

喷墨打印控制系统的现状和趋势

王家奇¹, 陆利坤¹, 刘 为²

¹北京印刷学院信息工程学院, 北京

³湖南常德金鹏印务有限公司, 湖南 常德

收稿日期: 2025年9月15日; 录用日期: 2025年10月5日; 发布日期: 2025年10月16日

摘 要

喷墨打印技术作为数字化制造与精密加工领域的关键技术, 在工业制造、增材制造、电子封装、生命科学等多个前沿领域具有广泛的应用前景。本文综述了喷墨打印控制系统的研究现状与发展趋势, 首先概述了热泡式和压电式喷墨打印控制的核心理论, 然后对喷墨打印控制领域的国内外现状进行了分析。接着, 国内在热泡喷墨芯片设计和压电喷墨供墨控制技术等方面的研究取得了一定的成果。国外则更加提升设备的稳定性与适应性, 同时注重喷墨打印技术在制药等领域的应用拓展。此外, 本文总结了喷墨打印控制研究的主要方法, 包括模拟仿真和控制系统设计等。最后, 本文针对当前存在的系统整体性研究不足、实验与仿真结合不紧密、工业化应用探索不够等挑战进行了展望, 主要有多喷头协同控制、自适应控制算法的开发以及新型功能材料的适应性喷墨控制等。

关键词

喷墨打印控制系统, 热泡式喷墨, 压电式喷墨, 模拟仿真

Research Status and Development Trends of Inkjet Printing Control System

Jiaqi Wang¹, Likun Lu¹, Wei Liu²

¹School of Information Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

²Hunan Changde Jinpeng Printing Co., Ltd., Changde Hunan

Received: September 15, 2025; accepted: October 3, 2025; published: October 16, 2025

Abstract

As a key technology in digital manufacturing and precision processing, inkjet printing holds broad application prospects in various cutting-edge fields such as industrial manufacturing, additive manufacturing, electronic packaging, and life sciences. This paper reviews the research status and development trends of inkjet printing control systems. It begins with an overview of the core theories

governing thermal and piezoelectric inkjet printing control, followed by an analysis of the current state of research both domestically and internationally. Domestically, notable progress has been made in areas such as thermal inkjet chip design and piezoelectric inkjet supply control technology. Internationally, efforts are more focused on enhancing the stability and adaptability of equipment, alongside expanding applications in fields like pharmaceuticals. Furthermore, this paper summarizes the main research methods in inkjet printing control, including simulation and control system design. Finally, it outlines challenges such as insufficient holistic system research, weak integration of experimental and simulation studies, and limited exploration in industrial applications. Promising future directions include multi-printhead cooperative control, development of adaptive control algorithms, and inkjet control strategies for novel functional materials.

Keywords

Inkjet Printing Control System, Thermal Inkjet, Piezoelectric Inkjet, Simulation

Copyright © 2025 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

喷墨打印技术作为数字化制造与精密加工的核心技术之一，凭借其非接触、高灵活性与广泛的材料相容性，在智能制造、柔性电子、生物制造等前沿领域应用不断深化。随着制造强国战略的深入推进，其在高效功能器件制备和微尺度复杂结构成形方面的潜力日益凸显。本文旨在综述喷墨打印控制系统的当前研究现状，并展望其智能化、高精度化的发展趋势。

2. 喷墨打印控制系统及基础理论

2.1. 喷墨打印控制系统

喷墨打印控制系统是数字化制造与高精度材料沉积领域的关键技术组成部分，其核心功能在于实现对墨滴生成、喷射、飞行及沉积全过程的高精度调控，以满足工业级的高效率、高分辨率及个性化制造需求。根据喷墨原理的不同，现有研究系统主要可分为热泡式与压电式两大类[1]，其分类示意如图 1 所示。

2.1.1. 热发泡式喷墨技术

热发泡喷墨技术(Thermal Inkjet, TIJ)是一种基于热气泡驱动原理的液滴生成方法，其工作机制依赖于微加热器对墨水瞬时汽化形成气泡的动态控制。该技术最早由 Canon 与 Hewlett-Packard 于 20 世纪 70 年代末开发并商业化。热发泡喷头喷墨方式如图 2 所示，电流通过微加热器导致局部墨水汽化，形成高压气泡推动液滴经喷嘴射出；随后气泡坍塌，依靠毛细作用补液，完成喷射循环。

该技术的核心在于对加热脉冲的精确调控，以维持气泡成核、生长和溃灭的稳定性，从而确保液滴均匀性与可靠性。墨水的流变性能，尤其是粘弹性，对打印质量至关重要。研究表明，如在 PbTe 热电墨水中的电子掺杂可调控粘弹性，实现高精度成型[2]；类似地，在制药和软材料 3D 打印，如 Hot-Melt Extrusion-Fused Deposition Modeling (HME-FDM 耦合工艺)中，材料的热响应性与流变行为直接影响制造质量[3]；加热辅助直写技术，如 Polydimethylsiloxane Foam Preparation (PDMS 泡沫制备)通过热场抑制结构塌陷，提高成型精度[4]。热发泡技术因此不仅依赖于热-流耦合过程，更需与材料物性协同设计，以适应多材料、高精度制造的需求。

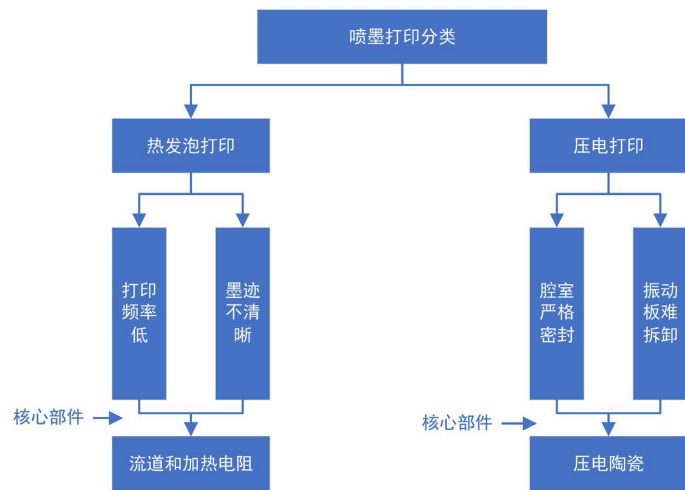


Figure 1. Classification diagram of inkjet printing technologies
图 1. 喷墨打印技术分类图

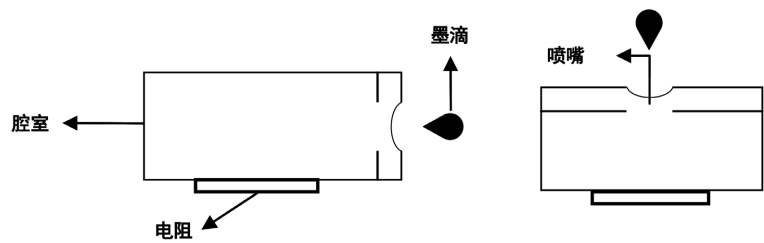


Figure 2. Schematic diagram of a thermal inkjet printhead
图 2. 热发泡喷头喷墨示意图

2.1.2. 压电喷墨技术

压电喷墨技术(Piezoelectric Inkjet, PIJ)利用逆压电效应驱动液滴喷射。如图 3 所示，电压信号使压电元件发生形变，改变腔室体积并产生压力波，推动墨液经喷嘴射出。通过精确调控电压幅值、频率与波形，可实现液滴体积、速度及时序的高精度控制。该技术的性能关键在于压电材料特性、腔室结构与驱动波形之间的多物理场耦合优化，以确保喷射稳定性和重复性[5]。

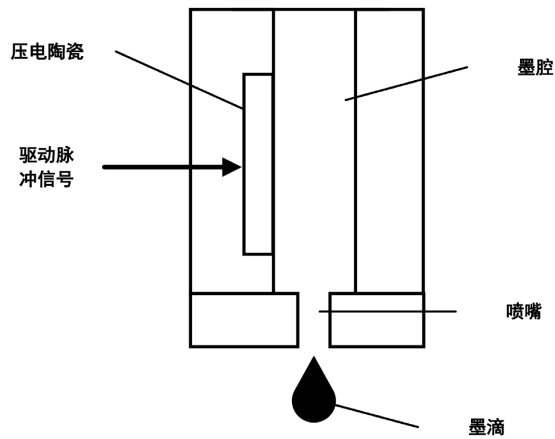


Figure 3. Schematic diagram of a piezoelectric inkjet printhead
图 3. 压电喷墨头示意图

压电喷墨技术因其高精度[6]、稳定性好及适应性强等特点[7]，已广泛应用于高精度打印、生物医学传感(如在压电纤维上印刷聚合物电极阵列)[8]和柔性电子制造(如无需退火的金图案直写)等领域[9]，体现出在多功能器件增材加工中的重要作用。

2.2. 理论基础

喷墨打印控制系统的建模与分析基于流体动力学、热力学传热模型、电子控制理论及系统辨识方法。热泡式喷墨技术依赖于传热与相变理论，用于描述电阻加热层中的瞬态沸腾机制[10]；压电式喷墨则建立在压电效应与弹性力学理论基础，以表征电场作用下压电材料形变及液腔体积变化[11]。近年来，有限元方法(Finite Element Method, FEM)与计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)被广泛应用于喷嘴内部动态过程的精确模拟[12]，如气泡生长、流体剪切、墨滴成形与飞行行为，为控制策略提供理论依据。

特别地，格子玻尔兹曼方法(Lattice Boltzmann Method, LBM)作为一种介观数值方法[13]，因其能够自然处理多相界面和相变过程，在模拟多相流动与传热中表现出显著优势。其基于分布函数演化的动力学特性，适用于复杂边界与并行计算，已成功应用于包括喷墨打印在内的微流动系统中。此外，压电效应在功能材料中的运用，如压电光催化中通过内置电场促进电荷分离，也为压电喷头的设计与控制提供了跨学科参考。

在颗粒悬浮液滴的按需喷印过程中，多相流、颗粒动力学与热传导的耦合效应尤为关键。研究表明，即使低浓度颗粒也会显著影响喷射对称性与卫星滴生成，而热加载则会改变液滴分离机制与成形精度。因此，结合多物理场仿真工具(如 COMSOL、ANSYS)与先进数值方法(如 LBM)，可实现对喷墨过程的高保真建模与优化。

喷墨打印控制系统已发展为融合流体动力学、热力学、电子控制与智能算法于一体的综合理论体系，并在工业与科研中广泛应用。未来，结合人工智能、边缘计算与自适应优化算法，喷墨控制系统将进一步向智能化、高精度方向发展，推动其在增材制造、柔性电子与功能材料打印等前沿领域的应用。

3. 国内外研究现状

3.1. 国内研究现状

喷墨打印控制系统作为现代数字化制造技术的核心组成部分，在国内的研究起步相对较晚，但发展较为迅速。自 20 世纪 90 年代末我国在热泡喷墨打印技术领域开展基础性研究以来，相关技术已逐步从简单的喷头控制电路，演进至多喷头协同驱动、实时供墨控制及闭环反馈调节等复杂系统架构[14]。近年来，随着 MEMS 制造技术、FPGA 嵌入式系统以及模糊控制等理论的引入，国内在热泡与压电式喷墨打印控制系统的设计方面取得了一系列重要突破[15]。我国学术界与产业界对该技术的重视程度不断提升，推动喷墨控制系统从早期的单喷头、低频、半开环控制模式，向高频、多喷头、全闭环及高度智能化的方向持续发展[16]。

3.1.1. 基于 MEMS 的高频热发泡喷墨

在国内相关研究中，彭熙舜等人针对热泡喷墨打印芯片的核心部件开展了系统性研究，开发了基于 MEMS 技术的高频热泡喷墨打印芯片，并首次在国内引入 FPGA 控制系统以提高驱动信号的调制精度与系统响应速度，其所设计的喷头驱动电路模块如图 4 所示。该研究提出了两项关键创新：一为 TaN 薄膜发热电阻，通过双层薄膜结构有效缓解了热应力集中问题，增强了电阻材料的可靠性；二为 H 型限流结构，可有效抑制气泡逆流，提升墨腔内部液体的利用效率。有限元仿真与实验验证结果表明，该结构显著改善了喷头的加热效率与喷墨一致性，尤其在高频喷射条件下仍表现出良好的稳定性。此外，该系统

集成 Xilinx Kintex-7 FPGA 芯片、异步 FIFO 缓存及大容量 DDR 存储单元, 能够实现 10 喷头同步控制并支持离线打印, 为我国自主研制喷墨芯片提供了新途径。然而, 该研究主要集中于单芯片层级的热管理及喷嘴结构优化, 尚未系统探讨大规模喷头阵列的协同控制问题, 一定程度上制约了该技术在工业级设备中的直接应用。

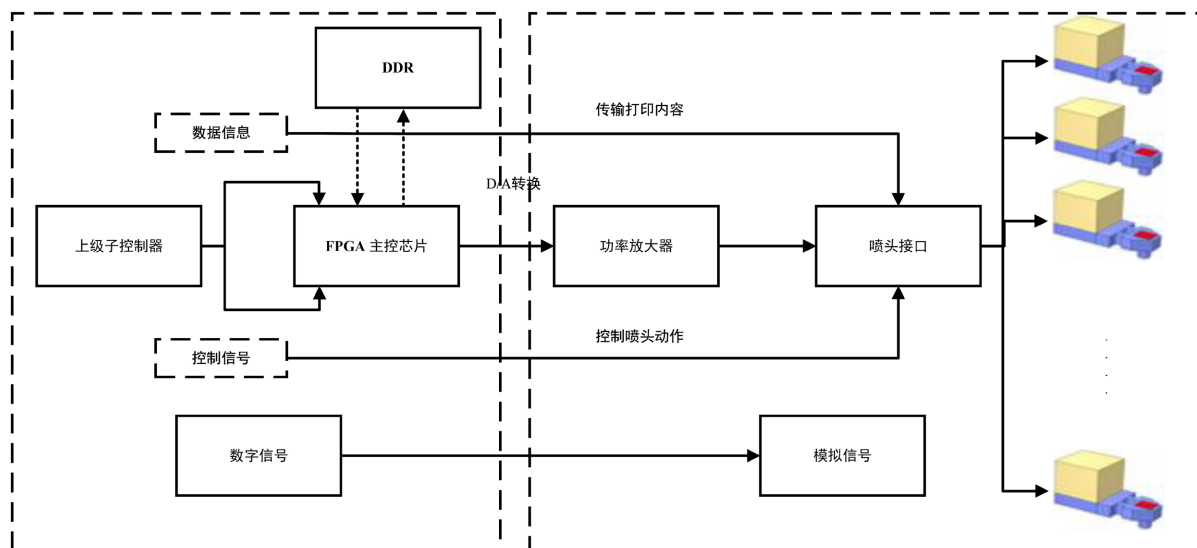


Figure 4. Schematic diagram of the printhead drive circuit module

图 4. 喷头驱动电路模块图

3.1.2. 压电喷墨研究

与热泡式喷墨技术路径不同, 牛志飞等人系统研究了压电喷墨打印系统中供墨控制的关键技术瓶颈。该系统总体结构如图 5 所示。该研究明确针对压电喷墨打印供墨控制难题, 提出了双墨盒动态供墨结构与循环供墨路径, 引入模糊 PID 控制算法, 并建立了二维层流两相流物理模型, 从而优化了供墨系统关键性能指标, 显著降低了喷头堵塞风险; 然而, 该工作对喷头驱动电路与系统级协同设计的探讨仍显不足。张洋等人以理光 Gen5 压电喷头为研究对象, 设计了基于 STM32 的双循环供墨控制系统, 集成隔膜泵、电磁阀及加热片控制模块, 并采用改进的模糊 PID 算法对墨水温度与压力进行精确控制, 有效抑制了供墨波动对喷印质量的影响[17]。该系统适用于中小型喷墨设备, 但未深入探讨多喷头阵列协同控制及数据传输效率问题[18]。汪邵华针对 SG1024 压电喷头, 设计了基于 FPGA 的喷墨驱动控制系统, 涵盖控制模块与图像数据传输单元等部分, 并基于 DDS 原理生成低压驱动信号, 提升了驱动电压的稳定性与可调性, 适用于工业级高精度 3D 打印设备; 然而, 该研究未集成供墨系统设计, 未能实现全流程闭环控制[19]。张鹏面向 Ricoh GEN5 喷头的复杂控制需求, 设计了基于 FPGA 的控制系统[20]。通过优化波形生成单元与光纤收发模块, 提升了控制信号的同步性与稳定性, 能够满足高频喷墨要求, 并具备良好的系统扩展性; 但其研究缺乏供墨系统联动控制、在线状态监测与反馈调节机制。

总体而言, 国内喷墨打印控制系统的研究在技术路径上可归纳为两种主要方向。其一侧重于热泡式喷墨芯片的自主设计, 聚焦于喷嘴结构优化、材料选型及单喷头控制系统开发, 以彭熙舜等人提出的 MEMS 热泡喷墨芯片为代表, 该研究在芯片级驱动电路与热管理方面取得了显著进展。其二则以压电式喷墨系统的应用优化为核心, 重点围绕供墨系统的动态控制与喷头驱动电路性能提升展开, 反映出国内研究正逐步从单一功能模块向系统集成化与智能化方向演进[21]。在技术应用层面, 相关研究主要集中在 3D 打印、数码印刷、功能涂层制备及生物打印等领域, 实验结果表明, 所开发的控制系统在提高墨滴一

致性、喷射稳定性与打印精度方面作用显著[22]。然而，当前国内系统仍普遍存在喷头驱动与供墨系统协同整合不足、反馈闭环调节机制不完善、喷头寿命预测与状态监测功能较弱等问题，尚难以满足超高频、超大规模喷头阵列协同作业的工业级应用需求。

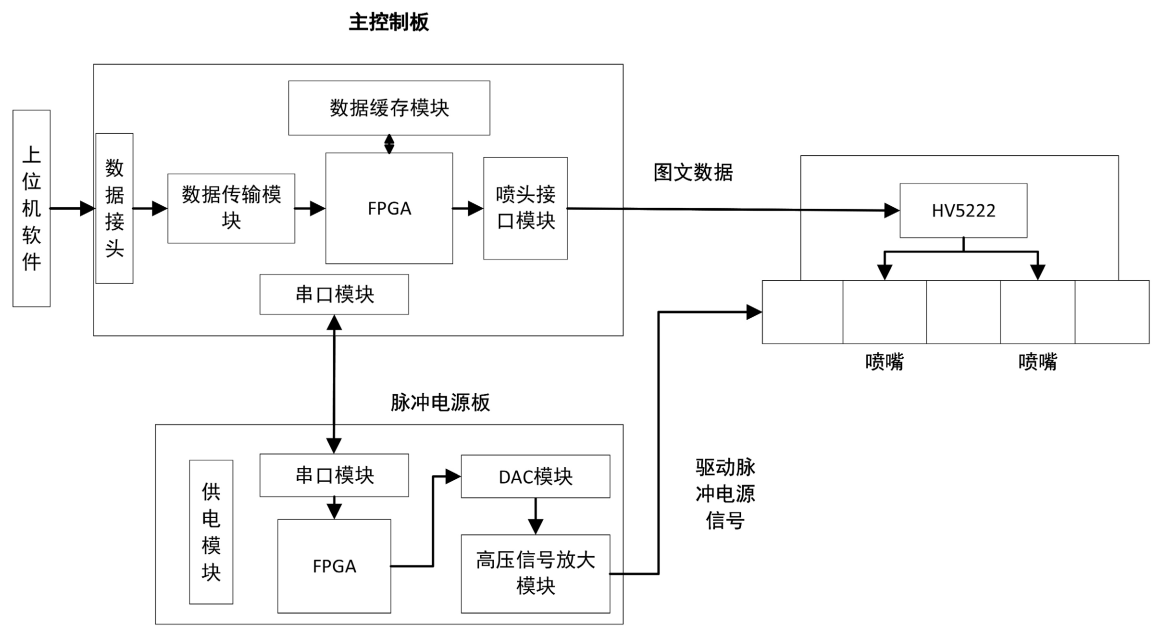


Figure 5. Overall architecture diagram of the control system
图 5. 控制系统总体结构图

3.2. 国外研究现状

在国际研究热点方面，多项研究体现出显著的研究价值与深度。Olga Kiefer 等人对 Spectra SE-128 AA 与 Konica Minolta KM512SHX 两种压电式打印头进行了系统比较，研究表明 Spectra 打印头在单次打印效率和降低墨滴散射方面表现更优，并指出低蒸汽压、难以渗透 HPMC 基薄膜的液体辅料(如聚乙二醇 400)不适用于该打印体系，而打印几何形状的影响相对有限，该研究为药物打印设备的选型与工艺参数优化提供了重要依据[23]。Hatim K. Cader 团队致力于水基 3D 喷墨打印口服制剂的研究，采用 Fujifilm Dimatix 打印机，开发出具有良好喷射性能的水基墨水配方，成功制备出不依赖可食用基底或其他打印方法辅助的独立式药片，为规避溶剂型喷墨打印中有毒溶剂的使用提供了新途径[24]。Konica Minolta 公司的喷墨打印头技术凭借高可靠性与独特设计在工业喷墨领域具有重要地位，其开发的适用于高端时尚纺织品的喷墨打印设备，以及配备内部电加热器与热敏电阻的 UV 墨专用喷头，为药物喷墨打印设备的稳定性与环境适应性提供了参考[25]。FUJIFILM Dimatix 公司推出的 Dimatix Materials Cartridge (DMC-11601) 及配套 Dimatix Materials Printer (DMP) 系统，为高精度非接触式流体打印提供了先进平台；该系统具备 1 pL 超小墨滴体积、基于 MEMS 技术的 16 喷嘴打印头及便捷墨盒更换设计，为高端制剂开发与个性化药物芯片制造等领域提供了关键技术与设备支持。Yasmin Thabet 等人开展的连续喷墨打印研究，成功实现在连续生产过程中将依那普利马来酸盐(Enalapril Maleate, EM)墨水在线打印至含或不含氢氯噻嗪(Hydrochlorothiazide, HCT)的口腔分散膜(Oral Dissolving Films, ODFs)上，为个性化药物制剂的连续化与规模化生产提供了实证依据[26]。此外，Henrika Wickström 团队通过喷墨打印技术改善难溶性药物吲哚美辛(Indomethacin, IMC)的溶出行为，采用 L-精氨酸(L-Arginine, ARG)与聚维酮(Polyvinylpyrrolidone, PVP)作为辅料，优化墨水配方与打印参数，成功打印出 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的药物单元，为难溶性药物的制剂开发提供了新策

略。

在技术应用层面，国际主流喷墨打印技术在制药领域的应用呈现多元化发展趋势。以水基墨水喷墨打印技术为例，其在规避有毒有机溶剂、实现药物快速释放及个性化剂量调控方面具有显著优势。例如，Hatim K. Cader 团队的研究为新型口服制剂的设计提供了有效技术支撑；然而，该技术在墨水配方稳定性、打印精度调控以及对药物多晶型的影响等方面仍存在明显局限，亟待进一步优化。另一方面，FUJIFILM Dimatix 公司的高精度打印设备与系统，在生物医学工程与电子材料制造等领域已取得广泛应用，为药物喷墨打印技术的跨领域迁移提供了重要参考。该类系统在高精度药物芯片制备及个性化药物涂层等方向具备显著潜力，但其设备成本高昂、操作环境与维护要求严苛，制约了在制药企业中的大规模推广。Konica Minolta 公司的工业级喷墨打印头技术，为连续化药物打印生产提供了可靠的硬件基础，然而在复杂结构制剂打印和多药协同喷射等应用场景仍缺乏系统研究，其于制药领域的深度融合模式尚需进一步探索。Yasmin Thabet 团队在连续喷墨打印方面的研究为制剂连续化生产提供了新途径，但在产业化实践中，如何实现与现有制药装备的兼容整合、保障产品品质一致性以及控制综合成本等问题仍待解决[27]。

根据表 1 代表性研究机构与团队的贡献来看，Olga Kiefer 等人对打印头结构与工艺参数的深入研究，以及 Henrika Wickström 团队在难溶性药物打印配方优化方面的工作，为该领域的技术推广提供了关键理论依据与实践指导。上述研究在一定程度上突破了传统药物制剂开发的限制，奠定了喷墨打印技术在制药领域中广泛应用的基础，提升了其于全球学术界与工业界的影响力[28][29]。尽管如此，该领域仍存在诸多技术瓶颈。在实际应用中，喷墨打印技术的适用性受到药物本身物化特性、墨水配方稳定性及打印系统精度等多重因素的制约。

Table 1. Table of technical strengths and limitations of foreign research teams
表 1. 国外各研究团队的技术优势局限表

技术类型/方向	代表机构/团队	主要应用与优势	现存问题与局限性	技术类型/方向
水基墨水喷墨打印	Hatim K. Cader 团队	避免使用有毒溶剂，实现药物快速释药和个性化剂量调控，为新型口服制剂开发提供支持。	墨水配方稳定性不足，打印精度控制有待提升，可能影响药物多晶型态。	水基墨水喷墨打印
高精度压电打印设备与系统	FUJIFILM Dimatix 公司	在生物医学和电子领域应用成熟，于高精度药物芯片制造、个性化药物涂层方面潜力巨大。	设备成本高昂，对操作环境与维护要求严格，限制了在制药业的广泛普及。	高精度压电打印设备与系统
工业化喷墨打印头技术	Konica Minolta 公司	技术稳定性高，为药物的连续化、工业化生产提供了硬件保障。	在复杂药物结构打印、多药协同打印等制药细分领域的应用实例较少，深度应用模式待探索。	工业化喷墨打印头技术
连续喷墨打印技术	Yasmin Thabet 团队	为药物制剂的连续化生产提供了创新思路，符合现代制药工业发展方向。	与现有制药工艺整合困难，难以确保产品质量稳定性，生产成本控制面临挑战。	连续喷墨打印技术
打印头设计与工艺参数研究	Olga Kiefer 等团队	对核心打印部件和工艺进行深入研究，为技术应用提供关键理论支持和参数优化依据。	研究成果从实验室到大规模工业生产的转化路径仍需验证。	打印头设计与工艺参数研究

续表

药物墨水 配方优化	Henrika Wickström 团队	针对难溶性药物等特殊配方 进行优化，突破了传统药物 制剂开发的局限性。	配方普适性可能不足， 不同药物需重新开发专用 墨水，研发成本和周期较长。	药物墨水 配方优化
--------------	-------------------------	---	--	--------------

在国际喷墨打印技术研究中，压电式与水基打印成为两大主流方向，分别聚焦于高精度控制和绿色制剂工艺。代表性工作涵盖打印头性能比较、水基墨水开发、连续化生产系统构建以及难溶性药物打印策略，体现了该领域从单一工艺优化向系统集成与智能化的发展趋势。然而，当前技术仍面临设备 - 工艺整合不足、系统闭环控制缺失、工业级规模化应用受限等核心瓶颈，亟待通过多学科协同与技术创新实现突破。

4. 研究方法的总结与评估

在喷墨打印技术的学术研究与应用开发过程中，多种研究方法被系统采用并彼此支撑，协同推进该领域的深入发展。目前主流的研究方法主要包括实验设计与数值模拟、材料科学与墨水配方优化、以及控制系统设计与性能验证等关键方向。

4.1. 模拟仿真方法

实验设计与模拟仿真方法在喷墨打印技术研究中占据关键地位。通过建立精确的物理模型并系统开展有限元分析，研究人员能够深入揭示喷墨过程中的流体动力学机制，为打印头结构优化与工艺参数调控提供理论依据。例如，彭熙舜等人通过有限元仿真确定了适宜的驱动电压与加热时间，优化了热泡式喷墨芯片发热电阻的设计，显著提高了打印效率与墨滴喷射稳定性(相关参数见表 2)。该方法在降低实验成本、加速技术研发进程方面具有明显优势，尤其适用于处理多物理场耦合及复杂结构问题[30]。

Table 2. Table of design parameters for the heating resistor
表 2. 加热电阻的设计参数

结构参数	数值(μm)
Si	60 × 40 × 5
第一层 SiO ₂	60 × 40 × 1
TaN	32 × 13 × 0.05
Al	6 × 13 × 0.05; 8 × 13 × 0.05
第二层 SiO ₂	60 × 40 × 0.1
Si ₃ N ₄	60 × 40 × 0.2

近年来，随着数值模拟方法的不断发展，多种高保真仿真技术被广泛应用于喷墨打印过程的研究中。任晓飞采用水平集方法对喷嘴区域液滴生成、喷射与撞击过程进行了模拟，系统评估了表面张力、喷射速度与动力黏度对液滴形态、飞行特性及卫星滴形成的影响[31]；桑瑞娟等人基于图像分层建模方法，实现了 UV 喷墨打印中木质纹理的三维仿真与彩色浮雕成形，并通过粗糙度、色差、光泽度、附着力和硬度等物理性能测试，验证了打印层是否符合装饰板材表面漆膜的应用标准[32]；尹宗君等人则借助相场动力学方法模拟了液滴撞击弯曲壁面的动态润湿行为，分析了不同撞击速度下液滴的流态演化规律，为解决移动接触线奇异性问题提供了有效途径。

然而，必须指出的是，仿真方法的有效性强烈依赖于模型的准确性与参数设置的合理性，对研究人员的专业能力与经验有较高要求[33]。此外，数值模拟结果需通过实验数据予以验证，以确保其可靠性与适用性。因此，在喷墨打印技术研究中，应始终坚持“模拟 - 实验”相互校验的研究范式，推动该领域的科学发展和工程应用。

4.2. 控制系统设计

控制系统设计与验证方法致力于提升喷墨打印的精确性与重复性。基于 FPGA 及其他微控制器的控制系统能够实现喷墨过程的高精度调控，包括喷头驱动信号的生成、图像数据的传输与处理等关键环节。汪邵华的研究开发了一种适配 SG1024 喷墨头的驱动控制系统，其工作流程如图 6 所示。该系统实现了图像数据的高速传输与墨滴喷射的精确控制，为工业级喷墨打印设备的开发提供了关键技术支撑。此类控制系统在提升打印效率与输出质量方面具有显著优势，尤其适用于高精度、大规模打印任务。然而，其设计与调试需具备电子系统设计与嵌入式开发等方面的专业知识，且在实际应用中需根据具体打印需求与环境条件进行持续优化与系统适配。

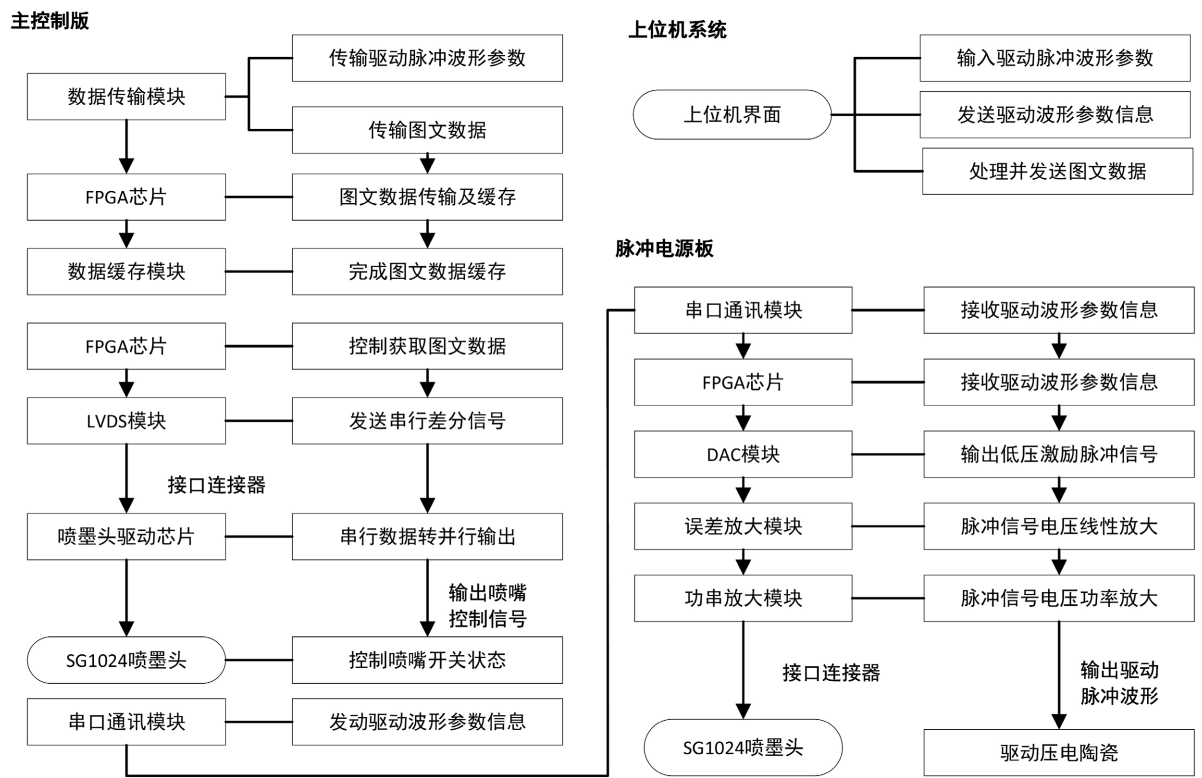


Figure 6. Operational flowchart of the drive control system
图 6. 驱动控制系统工作流程图

当前研究趋势表明，智能闭环控制正逐步替代传统开环策略，以应对材料变异和工艺耦合带来的挑战。Michal 团队采用强化学习实现直接墨水书写的在线控制，通过近似仿真与策略迁移，有效提升高、低黏度材料的打印一致性[34]；William 团队则融合深度学习与机器视觉，动态优化热固复合材料打印参数，显著改善纤维排列与力学性能[35]。在多变量约束控制方面，Graziana 团队将模型预测控制(MPC)应用于深冲压成型，通过多目标协调与实时监测抑制缺陷生成，为打印控制中的多物理场耦合问题提供了借鉴[36]。

4.3. 方法总结

喷墨打印技术的研究与开发依托多方法协同并进的系统性策略,涵盖从过程模拟、材料优化到控制验证等多个关键环节,共同推动该技术向高精度、高效率与高适应性方向发展。

在模拟仿真方面,基于有限元分析、水平集方法、相场动力学及图像分层建模等高保真数值方法,研究实现了对液滴生成、飞行、撞击以及复杂表面成形行为的精细化预测与机理揭示。该类方法显著降低实验成本、加速工艺研发,尤其适用于多物理场耦合问题的理论分析与参数优化,但其有效性高度依赖于模型的准确性与参数合理性,须通过实验数据予以严格验证,以构建“模拟-实验”闭环的研究范式。

在控制系统设计方面,传统基于 FPGA 与微控制器的开环控制已逐步发展为融合强化学习、深度学习与机器视觉的智能闭环策略。该类方法能够实时响应材料特性波动与工艺扰动,实现参数动态优化与质量控制,显著提升打印一致性、成品率及机械性能。尤其在高精度、多变量、强耦合的打印任务中,模型预测控制(MPC)等先进方法展现出较强适用性。然而,控制系统设计仍面临模型-实况差异、算法实时性与系统集成等多重挑战,需依托跨学科知识进行持续优化与验证。

综上所述,喷墨打印技术的研究方法正呈现出多学科交叉、虚实结合、智能调控的显著特征,其进一步发展亟需在模型精度、控制实时性与系统集成度等方面实现突破,以支撑该技术在新材料、新结构及新应用场景中的创新与推广。

5. 存在的挑战

近年来,喷墨打印控制系统研究虽取得系列进展,但仍面临多维度挑战。现有工作多聚焦于单一性能优化,如墨滴动力学、喷嘴结构或单元电路设计,缺乏系统级多尺度协同研究。例如,部分研究通过有限元仿真或模糊 PID 控制提升了局部性能,却尚未深入解决工艺-材料-热应力耦合、非牛顿流体动态响应及多变量扰动下的鲁棒控制等关键问题。研究方法层面,虽引入多物理场建模仿真工具,但尚未构建“设计-仿真-验证”一体化框架,多数模型仍基于理想假设,未能充分体现微观物理场耦合效应。应用方面,现有成果多局限于实验室环境下的单机、单喷头验证,缺乏面向工业级大规模生产、多喷头协同及复杂工况的系统性测试与适配,难以满足智能制造与柔性电子等新兴领域对高可靠性、高兼容性的控制需求。

此外,若干深层问题仍待深入探究:其一,针对不同喷头类型与非标准打印材料(如生物墨水、功能纳米材料)的适配性研究不足;其二,系统智能化和网络化程度较低,缺乏云边协同的分布式控制架构;其三,微流道内流体-传热耦合机制、墨滴气动行为等基础理论模型尚不完善,限制了仿真预测与过程优化能力。这些瓶颈部分源于高精度检测手段缺乏、跨尺度建模方法不成熟及工业数据封闭等因素,导致模型构建依赖经验假设,制约了技术集成与产业应用推广。

6. 总结与展望

喷墨打印控制领域已形成以喷嘴微结构设计、驱动控制系统与供墨路径优化为核心的技术体系。国内研究侧重于 MEMS 微结构设计、热管理及电路集成,如彭熙舜等基于 MEMS 的热泡喷头结构设计与仿真优化、牛志飞提出的模糊 PID 压电供墨控制方法,以及张洋开发的负压双循环供墨系统,为我国系统自主化与智能化奠定了基础。国际研究则更注重理论深化与应用拓展,如 Olga Kiefer 等人的打印头性能比较、Hatim K. Cader 团队面向水基 3D 打印药物制剂的工艺探索,推动技术向生物医药等前沿领域渗透。

当前,国内在 FPGA 控制、供墨系统设计与实验验证方面进展显著,但在芯片自主工艺、先进控制

算法实际应用与复杂工况适应性方面仍与国际水平存在差距。同时,该领域尚存若干关键争议,如热泡与压电技术路线的优选原则、能耗与打印精度间的平衡策略等,反映其核心技术标准尚未统一。

未来研究应重点关注多喷头协同控制与动态路径优化、基于人工智能与大数据的自适应控制算法开发,以及面向生物墨水与导电聚合物等新型功能材料的打印适配性。随着多物理场建模与智能算法的发展,喷墨打印控制系统将逐步实现从单机控制向智能化、网络化制造系统的转变,进一步支撑增材制造、个性化定制与数字化工厂的发展需求。

基金项目

北京印刷学院校级科研项目(E6202405),北京印刷学院学科建设和研究生教育专项(21090525014、21090325003),北京印刷学院信息与通信工程一级学科博士点培育项目(21090525004)、北京印刷学院科研平台建设项目(KYCPT202509)。

参考文献

- [1] 彭熙舜. 基于 MEMS 的喷墨微流道设计与控制研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [2] Lee, J., Choo, S., Ju, H., Hong, J., Yang, S.E., Kim, F., *et al.* (2021) Doping-Induced Viscoelasticity in PbTe Thermoelectric Inks for 3D Printing of Power-Generating Tubes. *Advanced Energy Materials*, **11**, Article ID: 2100190.
- [3] Bandari, S., Nyavanandi, D., Dumpa, N. and Repka, M.A. (2021) Coupling Hot Melt Extrusion and Fused Deposition Modeling: Critical Properties for Successful Performance. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **172**, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.02.006>
- [4] Xu, K., Li, D., Shang, E. and Liu, Y. (2022) A Heating-Assisted Direct Ink Writing Method for Preparation of PDMS Cellular Structure with High Manufacturing Fidelity. *Polymers*, **14**, Article 1323. <https://doi.org/10.3390/polym14071323>
- [5] 牛志飞. 面向压电喷墨打印的供墨控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [6] 王丽坤. 常见喷墨打印头的分类和性能[J]. 丝网印刷, 2015(7): 39-41.
- [7] 苏昕, 武秋敏. 压电喷墨打印头几何参数对墨滴喷射的影响及问题解决[J]. 印刷工业, 2021(5): 51-54.
- [8] Wu, D., Yao, B., Wu, S., Hingorani, H., Cui, Q., Hua, M., *et al.* (2022) Room-Temperature Annealing-Free Gold Printing via Anion-Assisted Photochemical Deposition. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2201772. <https://doi.org/10.1002/adma.202201772>
- [9] Andrew, C., Haley, R., Lin, D., Zhe, X., John, X.J.Z., *et al.* (2020) Method for Inkjet-Printing PEDOT: PSS Polymer Electrode Arrays on Piezoelectric PVDF-TrFE Fibers. 2020 *IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, Manchester, 16-19 August 2020, 1-4.
- [10] Li, Q., Yu, Y. and Tang, S. (2020) Multiphase Lattice Boltzmann Method and Its Applications in Phase-Change Heat Transfer. *Chinese Science Bulletin*, **65**, 1677-1693. <https://doi.org/10.1360/tb-2019-0769>
- [11] Zhang, C., Lei, D., Xie, C., Hang, X., He, C. and Jiang, H. (2021) Piezo-Photocatalysis over Metal-Organic Frameworks: Promoting Photocatalytic Activity by Piezoelectric Effect. *Advanced Materials*, **33**, Article ID: 2106308. <https://doi.org/10.1002/adma.202106308>
- [12] Chen, X. and Sun, Z. (2022) Plasma Kernel Model and Energy Transformation Characteristic of Plasma Synthetic Jet Actuator. *Physics of Fluids*, **34**, Article ID: 126104. <https://doi.org/10.1063/5.0125089>
- [13] Lee, H.M. and Lee, J.S. (2022) Effects of Heat Transfer on Particle Suspended Drop-on-Demand Inkjet Printing Using Lattice Boltzmann Method. *Applied Thermal Engineering*, **213**, Article ID: 118637. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118637>
- [14] 王晓红, 吕兆锋, 孙平. 喷墨数字印刷质量的闭环检测与色彩控制系统设计[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 10-13.
- [15] 罗庆生, 韩宝玲, 吴瑞松. 新型多功能喷墨编码器控制电路设计[J]. 印刷技术, 1999(6): 38-40.
- [16] Yang, P., Zhang, X. and Chen, J. (2021) Design of Control System for Inkjet Printer. *Journal of Physics: Conference Series*, **2037**, Article ID: 012056. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2037/1/012056>
- [17] 张洋. 基于嵌入式的供墨系统控制与设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京印刷学院, 2022.
- [18] 王婷, 李欢. 基于 MFC + STM32 的数控裁床喷墨笔绘切割控制系统设计[J]. 制造技术与机床, 2022(2): 86-89.

- [19] 汪邵华. SG1024 喷墨头的驱动控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [20] 张鹏. 基于 FPGA 的压电喷墨打印控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [21] 曹范亮. 数码喷墨印刷供墨系统硬件及软件设计与分析[J]. 今日印刷, 2018(11): 54-58.
- [22] 王玉青. 基于 FPGA 的喷墨打印系统设计与实现[J]. 电子制作, 2015(23): 73-74.
- [23] Kiefer, O. and Breitzkreutz, J. (2020) Comparative Investigations on Key Factors and Print Head Designs for Pharmaceutical Inkjet Printing. *International Journal of Pharmaceutics*, **586**, Article ID: 119561. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119561>
- [24] Cader, H.K., Rance, G.A., Alexander, M.R., Gonçalves, A.D., Roberts, C.J., Tuck, C.J., *et al.* (2019) Water-Based 3D Inkjet Printing of an Oral Pharmaceutical Dosage Form. *International Journal of Pharmaceutics*, **564**, 359-368. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.04.026>
- [25] Corral, J. (2017) Konica Minolta's Inkjet Printhead Technology. In: Zapka, W., Ed., *Handbook of Industrial Inkjet Printing: A Full System Approach*, Wiley-VCH, 253-284.
- [26] Thabet, Y., Lunter, D. and Breitzkreutz, J. (2018) Continuous Inkjet Printing of Enalapril Maleate onto Orodispersible Film Formulations. *International Journal of Pharmaceutics*, **546**, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2018.04.064>
- [27] Hoath, S.D. (2016) *Fundamentals of Inkjet Printing: The Science of Inkjet and Droplets*. John Wiley & Sons.
- [28] Thabet, Y., Sibanc, R. and Breitzkreutz, J. (2018) Printing Pharmaceuticals by Inkjet Technology: Proof of Concept for Stand-Alone and Continuous In-Line Printing on Orodispersible Films. *Journal of Manufacturing Processes*, **35**, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.07.018>
- [29] Wickström, H., Palo, M., Rijckaert, K., Kolakovic, R., Nyman, J.O., Määttänen, A., *et al.* (2015) Improvement of Dissolution Rate of Indomethacin by Inkjet Printing. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, **75**, 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.ejps.2015.03.009>
- [30] 孙玉满, 吕赐兴, 张磊, 等. 面向数字喷墨打印工艺的 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 薄膜电极制备控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2014, 36(20): 144-147, 152.
- [31] 任晓飞. 喷墨打印装置中液滴喷射过程的仿真研究[J]. 计算机时代, 2023(11): 127-130.
- [32] Sang, R., Wu, Z., Fan, Z., Yang, S., *et al.* (2022) Method and Analysis of UV Inkjet Printing 3D Simulation of Wood Texture Using Image Modeling. *Journal of Forestry Engineering*, **7**, 187-193.
- [33] Yin, Z., Su, R., Wang, Q., Chen, Q., Hong, Y., *et al.* (2022) Phase Field Dynamics Simulation of Single Droplet Impacting Curved Wall Surface. *Journal of Longdong University*, **33**, 63-67.
- [34] Piovarči, M., Foshey, M., Xu, J., Erps, T., Babaei, V., Didyk, P., *et al.* (2022) Closed-Loop Control of Direct Ink Writing via Reinforcement Learning. *ACM Transactions on Graphics*, **41**, 1-10. <https://doi.org/10.1145/3528223.3530144>
- [35] Wright, W.J., Darville, J., Celik, N., Koerner, H. and Celik, E. (2022) *In-Situ* Optimization of Thermoset Composite Additive Manufacturing via Deep Learning and Computer Vision. *Additive Manufacturing*, **58**, Article ID: 102985. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102985>
- [36] Cavone, G., Bozza, A., Carli, R. and Dotoli, M. (2022) MPC-Based Process Control of Deep Drawing: An Industry 4.0 Case Study in Automotive. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **19**, 1586-1598. <https://doi.org/10.1109/tase.2022.3177362>