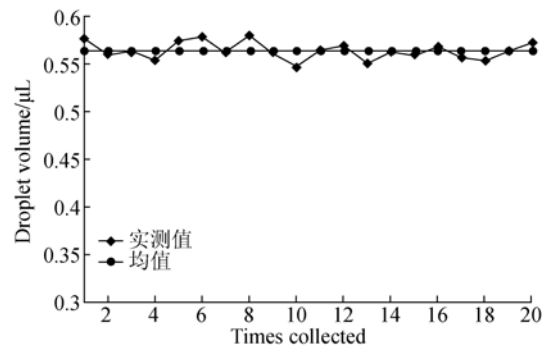


图 10 胶点体积分布图

Fig. 10 Dot volume distribution

## 5 结 论

为使非接触式点胶在电子封装技术中得到广泛应用,设计了一种压电驱动液压放大式喷射系统。对液压放大单元进行了分析与测试,结果显示该结构可实现对压电叠堆 3.31 倍的放大。对影响点胶喷射的关键因素叠堆的驱动电压和高低电平时间分别进行了实验测试,结果显示:在喷射系统能够实现稳定喷射的情况下,电压值越小,胶点的体积越小;高电平时间越短,胶点的体积也越小;低电平时间不影响胶点体积。胶液黏度为 1 000 cps 时,可稳定地实现每秒喷射 143 个胶点,胶点的体积误差可控制在  $\pm 3.11\%$  以内。

#### 参考文献:

- [1] 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)
- [2] LI J P, DENG G L. Technology development and basic theory study of fluid dispensing-a review [C]. *Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP'04)*, Shanghai, China, CPMT, 2004:198-205.
- [3] 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,2013,20(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.*, 2013, 20(12):2744-2750. (in Chinese)
- [4] KUMAGAI K, FUCHIWAKI O. 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.
- [5] 赵翼翔,陈新度,陈新. 微电子封装中的流体点胶技术综述[J]. 液压与气动,2006(2):52-54.  
ZHAO Y X, CHEN X D, CHEN X. An overview of fluid dispensing technology for micro-electronics packaging [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*,

- 2006(2):52-54. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 陈丹儿,王小萍,王申,等. 压电式喷射点胶控制系统的电路设计[J]. 电子与封装, 2013(7): 20-24.  
CHEN D E, WANG X P, WANG SH, *et al.*. The circuit design of piezoelectric jetting dispensing control system [J]. *Electronics & Packaging*, 2013 (7): 20-24. (in Chinese)
- [8] SHU X Y, ZHANG H H, LIU H Y, *et al.*. Experimental study on high viscosity fluid micro-drop-let jetting system [J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2010, 53(1): 182-187.
- [9] 焦晓阳,刘建芳,谷峰春,等. 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: 工程科学版, 2013, 45(2): 193-198.  
JIAO X Y, LIU J F, GU F CH, *et al.*. Analysis and research on jetting ability of the jet dispensing valve driven by a piezostack [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2013, 45(2): 193-198. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] LU S Z, LIU Y X, YAO Y F, *et al.*. Bond-graph model of a piezostack driven jetting dispenser[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2014, 49: 193-202.
- [12] ADAMSON S J, WANG D. 非接触式喷射点胶——未来的点胶技术[J]. 半导体技术, 2004, 29(3): 67-70.  
ADAMSON S J, WANG D. A change in dispensing technology—jetting takes off [J]. *Semiconductor Technology*, 2004, 29(3): 67-70. (in Chinese)
- [13] QUINONES H, BABIARZ A, DECK C, *et al.*. Fluid jetting for next generation packages [Z]. Pac Tech, Berlin, 2002.
- [14] 陈立国,孙慧,孙立宁,等. 基于撞针原理的高粘性微喷系统的设计与分析[J]. 压电与声光, 2012, 34(3): 372-375.  
CHEN L G, SUN H, SUN L N, *et al.*. Design and analysis of slight-jet system based on firing pin principle for high viscosity adhesives [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2012, 34(3): 372-375. (in Chinese)
- [15] WANG L Y, DU J, LUO Z W, *et al.*. Design and Experiment of a Jetting Dispenser Driven by Piezostack Actuator [J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2013, 3(1): 147-156.
- [16] WANG L Y, DU X H, LI Y P, *et al.*. Simulation and experiment study on adhesive ejection behavior in jetting dispenser [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28(1): 53-64.
- [17] JEON J C, NGUYEN Q H, CHOI S B. The design and modeling of jetting dispenser actuated by dual piezostack actuator [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 433-435: 72-75.
- [18] 焦晓阳,刘建芳,丁宁宁,等. 压电气体混合驱动式喷射点胶阀的设计与实验[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(11): 1445-1449.  
JIAO X Y, LIU J F, DING N N, *et al.*. Design and experiment for the piezoelectric-gas hybrid driven jet dispensing valve [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2013, 34(11): 1445-1449. (in Chinese)
- [19] 杨志刚,刘登云,吴丽萍,等. 应用于压电叠堆泵的微位移放大机构[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 884-888.  
YANG ZH G, LIU D Y, WU L P, *et al.*. Micro-displacement magnifying mechanism used in piezostack pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 884-888. (in Chinese)
- [20] 刘建芳,杨志刚,范尊强,等. 压电直线精密驱动器研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(1): 65-72.  
LIU J F, YANG ZH G, FAN Z Q, *et al.*. Precise PZT linear step actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 65-72. (in Chinese)
- [21] 张涛,孙立宁,蔡鹤皋. 压电陶瓷基本特性研究[J]. 光学精密工程, 1998, 6(5): 26-32.  
ZHANG T, SUN L N, CAI H G. Study on the-

fundamental characteristics of piezoelectric element [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998,6(5): 26-32. (in Chinese)

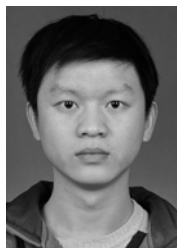
- [22] 杨兴, 贾振元, 郭东明, 等. 基于圆形膜片柔性结构的超磁致伸缩执行器的研究[J]. *中国机械工程*, 2002,13(6):474-477.

YANG X, JIA ZH Y, GUO D M, *et al.*. Study on

giant magnetostrictive actuator based on disk-shape diaphragm compliant structure [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002,13(6):474-477. (in Chinese)

- [23] NGUON B, JOUANEH M. Design and characterization of a precision fluid dispensing valve [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24(3-4): 251-260.

#### 作者简介:



顾守东(1990-),男,四川乐山人,博士研究生,2012年于南昌航空大学获得学士学位,主要从事智能与精密机械方面的研究。E-mail: 398729426@qq.com

#### 导师简介:



杨志刚(1956-),男,吉林长春人,教授,博士生导师,吉林大学链传动研究所所长,主要研究方向为压电驱动与控制技术、微小机械与精密机械和链传动。

#### 通讯简介:



刘建芳(1975-),男,吉林长春人,教授,博士生导师,主要研究方向为智能与精密机械,压电驱动与控制技术,电流及磁流变特性及其应用。E-mail: jfliu@jlu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)