

基于继电反馈的 PID 算法在碳化炉中的应用

王贺民 任正云

东华大学 信息科学与技术学院, 中国·上海 201620

摘要: 碳化是碳纤维生产过程中的重要环节, 碳化炉的温度具有大滞后、时变、非线性等特点, 并且碳化过程涉及一系列复杂的物理化学变化, 难以建立精确的模型。碳化过程中温度的稳定对碳纤维的质量至关重要, 常规的 PID 控制算法难以满足碳纤维的工艺需求。论文针对这种问题, 提出了基于继电反馈的 PID 控制算法, 通过辨识模型并根据辨识结果设计 PID 控制器, 仿真试验表明, 该方法可以实现对碳化炉温度模型参数的辨识, 且适用于广泛的过程对象, 具有良好的准确性和鲁棒性。

关键词: 继电反馈; 系统辨识; 碳纤维; PID

Application of PID Algorithm Based on Relay Feedback in Carbonization Furnace

Hemin Wang Zhengyun Ren

School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai, 201620, China

Abstract: Carbonization is a crucial step in the carbon fiber production process. The temperature of the carbonization furnace is characterized by significant delay, time-varying, and nonlinear features. Moreover, the carbonization process involves a series of complex physicochemical changes, making it difficult to establish an accurate model. The stability of temperature during carbonization is critical to the quality of carbon fibers, and conventional PID control algorithms are insufficient to meet the process requirements. In this paper, a relay feedback-based PID control algorithm is proposed to address this issue. By identifying the model and designing the PID controller based on the identification results, simulation experiments demonstrate that this method can successfully identify the temperature model parameters of the carbonization furnace. It is applicable to a wide range of process objects and exhibits good accuracy and robustness.

Keywords: relay feedback; system identification; carbon fiber; PID

0 前言

碳纤维是当今新兴的高性能材料, 具有低密度、高硬度、耐腐蚀、耐热、耐摩擦、导电、导热和高模量的特性, 同时还具有纤维的柔软性和可加工性。因此, 碳纤维常被应用于航天、国防、汽车制造、石油化工以及一些民生等领域^[1]。作为一种重要的战略物资, 碳纤维关键技术保密森严, 中国碳纤维产业的发展受到发达国家的阻碍和封锁, 导致中国对碳纤维的研究仍落后于日本及欧美的一些发达国家^[2]。

碳纤维碳化炉的温度调节过程是一个典型的大滞后、多变量、大惯性的非线性控制过程。由于内在机理复杂且难以建立精确的模型, 基于模型的控制设计变得更加困难, 从而加大了控制系统的控制难度。

Astrom 和 Hagglund 首次提出了在相位和幅度裕度上对 PID 进行自动整定的方法, 该方法对建模误差和干扰不敏感, 既可以用于简单调节器的自动调节, 也可以用于更复杂的自适应调节器的初始化, 该方法简化了 Z-N 方法 (Ziegler-Nichols) 中的 PID 控制器增益的整定步骤, 得益于其简便性, 继电器反馈技术在 PID 控制器的整定中得到了广泛应用^[3]; Luyben 提出了 ATV 法 (Autotune Variation) 来确定高非线

性多变量系统的传递函数模型, 该方法通过理想继电器的整定与关键点的幅相关系推导模型参数, 并据此设计控制器参数, 在蒸馏系统上获得了良好的效果^[4]; Hofreiter 提出一种适用于 PID 控制器整定的动态系统继电器反馈辨识的继电器移位方法, 该技术使用偏置继电器从单个实验中确定频率响应点, 而不需要对模型传递函数进行任何假设。该方法适用于开环稳定、不稳定和积分过程, 即使有延迟, 也不管它们是振荡还是非振荡^[5]。

当前工业过程控制领域仍有 90% 的控制回路采用传统的 PID 控制算法, 应用十分广泛, 但 PID 算法处理大滞后过程效果差、参数整定复杂, 且对模型不确定性敏感, 为了克服这些问题, 论文提出了基于继电反馈的 PID 控制算法, 该方法实现了模型参数的精确辨识, 并且基于碳化炉模型设计的控制器具有较好的鲁棒性和抗干扰能力。

1 标准继电反馈

标准继电反馈结构如图 1 所示, 与传统的闭环控制系统不同, 该系统的反馈回路中采用了继电器与控制器的并联结构, 并通过一个切换开关来灵活选择将继电器或控制器接入闭环系统。

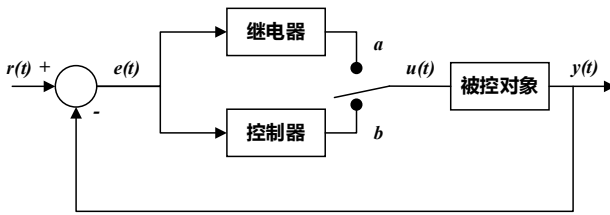


图 1 标准继电器反馈控制结构图

在继电器反馈结构图中，当开关在 a 端时为继电器反馈系统， $r(t)$ 为设定值， $e(t)$ 为偏差， $u(t)$ 为控制输入， $y(t)$ 为输出。

假设继电器反馈测试的周期为 T_u ，那么振荡频率为：

$$\omega_u = \frac{2\pi}{T_u} \quad (1)$$

假设非线性环节的输入信号 $e(t)$ 为正弦信号 $e(t) = A \sin(\omega t)$ ，此时非线性环节的输出信号 $u(t)$ 是周期为 T_u 的方波信号。对标准继电器输出 $u(t)$ 进行谐波分析，傅里叶展开式为：

$$u(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)) \quad (2)$$

式 (2) 中， A_0 为直流分量， A_n 和 B_n 分别为基波及各次谐波分量的幅值。

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) d(\omega t) \\ A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cos(n\omega t) d(\omega t), n=1, 2, 3, \dots \\ B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \sin(n\omega t) d(\omega t), n=1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad (3)$$

由于正弦信号是奇函数，因此输出的周期方波信号也是奇函数。由此可得，傅里叶级数中的直流分量系数和基波偶函数分量系数均为零，即 $A_0 = A_n = 0$ ，因此式 (2) 可以简化为：

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (4)$$

由公式 (3) 可以得到：

$$B_n = \begin{cases} \frac{4d}{n\pi}, n=1, 3, 5, \dots \\ 0, n=2, 4, 6, \dots \end{cases} \quad (5)$$

基波奇函数分量系数为：

$$B_1 = \frac{4d}{\pi} \quad (6)$$

根据式 (6) 和 $A_1 = 0$ 可以得到理想继电器特性的描述函数为：

$$N(A) = \frac{4d}{\pi A} \quad (7)$$

根据 Nyquist 稳定判据，继电器反馈产生持续的等幅振荡，临界振荡频率满足：

$$1 + G(j\omega)N(A) = 0 \quad (8)$$

临界增益为：

$$K_u = -\frac{1}{G(j\omega)} = \frac{4d}{\pi A} \quad (9)$$

$$T_u = \frac{2\pi}{\omega_u} \quad (10)$$

式中， K_u 为系统的临界增益， ω_u 为临界频率， T_u 为振荡周期， A 为正弦信号幅值， d 为继电器幅值。

2 继电器反馈整定 PID

基于比例、积分、微分的 PID 控制器是工业生产中应用最广泛的控制器，具有原理简单、适用范围广、控制参数独立、参数选择简单、易于实现等优点。比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 控制算法各自的作用如下：

①比例 (P)：适当的比例作用可以优化系统的稳态误差和响应速度。但要控制好比例系数，过小会导致动态性能下降，过大则会弱化系统的稳态性能，甚至造成不稳定。单纯地使用比例控制难以保证调节效果最合适、完全消除系统的稳态误差。

②积分 (I)：积分作用的存在可以有效提升系统的稳态性能，使系统达到无静差。但积分作用不宜过强，否则会使系统不稳定、弱化系统的动态性能。积分调节的大方向是正确的，积分项就可以减小系统的稳态误差。直到系统处于稳定、稳态误差恒为零，比例项和微分项均为零，积分项才不再变化，并且它的值等于系统处于稳态时控制器所需要的输出值。因此，为了消除系统的稳态误差，必须在控制器中引入积分项。

③微分 (D)：微分具有预测功能。它可以看作是一种超前校正，通过预测下一时刻的偏差实现消除系统稳态误差的效果。微分控制能够在早期修正信号，增大阻尼比，改善系统稳定性，提高系统的动态性能。但它对噪声敏感，容易出现过度的反应，影响控制器的控制效果，因此一般不会单独使用微分控制。微分控制只会对输入量的变化有反应，并不会对输入量本身有反应。如果输入量为恒定值，即使系统存在偏差，微分也不会起作用，这说明微分控制只对系统的动态过程有用。

PID 控制算法表达式如下^[6]。

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (11)$$

继电器反馈整定 PID 的流程为：首先，利用继电器使系统产生振荡；其次，测量系统的振荡幅值和振荡周期，即可获得系统的临界增益 K_u 和振荡周期 T_u ；最后，根据临界增益 K_u 和振荡周期 T_u ，基于 Z-N (Ziegler-Nichols) 表获得所需的 PID 参数。Z-N 参数整定表为 PID 控制器设计提供了简单有效的初始参数计算方法，尤其适用于模型未知的系统。然而，其局限性也促使研究者不断改进和优化，以适应

更复杂的工业控制场景。在实际应用中，建议结合具体系统特性对 Z-N 参数进行微调，以获得最佳控制效果。Z-N 参数整定表如表 1 所示。

表 1 Z-N 参数整定表

控制器类型	比例增益 K_p	积分时间 T_i	微分时间 T_d
P	$0.5K_u$		
PI	$0.45K_u$	$0.83T_u$	
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$

3 仿真实验

假设碳化炉温度系统简化为一阶惯性加时滞环节，传递函数为 [7]：

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

(12)

通过继电器反馈识别仿真试验，得到 $T_u = 2.9s$ ， $K_u = 29$ 。通过 Z-N 表，可以计算得到 PID 控制器的参数： $K_p = 0.6K_u = 17.4$ ， $K_i = 0.5T_u = 1.45$ ， $T_d = 0.125T_u = 0.3625$ 。

得到 PID 参数后，通过 Simulink 仿真试验得到继电器反馈整定 PID 的阶跃响应曲线如图 2 所示。

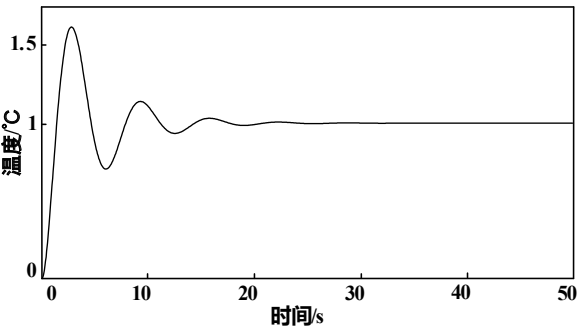


图 2 继电器反馈整定 PID 的阶跃响应曲线

4 结语

论文针对碳纤维碳化炉温度控制中传统 PID 算法存在的超调量大、调节时间长、抗干扰能力弱等问题，提出了一种基于继电器反馈正定 PID 的改进控制方法。通过继电器反馈实验在线整定 PID 参。与传统 PID 相比，改进算法将超调量降低至 5% 以下，调节时间缩短 30% 以上，显著提高了系统的响应速度与控制精度；通过动态参数调整，能够有效抑制碳化炉温度系统中的非线性、时滞及外部扰动（如进气流量波动）影响；基于 Simulink 的仿试验表明，该方法无需依赖精确数学模型，可直接应用于工业碳化炉温控系统，具备较强的工程落地价值。

参考文献：

[1] 王祥国,王保秀.碳纤维生产的微机温度控制系统设计[J].安徽大学学报(自然科学版),1991(2):21-27+32.

[2] 卢春华,宋丕双,孟庆辉,等.国内外聚丙烯腈基碳纤维生产现状及市场分析[J].弹性体,2012,22(2):89-94.

[3] K J Å, T H. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins[J]. Pergamon,1984,20(5):641-651.

[4] Luyben L W. Derivation of transfer functions for highly nonlinear distillation columns[J]. Ind. Eng. Chem. Res.,2002,26(12): 2490-2495.

[5] Hofreiter M. Relay identification using shifting method for pid controller tuning[J]. Energies,2021,14(18).

[6] 任正云,邵惠鹤.预测PID控制算法的基本原理及研究现状[J].世界仪表与自动化,2004,48(6):4.

[7] 杨自.基于继电器反馈的自整定预测PI及其在碳纤维生产中的应用[D].上海:东华大学,2022.

作者简介: 王贺民(2000-), 男, 中国吉林人, 在读硕士, 从事先进过程控制研究。