

# 基于模糊广义预测控制的管道加热系统温度控制

王战,高长水

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:**针对电热丝加热具有的热惯性、时变性等特点,提出一种基于 CARMIA 模型的模糊广义预测控制方法,对系统参数进行辨识。将模糊广义预测控制应用到加热过程,进行 Matlab 仿真和实际加热实验对比。结果表明:该方法在不同条件下的加热响应均可获得更快的调整速度和更好的控制精度,有较强的鲁棒性。

**关键词:**模糊广义预测控制;输气管道加热;CARMIA 模型

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0229-03

## Temperature Control of Pipeline Heating System Based on Fuzzy Generalized Predictive Control

WANG Zhan, GAO Changshui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aimed at the thermal inertia and time-varying characteristics of heating wire heating, a fuzzy generalized predictive control method based on CARMIA model is proposed to identify system parameters. The fuzzy generalized predictive control is applied to the heating process, and Matlab simulation and actual heating experiment are carried out. The results show that the heating response, by the proposed method under different conditions asynchronously, can obtain faster reset adjustment speed, better control accuracy and stronger robustness.

**Keywords:** fuzzy generalized predictive control; heating of gas pipeline; CARMIA model

## 0 引言

半导体工艺气体在经管道输送时需要保持管内气体温度稳定在设定值,以保证生产过程的可靠运行,因此在管道加热及保温过程中采用了内嵌有电加热丝的柔性管道加热器<sup>[1]</sup>。电阻丝加热存在时变性和滞后性的特点<sup>[2]</sup>,温控过程参数随温度变化,很难建立精确的数学模型。

研究人员在温度的预测控制研究方面进行了相关研究。蒋思瑀<sup>[3]</sup>提出了利用神经网络进行建模对加热过程数据进行预测的一种智能控制算法;祝帆等<sup>[4]</sup>采用 GM(1,1, $\tau$ )模型、模糊控制和常规 PID 控制 3 种控制理论的结合,解决该控制系统的控制滞后。KORKUT I 等<sup>[5]</sup>根据模糊预测理论建立了数学模型,并根据分析结果对加热过程进行控制,实现了加热过程中的温度预测;CHRISTIAN R A 等<sup>[6]</sup>使用了 K-均值聚类的办法对输入、输出进行了聚类,并在此基础上编制了模糊知识库来进行温度预测。上述方法虽然取得了一定的控制效果,但在具有不确定性和扰动的实际工业过程中,控制策略应对参数的变化得不到很好的控制效果。

对此,本文将具有多步预测、滚动优化和反馈校正特点<sup>[7]</sup>的模糊广义预测控制(FGPC)应用于管道加热过程的温度预测控制过程中。根据系统辨识,建立控制系统的

CARMIA 模型,据此模型进行加热仿真,并与实际实验结果相对照。

## 1 气体管道加热控制系统模型

### 1.1 管道加热器控制原理分析

工作过程中,控制器依据传感器所反馈的实时温度数据动态地调整 PWM 模块的输出,使加热器电加热丝的加热功率可调。通过改变加热功率的方式改变加热丝的产热值,使管道的自然散热与受热达到动态平衡,实现管道加热过程的精确性和保温过程的稳定性控制。

管道加热控制系统根据温度设定值由模糊控制器计算出作为当前参数  $u(k)$ ,并得到当前输出  $y(k)$ 。将输出作为历史数据传输到预测模型中,预测出  $k+P$  时刻的输出,并将系统设定值与  $y_p(k+P)$  的差值作为误差  $e$ ,从而实现了对加热过程的滚动优化。管道加热控制系统采用 GPC 算法与模糊 PID 模型相结合,共同实现对加热过程的控制,系统温度控制方案如图 1 所示。

### 1.2 温度模型辨识

采用阶跃响应系统辨识方法求取加热系统的数学模型,其传递函数可用式(1)表示。

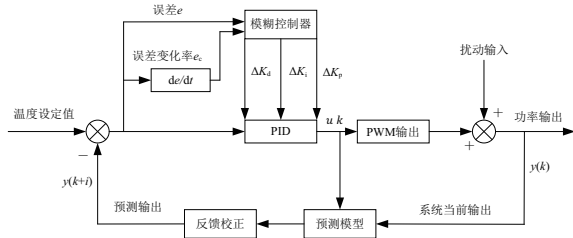


图1 模糊预测控制策略框图

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

式中:K是增益;T是惯性时间常数; $\tau$ 是延时时间。加热过程表面温度随加热时间变化曲线如图2所示。

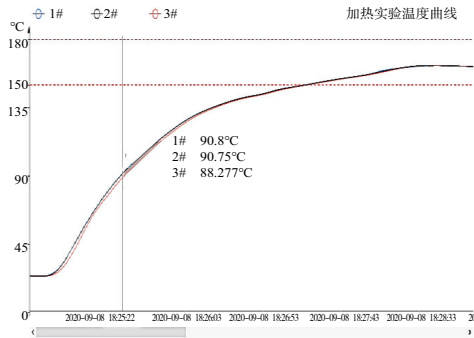


图2 管道连续加热过程曲线

采用文献[8]中的辨识方法,结果为  $K=0.317, T=57, \tau=8$ ,可得系统传递函数:

$$G(s) = \frac{0.317}{57s+1} e^{-8s} \quad (2)$$

## 2 FGPC 控制算法设计

### 2.1 预测模型

温度控制系统采用 CARIMA 预测模型如下:

$$A(z^{-1})y(t)\Delta = B(z^{-1})u(t-1)\Delta + C(z^{-1})\xi(k) \quad (3)$$

引入 Diophantine 方程以避免预测  $k+i$  时刻输出时的逐项迭代计算,预测值计算公式为:

$$\tilde{y}(k+i|k) = G_i(z^{-1})\Delta u(k+i-1|k) + H_i(z^{-1})\Delta u(k) + F_i(z^{-1})y(k) \quad (4)$$

$$y(k+i|k) = \tilde{y}(k+i|k) + E_i(z^{-1})\xi(k+i) \quad (5)$$

采用递推法分别计算  $E_i(z^{-1}), F_i(z^{-1})$ , 递推公式为:

$$f_{i+1} = \tilde{A}f_i, f_i = \tilde{A}[1 \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (6)$$

$$E_{i+1}(z^{-1}) = E_i(z^{-1}) + f_{i,0}z^{-i}, \quad E_1 = 1 \quad (7)$$

### 2.2 滚动优化

在控制系统中引入柔化因子,建立参考轨迹使功率输出更有效地对设定值进行跟踪:

$$y_r(k) = \alpha y(k+i-1) + (1-\alpha)s \quad (8)$$

通过 Diophantine 方程,求解出  $k+i$  时刻的预测值:

$$\tilde{y}(k+N|k) = G_N(z^{-1})\Delta u(k+1|k) + F_N(z^{-1})y(k) \quad (9)$$

$$\tilde{y}(k|k) = G\Delta\tilde{u}(k|k) + F(z^{-1})y(k) + H(z^{-1})\Delta u(k) + \tilde{\varepsilon}(k) \quad (10)$$

最优控制量  $u(k)$  的计算公式为

$$u(k) = u(k-1) +$$

$$d^T [\dot{y}_r(k) - F(z^{-1})y(k) - H(z^{-1})\Delta u(k)] \quad (11)$$

### 2.3 反馈校正

在 FGPC 控制过程中,基于  $z$  模型不断对辨识得到的被控系统进行在线修正,进而修正控制过程。反馈校正中输出变化量  $\Delta y(k)$  的计算公式为

$$\Delta y(k) = \varphi(k)^T \theta + \xi(k) \quad (12)$$

GPC 过程指标函数的偏差项是加热器预测功率输出  $y(k+i)$  与轨迹函数  $y_r(k+i)$  之间的跟随程度,用加热器实际功率  $y(k)$  对  $y_r(k+i)$  的实时修正也就是在对功率的预测值  $y(k+i)$  的修正。因此,上文所提的参考轨迹也可以看作是反馈校正的一环。

### 2.4 模糊控制器

控制器将计算出的控制量转化成比例因子  $K_p, K_i, K_d$  实现过程控制,模糊控制器的模糊规则则作为控制系统自适应调节的理论依据,对  $K_p, K_i, K_d$  的模糊规则库进行整合,可得图3所示的三维关系曲面图。

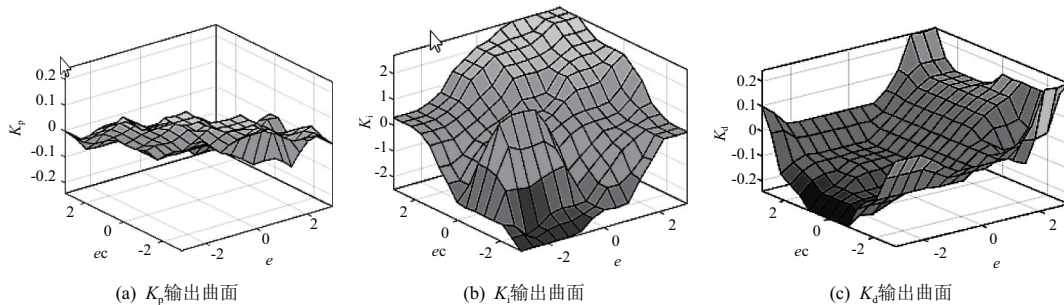


图3 输入-输出( $e, ec-K_p, K_i, K_d$ )三维关系曲面

### 3 加热系统温度控制仿真与实验

在阶跃输入信号下,选取参数为:控制时域 $N_a = 10$ ,预测时域 $N = 11$ ,柔化因子 $\alpha = 0.2$ ,开展设置值改变和输入值扰动仿真和实验。Matlab 仿真结果如图 4 所示。

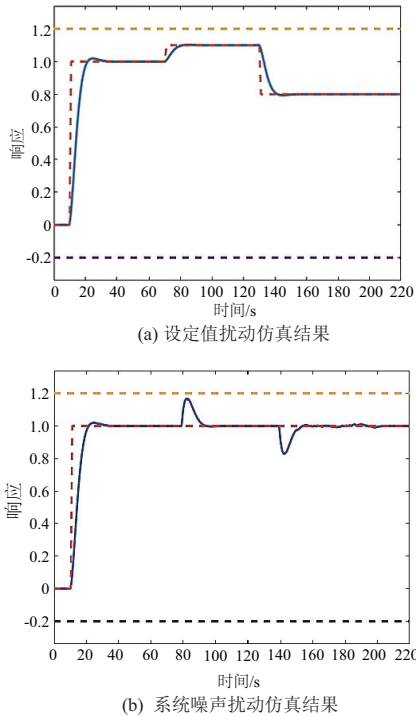


图 4 仿真及加热实验结果

加热系统加热初始段的响应在 40 s 左右达到稳定;在实验开始 70 s 后将设定值提高 20% 后测得: $t_s = 20$  s,  $M_p = 0.1\%$ ,  $e_{ss} = 0.01\%$ ;在 130 s 时设定值降至 80%,调整时间仍为 10 s 左右,超调量和稳态误差与正向扰动响应一致。从仿真结果可以看出,FGPC 算法可以从扰动中迅速恢复,对噪声有一定抑制的能力,可以减小加热过程中的温升时间、温度超调和最终的温度偏差。

加热实验包括温度设定值不变和设定值变更两种实验,其中设定值变更由 150 °C 变更为 180 °C。实验采用与仿真相同的控制参数,加热实验效果如图 5 所示。

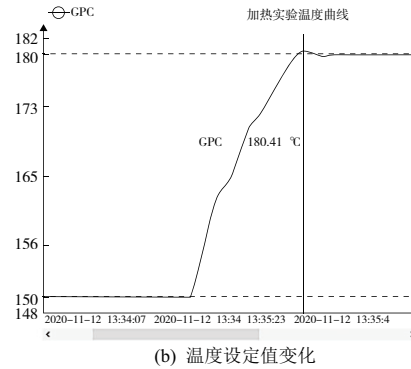
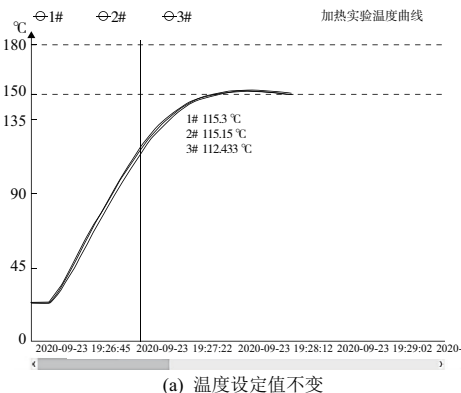


图 5 管道加热实验结果

FGPC 算法柔化因子与参考轨迹的引入一定程度上减少了系统的超调和稳态误差,也降低了保温时段的温度波动。最终该算法实现了 45.8 s 的调整时间、0.8% 的超调量以及 0.03% 的稳态误差,对加热过程可取得很好的控制效果。控制参数 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 最终分别稳定在 3.15、1.2 和 0.13。

### 4 结语

本文根据加热过程的历史数据辨识出加热器温控模型,并将所设计的模糊控制器和广义预测控制器应用于该模型,分别对管道加热过程进行了仿真和实验研究。结果表明:加热过程调整时间短,超调量及稳态误差低,对噪声及扰动具有较强的抑制与恢复能力,保温段温度稳定在系统设定值。该方法易于实现,可用于与输气管道类似的控制对象上。

#### 参考文献:

- [1] 沈正阳,潘丰. 晶体生长过程高精度温度控制系统设计[J]. 机械制造与自动化,2019,48(3):220-222,228.
- [2] 李强. 大滞后温度系统的控制方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [3] 蒋思瑛. 温度预测智能算法在工业控制中的设计与实现[D]. 北京:北京工业大学,2017.
- [4] 祝帆,李美求. 灰色模糊 PID 控制在感应加热管道中的应用[J]. 机电工程技术,2019,48(3):137-140.
- [5] KORKUT I, AC R A, BOY M. Application of regression and artificial neural network analysis in modelling of tool - chip interface temperature in machining [J]. Expert Systems With Applications,2011,38(9):11651-11656.
- [6] CHRISTIAN R A, PATEL D A. Potential of k-means clustering-based fuzzy logic for prediction of temperature in ambient atmosphere[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015,40(1):227-234.
- [7] 王玉中. 工业过程的预测控制与模糊 PID 控制的研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2017.
- [8] 张春,鲁世红,李正芳,等. 整体自阻电加热渐进成形温度控制系统[J]. 锻压技术,2019,44(2):119-125.

收稿日期:2021-03-12