

摘要

电流体动力喷印技术是利用电场力驱动喷头内墨水,产生微米级甚至是纳米级的射流来打印柔性电子元件、精密传感器件等微纳器件,具有高分辨率、低成本、可控性强等优势。电流体动力喷印过程中的锥射流成型稳定性与物料属性、操作参数及结构参数等诸多因素有关,但是建立揭示各个工艺参数对锥射流稳定性的影响规律的数学模型仍具有挑战。因此,探索各工艺参数对锥射流成型及稳定性的影响,构建准确的数学模型以预测稳定的锥射流成型条件具有重要价值。本研究首次提出以弯月面高度与泰勒锥半锥角为评判锥射流成型的指标,结合 BP 神经网络算法与遗传算法构建锥射流成型的神经网络预测模型。课题从电流体动力喷印过程中的锥射流成型机理分析、数值仿真模拟、模型构建与实验研究四个方面开展研究,主要研究内容与结论如下:

(1) 深入分析了电流体动力喷印中锥射流成型机理与运用神经网络建立预测模型的方法。分析了射流过程中泰勒锥的形成过程及受力情况,详细描述了泰勒锥顶端产生锥射流的过程;从临界电压和临界等效流量的角度说明了锥射流成型必要条件及影响规律;介绍了构建人工神经网络预测模型的方法,通过结合神经网络算法与遗传算法,有效避免陷入局部最小值的问题。

(2) 建立“喷头-基板”模型,并通过数值模拟对电喷印的关键表征参数进行模拟仿真分析。以优化设计的“喷头-基板”模型代替传统复杂的电喷印模型,有效节约了计算资源,缩短了模拟时间;泰勒锥产生内部回流,边缘速度明显高于内部速度,喷嘴出口处液面高度产生变化,产生锥射流。通过数值模拟方法,探究工作电压、工作距离、喷头内径与打印墨水电导率对锥射流成型的影响规律。

(3) 设计电流体动力喷印实验平台并开展验证性实验研究。搭建电流体动力喷印实验平台,配置不同电导率的打印墨水进行电流体动力喷印实验。通过图像处理方法提取泰勒锥边缘参数,提出以弯月面高度与泰勒锥半锥角作为是否产生稳定锥射流的评价指标。研究表明,在电导率为 $4\ \mu\text{S}/\text{cm}$,工作电压为 $5\ \text{kV}$,工作距离为 $2.0\ \text{mm}$ 条件下,使用 25G (内径为 $0.25\ \text{mm}$) 不锈钢点胶喷头时,最易形成稳定的锥射流。

(4) 基于神经网络算法构建高准确率、低损失的锥射流成型预测模型。构建 BP 神经网络模型并进行模型训练,在最佳超参数下模型的准确率为 91.52% 。运用遗传算法优化 BP 神经网络模型,模型的准确率提升至 94.35% 。在测试集上对 BPNN 模型与 GANN 模型进行测试, GANN 模型在测试集准确率为 94.3% ,显著高于 BPNN 模型的 89.1% 。

本课题通过机理分析、数值模拟与实验研究,探究了墨水电导率、工作距离、工作电压与喷头尺寸对锥射流成型的影响规律,并创新性地结合了 BP 神经网络算法与遗传算法构建了锥射流成型预测模型,准确预测不同参数下锥射流成型情况。研究结果表明,本课题构建的 GANN 模型,能够有效预测不同参数条件下的锥射流成型情况,避免了大量的数值模拟与重复性实验研究工作,有望在微纳米精密制造领域得到推广应用。

关键词: 电流体动力喷印、泰勒锥、锥射流、神经网络算法、遗传算法

Abstract

Electrohydrodynamic printing technology is defined as the process of utilizing printing ink driven by electric field force to generate micro/nano-scale jets to print flexible electronic components, precision sensors, and other micro/nano-scale devices, with the advantages of high resolution, low cost and strong controllability. The stability of the electrohydrodynamic jet forming was affected by ink properties, working voltage, working distance, nozzle size and many other factors, and could be featured by the bending moon surface height and the half angle of Taylor cone. However, an accurate analytical model has not been established to describe the stability of the cone jet process. Therefore, the influence law of process parameters on the bending moon surface height and half angle of Taylor cone in the cone jet process was worth studying, and an accurate analytical model to predict the bending moon surface height and half angle of Taylor cone was established in order to evaluate the stability of the cone jet. In this paper, a stable cone jet prediction model based on backpropagation neural network and genetic algorithm was proposed to judge the stability of cone jet molding by the bending moon surface height and the half cone angle of Taylor cone for the first time. The cone jet mechanism analysis, numerical simulation, experimental research and model building of electrohydrodynamic printing were researched. The main research contents and conclusions were as follows:

(1) The forming mechanism of cone jet in electrohydrodynamic jet printing was analyzed, and the method of building prediction model by neural network was presented. The forming process and force of Taylor cone were analyzed, and the process of appearing cone jet at the top of Taylor cone is described in detail. The necessary conditions and influence laws of cone jet forming were explained from the perspectives of critical voltage and critical equivalent flow rate. The method of training the model by artificial neural network was introduced, and genetic algorithm was applied to optimize the artificial neural network for global optimization to improve the model prediction accuracy.

(2) The key characterization parameters of electrohydrodynamic printing were simulated by the model of "nozzle-substrate". The "nozzle-substrate" model was optimized design to replace the traditional complex model of electrohydrodynamic printing, and effectively saved computing resources and shortens the simulation time. Taylor cone produced internal reflux, and the edge velocity was higher than the internal velocity which would cause a cone jet. Numerical simulations were carried out to investigate the effects of working voltage, working distance, nozzle inner diameter and print ink conductivity on jet forming.

(3) The electrohydrodynamic printing experimental platform was designed to carry out validation experiments. The electrohydrodynamic printing experiment platform was built to carry out the electrohydrodynamic printing experiment by using different conductivity ink. The parameters of Taylor cone edge were extracted by image processing method. The bending moon surface height and half cone Angle of Taylor cone were proposed as evaluation indexes for generating stable cone jet. Under the conditions of conductivity of 4 $\mu\text{S}/\text{cm}$, working voltage of 5 kV, working distance of 2.0 mm and inner diameter of 0.25 mm, stable cone jet is easily formed.

(4) A cone-jet forming prediction model with high accuracy and low loss was constructed based on neural network. The BP neural network model with the optimal parameters had an accuracy of 91.52%. The genetic algorithm was used to optimize the BP neural network model, which has a 94.35% accuracy. The accuracy of BPNN model and GANN model was tested with the test set. The accuracy of GANN model in the test set was 94.3%, significantly higher than 89.1% of BPNN model.

Through mechanism analysis, simulation research and experimental research, the influences of ink conductivity, working distance, working voltage and nozzle size on cone jet forming were investigated. Furthermore, the prediction model of cone jet forming based on genetic algorithm and neural network algorithm was innovatively constructed to accurately predict the cone jet forming under different parameters. The bending moon surface height and the half cone angle of the Taylor cone are accurately predicted by the GANN model. The research results indicated that the GANN model can effectively predict the cone jet forming under different parameter conditions, avoiding a large amount of work such as numerical simulation and repetitive experimental research, and is expected to be promoted in the field of micro/nano precision manufacturing.

Keywords: Electrohydrodynamic printing; Taylor cone; Cone jet; Neural network algorithm; Genetic algorithm

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 电流体动力喷印研究现状	2
1.2.1 电流体动力学的定义.....	2
1.2.2 电流体动力喷印技术.....	2
1.2.3 电流体动力喷印技术国内外研究现状	3
1.2.4 电流体动力喷印技术应用现状.....	6
1.3 锥射流成型及稳定性模型预测国内外研究现状	8
1.3.1 模型预测控制研究方法现状.....	8
1.3.2 锥射流成型及稳定性拟合模型研究现状	9
1.4 课题研究内容及技术路线	10
1.4.1 课题研究内容.....	10
1.4.2 技术路线.....	11
第二章 电流体动力喷印机理与神经网络预测算法	12
2.1 电流体动力喷印理论基础	12
2.1.1 泰勒锥的形成及受力分析.....	12
2.1.2 锥射流形态变化分析.....	14
2.1.3 工艺参数对锥射流稳定性的影响.....	16
2.2 遗传算法优化人工神经网络研究	18
2.2.1 人工神经网络.....	18
2.2.2 遗传算法优化神经网络算法用于锥射流模型构建	20
2.3 本章小结.....	21
第三章 锥射流成型关键表征指标的仿真分析	22
3.1 锥射流成型模拟建模.....	22
3.1.1 模拟流程.....	22
3.1.2 流场控制方程.....	22
3.1.3 电场控制方程.....	24
3.1.4 相场方法与界面追踪方程.....	25
3.2 几何模型及网格划分.....	26
3.2.1 建立几何模型及边界条件设置.....	26
3.2.2 求解器设置.....	26
3.2.3 几何模型网格划分及独立性分析.....	27
3.3 锥射流成型关键表征指标	28
3.3.1 泰勒锥内部回流.....	28

3.3.2 电场强度	29
3.3.3 喷头出口处液面高度	29
3.4 模拟结果及分析	29
3.4.1 工作距离对墨水体积分布及弯月面高度的影响	29
3.4.2 电压对墨水体积分布及弯月面高度的影响	32
3.4.3 喷头尺寸对墨水体积分布及弯月面高度的影响	34
3.4.4 电导率对墨水体积分布及弯月面高度的影响	35
3.5 本章小结	37
第四章 电流体动力喷印影响因素的实验研究	38
4.1 实验材料与仪器	38
4.1.1 实验仪器	38
4.1.2 实验材料	39
4.2 实验方法	39
4.2.1 打印墨水配置	39
4.2.2 实验流程	39
4.3 实验结果处理	40
4.3.1 评价指标	40
4.3.2 结果处理	41
4.4 结果与讨论	41
4.4.1 电导率对弯月面高度及泰勒锥半锥角的影响	41
4.4.2 电压幅值对弯月面高度及泰勒锥半锥角的影响	44
4.4.3 喷头尺寸对弯月面高度及泰勒锥半锥角的影响	45
4.4.4 最佳工艺参数下的锥射流成型实验	46
4.5 本章小结	46
第五章 基于神经网络算法与遗传算法的锥射流成型模型建立	48
5.1 锥射流成型预测模型数据集建立	48
5.2 模型构建方法	49
5.2.1 反向传播神经网络(BPNN)	49
5.2.2 遗传算法优化神经网络(GANN)	50
5.3 BPNN 模型与 GANN 模型的性能表征	52
5.3.1 损失表征	52
5.3.2 准确率表征	52
5.4 模型训练结果	53
5.4.1 训练策略	53
5.4.2 反向传播神经网络构建锥射流成型预测模型(BPNN 模型)	53
5.4.3 遗传算法优化神经网络构建锥射流成型预测模型(GANN 模型)	54
5.5 模型验证与性能比较	55

5.5.1 BPNN 模型与 GANN 模型在验证集上性能对比	55
5.5.2 BPNN 模型与 GANN 模型在测试集上性能对比	56
5.6 本章小结.....	57
第六章 结论与展望	58
6.1 主要结论.....	58
6.2 创新点.....	59
6.3 展望.....	59
参考文献.....	61

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

高分辨率的柔性电子元件，如柔性传感器、柔性显示器和电子皮肤等，由于其高度灵活性、延展性和紧凑性，现已广泛应用于软机器人^[1-4]、智能人机交互^[5-8]和医疗监控^[9-12]等领域。目前，构建高分辨率柔性电子器件的主要方法包括光刻^[13, 14]和印刷^[15, 16]，然而这两种方法在精密制造方面依然存在一定的局限性。电流体动力喷印^[17, 18]技术因其独特的驱动方式，能够产生微纳米级分辨率的射流，使其成为印刷小型化电子设备的有效替代方案。与传统喷墨打印技术相比，电流体动力喷印技术是在喷嘴尖端和底衬之间施加电场，使喷嘴出口处的液体形成倒锥形，即泰勒锥。当电荷力超过液体的表面张力时，会产生连续的射流并沉积在底衬上，通过精准控制喷嘴或基板移动，来制造复杂的微/纳米图案^[19-22]。

在电流体动力喷印过程中，稳定的泰勒锥和锥射流是实现高精度打印的前提条件^[23]。精准地控制弯月面变形产生泰勒锥，最终形成稳定的锥射流是提高电流体动力喷印图案精度和质量的关键技术^[24]。与其他微滴喷射成型工艺类似，影响电喷印图案分辨率、精度以及均匀度的因素众多^[21, 25-27]，包括：打印墨水的物料属性（介电常数、黏度、密度等）、操作参数（工作距离、工作电压等）、结构参数（基板材质、喷嘴材质与尺寸等）。这些参数相互耦合影响，决定电流体动力喷印最终成型的图案精度和质量。然而，多参数共同作用下的锥射流成型精度和质量的相关研究缺乏，且打印墨水的电导率对射流成型的影响研究仍然非常少，严重制约了高分辨率的电流体动力喷印技术在柔性电子、微纳米精密制造领域的应用。为了进一步提高电流体动力喷印打印图案的分辨率、均匀度，提高制备图案的精度与质量，需要深入研究各个工艺参数对喷印过程的影响规律，探究最佳打印参数^[24]。

电喷印过程中的锥射流的稳定性受到操作参数、结构参数及物料属性的共同影响^[28]。处于理想状态下的电流体动力喷射的锥射流直径稳定可控，有助于提高打印精度和可控性。但在实际打印过程中，难以描述各个参数对射流稳定性的影响，更难以通过简单的数学模型描述工艺参数与射流稳定性的关系。目前针对电流体动力喷印过程中射流成型的数学模型尚未见报道，因此，通过软计算^[29]的方法，建立完善的锥射流稳定性^[30]预测模型，用于预测不同参数条件下是否能够产生稳定锥射流，是一项值得探索研究的工作。

综上所述，探究工艺参数与操作参数对锥射流成型及稳定性的影响规律，并构建准确率高的锥射流成型预测模型是当前亟需解决的重要研究问题。本研究通过构建静电场下电流体动力喷印的理论模型，通过对泰勒锥进行受力分析探讨锥射流的成型原因，揭示泰勒锥到锥射流的演化过程；通过数值模拟探索了不同工艺参数下，喷嘴出口处电场强度与液面高度的变化规律；通过验证性实验研究，揭示了不同工艺参数对射流稳定性的影响规律；通过遗传算法优化神经网络结构参数，构建了高准确率、高可靠性、低损失的锥射流成型预测模型。本研究从理论分析、数值模拟、实验研究与模型构建四个方

面,逐步探索了不同工艺参数对锥射流成型的影响规律;最后创新性运用遗传算法优化了神经网络结构参数,构建高准确率的锥射流成型预测模型,为电流体动力喷印技术在微纳制造领域的推广应用奠定了理论基础。

1.2 电流体动力喷印研究现状

1.2.1 电流体动力学的定义

电流体动力学^[31] (Electro-hydro Dynamics) 是流体动力学的重要分支,主要研究单极性荷电流体、极化流体与电场之间的相互作用。在电极作用下,电荷通过分子极化、电解质电离等方式进入流体,流体荷电后,受到电场力、表面张力、黏性力、惯性力的共同作用,产生非常复杂的运动过程。电流体动力学涉及电场与流场之间的相互耦合作用,流体的运动受到其介电常数、电导率、极化率等的影响。电流体动力学领域仅考虑带电单极界面、具有恒定介电常数和小电导率的中性流体,这种中性流体被称作“漏电介质”^[32,33]。

电流体动力学在纳米技术、生物医药技术、微机械技术以及微重力研究等领域得到了广泛应用,例如利用电雾化技术制备纳米粒子、纳米纤维和纳米薄膜,利用电流体泵实现微流控系统的驱动和调节,利用电流体动力学强化传热提高冷却效率等。此外,电流体动力学在固体颗粒的电泳、电旋转以及界面流动等领域得到应用;在电流体干燥、电流体动力喷印行业有着广阔的应用前景。

1.2.2 电流体动力喷印技术

电流体动力喷射打印^[34,35] (Electrohydrodynamic Printing) 是一种微液滴喷射成型技术^[36]。电流体动力喷射打印技术是通过电场力以“拉”的方式从喷头出口处将墨水拉出^[37],与传统喷墨打印中“挤”的方式有所不同。图 1-1 (a) 所示为电流体动力喷印工作原理,通过在喷嘴与基板间施加高压电场,墨水表面的自由电荷在电场力的作用下在墨水表面快速流动。切向电场力会使得喷嘴出口处的液滴由弯月面逐渐变尖形成泰勒锥^[38],如图 1-1 (b) 所示,自由电荷向泰勒锥的尖端聚集,导致泰勒锥的尖端电场力持续增加,最终克服表面张力及黏性力等形成射流,即锥射流。调整工作电压和打印距离,使用内径更小的喷嘴可以形成远小于喷嘴尺寸的液滴或射流^[39,40]。

电流体动力喷印技术的灵感来源于电场可以使流体界面发生变形^[41]。早在 1600 年, Gilbert^[42]就曾报道过当液滴在受到足够大的电场力作用时,会大致形成一个锥形。在 1882 年, Rayleigh^[43]研究了球形液滴在电应力作用下的破碎理论,并推导出了带电球形液滴的不稳定条件:对于球形液滴,其稳定性的判定条件等效于向外的电应力等于向内的表面张力的条件。在 1995 年, Zeleny^[44]首次发现了带电液滴表面的快速 EHD 脉动,现在被称为锥射流过渡现象,即射流从带电锥形的尖端喷出的过程。随着 3D 打印技术的发展,电流体动力喷印技术因其可控性强、成本低等特点,在电极印刷、柔性传感器打印上展现出极大的优势。从 2018 年至 2023 年的近 5 年间,在国际知名期刊《Nature》及其子刊上发表的相关论文共计 60 余篇,该领域成为科学界的研究热点。

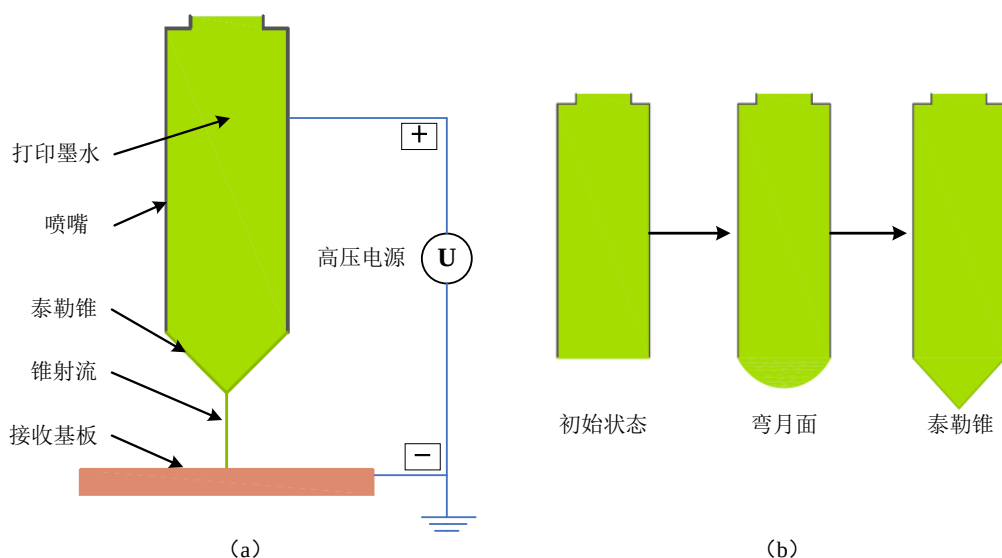


图 1-1 电流体动力喷印工作原理图

(a) 电流体动力喷印工作原理图；(b) 泰勒锥演变过程

相较于传统的熔融沉积技术、气溶胶喷射技术，电流体动力喷印技术具有极高的打印精度 (≥ 80 nm)，在纳米级光纤、复杂柔性电极的打印制备方向具有极高的优势^[45]。电流体动力喷印可以根据打印工艺及材料的差异分为三类：电喷印、电纺丝与电喷雾，三类电流体动力喷印成型方式对比如表 1-1 所示。相较于电纺丝和电喷雾，电喷印采用稳定的锥射流模式，可控性更高，产生的射流或液滴尺寸更小，可以达到微米级甚至纳米级，而且喷印材料范围广，尤其是在高黏度喷印材料方面更有潜力和优势。

表 1-1 三类电流体动力喷印成型方式对比

EHD 喷印方式	工作电压/kV	工作距离/mm	喷印材料	打印图案
电喷印	0~5	0~4	聚合物、纳米颗粒等	电、线、简单图案
电纺丝	≥ 1	≤ 10	聚合物、纳米材料等	纤维、纺丝
电喷雾	≥ 15	≥ 100	各种材料	薄膜

1.2.3 电流体动力喷印技术国内外研究现状

电流体动力喷印技术在国外研究起步较早，国内从 2000 年才开始关注此领域。在 20 世纪 60 年代之前，国外的研究工作主要集中于理想导体（水银或水）或理想电介质（极性液体，如苯）在电场中的行为，但在 1962 年，Allan 和 Mason^[32, 46]研究导电性差的液体，并建立了漏电介质模型或欧姆模型。1969 年，Taylor 提出了一个开创性的理论，以充分解释弯月面锥体的特殊形式，并将其命名为泰勒锥^[38]，而在泰勒锥顶端会产生极细的射流，即锥射流。Zeleny 将锥射流产生的喷雾描述为溶剂性质、高压和管端液体压力的函数^[47]。

电流体动力喷印的成型机理复杂，影响因素众多。尤其是在泰勒锥的形成以及稳定锥射流的产生过程中，极易受到工艺参数、材料特性等的影响。研究发现，在喷印过程中，射流稳定性及喷印分辨率易受到操作参数如喷嘴到接收基板间的距离、工作电压、电压占空比、入口流速等的直接影响^[48]。Zou 等^[30]通过在稳定锥射流模式下进行电流体

动力喷印的仿真模拟和实验分析,系统地研究了工作距离对沉积聚合物线宽的影响,结果表明在稳定的锥射流模式下,随着工作距离的减小,沉积聚合物线宽增大,打印分辨率有所下降;通过调整电压及工作距离,其设计的电喷印系统可以达到 68 nm 的纳米级打印分辨率。Li 等^[49]利用稳定锥射流模式制备了铜基电极,打印过程中,当电压处于 1.15~1.89 kV 时,锥射流处于稳定状态,随着电压继续增大,泰勒锥顶端失稳,产生多射流模式。Park 等^[50]使用高速相机拍摄电流体动力喷印过程中喷嘴出口处的状态用于观测锥射流的长度,研究发现随着喷嘴内径增大、入口流量减小、电场强度减小会导致泰勒锥长度增大,射流长度也随之增大。随着入口流量的增大,打印分辨率不断降低。Guan 等^[51]使用六种不同脉冲电压波形,即梯形上升、一阶上升、二阶上升、梯形下降、一阶下降和二阶下降波形进行了数值模拟,结果表明梯形下降波形下的印刷过程最稳定,两步下降波形的模拟过程类似于梯形下降波形,也处于稳定射流状态。Wang 等^[52]在不同电压条件下进行电流体动力喷印实验,实验结果表明,持续增大电压会导致“悬浮珠串”结构的出现,这种结构会极大地影响射流的均匀性,大大降低打印分辨率。Li 等^[53]提出一种优化波形的脉冲电压以提高喷印的稳定性和印刷的均匀性,如图 1-2 所示,通过在喷射停止和回缩时添加额外的电压脉冲可以快速消除打印过程中的残余振荡,减小行星液滴的产生。

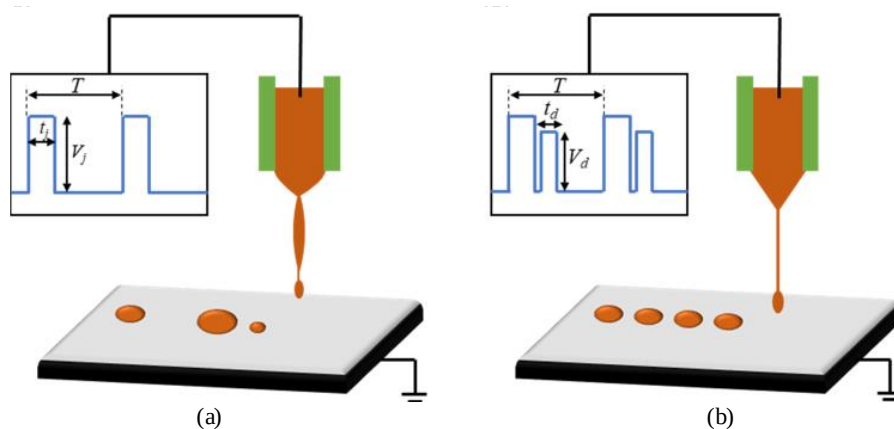


图 1-2 脉冲电压下的电流体动力喷印示意图^[53]

(a) 方波脉冲电压; (b) 优化波形电压

喷印墨水的性质,如墨水的电导率、表面张力、黏性、介电常数等都会影响到射流的稳定性及打印的分辨率。Wang 等^[52]通过配置不同电导率的 PVP/甘油溶液进行电流体印刷实验,实验发现电导率偏小时不会出现二次液滴,这能够提升射流的稳定性以及打印的均匀性。Lee 等^[54]使用 10 种黏度相对较低但介电常数分布范围广的有机溶剂作为墨水进行电喷印实验,结果表明低电导率条件下,墨水的介电常数在 10 左右时,锥射流是稳定的。Rahmat 等^[55]提出一种适合于模拟连续界面的多相流体积方法 (VOF, Volume of Fluid) 的数值模型,观察到电场通过作用于射流尖端并将射流拉向接收基板。模拟结果表明,雷诺数和电韦伯数的增加都会导致射流变细,雷诺数和电韦伯数过大则会导致不稳定射流的形成。Farjam 等^[56]在 COMSOL Multiphysics 中开发了一种水平集方法用于跟踪墨水-空气界面,并针对墨水的黏度、表面张力和相对介电常数进行了敏感

性分析。模拟结果表明墨水黏度越高，喷射阻力越大，喷射速度越小；表面张力越大，射流速度越慢，泰勒锥高度也越小；介电常数越大，射流速度越大。Tang 等^[57]提出一种利用低黏度流体制备复杂图案的电流体动力喷印方法，如图 1-4 所示，其成功地使用低黏度硅油印刷出 $73\ \mu\text{m}$ ，表面粗糙度低的硅油线，克服了低黏度流体不易形成稳定锥射流用于电液印刷的困难。

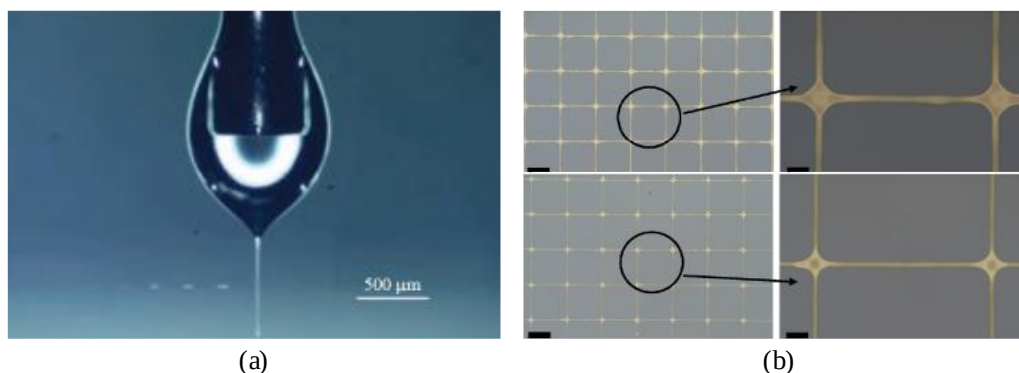


图 1-4 硅油电液印刷^[57]

(a) 稳定锥射流；(b) 硅油网格印刷

喷嘴的结构、材质直接影响射流成型过程，间接影响打印的分辨率。Hirt 等^[58]认为液滴直径是固定喷嘴尺寸的函数，并且可以通过改变脉冲频率或恒定电场的振幅来改变原有液滴的直径，例如在电压加倍的情况下，液滴尺寸会从 $1\ \mu\text{m}$ 降低到 $100\ \text{nm}$ 。Li 等^[59]设计了两个毛细管，在组装时保持同轴，形成同轴喷嘴，其通过在内毛细管和外毛细管的墨水通道之间对多余的墨水实现连续的循环，减少了墨水堵塞现象。与单毛细管喷嘴相比，同轴喷嘴并不会降低打印的分辨率，两者的差异小于 5%。Yang 等^[60]系统性地介绍了 EHD 的打印原理，并通过数值模拟分析了外加电压、打印距离和喷头尺寸对打印线宽，即分辨率的影响。模拟结果表明，打印线宽（分辨率）与打印距离、喷嘴尺寸和流量成正比，和施加电压成反比。Wu 等^[61]在连续稳定的锥形射流模式下，从理论和实验上研究了射流直径与喷嘴尺寸的关系，结果表面，射流直径应与喷嘴直径的平方成正比。Lee 等^[62]和 Pan 等^[63]通过设计一种多喷嘴结构，提高打印效率、定位精度和灵活性。Lee 等通过模拟与实验证明了多喷嘴之间并不会相互影响，且每个喷嘴均可以独立工作；Pan 等通过多喷嘴结构的在 0° 到 87° 之间的缓慢旋转，使得打印平行线之间的距离从 $4.927\ \text{mm}$ 急剧减小到 $0.308\ \text{mm}$ ，并最终实现了距离可调的光纤网格打印。Zhong 等^[64]提出一种双环级喷嘴的电喷印装置，如图 1-5 所示，利用脉冲电压解决了电场受沉积材料影响的问题，通过模拟研究总结出最佳喷印参数。

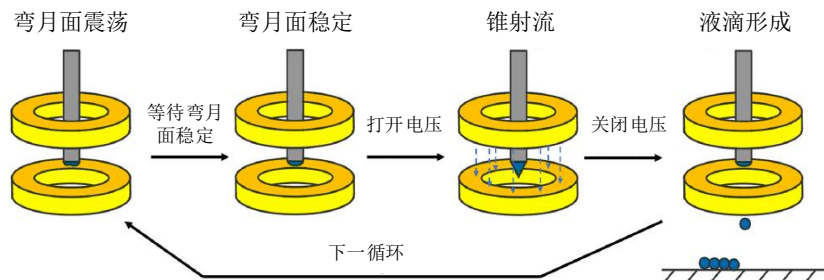


图 1-5 双环电极喷嘴电喷印过程示意图^[64]

综上所述,关于电流体动力喷印射流稳定性及打印分辨率已有大量的研究。电流体动力喷印的喷印稳定性和打印分辨率受到操作参数、结构参数及物料参数的共同影响,但多参数耦合影响下的锥射流成型实验研究尚不完善。

1.2.4 电流体动力喷印技术应用现状

电流体动力喷印技术因其打印分辨率高的特点,在电子器件制备、生物打印等领域起关键作用,表 1-2 展示了电流体动力喷印的应用,重点讨论了在柔性电子打印以及生物组织工程打印方向的应用。

表 1-2 电流体动力喷印的应用

电流体动力喷印应用	优势	应用案例
导电电极	无掩膜;低成本快速生产	(1) 印制导电银电极,电极宽度为 $35\ \mu\text{m}$,电阻率为 $3.9\times 10^{-8}\ \Omega/\text{m}$ ^[65] (2) 制备了电阻率约为 $25\ \mu\Omega/\text{cm}$ 的银栅/石墨烯混合透明电极
晶体管	能够使用的功能材料多,适用于非传统基材	(1) ZTO 薄膜晶体管 (TFTs) ^[66] (2) M-PEDOT: PSS 电极晶体管 (1) 制作了电阻率为 $23.35\ \mu\Omega/\text{cm}$ 的电阻式温度传感器
微传感器	分辨率高	(2) 制作了高灵敏度 ($85\ \text{k}\Omega/\%\text{RH}$) 和高响应度 ($0\sim 80\%\text{RH}$) 的湿度传感器
LED 屏幕	分辨率高,透光性好	像素密度 $500\ \text{ppi}$ 的 QLED 屏幕 ^[67]
细胞和细胞外基质	分辨率高	确定显微蛋白模式 (1) 活细胞印刷
组织工程支架	制作 DNA 和蛋白质微阵列;细胞存活率高	(2) 软骨、肌腱、骨骼和心脏等特定三维支架印刷

清晰的图案化电极线是实现高性能电路的基础,精细的图案化导电电极是实现电子器件高集成度的关键。Wang 等^[68]在硅基板上成功实现了线宽低于 $100\ \mu\text{m}$ 的金属轨迹印刷,银线电阻率稳定在 $2\sim 4\times 10^{-8}\ \Omega/\text{m}$,是银浆理论值的 $1.7\sim 2.4$ 倍。Kang 等^[69]利用热压转移技术和电流体动力喷印技术制备了石墨烯和银栅极的杂化结构并得到了大规模杂化导电薄膜,该导电薄膜表面电阻率约为 $0\sim 4\ \Omega/\text{square}$,光学透光率可以达到 78% 。Wang 等^[70]采用脉冲电流体打印技术制备了微米级分辨率的导电银图案,直径约为 $45\sim 55\ \mu\text{m}$,最小电导率为 $3.3\ \mu\Omega/\text{cm}$ 。Jang 等^[71]制备了不可见的银栅透明电极,栅格宽度小于 $10\ \mu\text{m}$,电极电阻率为 $4.87\ \Omega/\text{square}$,透光率 81.75% 。Liu 等^[72]采用电流体动力喷印技术制备了一种光控电极 (MOCE),并将电极嵌入微流控芯片内设计等效电路用于检测细胞液的电阻,测量到各种细胞的阻抗范围为 $1\sim 1.7\ \text{M}\Omega$,细胞容抗维持在 $10^{-9}\ \text{F}$ 以下。Liang 等^[73]通过优化电流体动力印刷工艺以及后处理工艺,实现了高黏度高电导率银电极线的印刷,印刷得到的银电极线宽 $19.42\pm 0.24\ \mu\text{m}$,电导率为 $6.01\times 10^6\ \text{S}/\text{m}$ 。Zhong 等^[74]通过基于表面疏水处理的电流体动力印刷实现了线宽为 $28\ \mu\text{m}$ 的石墨烯超级电容器,

解决了石墨烯印刷精度低的问题。Wang 等^[75]采用同轴聚焦电流体动力喷印技术制备了大面积聚合物半导体亚微米线阵，具有光滑的形貌和可控的宽度，平均线宽 110 nm，最小线宽约为 90 nm。

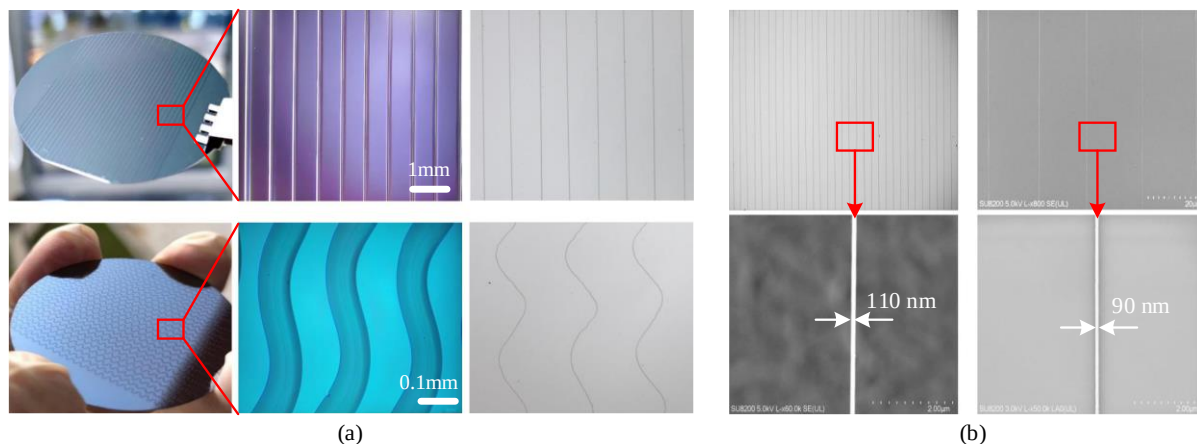


图 1-6 同轴聚焦电流体动力喷印制备的 PDVT-10 亚微米/纳米阵列图像^[75]

(a) PDVT-10 亚微米阵列图像；(b) PDVT-10 微/纳米线阵列图像

晶体管是柔性电子器件的重要组成部分，利用电流体动力喷印技术制备的晶体管具有更好的性能与稳定性。Li 等^[65]为了实现银纳米颗粒 (AgNWs) 锥形射流，添加了聚环氧乙烷 (PEO) 来增加墨水黏度，有助于形成更细的银线，通过添加 10 wt.% 的 PEO，制备了 AgNWs/PEO 电极并将电极与其他半导体材料制备成晶体管，在空气环境下该晶体管的平均场效应迁移率 (μ_{FET})、阈值电压 (V_{th}) 和开关电流比 (I_{on}/I_{off}) 分别为 $0.51 \text{ cm}^2/\text{V}$ 、 -2.0 V 和 $\sim 10^6$ 。Lee 等^[66]采用电流体动力喷印技术制备了锌-锡氧化物 (ZTO) 薄膜晶体管 (TFTs)，该晶体管平均场效应迁移率为 $9.82 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ ，开关电流比为 3.7×10^6 ，阈值电压为 2.36 V ，与旋转喷涂制备工艺相比，ZTO 薄膜晶体管的性能得到了明显提升，滞后性能以及正偏置稳定性也得到了改善。Can 等^[76]首次采用电流体动力喷印技术印刷薄膜晶体管，制备得到的 MoS_2 晶体管具有约 5.0×10^6 的高电流比， $19.4 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 的良好迁移率，阈值电压为 22.0 V ，亚阈值斜率为 1.9 V dec^{-1} 。

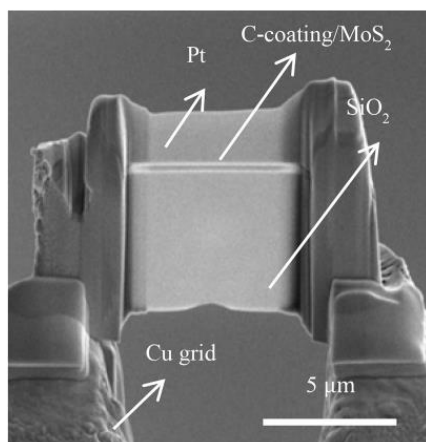


图 1-7 采用电流体动力喷印技术制备的 MoS_2 薄膜晶体管^[76]

电流体动力喷印技术制造微传感器具有响应速度快，精度高的特点。Huang 等^[77]制造了一种基于电流体动力学打印的自相似纳米/微纤维嵌入式金属电极的自供电传感

器 (HSS), 在往复变形试验 (拉伸 150% 时 1400 次) 下表现出高拉伸性 (高达 320%)、低检测限 (0.2 mg) 和优异的稳定性。Yousaf 等^[78]成功研制出一种温度补偿的湿度传感器, 该传感器电极采用电流体动力学液滴按需打印技术制备, 总尺寸为 1.8 mm×0.8 mm, 温度测量范围 0~100 °C, 灵敏度高达 0.7 $\Omega/^{\circ}\text{C}$, 平均误差 1.5%, 湿度测量范围 0%~80% RH, 灵敏度 85 k Ω /%RH, 响应时间和恢复时间分别为 0.6 s 和 0.3 s。Chen 等^[79]提出在 PDMS 薄膜上通过电液印刷方式制备离子凝胶膜, 并在紫外 (UV) 光的诱导下形成具有双网络 (DN) 结构的离子凝胶膜, 其在 335% 应变下的抗拉强度为 0.28 MPa; 当应变为 50% 时, 离子凝胶薄膜的迟滞度为 1.98%, 电导率为 1.231×10^{-3} S/cm, 响应时间为 81 ms。Hassan 等^[80]首次通过电流体喷印技术, 利用 PDMS/二甲苯混合油墨, 打印了 5~10 μm 的网格结构, 并通过改变网格结构的表面湿润性制备了高精度、高分辨率的柔性应变传感器。

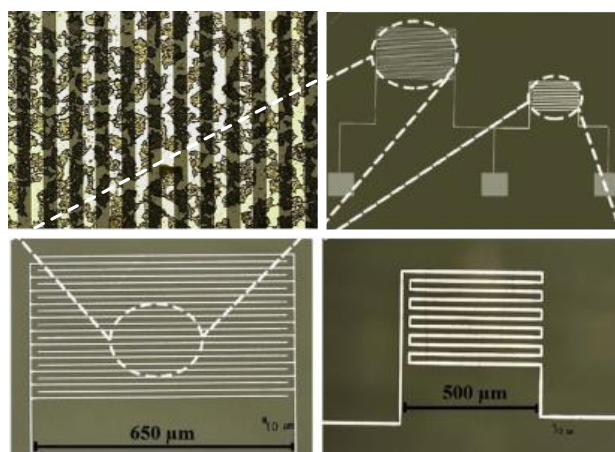


图 1-8 利用电流体动力喷印技术制备的温度补偿湿度传感器图像

1.3 锥射流成型及稳定性模型预测国内外研究现状

1.3.1 模型预测控制研究方法现状

模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 是一种先进的多变量过程控制系统开发的主要成果, 不仅能够进行瞬时状态测量, 还能够基于预期的过程响应来计算最优控制动作^[81]。MPC 依赖于其内置的线性/非线性模型来捕捉过程的行为动态, 并预测过程在有限视窗上的响应, 从而可以通过在每个采样时间求解受输入和状态约束的动态化问题来确定最优控制轨迹^[82]。席裕庚^[83]在模型预测控制研究方面做出了大量研究, 主要将模型预测方法应用于材料高压复合制造、半导体的生产供应等领域。

进入大数据时代后, 人工神经网络^[84] (Artificial Neural Network, ANN) 等深度学习^[85-88] (Deep Learning, DL) 方法因为其捕捉复杂物理系统行为的卓越性能而广受关注, 成为模型预测控制研究方法的首要选择。当给定适当参数时, 通用逼近定理表明, ANN 网络结构可以捕获任意复杂的输入与输出关系^[81, 89], 然而当涉及复杂物理系统建模时, 尤其是噪声或非线性过程, 则需要反向传播神经网络^[90-93] (Back Propagation Neural Network, BPNN) 或深度神经网络^[94-96] (Deep Neural Networks, DNN) 来捕捉输入与输出间关系。

1.3.2 锥射流成型及稳定性拟合模型研究现状

由于电流体动力喷印过程中锥射流成型机理与影响因素错综复杂,难以建立锥射流成型的理论模型。因此,研究人员通过实验拟合的方法拟合经验公式,描述各个参数对电流体动力喷印过程中射流成型难易程度及稳定性的影响规律。利用拟合出的经验公式,既可以在已知工艺参数条件下预测射流成型的难易程度及稳定性,也可以根据射流状况优选合适工艺参数。

学者们通过响应面、方差分析等拟合方法建立了电喷印、电纺丝的射流直径与纺丝直径的预测模型。Laurila 等^[97]利用实验设计 (Design of Experiments, DoE) 和统计分析方法研究了打印参数对电流体喷墨 (E-jet) 分辨率的影响,通过打印高度、偏置电压、峰值电压和频率四个打印参数作为预测值,生成沉积线条宽度的统计模型,该模型具有 94.24% 的准确率,标准偏差为 $1.05\ \mu\text{m}$ 。Park 等^[98]利用响应面 (Response Surface Methodology, RSM) 建模并优化聚醋酸乙烯酯 (PVAc) 的纳米纤维的静电纺丝参数,并利用二阶多项式函数将纤维直径与生产变量关联,模型预测的纤维直径与实验结果吻合较好。Doustgani 等^[99]同样也利用响应面法 (RSM) 研究工艺参数对电纺聚己内酯和纳米羟基磷灰石 (nHA) 复合纳米纤维平均直径的影响,利用三阶多项式函数拟合,模型 $R^2=0.96$,预测结果与实验结果吻合程度较好。Bu 等^[99]也采用了响应面法研究了工艺参数对聚偏二氟乙烯 (PVDF) 显微性能的影响。实验结果表明,预测的光纤宽度与实际光纤宽度吻合较好。Naderi 等^[100]通过响应面法 (RSM) 系统分析了聚酰胺溶液电纺丝的工艺参数,通过中心复合材料设计 (Central Composite Design, CCD),以纤维直径为观察响应,以静电纺丝参数为变量,根据经验确定响应函数,拟合效果较好。Wu 等^[61]证实了简化的 Melcher 分散模型在描述锥射流成型方面的局限性,并通过理论分析和实验研究总结出,射流直径正比于喷嘴直径的平方。

通过响应面拟合、方差分析等手段对电喷印过程中泰勒锥形成及稳定射流模型的拟合精度仍然不够高,模型的泛化性不够。因此,学者将机器学习应用于电喷印预测模型的建立中,进一步提高了模型的预测准确率。Ieracitano 等^[101]提出一种利用有监督和无监督混合的机器学习 (AE-MLP) 系统对电纺丝图片分析,用于检测纺丝是否含有缺陷,准确率高达 92.5%;相较于卷积神经网络 (Convolutional Neural Networks, CNN) 模型可以大大降低模型复杂性。Ogunsanya 等^[102]使用机器学习模型研究了雾滴属性和雾滴模式之间的关系,通过反向传播神经网络 (BPNN) 模型,以液滴特征为输入,对输出液滴模式进行分类,该模型对液滴模式的分类精度高达 90%。Ball 等^[103]同时采用 BPNN 神经网络和遗传算法优化神经网络 (GA-NN) 对电流体动力喷印过程中液滴直径进行预测,两种模型的误差均保持在 10% 以下,在大多测试结果中,GA-NN 模型的预测结果都远高于 BPNN 模型,GA-NN 模型的平均预测误差仅为 2.51%。

综上所述,大量研究主要集中在电流体动力喷印中产生的液滴尺寸、打印线条宽度的模型预测领域。但是,在构建电喷印过程中的稳定锥射流成型预测模型的研究方面仍然存在如下三个问题:

(1) 稳定锥射流形成的机理研究尚不完善。在电喷印过程中,锥射流的成型受到众

多因素耦合影响，目前的研究主要集中在操作参数，如工作电压、打印距离等对射流成型的影响，而仍然缺乏打印墨水的物性参数对稳定锥射流成型的研究。

(2) 准确描述稳定锥射流成型的表征技术指标的手段仍然不够科学合理。以前的研究仅通过打印液滴的尺寸或打印线条的宽度来表征打印的分辨率，但其并不能准确描述稳定锥射流是否成型，因此亟需寻求能够准确并详细描述锥射流成型的表征技术指标。

(3) 高准确率的稳定锥射流成型非线性预测模型尚未建立。利用回归分析等方法仅能构建较为简单的线性拟合模型，无法构建复杂的非线性模型。因此，需要探索研究一种能在多参数条件下构建锥射流非线性拟合模型的方法，通过人工神经网络算法构建锥射流成型预测模型不失为一种更好的技术手段。

1.4 课题研究内容及技术路线

1.4.1 课题研究内容

从弯月面的产生到锥射流阶段的过渡，最终到产生稳定的锥射流，是一个复杂的过程，受到诸多因素的影响。为了探究各个工艺参数对锥射流成型及稳定性的影响规律，本研究深入分析泰勒锥的受力机理以及电流体动力喷印工作原理；采用 COMSOL Multiphysics 5.6a 仿真软件进行电流体动力喷印模拟仿真分析；通过搭建电流体动力喷印实验平台进行实验研究；建立了基于神经网络算法与遗传算法优化的神经网络算法的锥射流成型预测模型。课题的主要研究内容如下：

(1) 深入分析电流体动力喷印技术原理以及神经网络算法构建预测回归模型的方法路径。通过对泰勒锥进行受力分析，阐明泰勒锥的成型机理，分析从泰勒锥到锥射流的过渡状态，并且详细阐明操作参数对锥射流产生及稳定性的影响。提出使用遗传算法优化神经网络的方法，构建高准确率的锥射流成型预测模型。

(2) 设计“喷头-基板”简化模型，开展电流体动力喷印数值模拟。通过 COMSOL Multiphysics 5.6a 仿真软件对电流体动力喷印的电场强度与流场分布进行模拟仿真。电流体动力喷印过程中的电荷密度分布与墨水体积分布能够直观地体现泰勒锥与锥射流的形成过程。通过数值模拟研究喷头内径、工作距离、工作电压、入口压力与墨水属性对锥射流形成的影响，以获得最佳操作参数。

(3) 开展电流体动力喷印验证性实验研究，探究不同工艺参数对锥射流成型与稳定性的影响。搭建了电流体动力喷印实验平台，并将一定比例的丙三醇溶液、NaCl 溶液和去离子水混合后调配不同电导率的打印墨水。通过实验研究了打印墨水电导率、工作电压以及喷头尺寸对电流体动力喷印过程中弯月面的高度以及泰勒锥半锥角的影响，并观测最佳工艺参数下的锥射流成型过程。

(4) 运用人工智能算法构建了基于神经网络与遗传算法的锥射流成型预测模型。通过电流体动力喷印实验研究建立了锥射流成型预测模型的数据集；提出以准确率与损失作为表征锥射流成型预测模型预测精度的评价指标；结合了神经网络算法与遗传算法构建了高准确率、低损失的 BPNN 与 GANN 锥射流成型预测模型，并在测试集上检测了两种预测模型的准确率。

1.4.2 技术路线

根据课题研究目标，从机理分析、模拟仿真、模型构建与实验研究四个方面，制定了课题的总体技术路线如图 1-9 所示。课题的总体技术路线概述如下：

第一章主要阐明课题的研究背景与研究意义，并结合国内外研究现状，提出课题研究内容。在电流体动力学的理论基础上，阐明了电流体动力喷印在微纳米精密制造领域的优势，并分析总结了电流体动力喷印的国内外研究现状和应用现状。深入分析了利用实验建立拟合模型数据集，训练高精度拟合模型的方法，并针对现有研究的不足，提出本课题的研究内容与技术路线。

第二章分析了锥射流成型的理论基础并提出了遗传算法优化人工神经网络的方法。通过对泰勒锥表面受力分析，阐述了锥射流成型机理，并且详细描述了从泰勒锥到锥射流过渡阶段中影响射流稳定性的因素；分析了人工神经网络构建预测模型的方法，并提出运用遗传算法优化神经网络结构以提高预测精度。

第三章通过对锥射流成型过程进行模拟仿真，探究不同工艺参数对稳定锥射流成型的影响规律。通过设计“喷头-基板”简化模型代替复杂结构，简化模拟进程；提出电流体动力喷印仿真模拟的关键表征指标；研究工作距离、工作电压、喷头尺寸以及电导率对锥射流成型的影响规律，并得出最佳模拟结果。

第四章通过验证性实验探究不同工艺参数下的锥射流成型及稳定性的影响规律。在实验平台上进行验证性实验；提取高速相机拍摄的图像边缘特征参数，以泰勒锥的半锥角以及弯月面高度来评判射流成型难易程度及射流稳定性；探究电导率、电压幅值、工作距离和喷头尺寸对电流体动力喷印过程中弯月面高度以及泰勒锥半锥角的影响规律。

第五章结合 BP 神经网络算法与遗传算法优化构建了锥射流成型预测模型。收集整理实验数据构建锥射流成型预测模型的数据集，将数据清洗后分为训练集、验证集和测试集。构建基于 BP 神经网络算法与遗传算法的锥射流成型预测模型，并提出模型预测精度的评价指标。最终使用测试集测试 BPNN 模型与 GANN 模型的预测精度。

第六章主要总结本课题研究内容、创新点、未来展望。

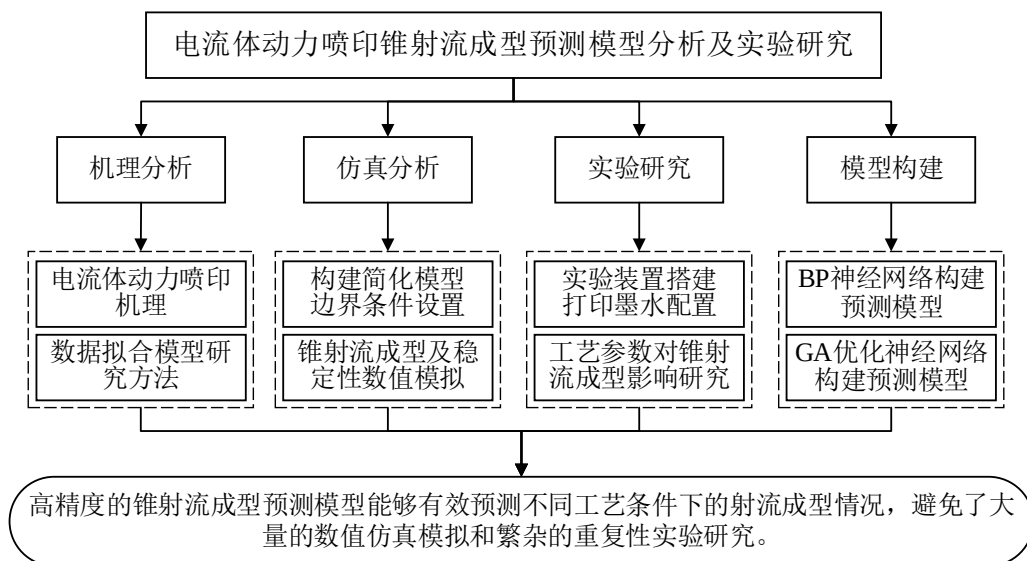


图 1-9 技术路线图

第二章 电流体动力喷印机理与神经网络预测算法

本章介绍了泰勒锥的成型机理与受力分析，探讨了产生稳定锥射流所需的临界电压条件和临界流量条件，并根据临界电压、流量条件分析了影响锥射流稳定性的因素。同时，本章介绍了利用神经网络算法构建预测模型的方法，并提出利用遗传算法优化神经网络来提高预测模型的准确率。

2.1 电流体动力喷印理论基础

2.1.1 泰勒锥的形成及受力分析

在高压电场作用下，喷嘴出口处的球形液滴逐渐向锥形转变，形成泰勒锥。图 2-1 所示为锥射流形成过程，喷嘴出口处的液体在持续的高压电场作用下，会发生形变，由半球形液面转变为倒锥形液面，并且在液面顶端产生极细的射流。喷嘴出口处的墨水表面分布着电荷^[32]，电荷在高电场的作用下，在墨水表面发生迁移，向着液面的顶端即泰勒锥顶端聚集，导致泰勒锥尖端受到电场力增大，产生锥射流。

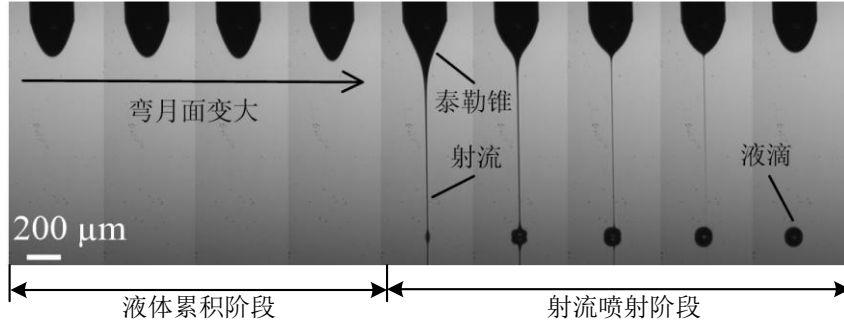


图 2-1 锥射流的成型过程

锥射流成型受到多个力的耦合作用。喷嘴出口处的墨水，受到其自身表面同种电荷的相互排斥，外部高压电场产生的电场力、黏滞力、表面张力与重力等多个力的共同作用。在电压较小时，墨水停留在喷嘴的顶端，随着电场的持续增大并突破临界电压 V_c 后，电场力突破表面张力和黏性力等的限制，圆形液滴向锥形过渡，并在锥形的顶端产生极细的射流，即锥射流，如图 2-1 所示。在形成泰勒锥时，Taylor 建立了液滴的平衡方程得到产生射流的临界电压 V_c 如式 2-1 所示^[37]：

$$V_c^2 = \frac{4H^2}{L^2} \left[\ln \frac{2L}{R} - \frac{3}{2} \right] (2\pi\gamma R \cos 49.3^\circ) \quad (2-1)$$

式 (2-1) 中：

H —— 喷嘴到基板间的距离，m；

L —— 喷嘴的长度，m；

R —— 喷嘴的内径，m；

γ —— 墨水的表面张力，mN/m；

V_c —— 产生射流的临界电压，V。

图 2-2 是泰勒锥的受力分析示意图，在多个力的共同作用下，泰勒锥处于一种动态平衡状态。式（2-2）是产生泰勒锥的必要条件^[104]，在产生泰勒锥时，电场力与重力的合力需要克服表面张力和黏性力的合力，需要在喷嘴与基板间施加足够强的电场。

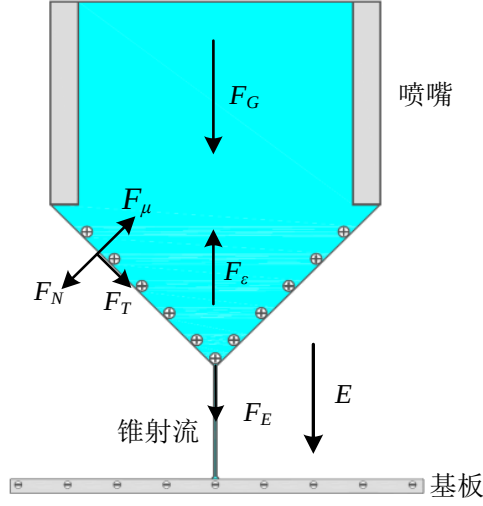


图 2-2 泰勒锥受力分析示意图

式（2-3）表示法向电场力的合力在法线方向上与表面张力平衡，这是形成稳定泰勒锥的必要条件。

$$F_E + F_G > F_\epsilon + F_\mu \quad (2-2)$$

$$F_N = \frac{\sigma}{r \cos \theta} = F_T \quad (2-3)$$

$$F_T - F_\mu = ma^2 \quad (2-4)$$

式（2-2）～（2-4）中：

F_E —— 尖端电场力，N；

F_G —— 液滴所受重力，N；

F_ϵ —— 表面张力，N；

F_μ —— 黏性力，N；

F_N —— 法向电场力，N；

F_T —— 切向电场力，N；

σ —— 表面张力系数；

r —— 喷嘴内径，m；

θ —— 泰勒锥半锥角，rad；

m —— 流体质量，kg；

a —— 流体运动加速度，m/s²。

电场变强时，法向电场力会随之增大，为了维持泰勒锥的稳定，泰勒锥的半锥角会减小。然而泰勒锥半锥角并不会总是呈减小趋势，在半锥角减小到一定程度后就停止减小，并产生射流来维持泰勒锥的平衡。式（2-4）则表示泰勒锥中流体在沿着泰勒锥表面切向方向流动，这满足 Li 等提出的泰勒锥内部回流理论^[105]，即在流动速度忽略不计的

条件下, 增强电场, 会使得切向电场力增大, 驱使泰勒锥表面流体的切向速度增大, 加强了泰勒锥的内部回流, 即较多的流体进入回流, 而较少的流体产生射流, 泰勒锥的稳定性会受到影响。泰勒锥会“缩短”锥形, 即泰勒锥的高度减小, 使得切向电场力减小来减弱回流, 维持喷射墨水的流量与入口流量保持平衡来稳定泰勒锥, 反之, 减小电压则需要“加长”泰勒锥来增强回流。

在电场过大的条件下, 切向电场力远大于表面张力, 泰勒锥的表面平衡状态极易被破坏, 出现射流不稳定的现象, 或在泰勒锥的表面而非泰勒锥顶点产生射流, 即多射流状态。在喷嘴入口施加一个较大的压力, 同样也会改变射流的稳定性, 易于出现垂直射流 (不属于锥射流状态)。

Taylor 首次提出在电场中, 喷嘴前端会产生类似圆锥形的现象^[38], 并建立假设模型, 通过计算总结出圆锥形顶角的大小。Taylor 认为产生圆锥形射流需要满足如下假设: (1) 液面与接收基板之间需要有一定电势差; (2) 电场恒定。为了研究泰勒锥成型机理, 建立轴对称弯月面模型如图 2-3 所示, 其中弯月面表层外加电势为 ϕ , r 为液面表面上任意一点到相邻等势面的距离, θ 则为弯月面表层切线与电场方向的夹角。

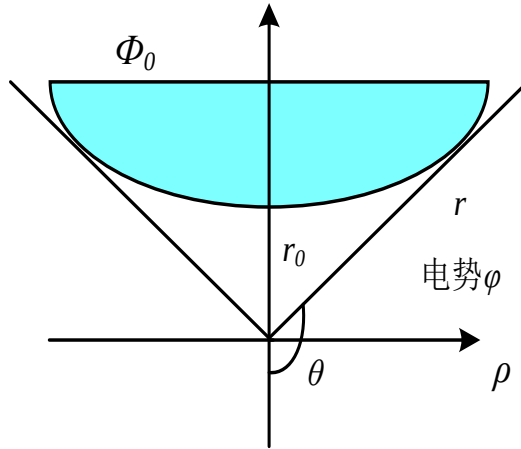


图 2-3 轴对称弯月面模型

在假设 r 远大于 r_0 时, 该位置的电势满足 Laplace 公式:

$$\phi = \sqrt{\sigma r} \varphi(\theta) + \text{const} \quad (2-5)$$

其中, const 是常数, 液面在表面张力、黏性力和电场力的共同作用下达到平衡状态, 此时弯月面表面达到同一等势面, 有:

$$\varphi(\theta) = P_{0.5} \cos \theta = 0 \quad (2-6)$$

根据 Legendre 方程和能量方程^[36]可以解得 $\theta = 130.7^\circ$, 因此, 理论状态下的泰勒锥半锥角大小为 49.3° 。

综上所述, 泰勒锥的成型受到多个力的综合影响, 在电场力较大时在泰勒锥内部产生回流, 随着电场增大, 回流增强, 弯月面的高度逐渐减小, 最后趋于稳定; 稳定泰勒锥的半锥角为 49.3° , 此时泰勒锥表面处于同一等势面, 能够产生最为稳定的射流。。

2.1.2 锥射流形态变化分析

如图 2-4 所示为流量和电场强度变化时发生的墨水流动转变情况, 当电场不存在或

很小时，毛细管中的液体在重力的作用下克服表面张力后流出，随流量增大逐渐由滴注状态转变为喷射状态。逐渐增大电场，在临界电位差附近，毛细管口的液体则在电场力、表面张力等作用下形成泰勒锥，随着电场继续增大，泰勒锥变得不稳定，最后在泰勒锥的顶端射出一个很小的液滴或形成很细的射流（比喷嘴内径小 1~2 个数量级）。当电压继续增大时，泰勒锥就会失去稳定，形成复杂的喷射行为，如图 2-4 中所示的倾斜射流或多射流模式。

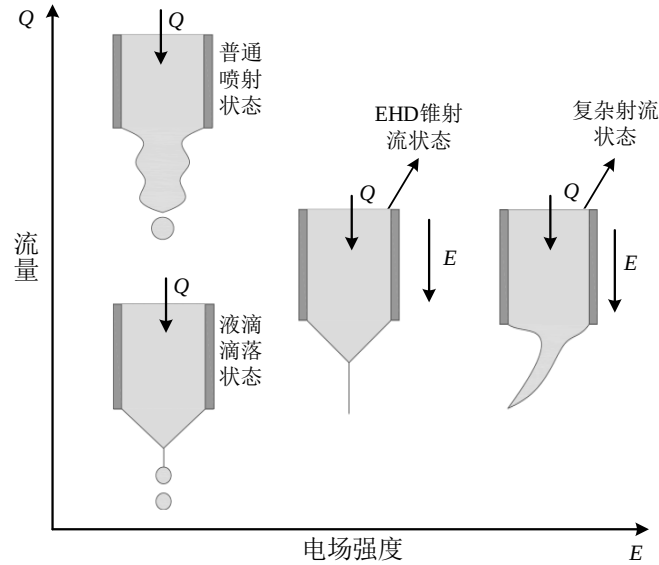


图 2-4 流量和电场强度变化时发生的墨水流动转变

锥射流模式下，会在泰勒锥的顶端产生连续的射流，射流的长度随着液体的黏度、电阻率、流速等参数的增加而增加。射流尖端的电场强度随着射流长度的增大而增大，这是由于毛细管（喷嘴）的较大外径减少了电场的屏蔽作用，加速射流的直径也相对减小，其表现为静脉收缩^[78]，对应射流尖端朝向电极方向的场应力增加。在电场作用下，亚微米级射流的运动轨迹很难稳定和控制，当射流的电荷不太高时，射流会因为曲张不稳定性分裂成液滴，并且在分裂过程中会产生行星液滴，极大的影响打印的分辨率及稳定性。在高电荷作用下，会出现横向扭结型不稳定性，射流延伸成不同尺寸的细液滴^[30]。因此，在克服电喷印、电喷雾、电纺丝过程中出现的射流快速崩解、产生行星液滴、射流抖动等问题，运用稳定锥射流状态进行高分辨率增材制造仍然是一个巨大的挑战。

当液体射流在较低场强条件下为中性或较低表面电荷时，射流破碎为液滴是由于表面波的影响^[79]，沿射流表面传播的表面波是由射流扰动产生的。当适当波长的表面波（“曲张波”）的振幅被表面张力增强时，它们会导致圆柱形射流分裂成半径 $r=1.89a$ 的液滴。对于不带电的射流，当表面波的波长大于射流周长时，曲面上的扰动就会增大，而这种扰动现象会控制射流的破裂。当产生稳定的锥射流后，泰勒锥内部必定会出现一个朝向锥表面的电场来提供电流，产生的电流经由微射流以微液滴形式发出。在这个过程中，切向电场力将泰勒锥的表面电荷拉向泰勒锥顶端，激发足够的轴向动量传递到液体上，并使得泰勒锥发生形变，形成射流。三种现象在不同假设下的理论模型及其优缺点如表 2-1 所示：

表 2-1 三种现象在不同假设下的理论模型及其优缺点

现象	理论或模型	假设和条件	优点	缺点
锥形弯月面	泰勒电静力学模型（泰勒锥）	泰勒锥的半锥角为 49.3°； 泰勒锥表面压力为 0； 忽略泰勒锥质量。	从锥体尖端获得射 流发射的临界电压值	半锥角并不总是 49.3°； 与实验临界电压 相差约 10%；
锥形射流过渡	漏电介质模型 表面耦合模型	电场线穿透液体； 表面电荷出现	描述了部分导电油墨 的锥形喷射操作图	仅适合漏电介质 材料和稳定的锥 射流模式； 数学方法复杂；
稳定细长射流	一维模型	电场引起的切向应力 必须远小于径向黏滞 应力；扰动的波长远 小于射流的特征衰减 长度	根据电场强度识别出 三种失稳模式： 静脉曲张和鞭梢不稳 定阈值	低黏度的墨水射 流不准确。

2.1.3 工艺参数对锥射流稳定性的影响

在电流体动力喷印过程中，锥射流的成型及稳定性受诸多因素的影响。操作参数（电场强度、工作距离、基板移动速度等）、结构参数（基板与喷嘴的结构及材质等）和物料参数（打印墨水的表面张力、黏度、密度等）都会对射流的稳定性产生一定影响，并最终影响到打印的分辨率及均匀性，锥射流成型影响因素如表 2-2 所示。

表 2-2 锥射流成型影响因素

电流体动力喷印影响因素		影响结果
工艺参数	电场强度	增大电压会减小射流直径、分辨率提高；
	喷嘴移动速度	喷嘴移动速度过快会导致射流不稳定不均匀；
	喷嘴与基板间距离	随着距离增大，射流逐渐不稳定。
结构参数	喷嘴的结构	喷嘴内径越小，弯月面高度越小；
	喷嘴的材质	不导电喷嘴更有利于形成射流。
物料参数	表面张力	表面张力越大，射流成型难度越大；
	密度	密度较大的墨水在喷印过程中易产生行星液滴；
	黏度	黏度增大喷墨体积随之增大；
	电导率	电导率增大喷墨体积减小。

喷头和基板间的电场强度受到工作电压、工作距离及喷嘴内径的影响。当不改变入口流量时，在电场的作用下会形成稳定的一个弯月面（弯月面高度不再发生改变）。当增大喷嘴出口处的电压时，弯月面的平衡受到破坏，形成射流或液滴，此时的电压是为形成锥射流的临界电压，可以表示为^[37]：

$$V_c = \left(\frac{2\gamma R \cos\theta}{\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \ln \left(\frac{4l}{R} \right) \quad (2-7)$$

式（2-7）中：

V_c —— 临界电压, V;

θ —— 泰勒锥半锥角, °;

ε_0 —— 真空介电常数, 一般取 8.85×10^{-12} F/m;

式 (2-7) 是对式 (2-1) 的化简, 也是更为普遍性的模型, 当喷嘴半径 r 远小于工作距离 l 时, 式 (2-7) 才成立, 产生锥射流的临界电压与喷嘴的半径、液体表面张力、工作距离等参数关系密切。导电流体形成锥射流的最小流量 Q_m 仅受到墨水的电导率和密度的影响, 具体可以表示为^[106]:

$$Q_m = \frac{\sigma \varepsilon_0}{K \rho} \quad (2-8)$$

式 (2-8) 中:

σ —— 表面张力, N;

K —— 电导率, S/m, 一般来说 $K > 10^{-4}$ S/m;

ρ —— 密度, kg/m^3 。

图 2-5 所示为稳定锥射流成型条件, 不同的工作条件会导致锥射流成型条件的 E - Q 图发生变化, 图 2-5 (a) 中曲线内部区域所示表示可以产生稳定锥射流。

(1) 当等效流量 Q 小于最小流量 Q_m 时, 不能形成稳定锥射流, 会产生不稳定射流状态, 如鞭动、曲张脉冲等。此时若增大电压, 使电场大于临界电场时, 由于等效流量较小, 出口流量与入口流量之间产生失衡, 就会形成静电喷雾状态;

(2) 当等效流量 Q 接近最小流量 Q_m 时, 若实际电场 E 远小于临界电场 E_m 时, 并不会在喷嘴出口处产生射流, 或者是在喷嘴出口处产生液滴滴落模式; 若实际电场强度 E 小于临界电场强度 E_m 时, 能够产生射流, 但是无法保证射流的稳定性, 会产生弯月面的分叉、射流鞭动或螺旋现象; 若实际电场强度 E 近似和临界电场强度 E_m 相等时, 此时的射流最为稳定; 若实际电场强度 E 远大于临界电场强度 E_m 时, 锥射流模式失稳, 出现多射流现象或射流分叉现象。

(3) 当等效流量 Q 大于最小流量 Q_m 时, 此时为液体动力射流, 无实际使用价值。

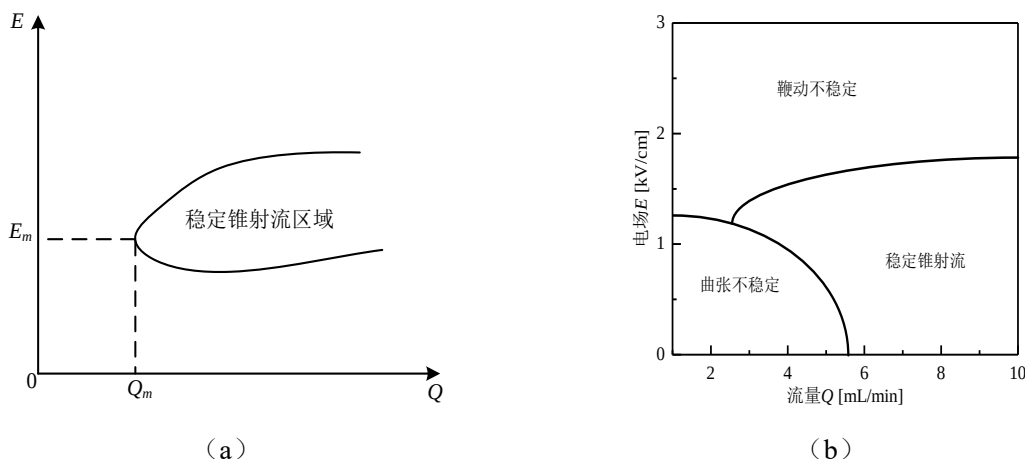


图 2-5 锥射流成型 E - Q 图

(a) 稳定锥射流形成条件; (b) 稳定锥射流及鞭动、曲张不稳定性;

2.2 遗传算法优化人工神经网络研究

2.2.1 人工神经网络

人工神经网络（ANN）是一种模拟生物神经网络结构和功能的数学模型，可用于进行函数估计或近似^[107]。ANN 的工作原理类似于利用神经元去感知信号，然后逐级上传至大脑终端，最后由大脑处理信号后指挥身体做出反应。人工神经元的主要结构如图 2-6（a）所示，输入层、隐藏层、输出层构成了一个简单的神经网络模型，每层都含有一定量的神经元，而层与层之间通过激活函数连接。如图 2-6（b）所示，对于单个神经元而言，其输出是通过计算输入对应权值的和并通过激活函数计算而来，如式（2-9）所示。

$$y = f\left(\sum_{n=1}^i (x_n w_n + b)\right) \quad (2-9)$$

式（2-9）中：

- f —— 激活函数；
- x_n —— 该神经元的第 n 个输入参数；
- w_n —— 对应输入参数的权重；
- b —— 偏置。

在计算过程中，通过引入激活函数，可以使输入输出之间生成非线性映射，引入非线性因素。如果不引入激活函数，则输出信号仅仅是对输入进行简单线性变化，模型的复杂程度低，内部数据非线性关系无法正确表达，不具备准确性。

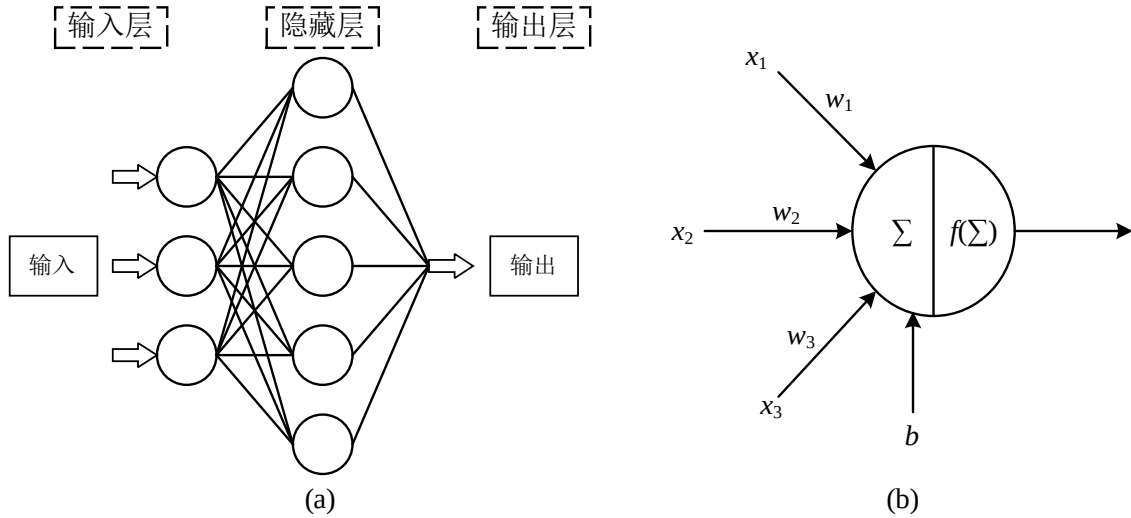


图 2-6 人工神经网络的基本原理

（a）人工神经网络结构；（b）单个神经元结构

在人工神经网络中常用到的激活函数主要由 Sigmoid、tanh、ReLU 等，Sigmoid 函数可以将输入的整个实数范围内的任意值映射到[0, 1]范围内，当输入值较大时，会返回一个接近于 1 的值，当输入值较小时，则返回一个接近于 0 的值，其函数表达式如式（2-10）所示。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2-10)$$

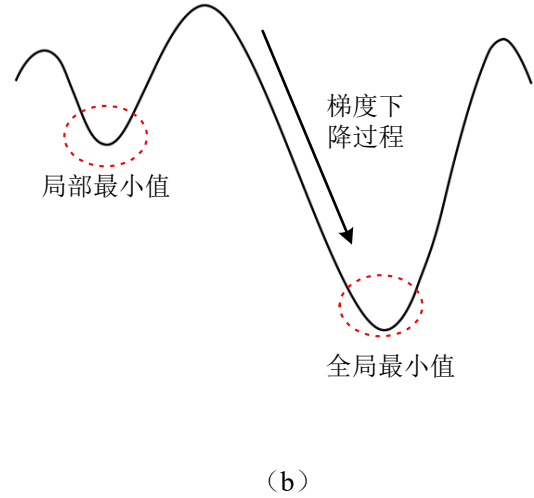
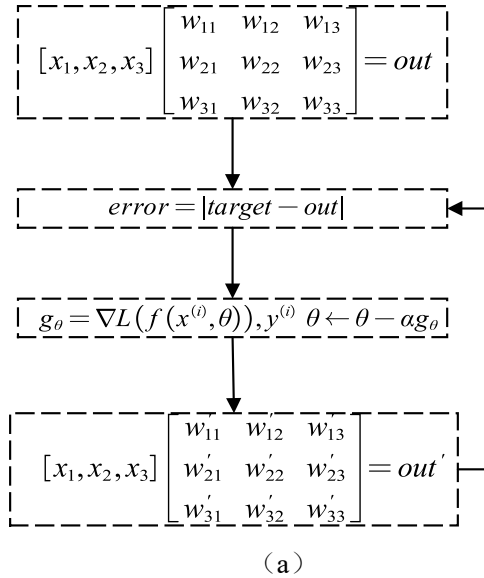
$\tanh$ 函数类似于 Sigmoid 函数，但它能将值映射到 $[-1, 1]$ 的范围。与 Sigmoid 函数相比，它的输出均值是 0，使得其收敛速度要比 Sigmoid 快，减少迭代次数，但幂运算的问题依然存在，其函数表达式如 2-11 所示。

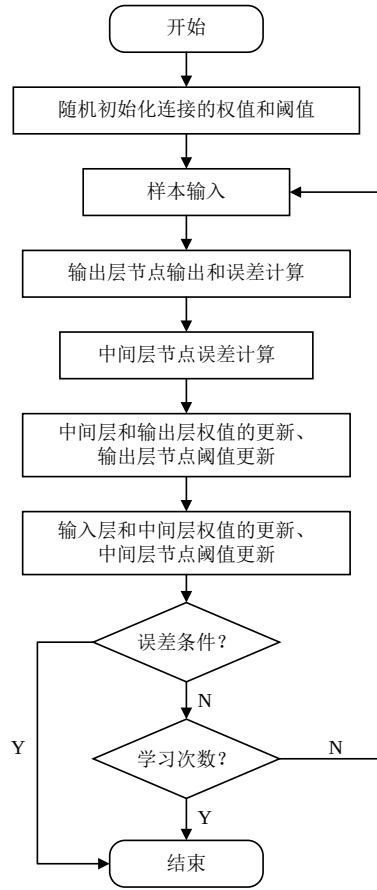
$$f(x) = \frac{(e^x - e^{-x})}{(e^x + e^{-x})} = 2 \cdot \text{sigmoid}(2x) - 1 \quad (2-11)$$

ReLU 函数是目前被使用最为频繁的激活函数，ReLU 函数在 $x < 0$ 时，输出始终为 0。由于 $x > 0$ 时，ReLU 函数的导数为 1，即保持输出为 x ，所以 ReLU 函数能够在 $x > 0$ 时保持梯度不断衰减，从而缓解梯度消失的问题，还能加快收敛速度，避免过拟合问题^[108]，常被用于神经网络计算过程中，其函数表达式如 2-12 所示。

$$f(x) = \max(0, x) \quad (2-12)$$

使用人工神经网络最主要的目的就是使模型最终输出值与实际目标值之间的误差尽可能小，这个过程利用误差反向传播方式实现。如图 2-7 所示是神经网络模型训练流程图，在进行神经网络训练时，先进行正向传播，计算出预测值后与目标值比较后，若误差不满足设定的最小误差时，需要将误差通过反向传播逐级分配至神经元上进行权值的修正，再重新进行正向传播并不断重复该过程，直至误差满足所要求。在这个过程中，梯度下降法一般被用来更新神经网络的权值，而在梯度下降中，权值与阈值的更新由学习率控制，如图 2-7 (a) 所示。使用梯度下降的主要就是为了寻找梯度为 0 的点，这个点可以是局部最小值，也可以是全局最小值，如图 2-7 (b) 所示，合理的学习率取值能够避免误差差值陷入局部最小值，也不会错过全局最小值。





(c)

图 2-7 神经网络算法流程及梯度下降

(a) 权值与阈值更新; (b) 梯度下降寻找最小值过程; (c) 神经网络算法流程图;

2.2.2 遗传算法优化神经网络算法用于锥射流模型构建

由于人工神经网络对于初始权值十分敏感, 随机的初始权值易造成网络陷入局部最小值, 导致神经网络模型产生较大的误差^[109]。遗传算法是为了模拟自然进化过程中搜寻最优解的算法^[110]。运用遗传算法优化神经网络, 使得网络具有自适应能力, 能够提高神经网络的收敛速度^[111, 112]。本研究在神经网络算法的基础上运用遗传算法进行优化, 以提高模型的准确率。在 BP 神经网络过程中, 模型在前向传播与反向传播交替过程中不断更新权值与偏置, 完成训练过程。在训练过程中需要重点确定隐藏节点的数量, 并通过调整参数避免过拟合问题, 使得模型的准确率进一步提高的同时, 降低模型损失。此外, 在 BP 神经网络训练过程中引入遗传算法, 通过基因的编码、选择、交叉以及变异设计, 优化整体网络结构, 降低模型损失率, 提高预测的准确性。

通过对电流体动力喷印过程中锥射流成型及后续稳定阶段的理论分析以及实验研究, 可以得到各个工艺参数对射流成型及稳定性的影响, 并进行实验数据收集。但是对于射流成型难度以及射流稳定性的分析只停留在定性阶段, 且受到限于误差的不确定性影响, 导致锥射流稳定性预测模型构建难度较大。根据电流体动力喷印过程中工艺参数对射流稳定性的影响, 在神经网络模型的基础上提出利用遗传算法优化神经网络结构, 建立了锥射流成型神经网络预测模型, 研究路线如图 2-8 所示。

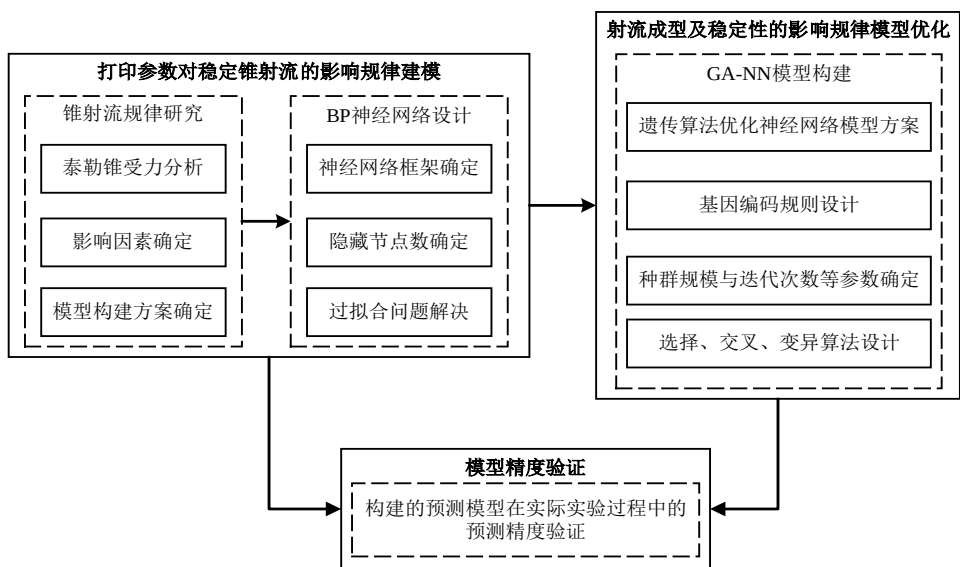


图 2-8 基于神经网络的锥射流预测模型研究路线

2.3 本章小结

本章阐明了电流体动力喷印过程中泰勒锥受力分析、锥射流转变过程以及神经网络算法的基本原理。首先，深入分析了泰勒锥表面受力分析，从受力角度分析弯月面到锥射流的演变过程；其次，通过理论分析详细介绍了锥射流成型过程中的控制方程，为进行电流体动力喷印模拟奠定基础；最后，分析了神经网络的基本结构，提出使用人工神经网络构建电流体动力喷印的锥射流预测模型的方法。本章主要结论如下：

（1）深入分析了电流体动力喷印过程中泰勒锥的成型与受力情况，并阐述影响射流的因素。泰勒锥的成型受到多个力的共同影响，高压电场作用下，液体表面电荷受到表面同种电荷之间的排斥力以及电场力、黏滞力、表面张力和重力等。在众多作用力的相互作用下，弯月面向着泰勒锥演变，最终形成泰勒锥。而在这个过程中，工艺参数（电场强度、工作距离、基板移动速度等）、结构参数（喷嘴的结构及材质等）和物料参数（打印墨水的表面张力、黏度、密度等）都会对射流成型产生一定影响，并最终影响到打印的分辨率及均匀性。

（2）阐述了神经网络模型的原理，将神经网络与锥射流模型预测结合，构建高精度锥射流成型预测模型。详细介绍了运用人工神经网络建立复杂数学模型的方法，提出使用遗传算法优化神经网络的思路；通过结合神经网络算法与遗传算法，提出了基于电流体动力喷印技术的锥射流成型预测模型构建方法。

第三章 锥射流成型关键表征指标的仿真分析

为了探究不同参数对锥射流成型过程的影响规律，本章节利用 COMSOL Multiphysics 5.6a 软件对锥射流成型过程进行了数值模拟分析。本章详细说明在锥射流成型模拟过程中的控制方程，以简化设计的“喷头-基板”模型进行了锥射流成型的数值模拟。本模拟采用内部回流、电场强度和喷头出口处液面高度详细表征了锥射流成型过程，并总结了模拟结果，为进行电喷印实验研究提供了理论基础。

3.1 锥射流成型模拟建模

3.1.1 模拟流程

采用 COMSOL Multiphysics 5.6a 软件进行电流体动力喷印数值模拟的流程图如图 3-1 所示，整个模拟流程分为前处理、模拟计算和后处理三个阶段，其中前处理阶段主要进行几何建模、边界条件设置及物理量参数设置；模拟计算阶段需要对求解器进行设置后进行迭代计算；后处理阶段是对模拟结果进行后处理。

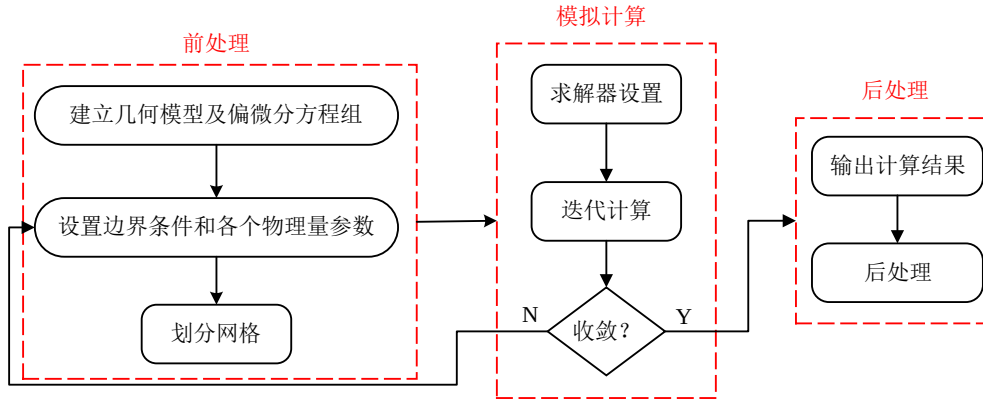


图 3-1 模拟仿真流程图

3.1.2 流场控制方程

任何一种流体在流动的过程中都可以用连续性方程和动量守恒方程来描述。同样，在打印过程中，墨水的流动满足连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3-1)$$

式 (3-1) 中：

ρ —— 流体的密度， kg/m^3 ；

$\mathbf{v}$ —— 流体的流速， m/s 。

本研究认为所使用的墨水是不可压缩流体，墨水速度场的散度为 0，则有：

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (3-2)$$

对于黏性不可压缩的流体，根据 Navier-Stokes 方程，有：

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_e + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_s \quad (3-3)$$

式 (3-3) 中:

- p —— 流体内部压力, N;
- μ —— 流体黏度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
- g —— 重力加速度, m/s^2 ;
- f_e —— 静电力, N;
- f_s —— 气液交界面处的表面张力, N。

在电流体动力喷印过程中, 产生的变化是细微的, 一般是微米/亚微米级, 重力项带来的影响很小, 因此在计算过程中忽略重力项 ρg ; 此外, 由于流体的运动速度很慢, 认为流体处于匀速流动的状态, 即 $\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt}$ 项可以忽略不记; 通过计算, 雷诺数 $\text{Re} \ll 1$, 则惯性项 $\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ 忽略不计。综上所述, 可以将流体的流动方程简化为:

$$-\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_s = 0 \quad (3-4)$$

本课题通过电场产生的 Maxwell 应力张量驱动流体变形, 进而深入研究打印墨水在持续施加的电场上的变形过程, 电场力可以通过式 (3-5) 表示:

$$\mathbf{f}_e = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^M = q_v \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right)_T E^2 \right] \quad (3-5)$$

式 (3-5) 中:

- $\mathbf{f}_e$ —— 电场力, N;
- $\boldsymbol{\sigma}^M$ —— Maxwell 应力张量;
- q_v —— 流体域的空间电荷密度, C/m^3 ;
- $\mathbf{E}$ —— 电场强度, V/m ;
- ε —— 相对介电常数;
- T —— 温度, $^\circ\text{C}$ 。

第一项表示库仑力, 与液体表面的电荷在电场中的受力相关, 库仑力的方向与电场方向一致; 第二项表示电极化力, 与流体内部电荷迁移相关; 第三项表示电致伸缩力, 与流体的密度相关, 但在模拟过程中认为流体是不可压缩流体, 该项可以忽略。

表面张力存在于液体的表面或者是两种不同属性流体的交界面处, 是流体本身的一种性质, 在 COMSOL 中表面张力 f_s 可根据式 (3-6) 表达:

$$\mathbf{f}_s = \sum_{ij, i < j} \gamma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2} (\rho_i + \rho_j)} \quad (3-6)$$

式 (3-6) 中:

- $\alpha_{i,j}$ —— 第 i 相、 j 相的体积分数;
- $\rho_{i,j}$ —— 第 i 相、 j 相的电荷密度, C/m^2 ;
- γ_{ij} —— 第 i 相与 j 相之间的表面张力系数。

由于在模拟过程中, 只使用气相、液相两种相, 因此有 $k_i = -k_j$, $\nabla \alpha_i = -\nabla \alpha_j$, 则式 (3-6) 可以简化为:

$$f_s = \gamma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla \alpha_i}{1/2(\rho_i + \rho_j)} \quad (3-7)$$

式 (3-7) 中:

ρ —— 空间电荷密度, C/m²。

3.1.3 电场控制方程

在模拟过程中, 需要在喷头与基板之间施加静电场, 电势控制方程可以通过电荷密度定义和泊松方程表示为:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{q}{\varepsilon} \quad (3-8)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (3-9)$$

式 (3-8) 和 (3-9) 中:

q —— 空间电荷密度, C/m²;

ε —— 介电常数;

ϕ —— 为电势, V。

静电场是由相对静止的电荷所激发出的电场, 属于无旋场, 即电势在其梯度上的散度为 0, 表示为:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3-10)$$

式 (3-10) 中:

∇^2 —— 梯度的散量。

根据电荷守恒方程, 可以得到如下方程:

$$\frac{dq}{dt} = -n \cdot K(\nabla \phi) \quad (3-11)$$

式 (3-11) 中:

dq/dt —— 电荷随时间的变化率;

K —— 材料的电导率, S/m;

n —— 气液交界面的法向。

根据“漏电介质”假说, 墨水内的电荷会聚集在气液交界面处, 电场在穿过气液交界面时, 电场线方向和电场强度均会发生改变, 使气液交界面的法线方向上电场不连续, 为了使切向方向上的电荷守恒, 需要空间电场密度满足条件^[113]:

$$n \cdot (\varepsilon_1 \nabla \phi_1 - \varepsilon_2 \nabla \phi_2) = q \quad (3-12)$$

$$t \cdot (\varepsilon_1 \nabla \phi_1 - \varepsilon_2 \nabla \phi_2) = 0 \quad (3-13)$$

式 (3-12) 和 (3-13) 中:

n —— 气液交界面的法向;

t —— 气液交界面的切向;

ε_1 —— 液体的介电常数;

ε_2 —— 气体的介电常数;

φ_1 —— 水平方向电势大小, V;

φ_2 —— 垂直方向电势大小, V;

3.1.4 相场方法与界面追踪方程

在多相流数值模拟中, VOF (Volume of Fluid) 是一种常用的方法。VOF 方法是通过在每一个网格中都定义一个流体体积函数, 来表示单元网格内的流体体积与网格的比值。在 COMSOL 模拟中, 一般使用 Cahn-Hilliard 方程来控制界面运动, 这样可以避免计算过程中需要额外定义初始化界面或者是重构界面, 导致计算量增大, 甚至会在界面附近出现物理量不守恒的问题。

在相场方法中引用相函数 ϕ , 该函数不衡量电势的大小, 只表示物质的种类。本模拟采用两相流方法, 相函数 ϕ 的取值为-1 和 1, 其中-1 表示一种流体, 1 表示另一种流体。气液两相的自由能如式 (3-14) 所示:

$$F(\phi) = \int \left[f(\phi) + \frac{1}{2} \lambda |\nabla \phi|^2 \right] dx \quad (3-14)$$

式 (3-14) 中:

$f(\phi)$ —— 体积自由能;

$\frac{1}{2} \lambda |\nabla \phi|^2$ —— 表面能;

λ —— 界面能量密度。

外部自由能可以表示为:

$$G = \frac{\partial F}{\partial \phi} = f(\phi) - \gamma \nabla^2 \phi \quad (3-15)$$

式 (3-15) 中:

γ —— 迁移调节参数。

式 (3-15) 中, $f(\phi)$ 使用的是双阱外势, 可以表示为:

$$f(\phi) = \frac{\lambda}{4\epsilon^2} (\phi^2 - 1)^2 \quad (3-16)$$

Cahn-Hilliard 方程表示为:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \frac{\lambda \gamma}{\epsilon^2} \nabla \phi \quad (3-17)$$

$$\phi = -\nabla \cdot \epsilon^2 \nabla \phi + (\phi^2 - 1) \phi \quad (3-18)$$

在相场方法中, 结合 Maxwell 应力张量模型, 可得到最终的电动力表达式为:

$$f_e = \nabla \cdot T \quad (3-19)$$

$$T = \epsilon_r \epsilon_0 \left(EE - \frac{1}{2} E^2 I \right) = \frac{1}{2} \epsilon_r \epsilon_0 E^2 \quad (3-20)$$

式 (3-19) 和 (3-20) 中:

E —— 电场强度, V/m;

I —— 单位张量;

ε_r —— 墨水的介电常数；
 ε_0 —— 空气的介电常数。

3.2 几何模型及网格划分

3.2.1 建立几何模型及边界条件设置

为了简化模拟过程，节省模拟时间，模拟中舍弃了传统的复杂三维模型，提出的“喷嘴-基板”模型如图 3-2（a）所示，用于电流体动力喷印过程中锥射流成型关键表征指标的仿真分析中。本模拟中提出的“喷嘴-基板”模型，结构简单，能够加快模型收敛速度。

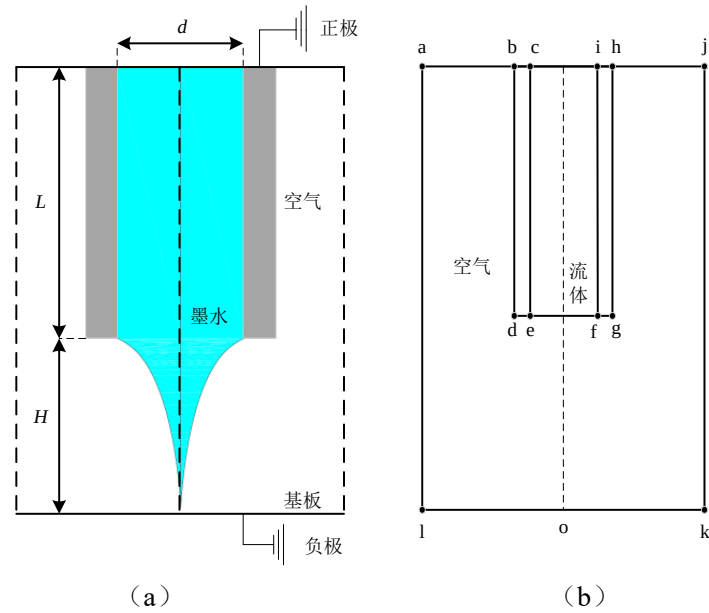


图 3-2 电喷印喷嘴结构及几何模型构建
(a) “喷嘴-基板”模型；(b) 几何模型示意图

模拟采用的锥射流几何模型如图 3-2（b）所示，其中流体代表打印墨水，液体流经区域属于喷嘴区域，当处于 $t=0\text{ s}$ 时，默认喷嘴出口处流场为平面。在确定几何模型后，需要添加约束，锥射流边界几何条件设置如表 3-1 所示。

表 3-1 边界几何条件设置

	边界	边界条件
ci	入口	入口静水压力补偿 $p[\text{Pa}]$
bc、ih	喷嘴上壁面	速度 $v=0$ ，电势 $e[\text{kV}]$
ab、hj、jk、al	开放边界	入口静水压力补偿 $p=0$ ，电势 $e=0$
bd、hg	喷头外壁面	无滑移，速度 $v=0$ ，电势 $e[\text{kV}]$
ce、if	喷头内壁面	无滑移，速度 $v=0$ ，电势 $e[\text{kV}]$
ef	相界面	电势 $e[\text{kV}]$
kl	出口	接地，电势 $e=0$

3.2.2 求解器设置

本研究的气液两相流动模型流体域材料分别为空气和丙三醇混合溶液，气液两相流

的材料属性设置如表 3-2 所示：

表 3-2 气液两相流的材料属性设置

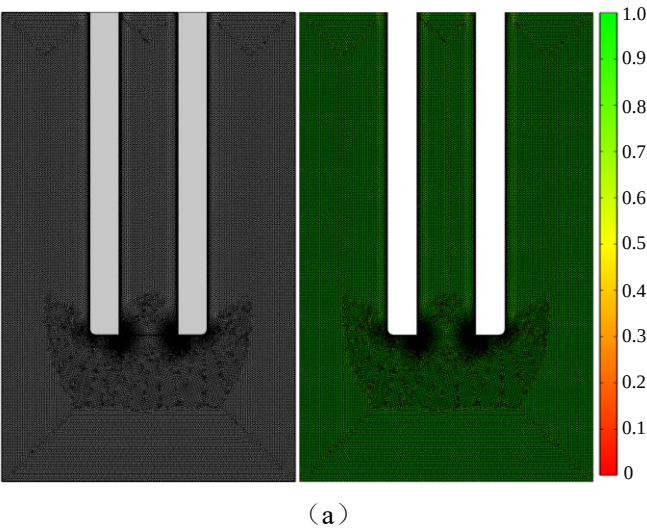
流体域	流体材料	相对介电常数	动力黏度 (Pa·s)	密度 (kg/m ³)
域 1	空气	1	17.9×10 ⁻⁶	1.293
域 2	丙三醇混合溶液	28.4	0.06	1208.4

本研究模拟的边界条件设置涉及相场接口和层流接口。对于相场边界条件，流体域 1 材料设置为空气，指定为流体 1 ($\phi=0$)，流体域 2 材料设置为丙三醇溶液，指定为流体 2 ($\phi=1$)；初始相界面选择域 1 与域 2 的交界面，即图 3-2 (b) 中“ef”界面；设置入口为流体 2 入口，即图 3-2 (b) 中“ci”界面；设置出口为流体 2 出口，即图 3-2 (b) 中“ik”界面，其余边界均选择为无滑移边界。层流接口中，流体域 1 和 2 均需要引入重力项，重力加速度大小为-g_const，负号表示 y 方向向下；速度场的初始值为 0，压力场初始值设置为静水压力补偿，设置在流体 2 入口位置；入口静水压力补偿设置为 75 Pa；设置出口静水压力补偿为 0 Pa。

两相流动相场方法的模拟研究中涉及两个求解过程：相初始化求解和瞬态求解。在相初始化求解过程中，选择两相流和相场耦合方法；在瞬态求解过程中，时间步长设置为 range (0, 0.8e-4, 4e-3)，因变量值节点采用默认选项。

3.2.3 几何模型网格划分及独立性分析

为了准确求解喷嘴出口处电场强度分布以及流体在喷嘴出口处的形态变化，需要在划分网格时，进行网格无关性分析。采用 COMSOL 自带的网格划分工具，对“喷头-基板”模型进行网格划分，保证最小单元格质量大于 0.1，平均网格质量大于 0.9，划分网格，取网格数量分别为：5087、7739、24719 和 86614，在电压为 1.7 kV，工作距离为 0.6 mm 时，计算喷头出口处的电势分布，几何模型的网格划分如图 3-3 (a) 所示。如图 3-3 (b) 所示为网格独立性分析结果，在四种不同网格数量下，出口处电势分布误差不超过 2%，均能够达到计算要求。为了确保后续模拟计算的精度，最终选用网格数量为 86614，其平均网格质量为 0.9301，最小单元格质量为 0.7955。



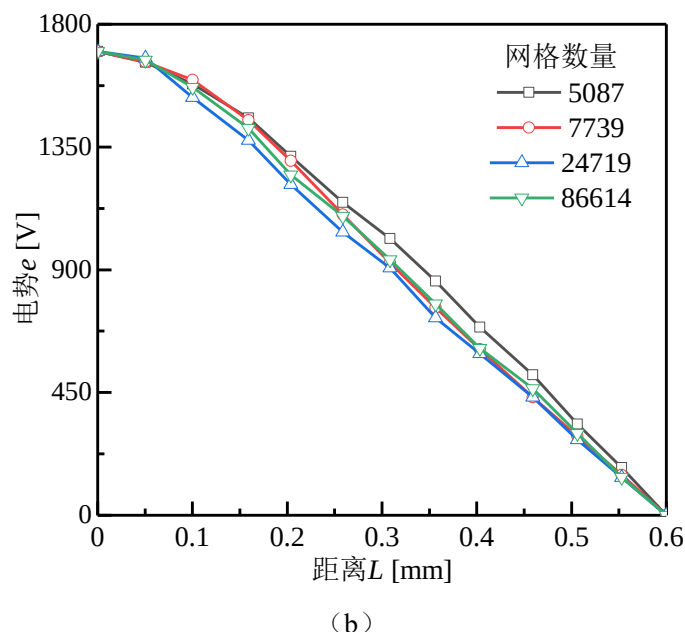


图 3-3 几何模型网格划分及网格独立性分析
(a) 几何模型网格划分；(b) 网格独立性分析

3.3 锥射流成型关键表征指标

3.3.1 泰勒锥内部回流

根据 Li 提出的泰勒锥内部回流理论^[105], 在产生较大的弯月面后, 若墨水在泰勒锥内部不进行内部回流, 弯月面会持续波动, 处于不稳定状态, 此时无法形成射流。在模拟过程中, 墨水体积分布能够直观地显示当前时间下墨水的分布, 并且根据墨水分布条件观测到相界面转变为弯月面, 最终向泰勒锥及锥射流的转变。因此, 本研究提出以内部回流作为相界面转化为泰勒锥的评判依据, 判断在模拟过程中是否能够产生锥射流。

在入口静水压力补偿为 75 Pa, 电势差 1.5 kV, 工作距离 0.6 mm 条件下, 进行电流体动力喷印的仿真模拟, 模拟结果如 3-4 所示。从图 3-4 中, 能观察到在喷头出口处墨水形成了一个类锥形, 且尖端的速度大于边缘速度; 能够明显观察到回流现象的产生, 这意味着在模拟过程中弯月面被拉伸形成了泰勒锥。

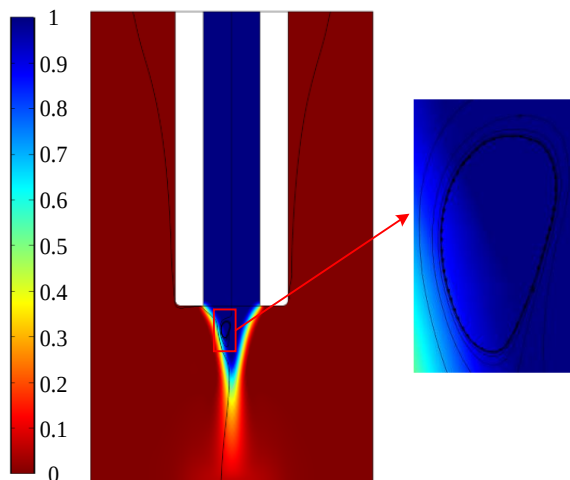


图 3-4 泰勒锥内部回流

3.3.2 电场强度

在电场力的作用下,相界面处墨水被拉伸变形,形成泰勒锥后进一步转化为锥射流,因此电场力的大小直接影响到电流体动力喷印整个过程。在“喷头-基板”模型中,电场力的方向及大小完全由电场强度决定,电场强度越大,相界面的墨水所受的电场力也就越大,易于克服表面张力及黏性力,形成弯月面后进一步形成锥射流。因此,本研究提出以电场强度作为评价泰勒锥成型难度的一项指标,理论条件下,当电场强度越大时,弯月面更易成型,也更易形成稳定锥射流。

3.3.3 喷头出口处液面高度

喷头出口处液面高度是流体体积分数变化的直观表征。随着时间的迁移,喷头出口处的液面逐渐弯曲变形,先形成弯月面后会逐步变形,此时根据电场强度的变化出现三种情况。在电场强度偏小时,弯月面随时间变化缓慢,不易发生变形,经过长时间迁移后,弯月面高度缓慢增加,最后在电场力的持续作用下会形成倒锥形液面;电场强度合适,弯月面高度能够快速增加,逐渐演变泰勒锥后形成稳定的锥射流;电场强度过大,此时会破坏相界面流体表面的平衡,射流极易发散。因此,本研究通过喷头出口处液面高度,也就是墨水体积分数分布来直观表示弯月面向泰勒锥(锥射流)、发散射流的演变过程,并且通过记录形成稳定锥射流时,相同时间条件下喷头出口处液面高度来反映弯月面的变形情况,用于评估锥射流成型难度。

3.4 模拟结果及分析

3.4.1 工作距离对墨水体积分布及弯月面高度的影响

为了探究喷印的工作距离对墨水体积分布与弯月面高度的影响,在工作距离为 0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8 mm 条件下,采用丙三醇混合溶液进行模拟仿真分析,电压为 1.7 kV 时电场分布特性如图 3-5 所示。如图 3-5 (a) 所示为电势分布云图,在喷头出口处轴线方向上,电势大小逐渐减小,电势最大值位于喷嘴出口处,达到 1657 V,电势最小值位于基板处,电势值为 42.5 V,接近零电势。图 3-5 (b) 所示为电势差 1.7 kV 条件下的电场分布云图,电场为负值意味着电场方向由喷嘴出口指向基板,与 3-5 (a) 中电势下降方向一致。电场强度在喷嘴出口处达到最大值,在基板表面达到最小值,随着距离逐渐增大,电场强度减小,在基板上达到最小值。

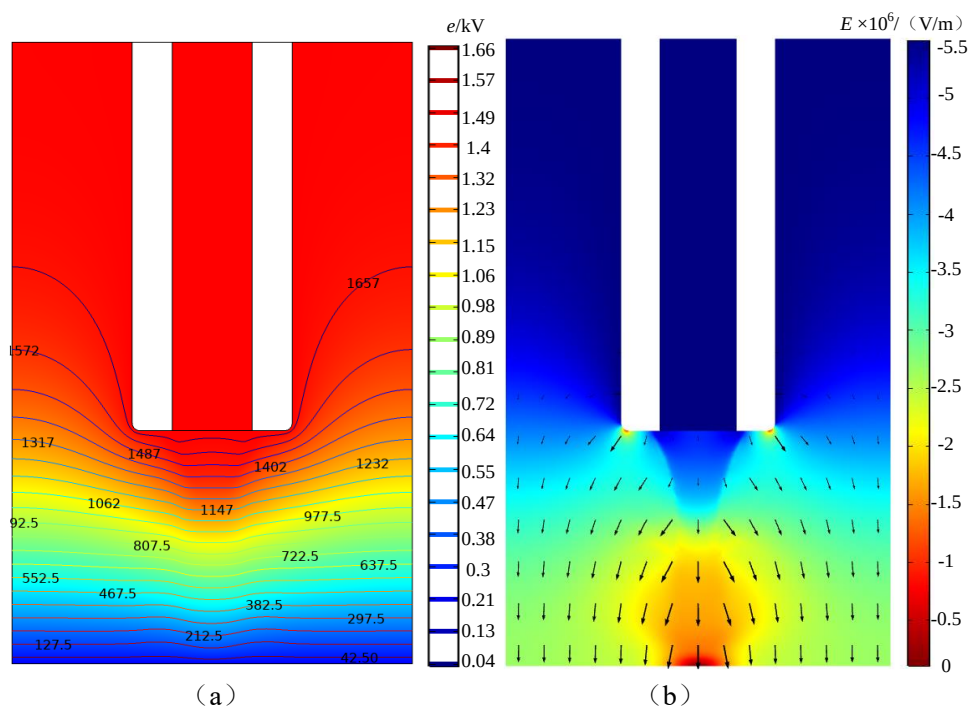


图 3-5 电压为 1.7 kV 时电场分布特性

(a) 电势分布云图; (b) 电场分布云图

图 3-6 所示为工作电压 1.7 kV 条件下, 工作距离为 0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8 mm 条件下, 1.2 ms 时电流体动力喷印墨水体积分数分布云图。当工作距离为 0.4 mm 时, 如图 3-6 (a) 所示, 喷嘴出口处的液面发散, 不能形成弯月面。在电压恒定条件下, 工作距离越小, 电场强度越大, 此时切向电场力远超过表面张力和黏性力的合力, 严重影响到喷头出口处液面的平衡, 产生射流发散现象。当工作距离较大时, 如图 3-6 (d) 和 3-6 (c) 所示, 工作距离较大, 电场强度小导致切向电场力不足以克服表面张力及黏性力, 迫使墨水向弯月面顶端移动, 因此在相同时间条件下产生的弯月面较小。当工作距离进一步增大, 电场强度过小则无法提供足够的切向电场力支撑锥射流的成型, 如图 3-6 (d) 与 3-6 (e) 所示, 弯月面虽然能够成型, 但是弯月面高度相对较小。

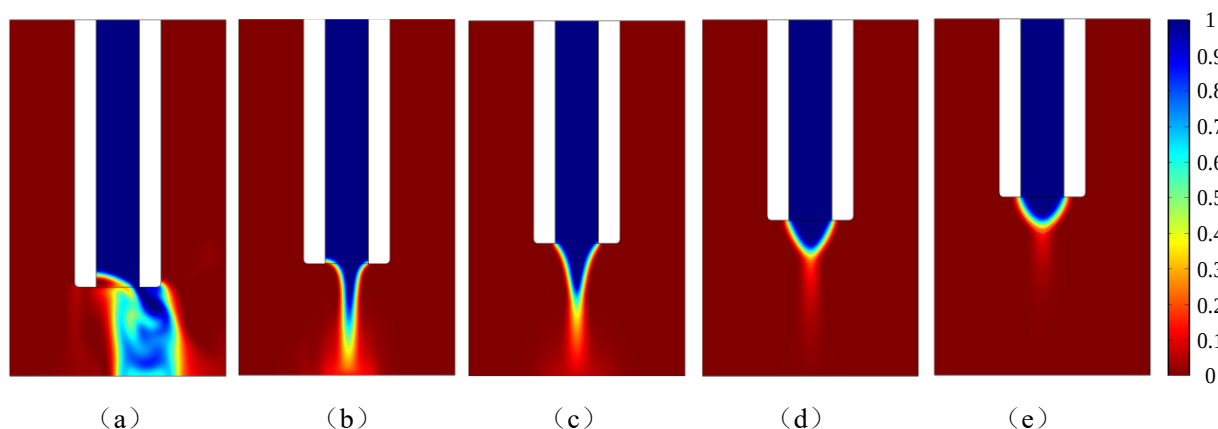


图 3-6 不同工作距离下墨水体积分数分布云图

(a) 0.4 mm; (b) 0.5 mm; (c) 0.6 mm; (d) 0.7 mm; (e) 0.8 mm

在工作电压 1.7 kV 条件下, 当模型收敛后, 工作距离为 0.4、0.5、0.6、0.7 和 0.8

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/666125114154010053>