

# 压电喷射点胶过程的神经网络控制与参数优化

程 龙, 陶为戈\*

江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年4月23日; 发布日期: 2026年4月30日

## 摘 要

针对微电子封装中小直径胶点喷射的需求, 本文基于压电驱动点胶阀的工作原理, 建立了撞针与喷嘴碰撞结构的二维几何模型, 并采用COMSOL多物理场软件对点胶过程中的胶液流动与喷射特性进行了数值仿真。研究系统分析了驱动气压、喷嘴锥角、出口内径及内侧间隙等参数对胶液流速变化的作用机理, 并进行了对比分析。仿真结果表明, 喷嘴结构参数对胶水喷射速度及胶点直径具有显著影响。为进一步提高点胶精度, 本文引入前馈神经网络算法, 对仿真结果进行了优化验证。该研究为压电式点胶阀设计优化及微小胶点制造提供了理论依据和技术参考。

## 关键词

压电喷射点胶, 神经网络控制, 喷嘴结构设计, COMSOL

# Neural Network Control and Parameter Optimization of Piezoelectric Jetting Dispensing Process

Long Cheng, Weige Tao\*

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou Jiangsu

Received: March 26, 2026; accepted: April 23, 2026; published: April 30, 2026

## Abstract

To address the demand for small-diameter adhesive dot jetting in microelectronic packaging, this paper establishes a two-dimensional geometric model of the collision structure between the striker pin and the nozzle based on the working principle of a piezoelectric-driven dispensing valve. COMSOL

\*通讯作者。

**multiphysics software is employed to perform numerical simulations of the adhesive flow and jetting characteristics during the dispensing process. The study systematically analyzes the mechanisms by which parameters such as driving air pressure, nozzle cone angle, outlet inner diameter, and inner clearance affect the variation in adhesive flow velocity, along with a comparative analysis. Simulation results indicate that nozzle structural parameters have a significant influence on the adhesive jetting velocity and dot diameter. To further improve dispensing accuracy, a feedforward neural network algorithm is introduced to optimize and validate the simulation results. This research provides a theoretical basis and technical reference for the design optimization of piezoelectric dispensing valves and the fabrication of micro-scale adhesive dots.**

## Keywords

**Piezoelectric Jetting Dispensing, Neural Network Control, Nozzle Structural Design, COMSOL**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代工业技术的快速进步, 电子封装产业已成为推动国民经济发展的关键支柱之一。当前, 从个人电子设备到汽车电子、再到航空航天与国防领域, 对电子产品提出了更高要求——不仅要具备高性能与多功能, 还需实现低成本、小型化与高可靠性。在这一发展趋势下, 能够实现精确涂覆与高效封装的点胶技术, 逐渐成为电子制造过程中的关键环节之一[1]。

点胶技术的核心在于将粘结剂准确、均匀地分配至指定位置, 以完成电子元器件的固定、封装及互连等功能。按照施胶方式的不同, 点胶技术主要分为接触式与非接触式两类[2]。接触式点胶依靠针头直接接触基板, 在压力作用下输送胶液; 而非接触式点胶则利用撞针对喷嘴的瞬时冲击, 将胶液喷射至基板表面[3]。相较而言, 非接触式点胶无需与基板直接接触, 能够有效减少机械磨损与污染问题, 同时具备更高的点胶速度与重复精度, 因此在微电子封装领域得到了广泛应用[4]。

近年来, 压电驱动技术的引入进一步提升了非接触式点胶的性能。由于压电陶瓷具有响应速度快、驱动力强及能量转换效率高等优点, 其与高速微量点胶的需求高度契合, 成为取代传统气动与液压点胶阀的重要发展方向[5]。在压电式点胶阀中, 压电陶瓷在外加电压的驱动下产生高频振动, 带动撞针周期性撞击喷嘴, 从而实现微小胶滴的快速喷射[6]。

然而, 点胶喷射过程涉及复杂的流体动力学行为。胶液在撞针冲击作用下会在喷嘴内腔中产生强烈的瞬态流动, 其运动状态受气压、流体黏度以及腔体体积变化等多因素耦合影响[7]。这一非线性过程难以通过解析模型精确描述, 因此有必要借助数值仿真手段进行研究。基于此, 本文结合压电驱动点胶阀的工作原理, 建立了撞针与喷嘴碰撞结构的二维几何模型, 并利用 COMSOL 多物理场仿真软件对点胶过程中胶液的流动与喷射特性进行了数值模拟[8]。通过分析驱动气压、喷嘴几何参数及内腔间隙等因素对喷射速度与胶点尺寸的影响规律, 为压电式点胶阀的结构优化与小直径胶点制造提供了理论依据与技术参考[9]。

为了进一步提升点胶精度并优化点胶过程的控制效果, 本文引入了前馈神经网络算法[10]。通过与传统 PID 控制方法的对比, FNN 在处理复杂的非线性问题时表现出更高的精度, 能够更有效地控制喷射速度与胶点直径, 从而为点胶阀的优化设计提供了更为精确的技术支持[11]。

## 2. 流体动力学分析

在喷射点胶过程中, 胶液在密闭的阀腔内经历着高度复杂的流体动力学运动。撞针的往复撞击会使胶液在腔体内部产生快速且无规则的流动。然而, 这一过程虽然表现出非定常和随机特征, 但胶液的流动仍需严格遵循质量守恒、动量守恒及能量守恒等基本物理定律。其中, 质量守恒定律主要说明, 在任意微小单元内, 单位时间内流入与流出的流体质量应保持相等, 即系统在流动过程中不会出现质量的损失或积累。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中,  $(u, v, w)$  分别是速度沿 3 个方向  $(x, y, z)$  的矢量分量。

由于撞针的运动是线性加速的, 胶液在撞针挤压下的流动过程保持连续且一致。同时, 胶液流动过程中涉及的所有场变量, 如压力、速度、密度和温度等, 均为可微分的。根据质量、动量和能量守恒的基本原理, 可以推导出纳维-斯托克斯(N-S)方程。因此, 胶液的流体动力学行为可以通过相应的数学微分方程进行描述。

$$\frac{du_x}{d\tau} = f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{du_y}{d\tau} = f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{du_z}{d\tau} = f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

式中,  $(u, v, w)$  分别是速度沿 3 个方向  $(x, y, z)$  的矢量分量;  $(f_x, f_y, f_z)$  分别是微单元所受的外力;  $\rho$  是胶液流体密度。

假设流动过程为不可压缩流动, 则可以忽略能量方程, 直接求解流动方程。显然, (N-S)方程是一个非线性的偏微分方程组, 解析解的求解非常复杂, 通常只有在特定条件下才有可能求得解析解。大多数情况下, 我们无法通过解析方法直接得到位置参数以及三维方向  $(x, y, z)$  的速度矢量和压力 P 值。此外, 在撞针挤压胶液时, 密闭腔体的体积发生变化, 这使得微分方程的解析解更难求得。COMSOL 软件通过有限元法离散化微分方程组, 并利用数值计算求解这些方程, 通过迭代计算最终得到所有未知参数的数值解。

## 3. 数值分析模型建立与验证

本研究针对压电式点胶阀驱动的喷射点胶装置中撞针与喷嘴的碰撞结构, 建立了二维数值仿真模型, 如图 1 所示, 其中灰色部分为喷嘴、黑色部分为撞针和白色部分为胶液。每个喷射周期中, 撞针经历两个关键的运动阶段: 碰撞阶段和分离阶段。在碰撞阶段, 撞针与喷嘴紧密贴合, 并在接触处形成接触线。撞针撞击喷嘴后停止运动, 接着进入分离阶段, 撞针开始向远离喷嘴口的方向运动, 并在碰撞到限位块后停止回撤。回撤过程中, 撞针产生的局部瞬时真空效应促使胶液迅速补充至该区域, 为下一个喷射周期做准备。此时喷嘴停止出胶, 确保每个喷射周期的稳定性与连续性。

为了提高分析的精度并划分规则形状的网络, 本研究对碰撞结构进行了适当的简化, 并在 COMSOL 中创建了几何模型进行数值仿真。考虑到撞针与喷嘴碰撞过程中流体密闭内腔的体积是动态变化的, 使用了 COMSOL 中的流体-结构耦合模块来模拟流体的动力学特性和结构的相互作用。该模块能够处理因撞针运动而导致的流体边界变化, 尤其在分离阶段形成的瞬时真空对胶液流动产生的影响。



Figure 1. Schematic diagram of the jetting model  
图 1. 喷射模型示意图

## 4. 仿真结果及分析

### 4.1. 驱动气压对点胶性能的影响

在仿真分析驱动气压对点胶性能的影响规律时,首先在软件 COMSOL 中建立仿真模型。由于此次仿真主要研究胶液的流动状态,故仅对喷嘴内侧与撞针外侧间的胶液区域进行建模。此外,胶液黏度设置为 2000 cps,撞针位移为 180  $\mu\text{m}$ ,撞针振动频率为 100 Hz。

当在流体入口处施加 0.8 MPa 的气压 P1,出口处定义相对压力 P0 为 0 MPa 时,仿真得到其点胶性能分布云图如图 2 所示。速度分布呈现明显的梯度变化,最大流速为 10.3 m/s,如图 2(a)所示。当胶液自喷嘴喷射进入空气后,胶滴直径为 0.44 mm,其体积分数分布情况如图 2(b)所示,其中体积分数 0~1 表示单位体积内无胶液存在(完全为空气)至单位体积内充满胶液。

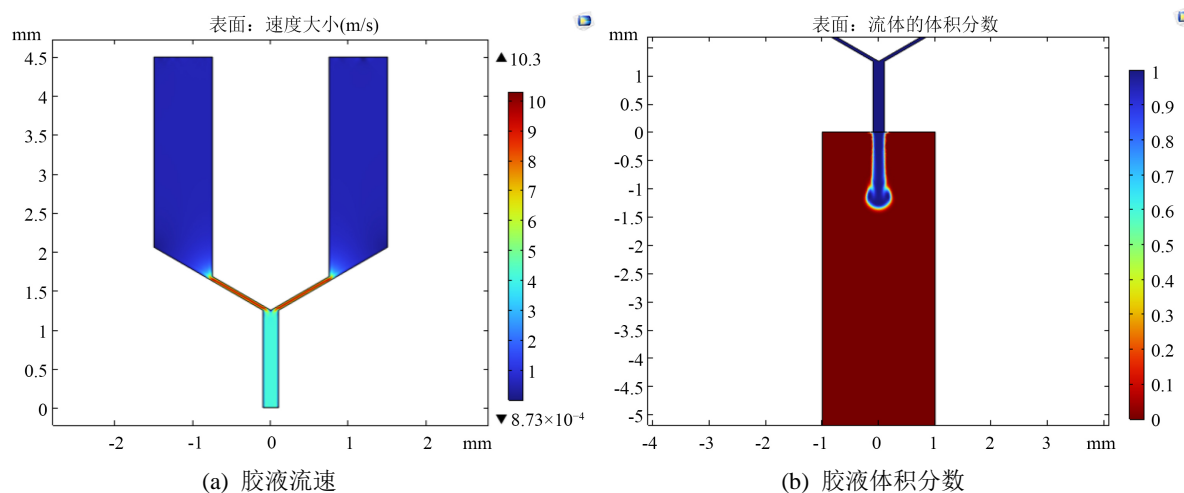


Figure 2. Distribution contour maps of dispensing performance  
图 2. 点胶性能分布云图

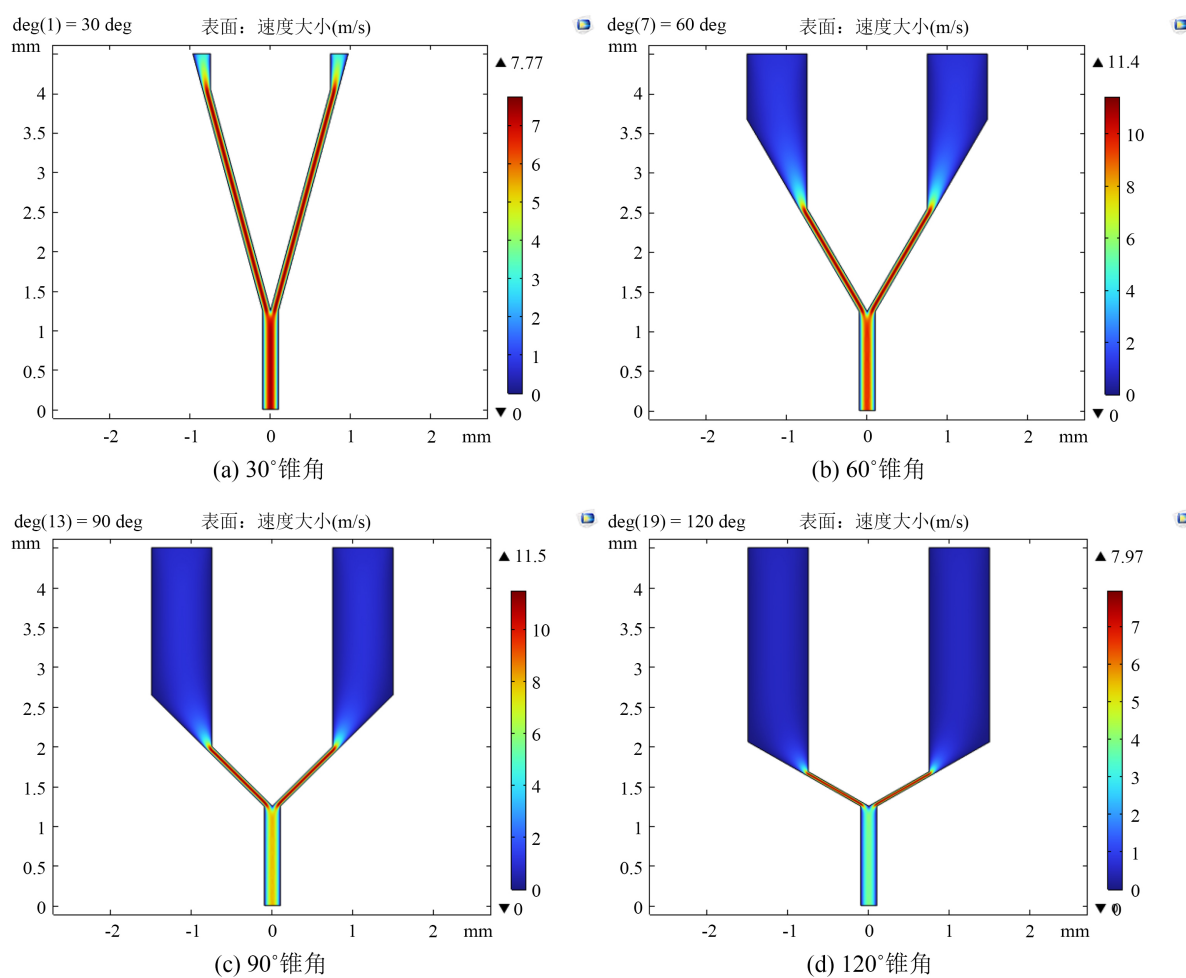
为了探究驱动压力对点胶性能的影响,在保持其他条件不变的前提下,分别求解 P1 为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 MPa 时胶液的出口流速与胶滴直径。

由表 1 可知,胶液出口流速和胶滴直径都随驱动压力增大而增大,其中流速的变化斜率基本一致。分析其原因为,当驱动气压增大时,流体入口处获得的初速度随之增大,从而使喷嘴出口处流速恒定增大;同时,喷嘴内胶液流入量随压力而增大,使得喷射出的胶滴直径增大。

**Table 1.** Relationship between outlet flow velocity, adhesive droplet diameter, and driving pressure**表 1.** 出口流速、胶滴直径和驱动压力关系

驱动压力(MPa)	出口流速(m/s)	胶滴直径(mm)
0.2	2.45	0.18
0.3	3.08	0.25
0.4	3.46	0.29
0.5	3.88	0.33
0.6	4.26	0.36
0.7	4.61	0.40
0.8	4.90	0.44

#### 4.2. 喷嘴锥角对点胶性能的影响

**Figure 3.** Adhesive flow velocity contour maps for various cone angles**图 3.** 各锥角对应胶液流速云图

与上一节仿真分析方法相同,以流体区域为仿真模型,在软件 COMSOL 中设置胶液黏度为 2000 cps,驱动气压为 0.8 MPa,撞针位移为 180  $\mu\text{m}$ ,撞针振动频率为 100 Hz,环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。模型中撞针直径为 1.5 mm,喷嘴出口直径为 0.2 mm,撞针与喷嘴的间隙为 0.75 mm。分析当喷嘴锥角为 30 $^{\circ}$ 到 120 $^{\circ}$ 时胶液流速分布情况,由图 3 可知,四种锥角状态下胶液最大流速分别为 7.77 m/s、11.4 m/s、11.5 m/s、7.97 m/s。为进一步分析锥角与流速的关系,在锥角为 30 $^{\circ}$ ~120 $^{\circ}$ 间,每 10 $^{\circ}$ 作为数据计算点,如表 2 所示。

由表 2 可知,各锥角与胶液流速之间存在显著的非线性关系。具体来看,在锥角从 30 $^{\circ}$ 到 60 $^{\circ}$ 的范围内,胶液流速逐渐增加,从 7.51 m/s 提升至 9.72 m/s。这表明,在较小的锥角下,胶液流动相对缓慢,随着锥角增大,胶液流动加快,流速提升。然而,当锥角超过 60 $^{\circ}$ 时,胶液流速开始下降,直至 120 $^{\circ}$ 时降至 4.02 m/s。流速的下降与过大锥角导致的流动阻力增加有关,过大的锥角引发流动分离或湍流的加强,从而抑制流速。这一趋势表明,锥角对胶液流速的影响具有临界性:适度增加锥角可提升胶液流速,但在超过一定角度后,流速会迅速下降。因此,在实际应用中,选择合适的锥角对于优化胶液流速至关重要。

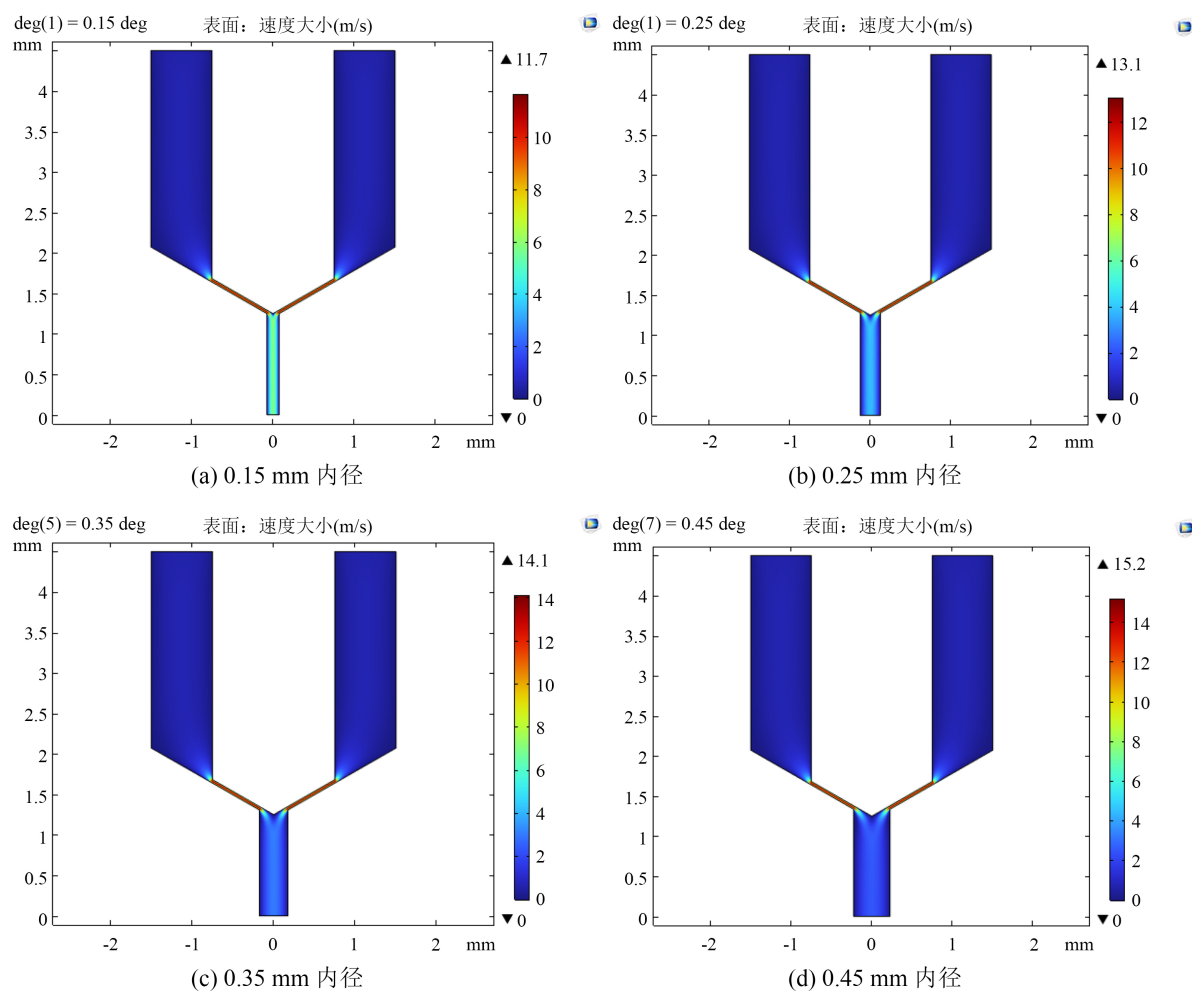
**Table 2.** Relationship between cone angle and adhesive outlet flow velocity  
**表 2.** 锥角与胶液出口流速关系

锥角(度)	出口流速(m/s)
30	7.51
40	8.82
50	9.51
60	9.72
70	9.51
80	9.02
90	8.12
100	6.83
110	5.41
120	4.02

### 4.3. 喷嘴出口内径对点胶性能的影响

与上一小节仿真模型的驱动条件相同,此外,设置撞针直径为 1.5 mm,撞针与喷嘴的间隙为 0.75 mm,喷嘴锥角为 120 $^{\circ}$ 。分析当出口内径为 0.15 mm、0.25 mm、0.35 mm、0.45 mm 时胶液流速分布情况,图 4 中展示了在不同喷嘴出口内径条件下的点胶流场速度分布。结果表明,随着喷嘴出口内径的增大,流场整体的最高速度逐渐升高,分别为 11.7 m/s、13.1 m/s、14.1 m/s 和 15.2 m/s。由此可见,喷嘴出口尺寸对点胶过程中流体的运动特性具有显著影响。

当喷嘴内径较小时,流体在狭窄通道中受到较大的黏性阻力,导致流场整体流速偏低,且高速度区域主要集中在喷嘴轴心附近,速度梯度较大。随着喷嘴内径的增大,流体通道阻力减小,流动更加顺畅,高速区域范围明显扩大,速度分布趋于均匀。此时流体的动能得以充分释放,整体流场能量水平提升。



**Figure 4.** Adhesive flow velocity contour maps for various inner diameters

**图 4.** 各内径对应胶液流速云图

**Table 3.** Relationship between outlet inner diameter and adhesive outlet flow velocity

**表 3.** 出口内径与胶液出口流速关系

出口内径(mm)	出口流速(m/s)
0.15	5.81
0.20	4.62
0.25	3.91
0.30	3.42
0.35	3.03
0.40	2.71
0.45	2.52

表 3 展示了出口内径与胶液出口流速之间的对应关系。从数据可以看出, 随着出口内径的增大, 胶液的出口流速逐渐减小, 呈明显的负相关趋势。当出口内径为 0.15 mm 时, 流速最高, 为 5.81 m/s; 而当

内径增大至 0.45 mm 时, 流速降至 2.52 m/s。这说明在一定驱动压力下, 喷嘴出口越小, 流体的速度越高, 这是由于流体在狭窄通道中受限, 动能集中所致。

这种规律符合流体力学原理: 当流体通过较小截面时, 流速会因连续性方程的约束而提高。较小的出口内径会导致更高的喷射速度, 但同时可能增加局部压降与剪切应力。因此, 在喷嘴设计时, 应综合考虑喷射速度需求与流体稳定性, 确保在保证流量的同时, 实现最佳喷射效果。

#### 4.4. 喷嘴内侧间隙对点胶性能的影响

在软件 COMSOL 中保持驱动条件不变, 定义撞针直径为 1.5 mm, 喷嘴出口内径为 0.2 mm, 喷嘴锥角为 120°。分析当喷嘴内侧间隙为 0.24 mm、0.6 mm、0.96 mm、1.2 mm 时胶液流速分布情况, 由图 5 可知, 其最大流速分别为 9.5 m/s、8.71 m/s、7.99 m/s、7.68 m/s。进一步分析当喷嘴内侧与撞针外侧的间隙为 0.24~1.2 mm 时胶液的最大流速, 每 0.12 mm 作为数据计算点, 其结果如表 4 所示。

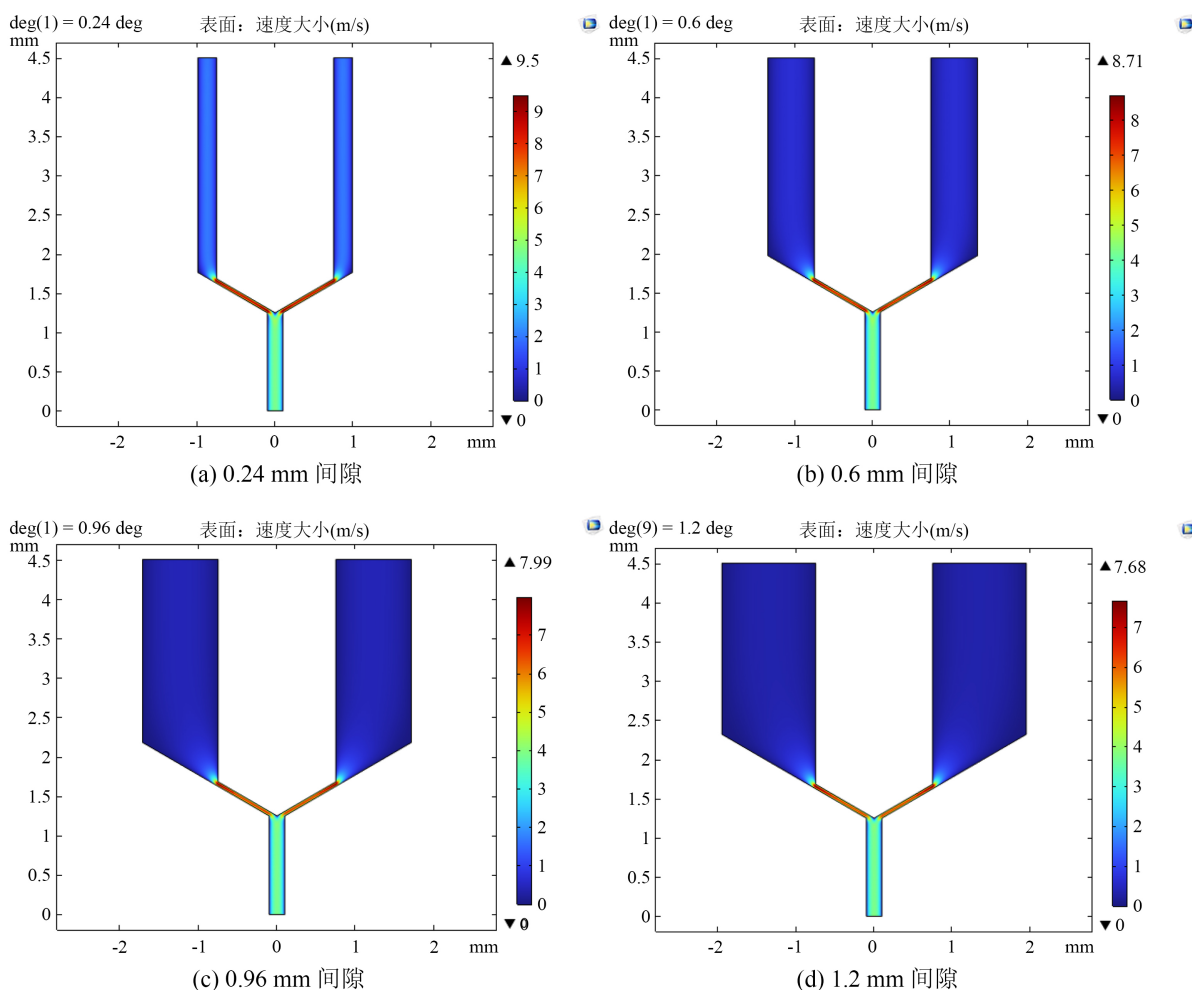


Figure 5. Adhesive flow velocity contour maps for various inner clearances

图 5. 各间隙对应胶液流速云图

当间隙较小时, 速度梯度增大, 流体在单位面积上的剪切应力也随之增加, 从而导致流速较高。因此, 在选择不同尺寸的撞针时, 喷嘴应确保腔内供胶量充足的同时, 适当缩小内侧间隙, 以提高喷射速度。

**Table 4.** Relationship between inner clearance and adhesive outlet flow velocity  
**表 4.** 间隙与胶液出口流速关系

间隙(mm)	出口流速(m/s)
0.24	6.22
0.36	5.81
0.48	5.52
0.60	5.13
0.72	4.72
0.84	4.32
0.96	4.01
1.08	3.63
1.20	3.21

#### 4.5. 关键参数正交试验分析

前述各节已分别讨论了驱动气压、喷嘴锥角、出口内径及内侧间隙对胶液流速的单因素影响规律。然而, 实际点胶过程中上述参数并非孤立作用, 各参数之间存在一定的耦合效应。为初步探讨关键参数(锥角、出口内径、驱动气压)间的交互作用, 本节设计了三因素三水平  $L_9(3^3)$  正交试验, 系统考察各因素及其组合对出口流速的综合影响, 为喷嘴结构的协同优化提供更具系统性的理论依据。

**Table 5.** Orthogonal experiment results for key parameters  
**表 5.** 关键参数正交试验结果

试验号	锥角(°)	出口内径(mm)	驱动气压(MPa)	出口流速(m/s)
1	50	0.15	0.4	8.23
2	50	0.20	0.6	7.51
3	50	0.25	0.8	7.84
4	60	0.15	0.6	11.85
5	60	0.20	0.8	10.92
6	60	0.25	0.4	6.43
7	70	0.15	0.8	10.72
8	70	0.20	0.4	7.68
9	70	0.25	0.6	6.12
K1	7.86	10.27	7.45	—
K2	9.73	8.70	8.49	—
K3	8.17	6.80	9.83	—
极差 R	1.87	3.47	2.38	—

正交试验选取三个主控因素：因素 A 为喷嘴锥角，取水平 50°、60°、70°；因素 B 为喷嘴出口内径，取水平 0.15 mm、0.20 mm、0.25 mm；因素 C 为驱动气压，取水平 0.4 MPa、0.6 MPa、0.8 MPa。其余参数与前述仿真保持一致，包括胶液黏度 2000 cps、撞针位移 180 μm、振动频率 100 Hz。各仿真试验工况及对应的出口流速结果如表 5 所示，其中 K1、K2、K3 分别代表各因素在三个水平下对应流速的均值，极差 R 反映该因素对流速影响的显著程度。

由表 5 的极差分析可知，三个因素对出口流速的影响主次顺序为：B (出口内径) > C (驱动气压) > A (锥角)，极差值分别为 3.47、2.38 和 1.87。这表明喷嘴出口内径是影响胶液出口流速的最显著因素，驱动气压次之，锥角的单独影响相对较小。最优参数组合为 A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>，即锥角 60°、出口内径 0.15 mm、驱动气压 0.8 MPa，该条件下预测出口流速最高。上述结果与单因素仿真分析的结论相吻合，但进一步表明了各参数间存在明显的非线性耦合关系：例如在出口内径较小(0.15 mm)时，锥角从 50°增至 60°导致流速显著提升(8.23→11.85 m/s)，但在出口内径较大(0.25 mm)条件下，该提升效果受到明显抑制(7.84→6.43 m/s)。这一交互效应说明，在实际喷嘴设计优化时，不能简单地叠加单因素最优值，而需综合考虑参数组合的整体效果。

## 5. 神经网络算法验证

### 5.1. 建立神经网络控制模型

为进一步验证数值仿真结果的准确性并实现点胶性能的快速控制，本文引入前馈神经网络模型，对驱动气压、喷嘴锥角、喷嘴出口内径及喷嘴间隙四个主要影响参数进行建模与控制分析。该方法可实现从结构参数到喷射性能指标(喷射速度、胶滴直径)的非线性映射，克服传统数值仿真计算量大、计算周期长的局限性。

利用多层 BP 神经网络算法的前馈神经网络称为 BP 神经网络。BP 神经网络学习算法分为 2 个步骤：(1) 信息的正向传播。信息通过输入层到隐含层，最终到输出层，若输出值满足期望值要求，学习训练结束，输出结果值。(2) 误差的反馈调节。若输出值不满足期望值要求，误差信号会进行反馈，在线修改 BP 神经网络权值，减少输出误差。

使用 3 层 BP 神经网络结构作为系统控制算法，如图 6 所示。

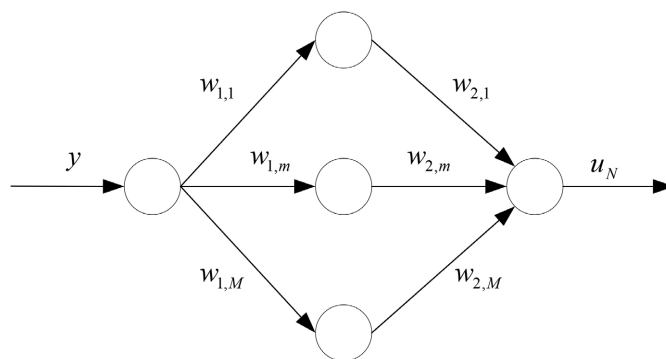


Figure 6. BP neural network structure  
图 6. BP 神经网络结构

假设 BP 神经网络结构  $n$  层的输入值为  $net^{(n)}$ ，输出值为  $out^{(n)}$ 。将输入值导入输入层，定义为：

$$out^{(1)} = net^{(1)} = y \quad (5)$$

隐含层采用激励函数 Sigmoid 得到:

$$net_i^{(2)} = out^{(1)} w_{1,i} \quad (6)$$

$$out_i^{(2)} = \frac{1}{\left(1 + \exp\left(-\kappa \cdot net_i^{(2)}\right)\right)} \quad (7)$$

式中  $w_{1,i}$  为输入层和隐含层之间第  $i$  节点的权值;  $\kappa$  为常数因子。

采用线性加权得到:

$$net^{(3)} = \sum_{i=1}^M out_i^{(2)} \cdot w_{2,i} \quad (8)$$

$$out^{(3)} = net^{(3)} \quad (9)$$

式中  $w_{2,i}$  为隐含层和输出层之间第  $i$  节点的权值。

本文所构建的前馈神经网络(FNN)采用三层 BP 结构: 输入层、单隐含层和输出层。输入层共 4 个神经元, 分别对应驱动气压( $P$ , 单位 MPa)、喷嘴锥角( $\theta$ , 单位 $^\circ$ )、出口内径( $d$ , 单位 mm)和内侧间隙( $g$ , 单位 mm)四个结构与驱动参数; 输出层共 2 个神经元, 分别对应胶液出口流速( $v$ , 单位 m/s)和胶滴直径( $D$ , 单位 mm)。

隐含层神经元数目根据公式:

$$n = \sqrt{n_{in} + n_{out}} + \alpha \quad (10)$$

式中,  $n_{in}$  为输入层神经元数量,  $n_{out}$  为输出层神经元数量,  $\alpha$  为 1~10 之间的调节常数。对于本研究,  $n_{in} = 3$ ,  $n_{out} = 1$ , 综合考虑网络的拟合能力和泛化性能, 最终确定隐藏层神经元数量为 10。

隐含层激活函数采用 Sigmoid 函数, 输出层采用线性激活函数, 以适应连续数值的回归预测任务。网络拓扑结构为 4-10-2, 可记为输入层维度 4, 隐层维度 10, 输出层维度 2。

本文训练数据集完全来源于上述 COMSOL 多物理场仿真结果。通过系统变化四个参数(驱动气压、喷嘴锥角、出口内径、内侧间隙)在各自物理约束范围内的取值, 共生成 240 组仿真样本。其中, 驱动气压在 0.2~0.8 MPa 范围内均匀采样 7 个水平, 锥角在  $30^\circ$ ~ $120^\circ$  范围内采样 10 个水平, 出口内径在 0.15~0.45 mm 范围内采样 7 个水平, 内侧间隙在 0.24~1.20 mm 范围内采样 9 个水平; 通过参数组合设计确保数据覆盖参数空间的主要区域, 并额外在物理边界附近加密采样以提升模型在极值区域的预测精度。数据集按 7:1.5:1.5 比例随机划分为训练集(168 组)、验证集(36 组)和测试集(36 组), 各子集之间不存在重叠。所有输入特征和输出目标在送入网络前均进行归一化处理, 采用最小 - 最大归一化方法将数值映射至[0, 1] 区间, 以消除量纲差异对收敛速度的影响。

神经网络的训练与测试基于 Python 3.9 环境, 采用 TensorFlow 2.8 框架实现。优化算法选用自适应矩估计(Adam)优化器, 初始学习率设为 0.001, 并配置学习率衰减策略(每 50 轮衰减至原来的 0.9 倍), 以保证训练后期的精细调优。损失函数采用均方误差(MSE)。网络共训练 500 个 epoch, 批次大小(batch size) 设为 32。为防止过拟合, 训练过程中采用早停策略(Early Stopping), 当验证集损失连续 50 轮不再降低时终止训练; 同时在隐含层加入 Dropout 正则化(丢弃率为 0.1)。训练过程中监控训练损失与验证损失的动态变化, 以诊断是否出现过拟合现象。

为全面评估 FNN 的预测性能, 本文在测试集上采用多种指标进行评价, 包括均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)和决定系数( $R^2$ )。各参数条件下 FNN 在测试集上的具体性能指标如表 6 所示。总体

而言, RMSE 均低于 0.025 m/s, MAE 均低于 0.02 m/s,  $R^2$  均高于 0.999, 表明 FNN 模型对各参数条件下胶液出口流速的预测精度极高, 能够有效捕捉参数空间内复杂的非线性映射关系。

**Table 6.** FNN performance metrics on test dataset  
**表 6.** FNN 模型在测试集上的性能评估指标

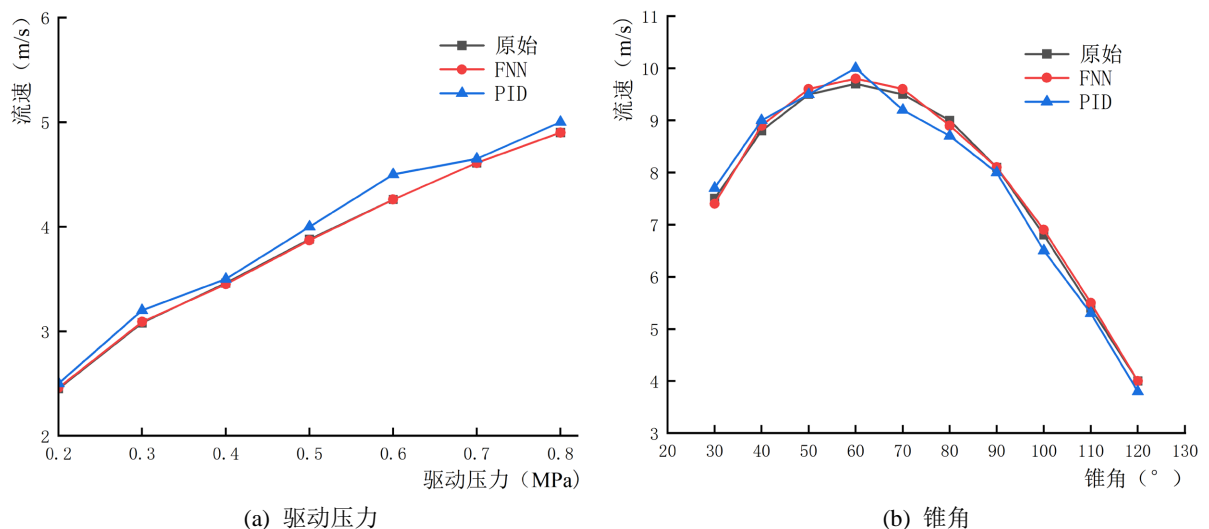
性能指标	驱动气压	锥角	出口内径	内侧间隙
RMSE (m/s)	0.018	0.009	0.016	0.024
MAE (m/s)	0.013	0.007	0.012	0.019
$R^2$	0.9997	0.9999	0.9998	0.9996
相对误差(%)	0.2	0.1	0.2	0.3

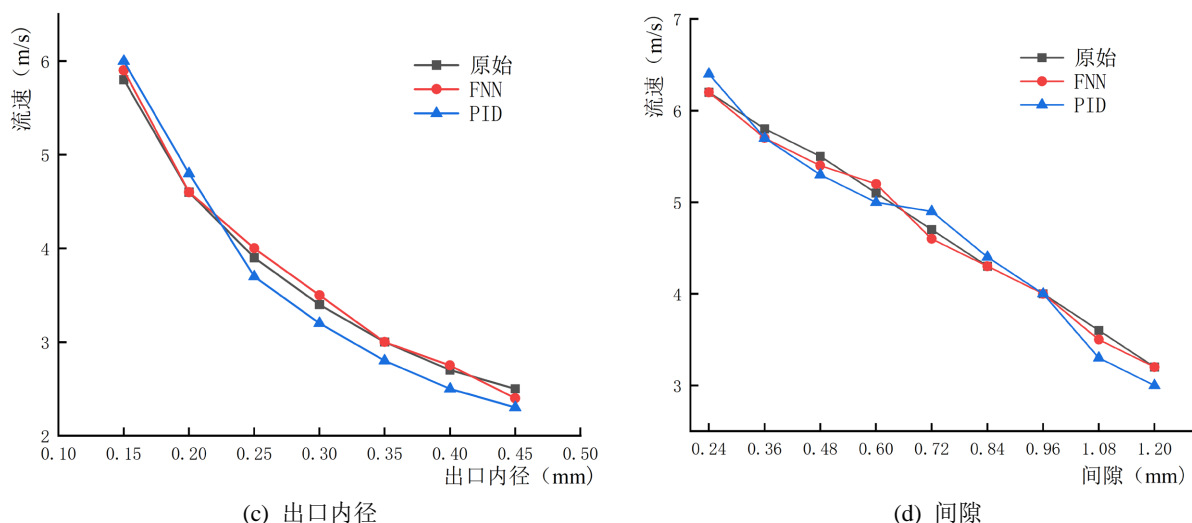
需要特别说明的是, 本文中 FNN 所扮演的角色为离线代理预测模型(Offline Surrogate Model), 而非实时在线控制器。具体而言, 在离线阶段, FNN 通过大量仿真数据训练完成, 形成从结构参数到喷射性能的高精度映射函数; 在点胶阀设计与调试阶段, 工程师可将待评估的参数组合输入训练好的 FNN 模型, 实现对喷射速度和胶滴直径的毫秒级快速预测, 从而代替耗时的 COMSOL 仿真, 大幅缩短设计迭代周期。若未来需要将 FNN 部署为实时控制器, 则需进一步结合传感器反馈信号(如实时胶滴直径视觉测量), 建立闭环控制架构, 此方向将作为后续研究的重点内容。

## 5.2. 神经网络控制结果及对比分析

通过比较前馈神经网络(FNN)和 PID 控制方法在驱动气压、喷嘴锥角、喷嘴出口内径及喷嘴间隙下的流速结果, 如图 7 所示, 可以得出以下结论:

首先, 驱动压力与流速呈正相关, FNN 模型的流速控制高于 PID 模型, FNN 的相对误差为 0.2%, PID 的相对误差为 3.0%, 因此 FNN 模型比 PID 模型的控制精度高出 2.8%。其次, 角度与流速的关系呈非线性, FNN 模型的相对误差为 0.1%, 而 PID 模型为 5.1%, FNN 模型的控制精度比 PID 高出 5.0%。对于出口直径, FNN 模型的相对误差为 0.2%, PID 模型为 3.2%, FNN 比 PID 的控制精度高出 3.0%。最后, 半径与流速呈反比关系, FNN 的相对误差为 0.3%, 而 PID 为 3.6%, FNN 模型比 PID 高出 3.3%。





**Figure 7.** Comparison diagram of FNN and PID algorithms  
**图 7.** FNN 与 PID 算法对比图

## 6. 结论

本研究系统地分析了驱动气压、喷嘴锥角、喷嘴出口内径及喷嘴内侧间隙对点胶性能的影响, 并通过数值仿真结果深入探讨了这些参数对胶液流速和胶滴直径的显著作用。研究表明, 驱动气压的增大、喷嘴锥角的适度调整、出口内径的合理选择以及喷嘴内侧间隙的优化, 都对点胶过程中的流速和喷射精度产生重要影响。同时, 前馈神经网络算法的引入有效提高了点胶性能的控制精度, 相比传统的 PID 控制方法, FNN 模型在控制精度上表现出显著优势, 尤其在处理非线性和复杂条件下。

本研究的成果为微电子封装中小直径胶点喷射工艺的优化和点胶阀设计提供了重要的理论依据和技术参考, 尤其是在提高控制精度和优化喷射过程方面具有较大的应用潜力。未来的研究可进一步结合实验数据验证数值仿真结果, 并探索更多因素对点胶性能的影响, 以推动微电子封装技术的持续发展与创新。

## 参考文献

- [1] 王志, 秦苏琼, 谭伟. 用于微电子封装的电子胶粘剂及其涂覆工艺[J]. 电子工业专用设备, 2019, 48(1): 11-16.
- [2] 焦晓阳. 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.
- [3] Du, B., Liu, F., Cui, H., Wang, J., Zhou, M., Huang, X., *et al.* (2024) Research on Adhesive Quality Control Based on Piezoelectric Dispensing Valve. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **71**, 912-921. <https://doi.org/10.1109/tie.2023.3241390>
- [4] Borghetti, M., Nicolosi, V., Sardini, E., Serpelloni, M. and Spurling, D. (2024) Optimization of Piezo-Driven Jet Valve Dispensing Process for the Geometrical Control of Printed Sensors Based on Silver and Mxene Inks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **73**, 1-11. <https://doi.org/10.1109/tim.2023.3331397>
- [5] Facon, M., Rharbi, Y., Batocchi, P., Magnin, A. and El Kissi, N. (2025) Droplet and Jet Morphologies Using Solenoid Microvalves for Controlled Fluid Dispensing. *Chemical Engineering Science*, **318**, Article 122118. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.122118>
- [6] Nguyen, D., Fang, T., Fan, Y., Huang, C. and Lin, C. (2023) Influence of Control Parameters on Accuracy and Reliability of the Jet-Dispensing Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **129**, 3713-3722. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12537-0>
- [7] Bilski, J., Smola, J., Kowalczyk, B., Grzanek, K. and Izonin, I. (2023) Fast Computational Approach to the Levenberg-Marquardt Algorithm for Training Feedforward Neural Networks. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, **13**, 45-61. <https://doi.org/10.2478/jaiscr-2023-0006>

- [8] Yuan, Z., Zhou, S., Zhang, Z., Xiao, Z., Hong, C., Chen, X., *et al.* (2024) Piezo-Actuated Smart Mechatronic Systems: Nonlinear Modeling, Identification, and Control. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **221**, Article 111715. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111715>
- [9] Zhu, D., Liu, H., Luo, H., Sun, S. and Chen, J. (2020) Tetragonal Phase and Enhanced Depolarization Temperature in Ba-Rich (Bi,Na)TiO<sub>3</sub>-BaTiO<sub>3</sub> Lead-Free Piezoelectrics. *Ceramics International*, **46**, 3708-3714. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.091>
- [10] Li, R., Zhou, Z., Shen, Z., Li, Y., Xia, X., Shi, X., *et al.* (2025) The Influence of Zr/Ti Variation and Defect Dipoles on the Piezoelectric Properties of PMS-PZT Ceramics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **36**, Article No. 492. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-14577-6>
- [11] 杨倩. 微机电系统的非线性动力分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.