

doi: 10.7690/bgzdh.2021.03.020

## 基于模糊 PI 控制的甲醇催化燃烧系统温度控制策略

张 聪, 王 伟, 李永成, 张 鸿, 吴 航

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司武器装备信息与控制技术创新中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为改善甲醇催化燃烧系统中由于温冲效应导致重整室温度达到稳态时间的滞后问题, 运用模糊算法对传统的 PI 控制器进行优化, 根据先验知识实时调整 P、I 参数, 并通过 Matlab 软件仿真计算和设计实验对 2 种控制策略性能进行比较。仿真计算和实验结果均表明: 在升温快速响应阶段, 模糊 PI 控制器较传统 PI 控制器响应时间更短、速度更快; 在稳定阶段, 相较传统 PI 控制器, 模糊 PI 控制器产生的超调量更小, 且能更快使系统温度达到稳定状态。由此可见, 模糊 PI 算法能有效提升系统快速性和稳定性, 一定程度改善系统滞后的缺点。

**关键词:** 模糊 PI 算法; 甲醇催化燃烧系统; 温度控制; 仿真计算

**中图分类号:** TP311.1 **文献标志码:** A

## Temperature Control Strategy of Methanol Catalytic Combustion System Based on Fuzzy PI Control

Zhang Cong, Wang Wei, Li Yongcheng, Zhang Hong, Wu Hang

*(Weapon Equipment Information & Control Technology Innovation Center, Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)*

**Abstract:** In order to improve the lag problem in the methanol catalytic combustion system that the temperature of the reforming chamber reaches the steady state due to the temperature shock effect, the fuzzy algorithm is used to optimize the traditional PI controller, and the P and I parameters are adjusted in real time based on prior knowledge, and the Matlab is passed software simulation calculation and design experiment compare the performance of the two control strategies. The simulation calculation and experiment results show that: in the rapid response stage of heating, the fuzzy PI controller has shorter response time and faster speed than the traditional PI controller; in the stable stage, compared with the traditional PI controller, the fuzzy PI controller produces more overshoot. Small, and can make the system temperature reach a steady state faster. It shows that the fuzzy PI algorithm can effectively improve the speed and stability of the system, and also improve system lag to a certain extent.

**Keywords:** fuzzy PI algorithm; methanol catalytic combustion system; temperature control; simulation calculation

### 0 引言

高温质子交换膜燃料电池是燃料电池中应用较多的一种, 具备效率高、发热小、噪音低、红外指征和声指征弱等优点<sup>[1]</sup>, 符合现代武器装备对电源系统的军事需要。在实际使用过程中, 通常将甲醇水蒸气通过重整反应产生氢气。该反应为吸热反应, 需要匹配一个供热源, 笔者采用甲醇催化燃烧供热。系统中供热源来自燃烧室, 利用催化剂对甲醇水蒸汽进行催化燃烧, 通过燃烧室尾部风扇将产生的热能传递到重整室, 进行强制对流换热。位于重整室中的温度传感器采集实时温度后传递给控制计算机进行数据分析, 最终将控制变量发送至风扇或甲醇泵, 形成闭环控制。在快速升温过程中, 甲醇泵过量注入甲醇水, 因此, 只需控制风扇转速即可。

由于采用甲醇催化燃烧供热存在系统响应滞后

问题, 需要采取一些策略进行控制, 以满足重整室温度快速稳定在所需温度的要求。国内外学者对于甲醇催化燃烧系统温度控制策略研究较少, 但是对类似系统温度控制策略开展了很多研究。文献[2]提出 PID 算法对燃烧室温度进行控制, 在 10 min 内实现燃烧室无静差和无震荡的温度稳定控制; 文献[3]提出模糊控制对竖炉燃烧室温度进行控制, 实验结果表明, Fuzzy 可在 100 s 内使炉温稳定在 1 050℃。

针对甲醇催化燃烧其化学反应特性导致的滞后问题, 基于大量先验知识, 笔者提出一种基于模糊 PI 控制的改进型温度控制算法, 使系统能够快速稳定在理想温度。

### 1 系统温控数学模型建立

本系统温度控制模型涉及强制对流换热、热传导、空气动力学以及风扇转速模型。首先, 各个模

收稿日期: 2020-12-09; 修回日期: 2021-01-10

作者简介: 张 聪(1994—), 男, 四川人, 学士, 从事计算机控制技术、高温质子交换膜燃料电池、电子信息技术研究。

E-mail: 505724935@qq.com。

型均具有时滞性、非线性和时变性等特征；其次，气流扰动以及重力影响均会导致温度场不均匀，难以得到精确的传递函数模型。笔者选用一阶惯性加纯延迟传递函数表征系统模型，如下式：

$$G(s) = K / (T_s + 1) e^{-ts} \quad (1)$$

其中：输入量为风扇转速，输出量为重整室入口温度。本次实验选用某型贵金属燃烧催化剂，根据生产手册，当反应温度达到 300℃ 时，其燃烧效率可达到理论高值。实验设计：选用质量比 54%:46% (甲醇:水) 的甲醇水溶液，其进液速率是 16 ml/min，为测量甲醇重整系统温度响应速度，通过调试计算机增减风机转速，观察重整室中温度响应情况。开环实验结果表明：在转速控制指令发出 1 s 后，风扇产生响应，当风扇转速达到 2 600 r/min，重整室温度在 280℃。开环控制实验原理如图 1 所示。

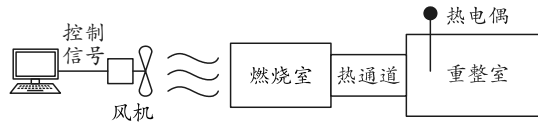


图 1 开环控制实验原理

根据系统辨识和实验结果，将实验数据拟合并代入式(2)中求出：过程增益  $K=288$ ，惯性时间  $T=77$ ，滞后时间  $t=1$  s。

$$y(t) = K(1 - e^{-t/T}) \quad (2)$$

## 2 温度控制策略

### 2.1 控制难点

系统采用对流换热方式进行热传导，由于空气流动的滞后性会导致温冲效应进而产生一个较大的超调量  $\sigma$ ，系统闭环控制原理如图 2 所示。

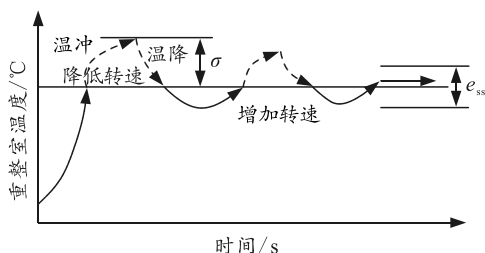


图 2 系统闭环控制原理

启动风机初始阶段，重整室温度迅速上升至稳态值，后由于温冲效应，重整室温度到达峰值，产生偏离量，期间降低转速，此后温度下降。由于空气流动的滞后性导致重整室温度低于所需温度，进而增加转速，如此循环，最终系统误差控制在稳态误差  $e_{ss}$  内。采用常规 PI 控制算法到达系统稳态值所需时间较长，不能满足系统快速供热启动要求。

### 2.2 模糊 PI 控制

#### 2.2.1 简述

模糊 PI 控制器简单来说就是对 PI 控制的比例系数  $k_p$  和积分系数  $k_i$  进行实时修正<sup>[4-7]</sup>，以提升被控对象的动态性能，模糊 PI 控制原理如图 3 所示。

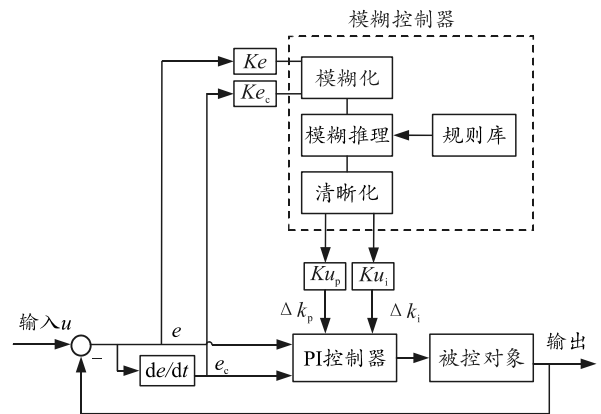


图 3 模糊 PI 控制器原理

模糊 PI 控制器将系统误差信号  $e$  及误差信号变化率  $e_c$  作为输入量，控制器实时监测 2 个输入量的值，同时将其转换成模糊化量<sup>[8-9]</sup>。然后，按照设定的规则库进行模糊推理，最后将模糊推理得到的模糊量变换为实际用于修正 PI 控制的清晰量 (即  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$ )，用以实时调整  $k_p$  和  $k_i$ ，见下式。

$$\left. \begin{aligned} k_p &= k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i &= k_{i0} + \Delta k_i \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

#### 2.2.2 设计

由实验数据可知：系统温度变化误差  $e$  的范围为  $-300 \sim 300^\circ\text{C}$ ，温度变化率误差  $e_c$  的范围为  $-20 \sim 20^\circ\text{C/s}$ ，可确定  $e$  和  $e_c$  的基本论域分别为  $[-300, 300]$  和  $[-20, 20]$ 。根据经验可确定输入量  $e$  和  $e_c$  以及输出量  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  的模糊论域均为  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ ，其对应的模糊语言值分别为 NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZE(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。如图 4 所示，本次设计选用 2 维模糊控制器，对模糊集合进行三角形分布隶属度函数分割。

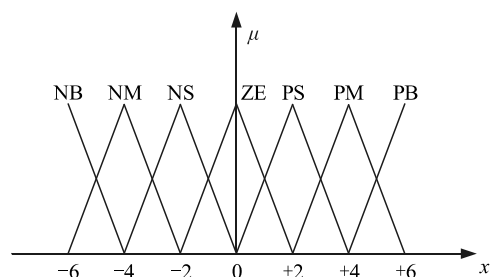


图 4 模糊集合三角形分布隶属度函数分割

模糊控制规则是模糊控制的核心，依据工作经验和控制工程知识，建立用于关于  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  的模糊控制规则库，用于实时调整  $k_p$  和  $k_i$ ，如表 1 和表 2 所示。

表 1  $\Delta k_p$  模糊规则表

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 2  $\Delta k_i$  模糊规则表

$e_c$	$e$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

表 1、表 2 规则库可用 IF-THEN 语言表示如下：

RULE1:If( $e$  is NB)and( $e_c$  is NB)then( $\Delta k_p$  is PB )( $\Delta k_p$  is NB);

RULE2:If( $e$  is NB)and( $e_c$  is NM)then( $\Delta k_p$  is PB )( $\Delta k_p$  is NB);

.....

RULE49:If( $e$  is PB)and( $e_c$  is PB)then( $\Delta k_p$  is NB )( $\Delta k_p$  is PB).

共 49 条模糊语句，对应 49 条模糊规则，输入量  $e$ 、 $e_c$  分别对应集合  $A$ 、 $B$ ，并运算模糊关系为  $R$ ，则输出模糊量  $z$  用集合  $C$  可表示式(4)。

$$C_i = (A_i \text{ and } B_i) \circ R. \quad (4)$$

运用重心法对输出模糊量进行清晰化计算，对于离散量  $z$ ，代入式(5)可求出输出清晰量  $z_0$ ，得出用于修正的变量  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$ ，即可实现实时调整 PI 参数<sup>[10]</sup>。

$$z_0 = \frac{\sum_{i=0}^n z_i \mu_c(z_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_c(z_i)}. \quad (5)$$

其中  $\mu_c$  为输出模糊量  $z_i$  的加权平均值<sup>[10]</sup>。

### 2.3 仿真模型搭建与结果分析

首先在 Matlab 中利用 simulink 搭建一个双输入双输出的 fuzzy 控制器，输入量为误差信号  $e$  及误差信号变化率  $e_c$ ，输出量分别为 PI 控制器调节参数  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$ 。按照 2.2 节设计的模糊规则库，设定各条规则权重均为 1，可得到  $\Delta k_p$  和  $\Delta k_i$  关于  $e$  和  $e_c$  的 3 维模糊规则关系，如图 5、图 6 所示。

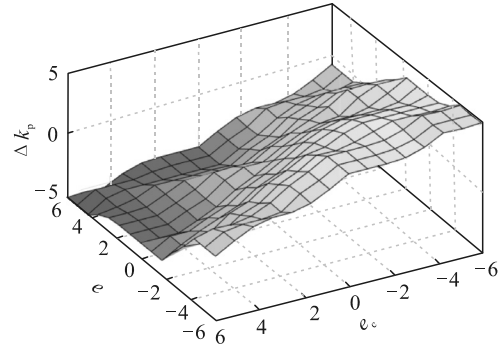


图 5  $\Delta k_p$  关于  $e$  和  $e_c$  3 维模糊规则关系

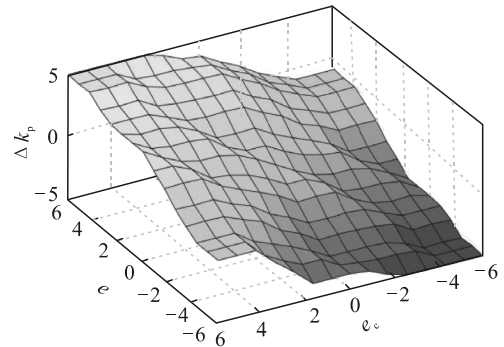


图 6  $\Delta k_i$  关于  $e$  和  $e_c$  3 维模糊规则关系

系统响应仿真结果如图 7 所示，可以看出：在温度上升的快速响应阶段，改进的模糊 PI 算法较传统 PI 算法响应更快；在稳定阶段，采用模糊 PI 控制器的系统温冲效应带来的超调量较小，且达到稳定状态时间更短。由此说明：在甲醇催化燃烧温度控制系统中，在响应不同阶段，利用模糊算法对传统 PI 控制器 P、I 参数进行实时调整，能够有效提升系统快速性和稳定性，一定程度改善系统响应滞后的问题。

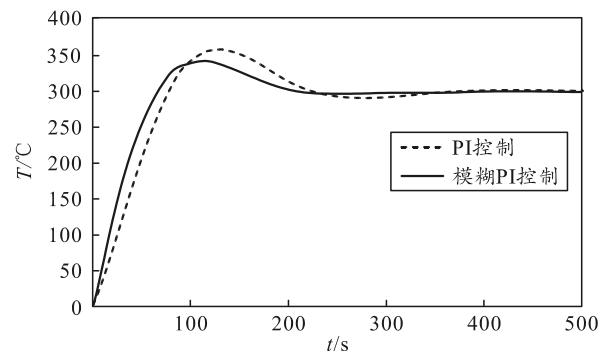


图 7 系统响应仿真结果

在 simulink 中选用 Library 的 Transfer、Transport delay 模块，分别搭建 PI 算法和模糊 PI 算法 2 种控制模型，进行对比仿真实验：目标温度设为 300；Transfer fcn 中系统过程增益  $K=288$ 、惯性时间  $T=77$ ；Transport delay 中滞后时间  $t=1$  s，模型如图 8 所示。

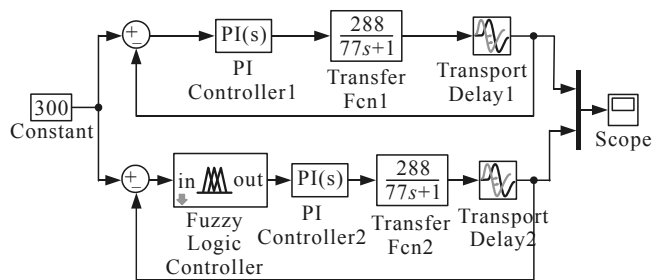


图8 温控仿真模型

### 3 实验

为验证笔者提出方法的有效性和合理性,分别采用 PI 算法和改进的模糊 PI 算法对系统进行实际控制,观察各响应阶段重整室温度变化情况,实验装置如图 9 所示。

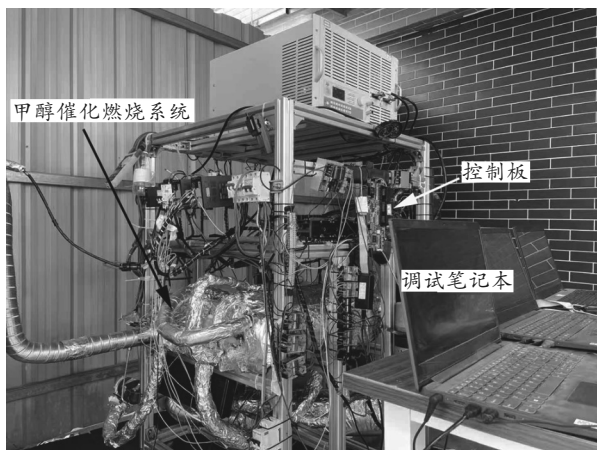


图9 甲醇催化燃烧系统实验装置

目标温度设定为  $300^{\circ}\text{C}$ , 采样频率设定为  $10\text{ s}$  / 次, 分别用 2 种不同算法对系统温度进行控制, 实验结果如图 10 所示。

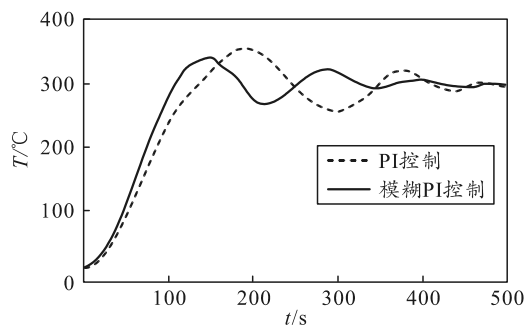


图10 2种控制算法实验结果

实验结果显示:采用模糊 PI 算法控制的系统在  $150\text{ s}$  时重整室温度上升到最高温度  $339^{\circ}\text{C}$ , 在  $350\text{ s}$  后重整室温度稳定在目标温度  $\pm 5\%$  范围内;采用传

统 PI 算法控制的系统在  $190\text{ s}$  时, 重整室温度上升到最高温度  $355^{\circ}\text{C}$ , 在  $420\text{ s}$  后, 重整室温度稳定在目标温度  $\pm 5\%$  范围内。综上可知:在实际工程中,改进后的模糊 PI 算法相较于传统 PI 算法在快速响应阶段响应速度更快;在系统稳定阶段,模糊 PI 算法产生的超调量更小,且稳定在目标温度范围时间更短。实验结论与计算机仿真结果大体一致。

### 4 结束语

笔者运用模糊算法对传统 PI 控制器进行改进,利用先验知识实时调整 PI 控制器中的 P、I 参数,不仅一定程度改善系统响应滞后的问题,而且模糊 PI 控制器控制的系统响应速度更快,产生的超调量更小。仿真计算和实验结果均表明,相较于传统 PI 算法,改进后的模糊 PI 算法具有更好的快速性与稳定性。

### 参考文献:

- [1] 闵凌云. 高温质子交换膜燃料电池快速启动的仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019: 1-12.
- [2] 俞炜. 自热式甲醇重整制氢微反应器放大与集成研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019: 45-56.
- [3] 张凯. 模糊控制在竖炉燃烧室温度控制中的研究与应用[J]. 电子测试, 2019(2): 43-45.
- [4] 廖勇, 陈继斌, 过李娇, 等. 基于模糊 PI 控制的光伏直流变换器控制策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(4): 100-104.
- [5] 王艳, 卢斌, 问增杰. 基于 PLC 与模糊 PI 算法的退火炉温度控制系统[J]. 自动化与仪表, 2012, 27(11): 35-39.
- [6] 党晓圆, 马冬梅, 李洁. 真空氢气烧结炉温度控制策略研究[J]. 仪表技术, 2020(10): 31-33.
- [7] 杜里根, 方诣博, 李玉玲. 基于自适应模糊系统的感应加热电源温度控制[J]. 电工技术, 2020(12): 10-12, 14.
- [8] JENA T, DEBNATH M K, SANYAL S K. Optimal fuzzy-PID controller with derivative filter for load frequency control including UPFC and SMES[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2019, 9(4): 2813.
- [9] MOBIN G. A hybrid fuzzy-PID controller based on gray wolf optimization algorithm in power system[J]. Evolving Systems, 2019, 10(2): 273-284.
- [10] 李国勇, 杨丽娟. 神经-模糊-预测控制及其 MATLAB 实验[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 188-195.