

基于串级模糊PID的药型成形工艺温度控制系统设计与仿真

张春元, 陈安民, 原梅妮, 康东轩

引用本文:

张春元, 陈安民, 原梅妮, 等. 基于串级模糊PID的药型成形工艺温度控制系统设计与仿真[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(8): 182-186.

您可能感兴趣的其他文章

1. 弹药运输车恒稳控制系统的设计

引用本文: 张小明, 王坤坤, 于纪言. 弹药运输车恒稳控制系统的设计[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(4): 15-19.

2. 稳压器压力控制系统灰色预测PID控制方法研究

引用本文: 聂希峰, 陆古兵, 宋辉. 稳压器压力控制系统灰色预测PID控制方法研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(5): 108-110,134.

3. 遥控武器站交流位置伺服系统控制及联合仿真

引用本文: 郭华新, 赫雷, 曹维清, 等. 遥控武器站交流位置伺服系统控制及联合仿真[J]. [兵器装备工程学报](#), 2016, 37(6): 10-15.

4. 基于CMAC-模糊PID模型的火箭炮调平控制系统仿真

引用本文: 邢立新, 沈中卿. 基于CMAC-模糊PID模型的火箭炮调平控制系统仿真[J]. [兵器装备工程学报](#), 2015, 36(8): 1-4.

5. 复杂地形单兵无人机精准投弹稳定控制研究

引用本文: 王胜男, 陈放. 复杂地形单兵无人机精准投弹稳定控制研究[J]. [兵器装备工程学报](#), 2020, 41(3): 25-30.

基于串级模糊 PID 的药型成形工艺 温度控制系统设计与仿真

张春元, 陈安民, 原梅妮, 康东轩

(中北大学 机电工程学院, 太原 030051)

摘要:针对传统的 PID 控制存在非线性、时滞性和大惯性的问题,提出了将传统 PID 控制器与控制模型相结合,在模糊自整定控制系统中串联一套即时的流量 PID 控制器。设计了一套基于 STM32F407 微控制器的智能的、有实时性的药型螺压挤出成型工艺温度控制系统,从温度和流量两方面实现温度调控,提高了系统的抗干扰能力,缩短了调温时间。利用 Matlab 对药型成型工艺温度控制系统的 PID 控制和串级模糊自整定 PID 控制进行仿真比较,证实串级模糊自整定 PID 控制器的调整精度、响应速度等各方面优于传统的 PID 控制器,具有广泛的应用前景。

关键词:药型;模糊 PID;温度控制;STM32;Matlab

本文引用格式:张春元,陈安民,原梅妮,等.基于串级模糊 PID 的药型成形工艺温度控制系统设计与仿真[J].兵器装备工程学报,2020,41(08):182-186.

Citation format:ZHANG Chunyuan, CHEN Anmin, YUAN Meini, et al. Design and Simulation of Temperature Control System for Propel-Lant Forming Process Based on Cascade Fuzzy PID[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020,41(08):182-186.

中图分类号:TJ-9

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2020)08-0182-05

Design and Simulation of Temperature Control System for Propel-Lant Forming Process Based on Cascade Fuzzy PID

ZHANG Chunyuan, CHEN Anmin, YUAN Meini, KANG Dongxuan

(College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at the problems of nonlinearity, time-delay and large inertia of traditional PID control, a traditional PID controller was combined with the control model to set up an instantaneous flow PID controller in the fuzzy self-tuning control system. An intelligent, real-time temperature control system for screw-type extrusion molding process based on STM32F407 microcontroller was designed. Temperature control was realized from both temperature and flow, which improves the anti-interference ability of the system and shortens the temperature adjustment time. We used Matlab to simulate the PID control of the temperature control system of the propellant molding process and the cascade fuzzy self-tuning PID control, and the adjustment precision of the cascade fuzzy self-tuning PID controller was confirmed. The response speed is better than the traditional PID controller, which has broad application prospects.

Key words: propellant; fuzzy PID; temperature control; STM32; Matlab

收稿日期:2019-07-11;修回日期:2019-08-13

基金项目:山西省自然科学基金项目(2012011019-1)

作者简介:张春元(1965—),男,硕士,副教授,主要从事航空宇航制造工艺与装备制造研究。

在目前的双基火药螺压挤出成型工艺过程中,通过对温度的测量后,分别对药型机体以及外部模具进行手动调温,以满足生产工艺要求。但实践证明,现行调温方法存在以下缺点:测量过程和调温操作随机性大;由于共用一个加热装置,且加热设备与生产现场有一定的距离,沿程散热较大,达不到及时调温。针对生产中存在的问题,本文设计的具有自适应性、在线测量的基于模糊自整定PID串级控制系统,将传统PID控制器与控制模型相结合,在模糊自整定控制系统中串联一套即时的流量PID控制器(加热器离生产设备较近),该系统以实际生产时实时温度与目标温度的差值为测量基准,解决了在线对温度的精准测量。在一定条件下,启用即时流量PID控制器,以达到实时调控温度为目的,解决了远程加热水迟滞性大,不能即时满足生产的问题。综上所述设计的是一套能解决温度控制过程中存在非线性、时滞性、时变性、大惯性等问题的较理想的温度控制系统。

1 基于模糊自整定PID的串级控制器设计

1.1 温度控制系统的改进方法

药型原材料双基火药属于易燃易爆品,在螺压挤出生产过程中有严格的防火防爆要求,保温水的加热系统与螺压挤出生产位置之间有一定距离,在设计时必须考虑保温水循环过程中水流量对保温效果的影响。

本设计对成型模具加热水箱温度、成型模具入口温度、机体加热水箱温度、机体入口温度、螺杆温度、机体温度、前锥体温度、后锥体温度、成型体温度共9个位置的温度进行测控。螺压挤出成型结构及温度传感器布置如图1所示。

药型螺压挤出成型温度控制过程存在非线性、时滞性、时变性、大惯性等问题,导致对药型生产工艺温度的调控达不到实时调控效果。本文针对螺压挤出成型温度控制系统,根据外界干扰因素的变化,相应的设计了一种基于模糊自整

定PID的串级控制器。控制方式改进思路如图2所示。

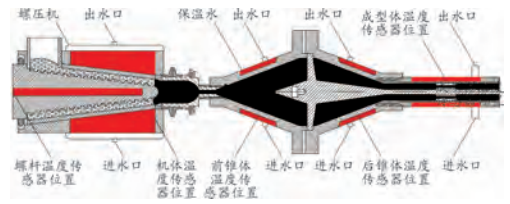


图1 螺压挤出成型结构及温度传感器布置示意图

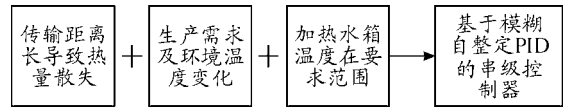


图2 控制方式改进思路框图

式(1)是药型温度控制系统数字PID的表达式:

$$u(k) = k_p(\text{error}(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k \text{error}(j) + \frac{T_D}{T} (\text{error}(k) - \text{error}(k-1))) = k_p \text{error}(k) + k_i \sum_{j=0}^k \text{error}(j) T + k_d \frac{\text{error}(k) - \text{error}(k-1)}{T} \quad (1)$$

式(1)中, $k_i = \frac{k_p}{T_i}$; $k_d = k_p T_D$; T 为温度控制系统采样周期; k 为采样序号, $k = 1, 2, \dots$; $\text{error}(k-1)$ 和 $\text{error}(k)$ 分别表示 $k-1$ 和 k 时刻温度控制系统的偏差值。

本文温度控制系统主要实现对螺压挤出成型工艺各个部位温度准确实时的控制,温度控制系统主要包括数据采集模块、人机交互模块、输出模块和控制对象4个部分。系统总体方案如图3所示。

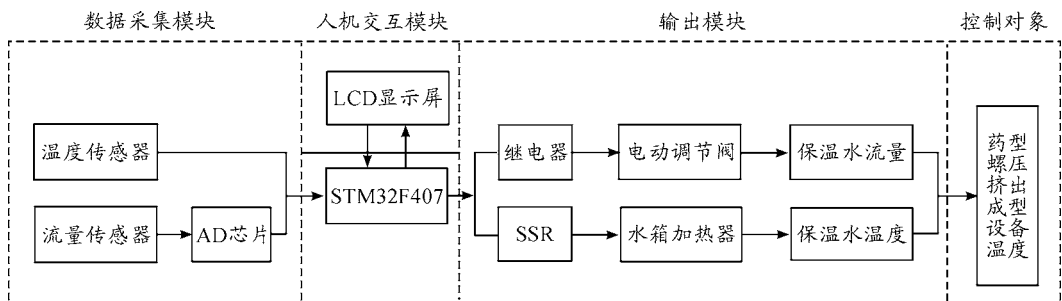


图3 温度控制系统总体方案框图

1.2 基于模糊自整定PID的串级控制器设计

在药型螺压挤出成型工艺中,在正常情况下,机体温度为 $60 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$,螺杆温度为 $65 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,前后锥体温度为 $65 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$,成型体 $65 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$ [8]。本文为满足以上工艺要求设计了两种循环水系统,一种是对前半部分的机体提供保温

水,以达到机体正常工作温度,一种是对后半部分的螺杆,前后锥体和成型体提供保温水,以满足成型过程中的温度要求。

在药型螺压挤出成型工艺的温度控制过程中,温度小范围的变化都会对药料的内部压力产生影响,进而对生产效率

以及生产安全产生影响,因此能否快速的达到目标温度 y_d , 这对螺压挤出成型工艺非常重要。传统的 PID 控制存在大惯性、大时滞的缺点,不能满足药型螺压挤出成型工艺控制要求,因此,选择采取模糊 PID 控制以满足生产需要。

当外界环境温度较低时,保温水在循环过程中损失的热量就大,所以在环境温度较低时必须考虑整个温度控制系统热能散失的问题。在温度 PID 控制的基础上串联流量 PID 控制环,增大流量来补偿保温水流动过程中散失的热能。通过温度 PID 控制与流量 PID 控制结合,能够提高系统响应速度和改善温度控制效果。

n 时刻串级模糊 PID 控制的输出为

$$f_k(n) \quad (k = 1, 2, 3)$$

$$f(n) = \begin{cases} f_1(n) & e > M \\ f_2(n) & |e| \leq M, T_1 > N \\ f_3(n) & |e| \leq M, T_1 \leq N \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f_k(n)$ 表示温度控制系统的输出; M 为目标温度阈值; N 表示温差; T_1 为保温水从加热水箱传导到目标设备的温度差值,温度传感器通过实时反馈保温水的温度值得到不同时刻误差 e 和误差变化率 ec 的值。

该系统具有如下功能和特点:

1) 当温度偏差 $e \geq M$ 时,系统可实现全功率供水功能,即加热器以全功率 p 进行粗调。可表示为

$$f_1(n) = \begin{cases} p & e > M \\ 0 & e < 0 \end{cases} \quad (3)$$

2) 当温度偏差 $e \leq M$ 时, $T_1 \leq N$ 表示当实际温度偏离目标温度,但在阈值范围内,环境温度稳定且加热水沿程损失较小,启用模糊 PID 控制器系统调节。系统可自适应调节加热水温,使系统实现稳定的、快速的响应,将生产中实际温度始终控制在工艺温度要求范围内。模糊自整定 PID 控制结构如图 4 所示。

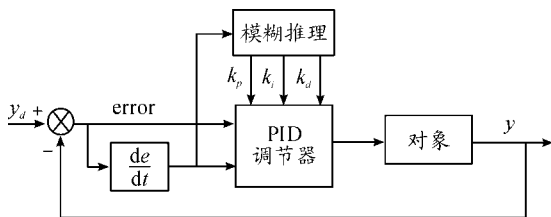


图4 模糊自整定PID控制结构框图

本设计根据工艺要求 $M = 12$ °C, 温度阈值 N 根据实际情况确定。设 $e, ec, \Delta k_p, \Delta k_i$ 和 Δk_d 均服从三角分布,隶属函数选择三角函数。温度传感器实时反馈保温水温度值得到不同时刻误差变化率 ec 和误差 e 的值,作为模糊控制器的输入变量。根据不同时刻 ec 和 e 的值来对PID的3个参数

k_p, k_i, k_d 进行自整定。整定系数如式(4)求得:

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_i = k_{i0} + \Delta k_i \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (4)$$

其中, k_{p0}, k_{i0}, k_{d0} 可根据工程整定法测得, $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 分别是 k_p, k_i, k_d 的修正值。

根据上述方法可得输出 $f_2(n)$:

$$f_2(n) = k_p e(k) + k_i T \sum_{j=0}^k e(j) + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (5)$$

$$e < |M| \quad T_1 < N$$

3) 当温度偏差 $e \leq M, T_1 > N$ 时,则表示环境温度极不稳定,环境温度的变化和药型螺压挤出成型温度控制系统保温水输送距离较远引起热量散失超阈值时,才启用基于模糊自整定PID的串级控制。即在模糊自整定PID控制系统中,串连一环保温水流量的PID控制,解决传送过程中热量散失而造成的系统响应速度变慢的问题。

流量控制离散型PID公式如下:

$$u_i(k) = k_{i_p} e(k) + k_{i_i} \sum_{j=0}^k e(j) T + k_{i_d} \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可得:

$$f_3(n) = k_p e(k) + k_p el(k) + T [k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_{i_i} \sum_{j=0}^k el(j)] + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} + k_{i_d} \frac{el(k) - el(k-1)}{T} \quad (7)$$

2 药型螺压挤出成型温度控制系统仿真

根据生产工艺要求,要实现目标温度值的波动范围较小,假设实际温度是 t_1 , 目标温度是 t_2 , 目标温度与实际温度的差值小于或者等于 12 时开始调用模糊PID控制器,所以仿真过程主要采集了 t_2 与 t_1 差值为 5 °C、8 °C、10 °C 的温度曲线图。保温水温度控制过程可以等效为一阶惯性环节加纯滞后^[3], 数学模型表达式为

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \exp - \tau s \quad (8)$$

式(8)中: K 是静态增益; T 是时间常数; τ 为纯滞后时间。温度控制系统的传递函数和流量控制系统的传递函数分别为

$$G_1(s) = \frac{1.2}{143s + 1} \exp - 90\tau$$

$$G_2(s) = \frac{1.2}{5s + 1} \quad (9)$$

本文选用 Simulink 来实现温度控制系统模型的搭建和仿真。图 5 是药型螺压挤出成型温度控制系统仿真框图。



图5 药型螺压挤出成型温度控制系统仿真框图

由式(7)可知本设计采用基于模糊自整定PID的串级控制有3种输出方式,第1种是在目标温度 t_2 与实际温度差 t_1 大于阈值 M 时,加热器以满功率输出,此过程的温度与时间呈现正比例关系。仿真主要是针对第2种输出方式模糊自整定PID控制环节和第3种基于模糊自整定PID的串级控制环节进行,对常规PID控制、模糊自整定PID控制模糊自整定PID的串级控制进行了比较。常规温度PID参数设置为 $k_p=15, k_i=0.2, k_d=0.12$,流量PID参数设置为 $k_{ip}=5, k_{ii}$ 为 $0.2, k_{id}$ 为 0 。模糊PID的参数则是在常规PID的基础上根据模糊控制规则对比例、积分和微分3个参数进行自整定,以改善控制效果。分别获取了与目标温差为 5°C 、 8°C 和 10°C 的仿真结果,如图6、图7和图8所示。

由图6和图7可以看出:基于模糊PID控制原理的温度控制系统具有响应速度更快、超调小、稳态误差小的优点,表明模糊PID控制在由外界干扰引起螺压挤出成型系统温度改变的情况下,能快速调节实际温度达到目标值。

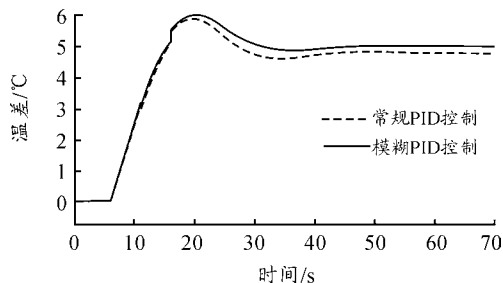
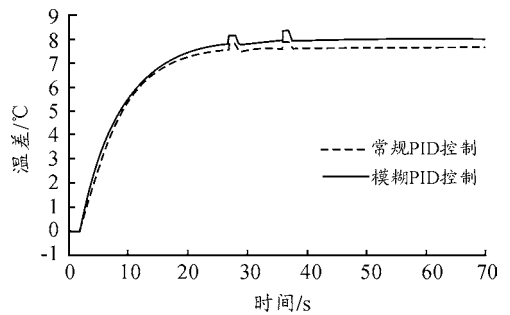
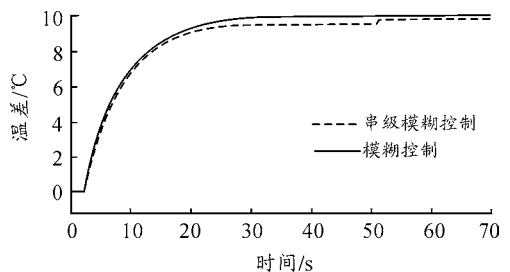
图6 药型螺压挤出成型温度控制系统
温差 5°C 的响应曲线图7 药型螺压挤出成型温度控制系统
温差 8°C 的响应曲线图8 药型螺压挤出成型温度控制系统
温差 10°C 的响应曲线

图8中用实线表示模糊控制,保温水在传递过程中温降阈值在允许范围内时,模糊PID控制可达温度控制要求。虚线表示模糊自整定的串级控制,温降阈值超出允许范围,模糊PID调控由于传输过程热能散失温度开始阶段达不到目标值,启用流量PID开始在约 50 s 时使调控值达到目标值。由图可知引入流量PID控制环节后,可达到理想控制效果。

3 结语

本设计根据药型螺压挤出成型工艺特点,在温度控制模糊自整定 PID 控制器的基础上串联了流量 PID 控制器,从温度和流量两方面实现温度调控,提高了系统的抗干扰能力,缩短调温时间。利用 Matlab 对温度控制系统的 PID 控制和模糊自整定 PID 控制进行仿真比较,证实模糊自整定 PID 控制器的调整精度,响应速度等各方面优于传统的 PID 控制器。本设计的温度控制系统保温水循环间接控制药型螺压挤出成型工艺药料温度,具有可移植性,可以广泛应用于其他温度控制系统,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 段江霞. 模糊 PID 控制在大惯量时滞温度控制系统中的应用研究[D]. 兰州:兰州大学,2013.
- [2] 刘曙光,俊民竺,志超. 模糊控制技术[M]. 北京:中国纺织出版社,2001.
- [3] 何荣誉. 基于模糊 PID 的电热炉温度智能控制系统[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [4] 李献,骆志伟,于晋臣. MATLAB/Simulink 系统仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2017.
- [5] 常旭涛. 药型端面包覆层自动修复生产线设计与分析

[D]. 太原:中北大学,2017.

- [6] 李志敏. 螺压过程物料温度和压力测试技术研究[D]. 太原:中北大学,2016.
- [7] 张续柱. 双基火药[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997:142-143.
- [8] 黄英,王永红. 传感器原理及应用[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2016.
- [9] 朱彩莲,熊丽萍. 电子线路板设计与制作[M]. 上海:上海交通大学出版社,2014.
- [10] 蔡慧玲. 基于模糊 PID 的电热炉温度智能控制系统[J]. 科技与企业,2016(10):243.
- [11] 刘晓春. 基于单片机、温度传感器的温度智能控制系统的设计[J]. 电子世界,2011(9):24-25.
- [12] 王芳. 利用单片机实现温度智能控制[J]. 黑龙江冶金,2008(4):46-47,55.
- [13] SHAN K, FAN C, WANG J Y. Model Predictive Control for Thermal Energy Storage Assisted Large Central Cooling Systems[J]. Energy,2019,179(11):479-485.
- [14] 张临松,王士军,陈伟,等. 塑料挤出机的多路温度控制系统设计[J]. 自动化与仪表,2018,33(11):29-32.

科学编辑 杨继森 博士(重庆理工大学教授)

责任编辑 唐定国