 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v6i10.7904

Intelligent application research of low temperature plasma under computer hardware and software control

Guosu Xi [1] **Jiefeng Chen** [2]

1. Shenzhen Beijing Institute of Moscow University, Shenzhen, Guangdong, 511400, China
2. Guangdong Yingqiao Technology Development Co., Ltd., Jiangmen, Guangdong, 529141, China

Abstract

Low-temperature plasma, renowned for its high efficiency, environmental friendliness, and controllability, has been extensively applied in material modification, medical sterilization, and environmental remediation. With the advancement of artificial intelligence and automation technologies, the coordinated control of computer software and hardware has become crucial for intelligent operation of low-temperature plasma systems. This study establishes an intelligent control framework integrating multi-sensor networks, embedded control systems, and deep learning algorithms, achieving adaptive parameter regulation and dynamic optimization of reaction efficiency. Experimental results demonstrate that the system significantly enhances discharge stability and energy utilization efficiency while improving process consistency, showing promising practical value. This research provides both technical pathways and theoretical foundations for the intelligent and standardized development of low-temperature plasma equipment.

Keywords

low temperature plasma; computer control; intelligent system; hardware integration; application research

基于计算机软硬件控制下的低温等离子体智能化应用研究

席国素 [1] 陈杰锋 [2]

1. 深圳北理莫斯科大学，中国 · 广东 · 深圳 511400
2. 广东英侨科技发展有限公司，中国 · 广东 · 江门 529141

摘　要

低温等离子体因其高效、清洁、可控特性，广泛应用于材料改性、医疗消毒和环境治理等领域。随着人工智能与自动化技术的发展，计算机软硬件协同控制成为低温等离子体智能化运行的关键。本文构建了基于多传感器网络、嵌入式控制与深度学习算法的智能控制体系，实现放电参数的自适应调节与反应效率的动态优化。研究结果表明，该系统能显著提升放电稳定性与能量利用率，改善工艺一致性，具备推广价值。该研究为低温等离子体装置的智能化与标准化发展提供了技术路径与理论支撑。

关键词

低温等离子体；计算机控制；智能化系统；硬件集成；应用研究

1 引言

低温等离子体（Low Temperature Plasma, LTP）作为一种非平衡态电离气体，因具有高活性粒子密度、低能耗及可控性强等特性，在材料科学、生物医学、能源工程及环境保护等领域得到了广泛关注。传统低温等离子体装置多依赖人工调节与经验控制，存在稳定性差、响应滞后、能量利用率低等问题。随着计算机控制理论与智能算法的快速发展，软硬件一体化技术被引入等离子体控制系统中，使实时监测、参数优化与自适应调节成为可能。

在过去的研究中，低温等离子体控制主要集中在电源调节、气体流量与反应腔体温度控制等方面。然而，在高频放电条件下，系统非线性和多参数耦合问题突出，传统 PID 控制难以应对复杂环境变化。为此，基于计算机软硬件协同控制的智能化系统成为重要研究方向。本文旨在探讨在现代计算机控制架构下，如何通过智能感知、数据处理与算法优化实现低温等离子体的自适应运行，并分析其在典型应用场景中的优势与挑战。

2 低温等离子体智能化控制的理论基础与体系构建

2.1 低温等离子体特性与控制需求

低温等离子体具有电子温度高、气体温度低、粒子组成复杂等典型特征，其放电过程受多种因素耦合影响，包括电场强度、气体流速、放电间隙与外部电源频率等。由于系

【作者简介】席国素（2006–），女，苗族，中国贵州平塘人，本科，从事电子与计算机工程研究。

统呈现明显的非线性、时变性和随机性，微小扰动即可引起电流、电压波动与放电不稳定。传统人工调控方式依赖经验调节，难以应对动态变化的放电特性，存在响应滞后、重复性差与能量利用率低等问题。计算机软硬件一体化控制技术通过高频采样、实时监测与算法预测，可实现对放电状态参数的精细化调节。系统在毫秒级周期内完成信号采集与反馈修正，动态调整放电功率与气体比例，实现电子密度与反应速率的稳定控制。该方式显著提升了放电均匀性与能量利用率，为高精度表面处理、微细加工及气体污染控制等应用提供可靠保障。

2.2 智能化控制系统的组成结构

智能化低温等离子体控制系统通常由数据采集层、决策控制层与执行层组成，三者构成闭环反馈体系。数据采集层配置高精度传感阵列，采集放电电压、电流波形、气体压力、温度、电子密度及光谱发射强度等信息。信号经多通道 A/D 模块转换后传输至中央处理单元。决策控制层以嵌入式计算机为核心，运行多算法融合控制模型，包括模糊控制、遗传算法优化及 BP 神经网络预测模块。该层通过实时数据分析与特征提取，生成动态控制指令。执行层由可编程功率模块、气体流量控制系统及冷却系统组成，通过 PWM 与 PID 复合调节实现对电源输出、气体流速及放电频率的精确控制。三层之间通过 CAN 总线与 Ethernet 实时通信，延时低于 10 ms，确保控制链路高效闭合与数据同步，支撑系统在高负载与复杂工况下的稳定运行。

2.3 计算机软硬件协同的运行机制

系统软硬件协同控制通过硬件加速与软件智能算法相结合，构建多层响应体系。硬件方面，采用 ARM 架构嵌入式主控单元与 FPGA 协处理模块，实现高并发信号采集与快速数据计算；配套高精度 DAC 模块、隔离驱动电路与 EMI 抗干扰设计，保证信号稳定性与安全性。软件层面，基于 LabVIEW 实现人机交互与过程监控界面，Python 脚本承担数据分析与算法优化任务。系统集成多传感融合模型，通过数据加权与滤波算法消除噪声干扰，实现状态估计与趋势预测。控制核心采用模糊神经网络算法，能够依据实时误差与变化速率自动调整 PID 参数，实现放电电流与气体流速的自适应调节。系统运行过程中通过历史数据训练与自学习机制不断优化参数，实现动态工况下的稳定放电控制，保证低温等离子体处理过程的精确性与可靠性。

3 关键软硬件控制技术的集成与优化设计

3.1 传感器网络与数据采集模块设计

低温等离子体系统中电流、电压、气体流量及温度变化极为敏感，实时、精准的数据采集是智能控制的核心。本文设计了一种多维传感器融合架构，通过在放电腔体、气体入口、功率模块及冷却系统关键节点布设电磁、热学、光学等多类传感器，实现多源数据协同采集。信号经独立 A/D 转换模块完成高精度数字化，采样频率可达 1 kHz。数据经卡尔曼滤波与低通滤波处理后进行归一化、冗余校验，并通过 CAN 总线与 Modbus 协议上传至中央处理单元。系统具备自诊断功能，可自动识别异常数据并触发报警机制。采集数据除用于实时控制外，还通过数据库归档供算法训练与性能优化，为后续深度学习模型的自学习提供原始样本支撑，实现“监测—分析—反馈”的信息闭环。

3.2 控制算法与反馈机制

为应对等离子体放电过程中非线性强、响应快、扰动多的特性，本文构建了“模糊—PID—遗传”三层复合控制体系。底层 PID 实现基础反馈调节，中层模糊逻辑模块通过误差与误差变化率的模糊化映射动态修正 PID 参数，实现非线性系统的自适应补偿；上层遗传算法模块定期搜索全局最优控制参数集，以提高复杂工况下的收敛速度与稳定性。系统反馈机制基于多通道数据融合，实时监测电压、电流、放电密度与气压波动，并对放电状态异常进行预测与预警。控制算法运行在嵌入式平台上，通过并行运算加速模块优化响应时间，确保控制周期稳定在 50 ms 以内。模型在长期运行中具备自学习能力，能够依据历史数据自动调整权重，实现控制策略的持续演进与优化。

3.3 软件系统架构与接口集成

为实现高可靠性与可扩展性，系统软件采用分层式模块架构。核心算法层以 C++ 和 Python 混合开发，负责执行实时控制、数据建模与算法优化；通讯层基于 TCP/IP 与串行协议实现多设备协同通信，支持以太网远程访问及边缘计算节点部署；人机交互层采用 LabVIEW 与 Qt 可视化界面，动态显示放电电压、电流波形与能耗曲线，并支持用户参数设定与报警响应。系统内置权限管理与日志追踪模块，确保操作安全与可审计性。软件接口遵循 OPC UA 与 RESTful 标准，可与上位机、云端平台及外部监控系统无缝对接，实现远程运维与数据共享。整体架构在多任务负载下稳定运行超 2000 小时，验证了其在低温等离子体智能控制中的高可靠性与工程适配性。

4 低温等离子体智能化应用的实验验证与案例分析

4.1 材料表面改性实验

为验证智能控制在材料处理中的精度与一致性，选取聚四氟乙烯（PTFE）薄膜作为实验样本。通过计算机软硬件协同系统实时调节放电功率（50–120 W）与气体流量（10–30 sccm），控制放电间隙与反应时间。结果显示，在智能算法控制下，薄膜表面能提升约 23%，静态接触角由 98° 降至 81° ，XPS 分析表明氧含量增加 18%，说明表面极性官能团显著增多。与人工调节相比，样品改性均匀度提高 21%，批次间差异显著降低。该结果表明，智能控制系统可实现放电功率与气体配比的自适应调节，优化反应均匀

性与稳定性，为精密制造与微结构表面改性提供可靠控制手段。

4.2 医疗器械消毒与灭菌应用

低温等离子体在室温条件下具备高效杀菌特性，适用于对热敏性医疗器械的无损灭菌。本研究利用智能控制平台实时调整放电功率、气体比例（Ar/O_2 = 9:1）与时间参数，在不超过 40 ℃的环境中实现快速灭菌。实验表明，对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌及枯草芽孢杆菌的灭活率均超过 99.9%，较常规放电方式灭菌效率提高 25%，能耗下降 18%。智能系统通过反馈算法实现放电能量的动态调控，防止局部过热与电弧放电。红外热像监测显示，处理过程温升控制在 5 ℃以内，保证了器械材料的物理稳定性。该方法在基层医疗机构具有推广价值，可作为高压蒸汽灭菌的低能耗替代方案。

4.3 环境治理与能源应用

为探讨智能控制系统在环境治理中的适用性，将其应用于挥发性有机物（VOC）降解实验。实验装置采用智能控制模块对放电功率（80–150 W）和气体流量进行闭环调节，实现反应腔体中等离子体密度的动态均衡。在苯蒸气浓度 1000 ppm 条件下，系统可根据实时浓度反馈自动优化功率曲线，使等离子体反应区电场分布更均匀。结果表明，苯去除率达 92%，臭氧副产物降低 15%，系统能效比（E/N）提升 20%。同时，智能控制实现能量按需分配，避免过度放电导致的能耗浪费。通过与传统控制方式对比，智能化系统在节能、降耗及稳定性方面优势显著，体现出在环保与能源领域的广阔应用潜力，为大气污染治理与清洁能源转化提供了可复制的技术路径。

5 智能化低温等离子体系统的优化与发展趋势

5.1 算法优化与自学习机制完善

面向复杂、强耦合、时变的低温等离子体工况，应构建“模型驱动 + 数据驱动”混合智能控制。以基于物理约束的强化学习（Safe RL）替代纯经验调参，采用 Actor–Critic 框架在约束 MPC 外层在线修正功率、脉冲占空比与气体配比；以时序深度模型（LSTM/Transformer）预测放电电流、电子密度与光谱强度的短期轨迹，触发前馈补偿，降低响应滞后与振荡。引入迁移学习与贝叶斯优化实现跨材料、跨腔体的快速收敛；以异常检测（Isolation Forest/One-Class SVM）监测电弧与漂移，驱动自适应降级与安全停机。通过“离线仿真—数字孪生—小步在线试验”的闭环迭代，持续更新策略与不确定性边界，支撑向“少人化 / 无人化”稳定运行演进。

5.2 模块化硬件与可拓展架构

为适配多场景应用，硬件层应采用模块化与标准化并重的架构：以可热插拔传感板（射频电参、气压温度、发射 / 吸收光谱、残余气体质谱）+ 通用采集底板（FPGA+MCU）形成“即插即用”的测控拼装；总线与通讯优先选用 EtherCAT/CAN-FD/OPC UA，边缘计算节点支持 Docker 化部署，保障算法快速下发与回滚。电源与射频功率模块按功率等级分段并行，支持 N+1 冗余与毫秒级切换；I/O 隔离与 EMC 设计满足高 dv/dt 环境下的信号纯度。建立统一时钟与触发网络（IEEE-1588 PTP），实现跨设备纳秒级同步。通过安全芯片、TLS 与分级权限控制强化网络与固件安全，形成“端 - 边 - 云”协同、易维护、可扩展的等离子体智能装备底座。

5.3 产业化与应用推广前景

在电子制造（刻蚀 / 去胶 / 表面活化）、光学镀膜前处理、医疗器械低温灭菌与 VOCs/NOx 治理等赛道，智能等离子体控制的价值体现在良率、一致性与单位能耗三项核心 KPI：典型场景中可实现能耗 / 批次下降 10%–20%、关键参数 Cpk 提升≥ 0.3、消杀 / 降解效率提升 15%+。为加速落地，应构建“标准—试验线—生态”三位一体路径：推动电源接口、传感量测、数据字典与算法评测的团体标准；建设开放测试平台与行业试产线，开展跨厂商互认证；在合规层面对接 ISO 14644、ISO 13485、GMP 及环保排放规范，建立可追溯的质量与数据管理体系。通过产学研联合攻关、场景化示范、软件许可与模块化 IP 授权，配套人才培养与运维服务，形成可复制的商业化解决方案，拓展智能等离子体在高端制造与公共卫生领域的应用边界。

6 结语

基于计算机软硬件控制的低温等离子体智能化系统，是实现高效、精准、绿色制造的重要方向。本文通过理论分析、系统设计与实验验证，证明了智能化控制技术在等离子体应用中的显著优势。软硬件一体化的控制体系不仅提升了系统运行的稳定性与能效，也为未来多领域的交叉创新奠定了基础。未来应在算法优化、模块标准化与产业化推广等方面持续深化研究，推动低温等离子体智能控制技术在新材料、医疗及能源领域的广泛应用，实现科技创新与社会价值的双重提升。

参考文献

[1] 姬海燕,刘家印,吴海军,等.低温等离子体在生物质气化制氢中的应用研究进展[J].化工学报,2025,76(06):2419-2433.

[2] 许志成,高宁博,全翠,等.低温等离子体协同催化转化生物质气化焦油研究进展[J].化工进展,2025,44(06):3432-3442.

[3] 仲林林,王逸凡,任和,等.人工智能驱动的低温等离子体数值模拟研究综述[J].高电压技术,2024,50(07):2879-2893.

[4] 陈雨润,席剑飞,李广,等.不同低温等离子体反应器降解VOCs的研究进展[J].南京师范大学学报(工程技术版),2024,24(01):10-17.

[5] 徐少锋,徐雨,丁可,等.多场耦合非热平衡低温等离子体与微纳米结构材料的相互作用[J].力学学报,2023,55(12):2955-2980.