

极片烘干烘箱温度控制系统设计

王志凡^{*}, 任正云[#]

东华大学信息科学与技术学院, 上海

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年11月26日; 发布日期: 2025年12月4日

摘要

锂电池极片烘干烘箱的温度模型具有大惯性、非线性与大滞后等特性, 采用常规控制方法难以满足烘箱温度的控制要求, 因此有必要寻求更优异的控制策略。本文从烘箱温度模型辨识、控制器设计以及控制器参数整定三个方面, 对烘箱温度控制系统进行了设计。实际应用表明: 在升温阶段, 控制系统控制加热装置以最大加热功率加热, 温度超调量小于1°C; 进入稳定阶段后, 温度控制精度可达±0.5°C。该系统具有良好的鲁棒性与抗扰性能, 具备较高的工程应用价值。

关键词

继电反馈辨识, 超前校正, 模拟退火算法

Design of Temperature Control System for Electrode Drying Oven

Zhifan Wang^{*}, Zhengyun Ren[#]

School of Information and Intelligent Science, Donghua University, Shanghai

Received: October 10, 2025; accepted: November 26, 2025; published: December 4, 2025

Abstract

The temperature model of the oven for drying lithium battery electrodes features characteristics like large inertia, nonlinearity, and significant time delay. Conventional control methods are hardly able to meet the temperature control requirements of the oven; therefore, it is necessary to explore more excellent control strategies. This paper designs the oven temperature control system from three aspects: oven temperature model identification, controller design, and controller parameter tuning. Practical application results show that during the temperature rise stage, the control system regulates the heating device to operate at maximum heating power, with a temperature overshoot

^{*}第一作者。

[#]通讯作者。

of less than 1°C; after entering the stable stage, the temperature control accuracy can reach $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. The system has good robustness and anti-disturbance performance, and possesses high engineering application value.

Keywords

Relay Feedback Identification, Lead Correction, Simulated Annealing Algorithm

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

锂离子电池的性能主要由制造过程中形成的电极结构决定,而在这一过程中,去除溶剂并形成稳定电极结构的干燥工序尤为关键,温度则是该工艺中最主要的控制参数之一。极片干燥通常在热风循环烘箱中完成,烘箱温度的控制品质直接关系到最终产品的性能表现。

在设计烘箱温度控制算法之前,首先需要建立其温度的数学模型。烘箱温度系统具有显著的大惯性特性,且升温和降温阶段的动态行为不一致,属于复杂被控对象。若采用常规阶跃辨识法,不仅耗时较长,且通常只能获取升温和降温段中单一区间的模型,难以全面描述系统特性。相比之下,继电反馈辨识法通过利用系统的自激振荡,可综合升温和降温两段动态特性,辨识出一个近似一阶线性模型[1]。该方法不仅能有效提高模型精度,还可显著缩短辨识时间。

针对烘箱温度模型的大惯性特点,一些智能控制方法(如模糊控制、神经网络、遗传算法等)在理论上具有一定优势,但其设计复杂,在实际工业场景中应用较为困难[2]。而若采用传统PID控制器,虽结构简单,但无论使用Z-N法、Lamda法或Cohen-Coon法等参数整定方法,均难以在设定值跟踪性能与抗干扰能力之间取得良好平衡[3][4]。该问题的根源在于PID控制器本身的结构限制,而非参数整定方式。基于上述分析,本文对传统PID控制器结构进行改进,提出一种结合PI控制与反馈超前校正的控制器结构,称为PI-LEAD控制器。该控制器在保持结构简单、易于实现的基础上,能够同时具备优良的设定值跟踪能力和抗干扰性能。

鲁棒参数整定方法是保障控制器在模型存在一定失配时仍能维持良好控制性能的核心环节。传统参数整定方法仅适用于常规PID控制器,通用性不足[5]。近年来,遗传算法、模拟退火算法等智能优化算法在鲁棒参数整定领域得到广泛应用。例如,遗传算法通过模拟生物进化过程搜索最优参数,但存在计算量大、易陷入局部最优的缺陷[6];模拟退火算法基于金属退火过程的原理,具备出色的全局搜索能力和规避局部最优的特性,在参数整定领域表现出一定优势,然而当被控对象模型出现失配时,控制系统的控制性能可能会急剧恶化甚至失稳,存在参数敏感性问题[7]。鉴于此,本文引入模拟退火算法对控制参数进行整定,并结合蒙特卡罗方法生成的失配模型误差构建评价函数,从而使PI-LEAD控制器在烘箱温度系统中具备良好的鲁棒性。仿真与实际测试结果表明,所提出的控制方案能够以较低的控制成本,实现对烘箱温度的高效且稳定的控制。

2. 烘箱温度模型辨识

2.1. 带滞环的偏置继电反馈辨识

继电反馈辨识法是使用继电器来代替控制器与被控对象构成闭环系统。继电器的输出值随着系统的

输出改变而输出相应的矩形波信号, 进而实现让系统的输出在一定范围内震荡, 测量系统震荡的相关信息, 可以计算得到对象的传递函数模型。本文采用带滞环(死区)的偏置继电反馈辨识法辨识烘箱的数学模型, 当误差的绝对值小于死区的宽度 ε 时, 继电器输出不变, 只有当误差绝对值超过死区时, 继电器输出才会改变。由于死区的存在, 可以在一定程度上克服测量噪声对辨识结果影响, 提高辨识的准确性。继电反馈辨识法的闭环结构以及带滞环的偏置继电器输出与输入误差的关系分别如图 1 的 a、b 所示。

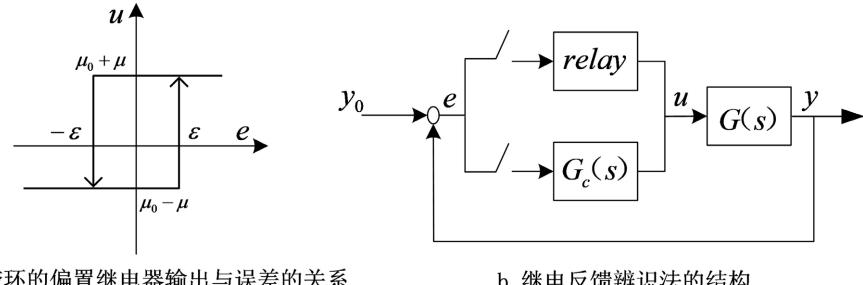


Figure 1. Relationship between output of biased relay with hysteresis and error and structure of relay feedback identification method

图 1. 带滞环的偏置继电器输出与误差的关系和继电反馈辨识法的结构

带滞环的偏置继电反馈辨识, 进入等幅振荡后, 振荡的最大值为 A_u , 最小值为 A_d , 振荡的周期为 T_u , 系统的设定值为 y_0 。继电器设置的死区大小为 ε , 继电器信号的高值为 $\mu_0 + \mu$, 低值为 $\mu_0 - \mu$ 。系统输出与继电器输出关系如图 2 所示。

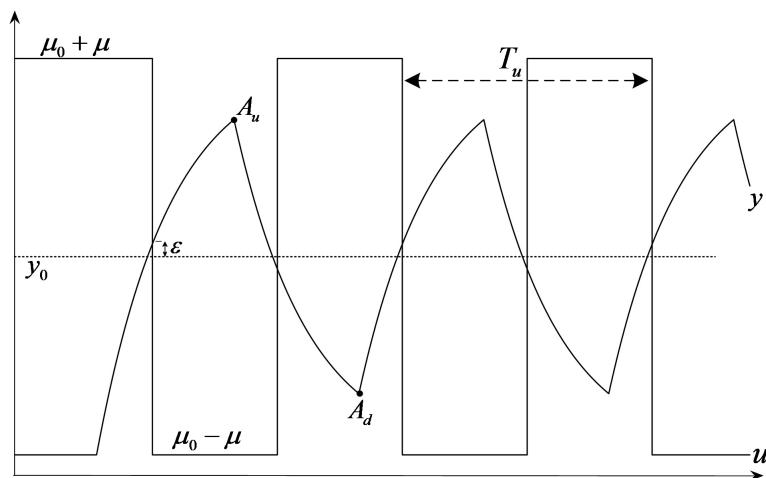


Figure 2. Relationship between system output and relay output

图 2. 系统输出与继电器输出的关系

待辨识对象的传递函数模型参数可由以下几组公式计算得到[8]:

$$e^{\frac{\tau}{T}} = \frac{2(\mu y_0 - \mu_0 \varepsilon)}{(\mu_0 + \mu) A_d - (\mu_0 - \mu) A_u} \quad (1)$$

$$K = \frac{y_0 (A_u - A_d) - \varepsilon (A_u + A_d)}{2(\mu y_0 - \mu_0 \varepsilon) + (\mu_0 - \mu) A_u - (\mu_0 + \mu) A_d} \quad (2)$$

$$T = T_u \ln^{-1} \frac{\left(2\mu K e^{\frac{\tau}{T}} - \mu K + \varepsilon\right)^2 - (\mu_0 K - y_0)^2}{(\mu K - \varepsilon)^2 - (\mu_0 K - y_0)^2} \quad (3)$$

$$\tau = -T \ln \frac{(\mu_0 + \mu) A_d - (\mu_0 - \mu) A_u}{2(\mu y_0 - \mu_0 \varepsilon)} \quad (4)$$

2.2. 烘箱温度模型辨识

对某锂电池生产线加热烘箱进行带滞环的偏置继电反馈辨识实验, 烘箱加热采用电加热包进行加热, 最大输出功率 100%。初始参数 μ 、 μ_0 、 y_0 、 ε 根据工艺情况分别设为 50、50、100、1。行继电反馈辨识并记录实验数据, 采样间隔 1 s, 得到系统输出 y 与继电器输出 μ 如图 3 所示。

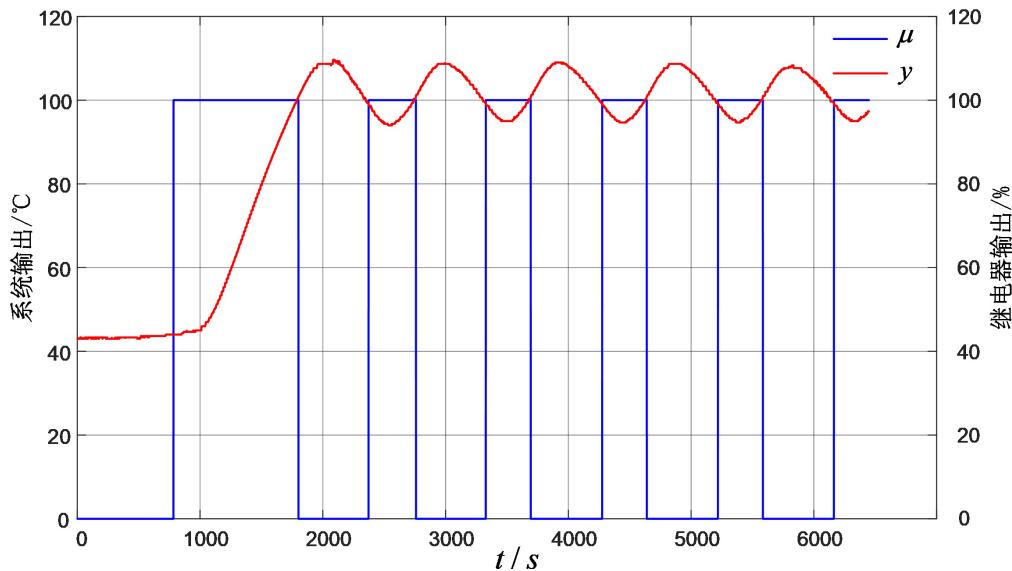


Figure 3. Experimental data of system output and relay output
图 3. 系统输出与继电器输出数据实验数据

读取实验所得数据, 得到 A_u 、 A_d 、 T_u 为 108.7、94.7、950, 将 A_u 、 A_d 、 T_u 、 μ 、 μ_0 、 y_0 、 ε 代入到公式(1)~(4), 可以求得 $K = 2.78$ 、 $T = 4373$ 、 $\tau = 194$, 求到烘箱温度的 FOPDT 模型如(5)式所示, 其时间常数较大, 具有大惯性特性。

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} = \frac{2.78}{4373s + 1} e^{-194s} \quad (5)$$

3. 控制方案设计

3.1. 控制器设计

前文已就温度对象的控制问题展开讨论。由于温度对象普遍具有大惯性特性, 传统 PID 控制器即便采用不同参数整定方法, 也难以获得理想的控制效果: 若采用文献[3]中提及的 Z-N 整定法, 易导致系统超调量偏大, 对设定值的跟踪响应能力较弱; 而采用文献[4]提出的 Lambda 整定法时, 系统虽能减少超调、优化设定值跟踪性能, 但其抗外部扰动的能力又会显著下降。针对上述传统控制方案的局限性, 本

文提出一种融合 PI 控制与反馈超前校正的复合控制器结构——PI-LEAD 控制器, 其具体结构形式如图 4 所示。

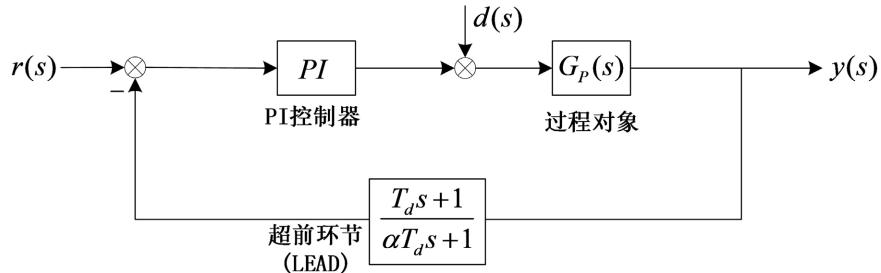


Figure 4. Structure of the PI-LEAD controller
图 4. PI-LEAD 控制器结构

其中超前环节中的系数 $0 < \alpha < 1$, 超前环节可分解为:

$$\frac{T_d s + 1}{\alpha T_d s + 1} = 1 + \frac{(1 - \alpha) T_d s}{\alpha T_d s + 1} \quad (6)$$

由(6)式可知, 超前环节实际为静态增益为 1 的不完全微分环节, α 为不完全微分系数。PI-LEAD 控制结构可以视为串行式 PID 控制器的一种变型, 与常规的串行式 PID 控制器结构的差异在于 PI-LEAD 控制器将微分项(超前环节)加入在反馈通道之中。微分反馈控制的核心思想: 将控制量误差的微分项引入系统调节运算, 或把系统输出的微分信号引回输入端与给定值进行比较, 通过这两种方式直接影响系统的控制输出。该控制方法虽已在诸多文献中有所阐述[9], 但实际工程应用仍较为有限[10][11]; 更为关键的是, 目前尚未有相关研究报道在反馈通道中引入超前环节代替微分项并将其应用于大惯性温度对象的控制场景中。因此如何在烘箱温度控制系统中引入超前环节以提高控制系统动态响应性能是本文研究的关键。

对于图 4 所示的 PI-LEAD 控制系统, 当超前环节位于反馈通道时, 输入响应和扰动响应的闭环传递函数分别为:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_{PI}(s) G_P(s)}{1 + G_{PI}(s) G_P(s) G_{LEAD}(s)} \quad (7)$$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G_P(s)}{1 + G_{PI}(s) G_P(s) G_{LEAD}(s)} \quad (8)$$

当超前环节位于前向通道(3.2 节将说明, 其与标准 PID 控制器近似等价), 输入响应和扰动响应的闭环传递函数分别为:

$$\frac{y(s)}{r(s)} = \frac{G_{PI}(s) G_P(s) G_{LEAD}(s)}{1 + G_{PI}(s) G_P(s) G_{LEAD}(s)} \quad (9)$$

$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G_P(s)}{1 + G_{PI}(s) G_P(s) G_{LEAD}(s)} \quad (10)$$

由公式(7)和(9)可知, 相较于把超前环节加在前向通道中, 在反馈通道加入超前环节可以避免在系统输入响应中引入超前项(微分项)——该项会提前触发系统的过冲, 增加系统的超调量[12]。

由公式(8)和(10)可知, 超前环节配置于前向通道或是反馈通道具有相同的扰动响应传递函数, 但加入超前环节可以增加系统的相角裕度, 因此可以适当增强 PI 控制器的积分作用, 提高系统的抗扰动性能。

3.2. PI-LEAD 控制器参数分析

PI-LEAD 控制器作为 PID 控制器的一种结构变型, 其控制参数的选取和常规 PID 控制器有一定的关联但又存在不同, 下面对其进行分析。

PID 控制器标准型和串联型表达式如下:

(1) 标准型(ideal)

$$G_i(s) = K_i \left(1 + \frac{1}{I_i s} + D_i s \right) \quad (11)$$

(2) 串联型(series)

$$G_s(s) = K_s \left(1 + \frac{1}{I_s s} \right) (1 + D_s s) \quad (12)$$

PI-LEAD 控制器中, 若不完全微分系数为 0, 则前向通道中的 PI 控制器加上反馈通道中比例微分环节可以组成(12)式串联型 PID 控制器。串联型 PID 最早由气动式控制器发展而来, 为方便与标准型 PID 进行对比分析分析, 串联型 PID 表达式可以写为以下形式:

$$G_s(s) = \left(K_s \frac{I_s + D_s}{I_s} \right) \left(1 + \frac{1}{(I_s + D_s)s} + \frac{I_s D_s}{I_s + D_s} s \right) \quad (13)$$

由(13)式可知, 串联型 PID 可以转换为标准型 PID 的形式, 但串联型 PID 改变积分时间 I_s 或者 D_s , 会同时影响其在标准形式下的其他两个参数, 所以串联型 PID 又称作交互型 PID, 又因为:

$$I_s + D_s \geq 4 \frac{I_s D_s}{I_s + D_s} \quad (14)$$

因此, 串联型结构的 PID 可以保证其等价标准型 PID 结构下的的积分时间恒定大于四倍的微分时间。Z-N 法整定的 PID 参数是基于标准型 PID 结构而言的, 若选取串联型 PID 的参数 I_s 、 D_s 、 K_s 分别满足以下几个条件:

- (a) 积分时间 I_s 为常规 Z-N 法的 1/4。
- (b) 微分时间为积分时间 I_s 的 3~5 倍。
- (c) 比例系数 K_s 为 Z-N 法的 1/4。

则根据(13)式, 在将其转换为等价的标准型 PID 后, 比例系数、积分时间、微分时间三个参数和 Z-N 法 PID 的三个参数接近。PI-LEAD 控制器按照(a)~(c)设定控制参数(不完全微分系数 α 按照工程经验设为 0.05~0.1), 除了拥有和 Z-N 法 PID 同样良好的抗干扰能力之外, 由于其微分环节位于反馈通道中这种创新构造, 设定值跟踪能力显著优于 Z-N 法 PID 控制。然而若想获得最佳的控制性能, 需要对控制器的参数进一步进行精确的设计, 下一节将介绍模拟退火算法整定 PI-LEAD 控制器参数, 参照条件(a)~(c)可以缩小四个参数的解空间的范围, 缩短整定的时间, 提高整定的准确性。

4. 基于模拟退火算法的控制器参数整定

4.1. 模拟退火算法

模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)是一种通用概率算法, 它通过模拟物理中固体物质退火的过程来解决优化问题[13]。在材料科学中, 退火是一种加热后再慢慢冷却的过程, 可以使物质的内部结构达到能量较低的稳定状态。类似地, 模拟退火算法通过随机性地探索解空间, 并逐步降低“温度”参数, 以减少陷入局部最优解的可能性, 从而寻找全局最优解或满意解。

模拟退火算法流程图如图 5 所示, 具体实现步骤如下:

1. 初始化参数, 设置初始温度 T_0 、终止温度 T_f 、降温系数 α 以及每个温度的迭代次数 L 和待整定参数的空间范围。
2. 对 $i=1, 2, \dots, L$ 做第 3 至第 6 步。
3. 对当前解 X 施加随机扰动, 产生新解 X_{new} , $X_{new} = X + \Delta X$ 。
4. 计算增量 $\Delta f = f(X_{new}) - f(X)$, 其中 $f(X)$ 为评价函数。
5. 按照 Metropolis 准则判断是否接受新解, 若 $\Delta f < 0$, 则接受 X_{new} 作为新的当前解, 否则以概率 $\exp(-\Delta f/(kT))$ 接受 X_{new} 作为新解。
6. 如果满足终止条件则输出当前解为最优解, 结束程序, 否则转至第 7 步。
7. T 逐渐减小, $T(n+1) = \alpha T(n)$, 且 $T > T_f$, 然后转第 2 步。

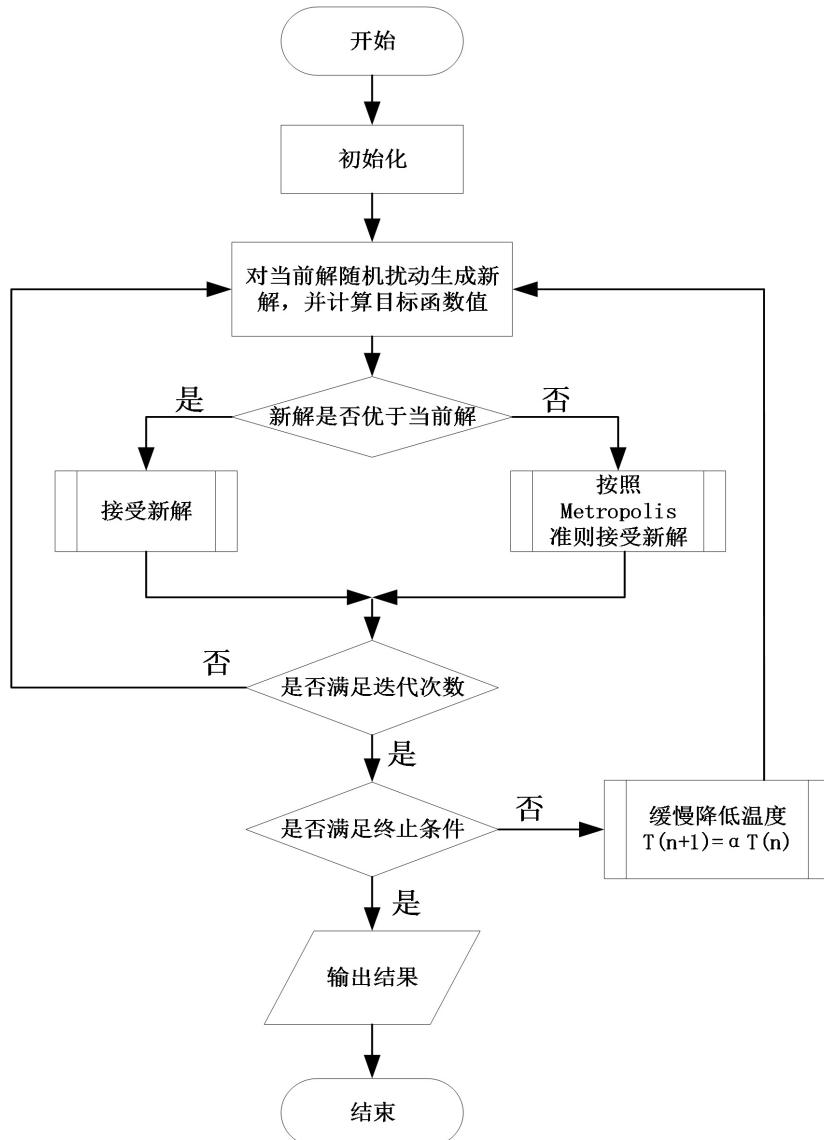


Figure 5. Flowchart of the simulated annealing optimization algorithm

图 5. 模拟退火优化算法流程图

4.2. 烘箱温度控制器参数整定

运用模拟退火算法整定控制参数之前, 首先要选取适当的评价函数 $f(X)$ 作为控制系统性能的优化指标。目前常采用误差积分指标来构造评价函数 $f(X)$, 其中, $ITAE$ (时间乘绝对误差积分)是控制系统性能评价中最常用且最有效的准则之一, 它通过将时间与绝对误差相乘后进行积分, 对持续存在的误差给予更大的惩罚权重, 兼顾了控制精度和响应速度。 $ITAE$ 的数学表达式为:

$$ITAE = \int_0^T t|r(t) - y(t)|dt = \int_0^T t|e(t)|dt \quad (15)$$

其中 t 是时间, $e(t)$ 为误差信号, T 是评价的时间范围。然而 $ITAE$ 准则只追求时间乘绝对误差积分值的最小化, 并未考虑系统的鲁棒性能, 因此将 $ITAE$ 准则整定得到的控制器参数应用到控制系统后, 在被控对象模型出现失配的情况下, 控制系统的控制性能可能会急剧变差甚至不稳定, 存在参数敏感的问题。因此, 为了兼顾控制系统的鲁棒性, 在构造评价函数 $f(X)$ 时, 采用如下方法:

$$f(X) = \int_0^T t|e_1(t)|dt + \int_0^T t|e_2(t)|dt + \cdots + \int_0^T t|e_N(t)|dt = \sum_{n=1}^N \int_0^T t|e_n(t)|dt \quad (16)$$

其中, $e_1(t), e_2(t), \dots, e_N(t)$ 为使用蒙特卡罗方法随机产生的 N 组失配模型在同一组控制参数 X 下的系统的输出和设定值的误差, 这样构造评价的函数即考虑了系统的动态性能, 又考虑了系统的鲁棒性, 在构造 $f(X)$ 时, N 和模型失配度分别设为 10% 和 20%。评价函数构造完成后开始整定烘箱温度 PI-LEAD 控制器的参数, PI-LEAD 控制器需要整定的参数有比例系数 K_p 、积分时间 T_i 、微分时间 T_d 、不完全微分系数 α , 四个参数的解空间范围参照 2.2 中的(a)~(c)设置, 初始温度 T_0 、终止温度 T_f 、降温系数 α 、每个温度下的迭代次数 L 分别设为 100、0.1、0.95、30, 按照 3.1 中的模拟退火算法的实现步骤开始整定控制器的参数, 控制器参数的优化过程如图 6 所示。

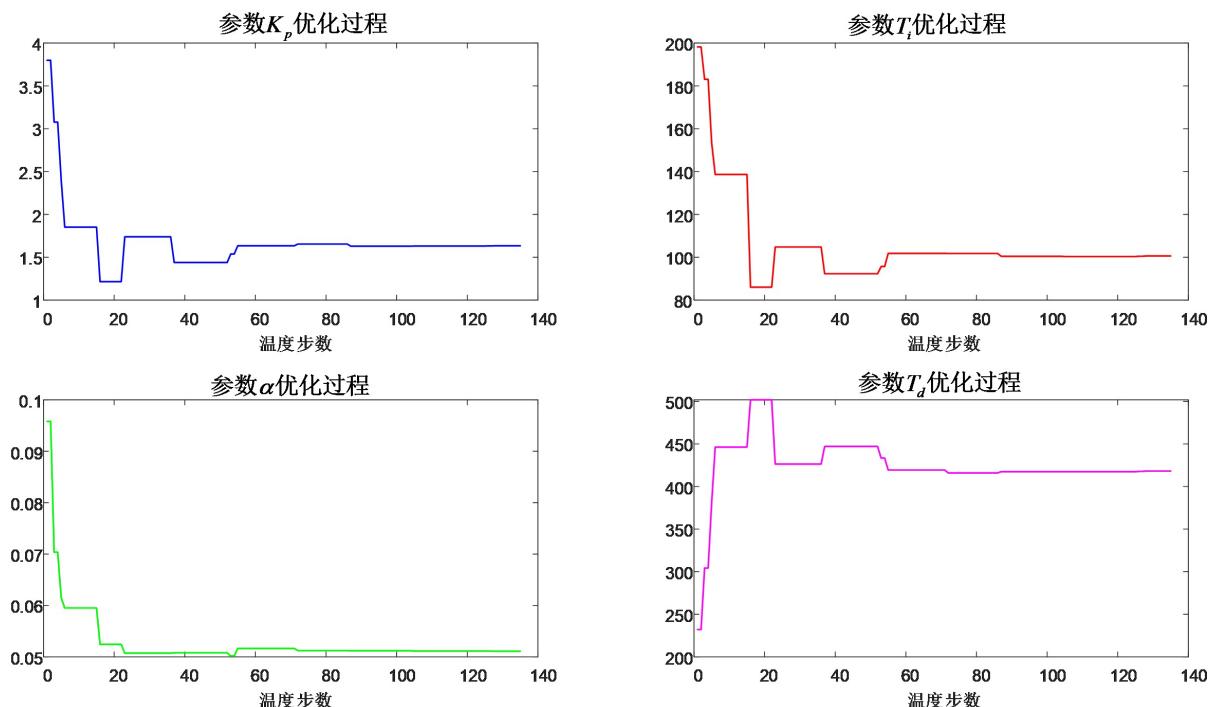


Figure 6. Optimization process of controller parameters

图 6. 控制器参数优化过程

评价函数 $f(X)$ 的优化过程如图 7 所示。

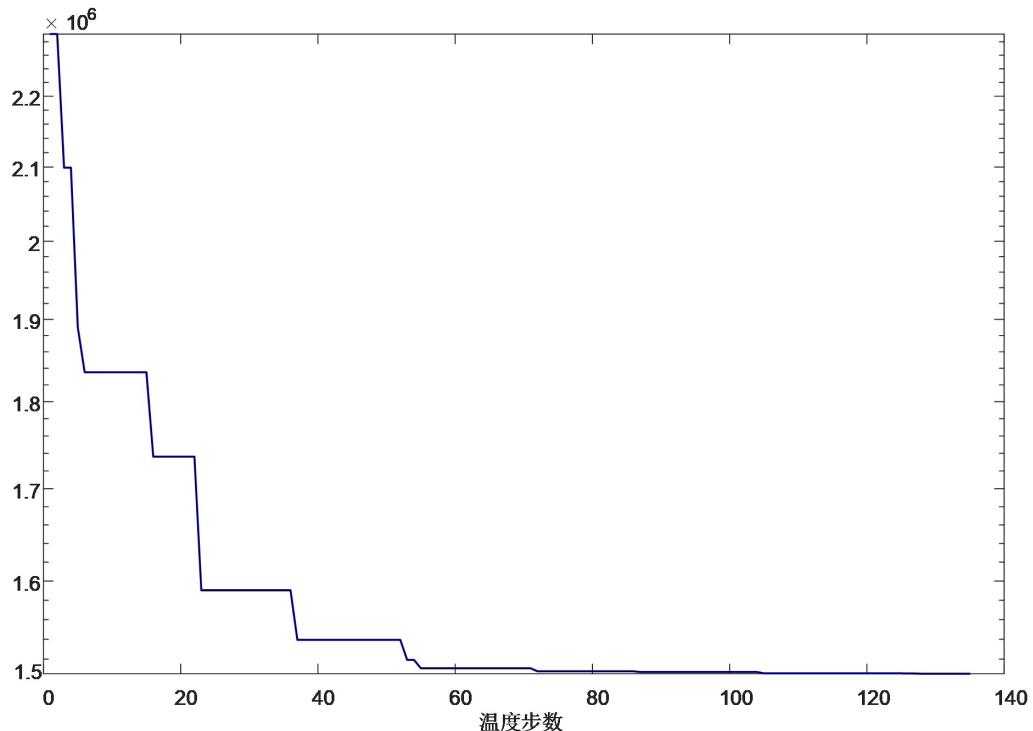


Figure 7. Optimization process of the evaluation function value $f(X)$

图 7. 评价函数值 $f(X)$ 优化过程

4.3. 仿真实验

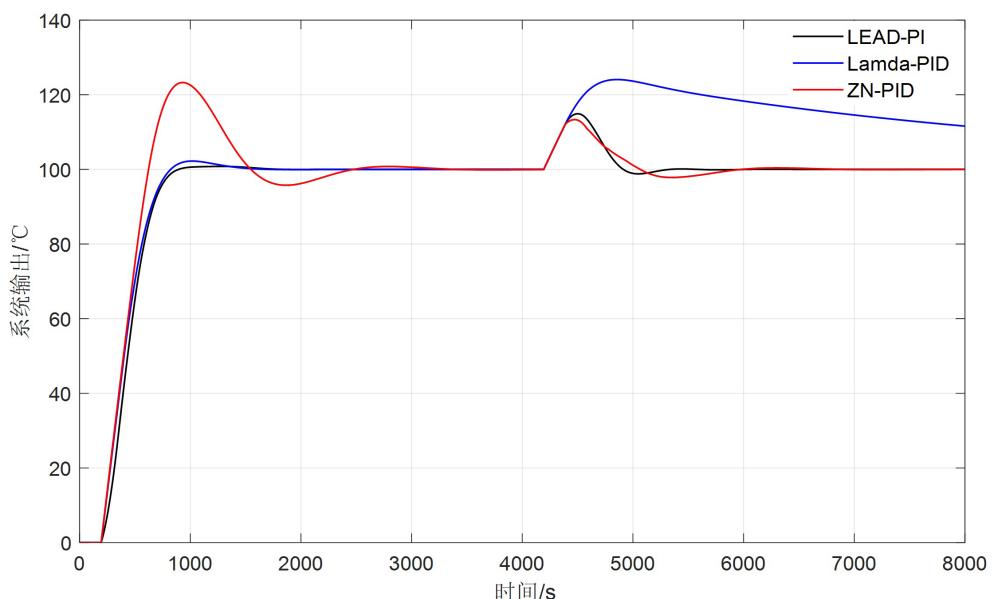


Figure 8. Simulation comparison of control effects of controllers under model matching condition

图 8. 模型标配时各控制器控制效果仿真对比

3.2. 中控制器参数 K_p 、 T_i 、 T_d 、 α 的整定结果分别为 1.63、100.57、418.16、0.051, 以此设置 PI-LEAD 控制器的参数, 在模型标配的情况下, 对 PI-LEAD 控制器、Z-N 法 PID 以及 Lamda 法 PID 的控制效果进行仿真分析并加入 100% 阶跃信号输入干扰观察各控制器的抗干扰能力, 仿真结果如图 8 所示。

从仿真结果上看, Lamda 整定法得到的 PID 控制器和 Z-N 整定法得到的控制器, 一个抗干扰能力差, 一个设定值跟踪能力差, 而通过模拟退火算法整定得到的 PI-LEAD 控制器无论设定值跟踪能力还是抗干扰能力都表现较好。同时, 为验证 PI-LEAD 控制器的鲁棒性能, 使用蒙特卡罗方法随机产生三组 20% 的模型失配:

第一组: $K = 2.57$; $T = 4168$; $\tau = 208$;

第一组: $K = 3.02$; $T = 4305$; $\tau = 210$;

第一组: $K = 3.19$; $T = 4995$; $\tau = 181$ 。

PI-LEAD 控制参数不变, 三组失配模型的响应如图 9 所示, 可以看出, 在出现模型失配的情况下, PI-LEAD 控制器依然具有较好设定值跟踪性能和抗干扰能力, 具有良好的鲁棒性, 满足烘箱温度控制器的设计要求。

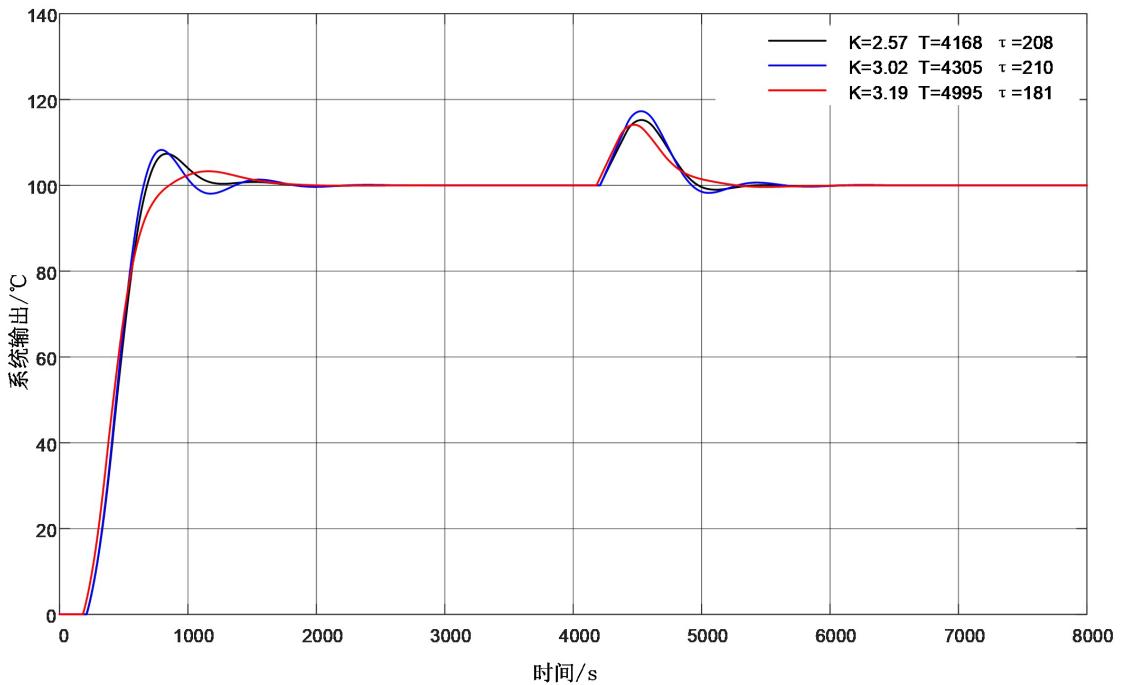


Figure 9. Simulation comparison of control effects of the PI-LEAD controller under model mismatch condition
图 9. 模型失配时 PI-LEAD 控制器控制效果仿真对比

5. 实际应用

该温度控制方案应用于某锂电池产线的烘箱温度控制, 温度从常温升到工艺设定温度 130°C, 控制效果如图 10 所示。在升温阶段, 控制器输出控制加热包以最大功率进行加热, 当烘箱温度接近设定温度时, 控制器输出快速下降到维持设定温度所需的加热功率, 温度超调小于 1°C, 达到稳定后, 温度控制精度为 ± 0.5 °C。除了可以大幅缩短升温时间和提高控制精度之外, 由于控制方案所具有的较强的抗干扰能力, 在控制极片干燥烘箱温度这种存在多种干扰(极片的走带速度的变化、烘箱排风阀门开度变化等)的被控对象时, 无需额外增加抗干扰设计, 大大减少了控制的成本。

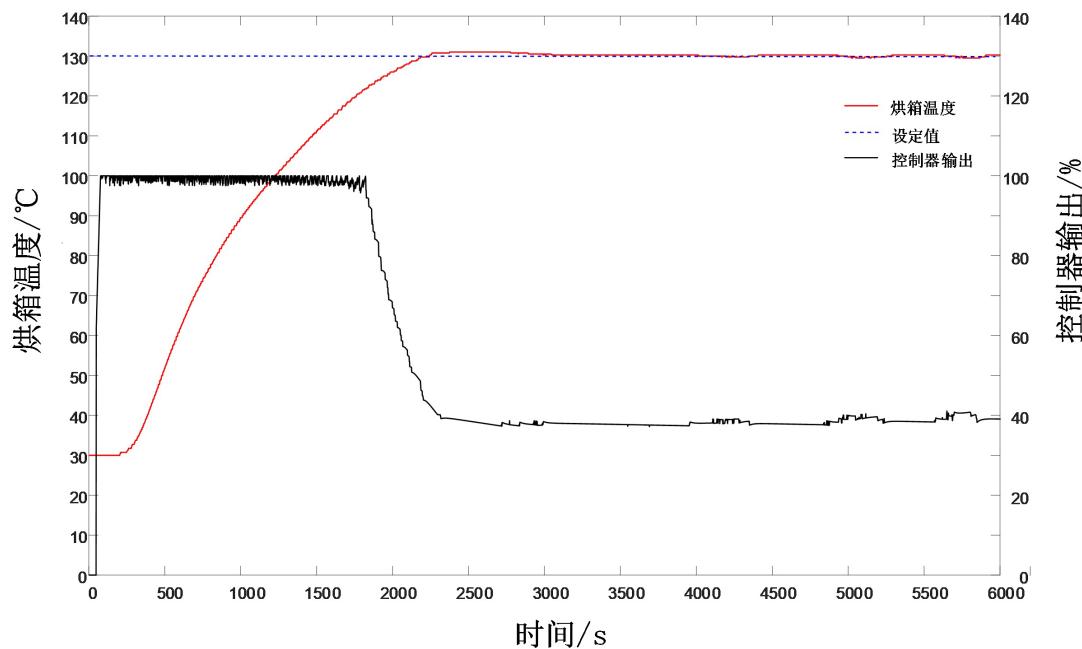


Figure 10. Actual temperature control effect of a single oven in a lithium battery production line
图 10. 某锂电池生产线单节烘箱温度实际控制效果

6. 结束语

本文针对烘箱温度系统大惯性、非线性、大滞后的复杂特性,完成了从模型辨识、控制器设计到参数整定的研究与实践。文中提出的 PI-LEAD 控制器,通过将超前校正环节引入反馈通道,有效解决了传统 PID 控制器在设定值跟踪与抗扰动性能之间难以平衡的难题;同时,结合模拟退火算法与蒙特卡罗方法构建参数整定策略,进一步提升了控制器的鲁棒性,确保其在模型失配场景下仍能稳定工作。仿真实验与工业现场应用结果均验证了该控制方案的有效性。

参考文献

- [1] 陈世和, 王贤平, 张曦, 等. 继电反馈辨识算法研究及其软件实现[J]. 信息技术, 2014(7): 183-186.
- [2] 吴为民, 王仁丽. 温度控制系统的发展概况[J]. 工业炉, 2002(2): 18-20+8.
- [3] 叶政. PID 控制器参数整定方法研究及其应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [4] 冯少辉, 袁海雷. 基于 Lambda 方法的自衡对象 PID 整定研究[J]. 石油化工自动化, 2021, 57(4): 31-34.
- [5] 蔡炳彧, 卢旭锦, 陈超然. PID 参数整定方法的时域及频域分析[J]. 自动化应用, 2024, 65(18): 93-95+98.
- [6] 李朝迁, 裴建朝. 新型模拟退火遗传算法在路径优化的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 52-55.
- [7] 卢宇婷, 林禹攸, 彭乔姿, 等. 模拟退火算法改进综述及参数探究[J]. 大学数学, 2015, 31(6): 96-103.
- [8] 张晨晨. 医用恒温箱的温度控制器开发与优化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [9] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [10] 齐国元, 陈增强, 袁著祉. 非线性系统高阶微分反馈控制[J]. 中国工程科学, 2003(8): 35-44+63.
- [11] 吴文江, 温立志, 杜彦良. 基于 DSP 的汽车电动转向控制系统研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2004(1): 67-71.
- [12] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第六版. 北京: 科学出版社, 2013: 382-399.
- [13] 陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004(6): 802-805.