П

# 磁性材料真空烧结炉智能控制系统研究

# 冯立峰

(宁波可可磁业股份有限公司,浙江 宁波 315000)

摘 要 本研究针对磁性材料真空烧结工艺对温度场均匀性和真空度控制精度的严格要求,研发了一套智能化控 制系统。该系统采用模糊 PID 和神经网络相结合的智能控制策略,构建了基于热力学传递原理的温度场动态模型, 通过递归最小二乘法和遗传算法实现模型参数优化。系统采用分层分布式控制架构,集成了温度场多区解耦控制 和基于压力变化率的真空度复合控制算法。实验结果表明,在1 200 ℃工况下,炉体温度场最大温差控制在8.5 ℃ 以内,真空度控制精度达到1×10<sup>-3</sup> Pa,系统平均无故障运行时间720小时,满足磁性材料真空烧结工艺要求。 关键词 真空烧结炉;智能控制;温度场;模糊 PID 控制:神经网络

中图分类号: TP27

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.009

#### 0 引言

在磁性材料真空烧结工艺过程中,温度场均匀性 和真空度控制精度直接影响产品性能。传统控制方法 难以适应烧结系统多变量、强耦合、大滞后的特点, 制约了产品质量提升。近年来,随着智能控制技术的 发展,为解决这一问题提供了新思路。研究针对磁性 材料真空烧结炉的控制难点,提出了一种基于模糊 PID 和神经网络的智能控制方案,通过建立精确的数学模 型和优化控制算法,实现了温度场和真空度的高精度 控制,为提高磁性材料烧结质量提供了技术支持。

## 1 真空烧结炉控制系统结构

# 1.1 系统总体架构

真空烧结炉智能控制系统由三大单元组成: 机械 结构单元(炉门、炉胆、炉壳等,内设多组热电偶监 测温度场);真空控制单元(安全阀、充气蝶阀、热 交换器等,通过双级真空泵抽真空);温度控制单元 (采用多区段加热,布置热电偶阵列实现精确测量与 闭环控制)。各单元通过工业现场总线连接中央控制 器,形成分层分布式控制架构。控制器采集温度和真 空度信号,经智能算法处理后输出指令驱动执行机构, 实现烧结工艺智能化控制。系统设计满足磁性材料对 温度均匀性和真空度的严格要求(见图1)。

### 1.2 硬件组成分析

真空烧结炉智能控制系统硬件由五大部分构成: 测量单元采用 K 型热电偶阵列监测温区, 皮拉尼规和 电离规组合测量真空度;执行单元包括硅钼棒加热器、 真空泵组、充气阀组和冷却系统;数据采集单元配备 高精度 A/D 转换和抗干扰电路;中央控制单元使用工 控机搭载实时操作系统处理数据; 人机交互单元通过 触摸屏和控制面板实现参数设置。



图 1 真空烧结炉智能控制系统结构图

# 智能科技 🛽

## 1.3 控制流程设计

真空烧结炉智能控制系统流程分为五个阶段<sup>[1]</sup>: 启动准备阶段进行设备自检和安全连锁确认;抽真空 阶段通过机械泵和分子泵进行粗抽和精抽,使炉体真 空度达到 10<sup>-3</sup> Pa;升温烧结阶段采用分区域阶梯式升 温,通过 PID 算法控制加热功率确保温场均匀;保温 阶段精确控制炉温波动并监测真空度变化,补偿温度 场畸变;降温卸料阶段按预设曲线降温,控制充气速 率和冷却水流量防止工件开裂。

## 2 智能控制系统设计方案

# 2.1 控制系统要求分析

磁性材料真空烧结炉智能控制系统须满足三方面 要求:温度场控制方面,各区温度均匀性偏差需小于 ±5 ℃,升温速率可调范围为0.5~10 ℃/min,温 度控制精度达±1 ℃;真空度控制方面,要求抽气速 率可调,极限真空度优于10<sup>-3</sup> Pa,波动范围在设定值 ±10%内;工艺过程控制方面,需精确跟踪烧结温度曲 线,自动记录参数并报警异常,具备故障诊断和安全 保护功能<sup>[2]</sup>。系统响应时间应小于1秒,采样频率不 低于10 Hz,算法需具备自适应性和抗干扰能力。

# 2.2 智能控制策略选择

针对真空烧结炉多变量、强耦合、大滞后特点, 采用模糊 PID 与神经网络结合的智能控制策略。模糊 控制器根据温度偏差实时调整 PID 参数提高自适应能 力<sup>[3]</sup>; BP 神经网络建立非线性数学模型并通过在线学 习优化控制参数。温度场控制采用多回路解耦策略构 建分布模型实现各区协调;真空度控制采用基于压力 变化率的前馈—反馈复合方案提高响应速度。

## 2.3 控制算法设计

磁性材料真空烧结炉智能控制算法设计包括模糊 PID 控制器和神经网络预测器两部分。模糊 PID 控制器 实现温度的精确控制,控制器输出 *u(t)* 计算公式为:

$$u(t) = Kp\left[e(t) + \frac{1}{T_i}\int e(t)dt + Td\left(\frac{de(t)}{dt}\right)\right]$$

式中: *Kp* 为比例系数; *T<sub>i</sub>* 为积分时间常数; *Td* 为 微分时间常数; *e(t)* 为温度偏差。PID 参数在线调整采 用模糊规则:

$$\Delta Kp = f_1(e, \Delta e)$$
  

$$\Delta Ki = f_2(e, \Delta e)$$
  

$$\Delta Kd = f_3(e, \Delta e)$$
  

$$\vec{T} \oplus e, a \oplus B \oplus \vec{G} \oplus \vec{F}, \Delta e \oplus \vec{G} \oplus \vec{F}, f = f_3(e, \Delta e)$$

f<sub>3</sub>为模糊推理函数。神经网络预测模型用于温度预测, 采用迭代学习方法更新权值:

# $W(k + 1) = W(k) + \eta [Y^{*}(k) - Y(k)]X(k)$

式中: W为权值矩阵; η为学习速率 (0 < η < 1); Y\*为期望输出; Y为实际输出; X为输入向量; k为迭 代次数。该控制算法结合模糊控制的自适应性和神经 网络的学习能力,有效提升了系统控制精度。

## 3 温度动态控制模型构建

#### 3.1 真空烧结温度特性分析

真空烧结温度特性涉及温度场分布和动态响应。 炉内温度呈空间非均匀性,中心温度高于边缘,形成 径向梯度。系统表现出大惯性、大时滞、非线性特征, 升温阶段有显著超调,降温过程呈非线性衰减<sup>[4]</sup>。真 空度变化影响热传导系数,加热功率、升温速率与真 空度间存在复杂制约关系。温度升高时热损失增大, 系统惯性和时滞更明显。

## 3.2 控制数学模型建立

真空烧结炉控制数学模型通过系统辨识方法建立。 基于热力学传递原理,将炉体划分为N个温度控制区域, 每个区域的温度动态过程表示为:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -k_1 T(t) + k_2 u(t) + k_3 [T'(t) - T(t)]$$

式中: T(t)为区域温度; u(t)为加热功率;  $k_1$ 为散 热系数;  $k_2$ 为加热系数;  $k_3$ 为区域间热传导系数; T'(t)为相邻区域温度。真空度影响热传导特性,其数学模 型为:

## $k_3 = \alpha_1 exp(-\alpha_2 P)$

式中: *P* 为真空度;  $a_1$ 、 $a_2$  为拟合系数。通过阶跃 响应试验获取系统动态特性数据,采用最小二乘法辨 识模型参数。在1 200 ℃工况下,  $k_1 \approx 0.015$  min<sup>-1</sup>,  $k_2 \approx 0.8$  ℃ / (kW・min),  $a_1 \approx 0.12$ ,  $a_2 \approx 2.5 \times 10^{-3}$ Pa<sup>-1</sup>。该模型反映了温度场、真空度与加热功率的耦合 关系,预测温度与实测温度的最大偏差小于±3 ℃, 满足工程应用需求。

#### 3.3 模型参数辨识与优化

模型参数辨识与优化采用递归最小二乘法结合遗 传算法的混合优化方法<sup>[5]</sup>。针对真空烧结温度场数学 模型中的关键参数,建立目标函数*J*(θ):

 $J(\theta) = min\{\sum [y(k) - \hat{y}(k)]^2 / N + a \sum \theta^2\}, k = 1, 2, ..., N$ 式中:  $\theta$ 为待辨识参数向量; y(k)为实测温度;

 $\hat{y}(k)$ 为模型预测温度; N为采样点数;  $\alpha$ 为正则化系数。

参数迭代更新方程为:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + P(k)\varphi(k)[y(k) - \varphi^{T}(k)\theta(k)]$$
$$P(k+1) = [I - P(k)\varphi(k)\varphi^{T}(k)] \frac{P(k)}{\lambda}$$

式中: P(k) 为协方差矩阵;  $\varphi(k)$  为回归向量;  $\lambda$  为 遗忘因子(0.95 <  $\lambda \le 1$ )。遗传算法采用实数编码, 种群规模设为 50, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.05, 最 大迭代代数 200 代。改进的 Levenberg-Marquardt 优 化算法表达式为:

 $\Delta \theta = -(H+\mu I)^{-1}g$   $\mu(k+1) = \mu(k) \cdot \beta, if \ J(k+1) < J(k)$  $\mu(k+1) = \mu(k)/\beta, if \ J(k+1) \ge J(k)$ 

式中: *H*为Hessian 矩阵; *g*为梯度向量;  $\mu$ 为阻 尼因子;  $\beta$ 为步长调节系数( $\beta > 1$ )。优化后的模型 在 1 000 ~ 1 300 °C温度区间内,预测误差均方根由 原来的 4.2 °C降低到 1.8 °C,系统动态响应时间缩短 了 15%。

#### 4 系统性能验证与分析

## 4.1 动态特性测试

通过加热功率阶跃响应和温度曲线跟踪试验,测试 真空烧结炉系统动态特性。在1 200 ℃工况下,系统 升温超调量 2.3%,调节时间 43 s,稳态误差 ±1.2 ℃。 加热功率 20% 到 80% 阶跃变化,系统响应时间 28 s, 温度动态偏差最大 5.8 ℃。系统在 0.5 ~ 8 ℃/min 范围内具有良好动态跟踪性能。真空度由 10<sup>-3</sup> Pa 突 变至 10<sup>-2</sup> Pa 时,温度波动控制在 ±3 ℃,恢复时间 35 s,验证了系统对外部干扰的抑制能力(见表 1)。

表1 真空烧结炉系统动态特性测试结果

测试项目	温度区间(℃)	响应时间 (s)	超调量 (%)	稳态误差 (℃)
升温过程	$20 \sim 800$	52	3.5	±1.8
升温过程	$800 \sim 1$ 200	43	2.3	$\pm 1.2$
升温过程	$1 \hspace{0.1 cm} 200 \sim 1 \hspace{0.1 cm} 400$	38	1.8	±0.9
降温过程	$1 400 \sim 1 000$	65	_	$\pm 2.1$

# 4.2 控制精度评估

经48小时连续运行测试,磁性材料真空烧结炉 智能控制系统展现优异控制精度。系统采用15个均匀 分布的K型热电偶测量温度场,在1 200 ℃工况下实 现炉体最大温差控制在8.5 ℃以内,各测点温度波动 仅为±1.5 ℃。真空度控制达到1×10<sup>-3</sup> Pa的高精度, 波动范围不超过设定值±8%,确保烧结稳定性。随温 度升高控制难度增大,但算法保持良好鲁棒性:600~ 800 ℃区间平均偏差为1.2 ℃,1 200~1 400 ℃高 温区间平均偏差增至2.1 ℃。标准偏差从低温区0.8 ℃ 到高温区1.6 ℃,均在工艺允许范围内,证明系统在 各温度段均能保持稳定控制性能。

#### 4.3 系统可靠性分析

磁性材料真空烧结炉智能控制系统可靠性分析基 于 6 个月长期运行数据,从硬件可靠性和软件稳定性 两方面进行评估。系统平均无故障运行时间(MTBF) 达 720小时,为连续生产提供坚实保障;即使出现故 障,平均恢复时间仅 45 分钟,大幅减少生产中断损失。 传感器可靠性测试显示关键测量元件保持优异稳定性: 热电偶测量精度漂移率控制在 0.2%/月内,真空规零 点漂移不超过 3%,确保长期运行数据准确性。系统在 恶劣工况下适应能力出色,在电源电压波动 ±10%、环 境温度 5 ~ 40 ℃的宽泛条件下均能保持稳定运行。

#### 5 结束语

研究开发的磁性材料真空烧结炉智能控制系统, 通过模糊 PID 与神经网络控制策略的有机结合,实现 了温度场和真空度的精确控制。系统采用分层分布式 控制架构,具有较强的自适应性和抗干扰能力。实验 验证表明,该系统在温度均匀性、真空度控制精度和 运行可靠性等方面均达到预期目标,满足磁性材料烧 结工艺要求。后续研究将进一步优化控制算法,探索 基于深度学习的智能控制方法,提升系统性能。

参考文献:

[1] 李艳红.基于 PLC 的工业烧结炉温度控制系统设计与实现 [J].工业加热,2024,53(03):48-50,54.

[2] 赵建业,付秀华.基于西门子S7通讯的小型PLC网络 在手套箱—烧结炉集群控制系统的应用[J].真空,2023, 60(01):80-85.

[3] 熊梨,张登春,宋石初,等.碳化硅真空烧结炉温度 场数值模拟与系统优化 [J]. 金属热处理,2022,47(06):259-265.

[4] 熊梨. 真空烧结炉加热特性与系统优化研究 [D]. 湘 潭: 湖南科技大学, 2022.

[5] 热冰娣,姚建功,张迅绯.真空烧结中对返烧料润 滑剂的捕集机构设计[J].工业炉,2022,44(01):38-40.

# 智 能 科 技

Π