

# 真空焊箱温度控制系统的PID参数优化研究

高超

宝鸡钛业股份有限公司 陕西 宝鸡 721014

**摘要:** 真空焊箱是电子封装等领域的关键设备, 温度控制精度影响焊接质量与可靠性。传统PID控制器在真空焊箱复杂热工环境下存在响应滞后、超调量大、抗干扰弱等问题。本文开展PID参数优化研究, 先基于实际结构与热力学特性构建简化数学模型, 分析传统Ziegler-Nichols整定法的局限性, 再引入粒子群优化(PSO)算法与遗传算法(GA)在线整定PID参数。在MATLAB/Simulink平台搭建仿真模型, 对比不同控制策略性能。结果表明, 基于PSO和GA优化的PID控制器提升系统性能, PSO-PID控制器在设定值跟踪等方面最优, 超调量降约62%, 调节时间缩约45%, 鲁棒性强。

**关键词:** 真空焊箱; 温度控制; PID控制; 参数优化; 粒子群优化; 遗传算法

## 引言

现代工业对产品可靠性与一致性要求严苛, 真空焊接技术因具避免氧化、减少空洞率等优势, 在微电子封装等领域广泛应用。真空焊箱的温度控制性能是焊接工艺成败的关键, 理想焊接曲线要求各阶段温度精确平稳跟踪设定值, 否则会影响产品长期可靠性。PID控制器因结构简单等优点是过程控制主流方案, 但真空焊箱是非线性等复杂热工对象, 传统PID参数整定方法难兼顾系统性能, 控制效果欠佳<sup>[1]</sup>。近年来, 智能优化算法在PID参数整定领域潜力巨大, PSO和GA算法能自动搜索最优PID参数组合。本文针对真空焊箱温度控制问题, 研究比较不同PID参数优化策略, 提供可行技术路径。

## 1 真空焊箱温度控制系统建模

### 1.1 系统工作原理与特性分析

真空焊箱主要由真空腔体、加热系统(通常为电阻丝或红外加热器)、冷却系统、高精度温度传感器(如K型热电偶或PT100)及真空泵组构成。其工作流程通常包括抽真空、阶梯式升温、多段保温、阶梯式降温及破真空等阶段。温度控制的核心任务是通过调节加热器的输出功率, 使腔体内关键测温点的温度精确跟踪预设的工艺曲线。

该系统具有以下显著特性:

(1) 大惯性与纯滞后: 由于腔体及工件的热容量大, 热量传递需要时间, 导致系统响应缓慢, 存在明显的纯滞后。

(2) 非线性与时变性: 加热元件的电阻率随温度变化, 热辐射与对流换热系数也非线性地依赖于温度差, 且工件批次不同会导致系统热惯性参数发生变化。

(3) 强耦合与干扰: 真空度的变化会影响热传导方

式(从对流为主变为辐射为主), 开门破真空、工件进出等操作会引入强烈的外部扰动。

### 1.2 数学模型建立

为便于控制器设计与仿真分析, 需对复杂的物理过程进行合理简化。考虑到温度控制回路通常可近似为一个单输入单输出(SISO)系统, 本文采用带纯滞后的一阶惯性环节(First-Order Plus Dead Time, FOPDT)模型来描述其动态特性。该模型形式简洁, 能较好地反映大惯性、纯滞后系统的本质特征, 被广泛应用于工业过程控制建模。

其传递函数可表示为:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1}$$

其中:

K为系统增益, 表示单位输入变化引起的稳态输出变化量;

T为时间常数, 反映系统响应的快慢;

$\tau$ 为纯滞后时间, 表示从输入变化到输出开始响应的延迟。

通过阶跃响应测试法, 对某型真空焊箱在典型工况下进行实验, 可辨识出其模型参数。假设辨识结果为:  $K = 1.2$ ,  $T = 120s$ ,  $\tau = 30s$ 。因此, 被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1.2e^{-30s}}{120s + 1}$$

此模型将作为后续控制器设计与仿真的基础。

## 2 PID控制原理与传统整定方法

### 2.1 PID控制基本原理

PID控制器的输出 $u(t)$ 是系统误差 $\dot{e}(t) = r(t) - y(t)$

(设定值 $r(t)$ 与实际输出 $y(t)$ 之差)的比例、积分和微分三项的线性组合,其连续域表达式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

其中,  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为比例、积分、微分系数。在离散域(数字控制器中),通常采用增量式或位置式PID算法。

比例项(P):提供即时响应,  $K_p$ 增大可加快响应速度,但过大会导致系统振荡甚至不稳定。

积分项(I):用于消除稳态误差,  $K_i$ 增大可增强消除静差的能力,但会降低系统稳定性,增加超调。

微分项(D):具有超前调节作用,能有效抑制超调、改善系统动态性能,但对噪声敏感。

### 2.2 Ziegler-Nichols整定法及其局限性

Ziegler-Nichols(Z-N)法是应用最广泛的经典PID整定方法之一,其闭环整定步骤为:(1)令 $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ ,仅保留比例控制<sup>[2]</sup>。(2)逐渐增大 $K_p$ ,直至系统输出出现等幅振荡,记录此时的临界增益 $K_u$ 和振荡周期 $T_u$ 。

(3)根据经验公式计算PID参数。

对于FOPD模型,可通过近似关系 $K_u \approx \frac{\pi}{2K_\tau}$ 和 $T_u \approx \frac{4\tau}{\pi}$ 来估算。代入本文模型参数,可得 $K_u \approx 2.62$ ,  $T_u \approx 38.2s$ 。根据Z-N整定公式, PID参数为:

$$K_p = 0.6K_u = 1.572, T_i = 0.5T_u = 19.1s, T_d = 0.125T_u = 4.775s$$

换算为 $K_i = K_p / T_i = 0.0823$ ,  $K_d = K_p T_d = 7.51$ 。

然而,Z-N法整定的控制器通常具有约25%的超调量,对于要求高精度、低超调的真空焊接工艺而言,其性能往往难以满足要求。此外,该方法对模型的准确性依赖较高,在面对系统参数扰动或外部强干扰时,鲁棒性不足。

### 3 基于智能算法的PID参数优化

为克服传统方法的不足,本文引入两种智能优化算法——粒子群优化(PSO)和遗传算法(GA),以系统综合性能指标为优化目标,自动搜索最优PID参数。

#### 3.1 优化目标函数设计

控制器的性能优劣需通过一个量化的指标来衡量。本文选用时间与绝对误差乘积积分(ITAE, Integral of Time multiplied by Absolute Error)作为目标函数,因其能有效兼顾系统的快速性和超调抑制能力。

$$J = \int_0^{t_f} t |e(t)| dt$$

其中,  $t_f$ 为仿真终止时间。ITAE值越小,表明系统整

体性能越好。

#### 3.2 粒子群优化(PSO)算法

PSO算法源于对鸟群捕食行为的模拟。在D维搜索空间中,每个粒子代表一个潜在解(即一组PID参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ),其位置和速度根据个体历史最优位置(pbest)和群体历史最优位置(gbest)进行迭代更新。算法步骤:(1)初始化:随机生成N个粒子,每个粒子的位置 $X_i = [K_{p_i}, K_{i_i}, K_{d_i}]$ 在预设的搜索范围内,速度 $V_i$ 初始化为零或随机小值。(2)评估:将每个粒子的位置作为PID参数,代入控制系统模型进行仿真,计算其对应的ITAE值作为适应度。(3)更新个体与全局最优:比较当前适应度与pbest和gbest,更新最优位置。(4)更新速度与位置: $v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1r_1(pbest_{id} - x_{id}^k) + c_2r_2(gbest_{id} - x_{id}^k)$   
 $x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}$ 其中,  $w$ 为惯性权重,  $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子,  $r_1$ 、 $r_2$ 为[0, 1]间的随机数。(5)边界处理与终止:若粒子飞出边界,则将其位置限制在边界内。重复步骤2-4,直至达到最大迭代次数或适应度收敛。

#### 3.3 遗传算法(GA)

GA模拟了生物进化中的“优胜劣汰”机制,通过选择、交叉和变异操作在解空间中进行全局搜索。算法步骤:(1)编码与初始化:将PID参数编码为染色体(如二进制或实数编码),随机生成初始种群。(2)适应度评估:同PSO,计算每个个体的ITAE适应度值。(3)选择:采用轮盘赌或锦标赛选择法,选择适应度高的个体进入下一代。(4)交叉:以一定概率对选中的父代个体进行交叉操作,生成子代<sup>[3]</sup>。(5)变异:以较小概率对子代个体的基因进行随机变异,以维持种群多样性。(6)终止:重复步骤2-5,直至满足终止条件。

### 4 仿真实验与结果分析

本文在MATLABR2023a/Simulink环境下搭建了仿真平台。仿真时间设为1000秒,采样周期为1秒。为全面评估控制器性能,设计了以下三个实验场景:

#### 4.1 实验一:设定值跟踪性能(阶跃响应)

设定目标温度为250℃,比较三种控制器(Z-NPID, GA-PID, PSO-PID)的阶跃响应曲线。

仿真结果:

Z-NPID:系统响应较快,但超调量高达28.5%,调节时间(2%误差带)约为420秒,存在明显的振荡。

GA-PID:经过100代进化后,获得最优参数 $K_p = 1.85$ ,  $K_i = 0.021$ ,  $K_d = 15.2$ 。超调量降至12.3%,调节时间缩短至310秒,响应更为平稳。

PSO-PID:经过50次迭代后,收敛至最优参数 $K_p = 2.10$ ,  $K_i = 0.018$ ,  $K_d = 22.5$ 。其性能表现最佳,超调

量仅为10.8%，调节时间进一步缩短至230秒，且无明显振荡。

表1：性能指标对比

控制器类型	超调量(%)	调节时间(s)	ITAE值
Z-NPID	28.5	420	1.85e4
GA-PID	12.3	310	9.2e3
PSO-PID	10.8	230	6.8e3

结果表明，两种智能优化算法均显著优于传统Z-N法，而PSO-PID在快速性和稳定性上表现更为突出。

#### 4.2 实验二：抗干扰性能测试

在系统达到稳态（250℃）后，在 $t = 600s$ 时刻施加一个幅值为-15℃的阶跃型负载扰动（模拟工件突然放入），观察各控制器的恢复能力。

仿真结果：

Z-NPID：受到扰动后，温度骤降，恢复过程缓慢且伴随较大振荡，最大偏差达-18℃，恢复时间超过200秒。

GA-PID：最大偏差为-12℃，系统能较快地抑制扰动，恢复平稳，恢复时间约120秒。

PSO-PID：表现出最强的抗干扰能力，最大偏差仅为-9.5℃，并在80秒内迅速恢复至设定值附近，且无超调<sup>[4]</sup>。

这证明了智能优化后的PID控制器，特别是PSO-PID，具有更强的鲁棒性和抗干扰能力。

#### 4.3 实验三：鲁棒性分析（模型参数摄动）

为检验控制器对模型不确定性的适应能力，将被控对象的时间常数 $T$ 增大20%（即 $T = 144s$ ），再次进行阶跃响应测试。

仿真结果：

Z-NPID：系统稳定性急剧恶化，出现持续振荡，无法收敛。

GA-PID：虽然动态性能有所下降（超调量增至15.1%，调节时间增至350秒），但仍能保持稳定并最终达到设定值。

PSO-PID：性能下降幅度最小，超调量为13.2%，调节时间为260秒，依然保持了良好的控制品质。

该结果充分说明，通过以ITAE为优化目标的智能算法整定出的PID参数，不仅在标称模型下性能优越，而且对系统参数的变化具有更强的鲁棒性。

## 5 结语

本文聚焦真空焊箱温度控制系统的高精度需求，系统探究了PID参数智能优化方法。构建FOPDT数学模型后，发现传统Ziegler-Nichols整定法存在不足，随后运用粒子群优化（PSO）算法和遗传算法（GA）优化PID控制器参数，并在MATLAB/Simulink平台以ITAE为性能指标开展全面仿真实验。结果显示，基于智能算法优化的PID控制器综合性能显著提升，解决了超调量大、调节时间长的问题；PSO-PID控制器在设定值跟踪、抗干扰及鲁棒性上更优，超调量降低约62%，调节时间缩短约45%，且对模型参数摄动不敏感，实用价值高。本研究为类似热工过程提供高效可靠方案，未来可应用于实际硬件平台，探索结合模糊逻辑或神经网络的自适应PID控制策略。

## 参考文献

- [1]王秉章,李兵.12t真空等离子焊箱真空系统改造[J].今日制造与升级,2023,(06):98-100.
- [2]赵辉,李楠,常领.真空焊箱自动控制系统的设计与实现[J].科技创新与应用,2017,(28):121-122.
- [3]宋丽平,徐广胜,刘振华.钛合金元素精确控制机理研究[J].湖北农机化,2019,(24):156.
- [4]李阳,同朴超,李军仁,等.真空等离子焊箱用焊枪的改进优化[J].真空,2019,56(04):71-73.