

# 基于模糊 PID 的 FDM 型 3D 打印机喷头温度控制系统

胡亚南<sup>1</sup>, 祁广利<sup>2</sup>, 霍蛟飞<sup>1</sup>, 王鹏文<sup>1</sup>

(1. 西京学院, 西安 710021; 2. 陕西科技大学, 西安 710021)

**摘要:** 目的 提高 FDM 型 3D 打印机打印产品的精度及表面质量。方法 针对 FDM 型 3D 打印机喷头温度控制具有的非线性特点, 利用模糊规则对 PID 增量参数实时在线校正, 设计基于模糊 PID 算法的喷头温度控制系统, 并将其与传统 PID 控制器仿真对比。结果 模糊 PID 控制器较传统 PID 控制器超调量小、达到稳定时间短、鲁棒性强, 能够有效地提高温度控制系统的稳定性和控制精度。结论 模糊 PID 控制能够提高 FDM 型 3D 打印机喷头温度控制精度, 从而提高了打印产品的精度和表面质量。

**关键词:** FDM; 3D 打印机; 喷头; 温度控制; 模糊控制; PID

中图分类号: TS736+.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2017)19-0173-06

## Temperature Control System of FDM Type 3D Printer Nozzle Based on Fuzzy PID

HU Ya-nan<sup>1</sup>, QI Guang-li<sup>2</sup>, HUO Jiao-fei<sup>1</sup>, WANG Peng-wen<sup>1</sup>

(1. Xijing University, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the precision and surface quality of FDM type 3D printer's printing products. For the temperature control of FDM type 3D printer nozzle featured by the nonlinearity, the PID increment parameter was corrected online for real time with the fuzzy rules. The nozzle temperature control system based on the fuzzy PID algorithm was designed and compared with the simulation of traditional PID controller. Compared with the traditional PID controller, the fuzzy PID controller characterized by small overshoot, short settling time and strong robustness could effectively improve the stability and control precision of temperature control system. The fuzzy PID control can improve the temperature control precision of the FDM type 3D printer nozzle, so as to improve the precision and surface quality of the printing products.

**KEY WORDS:** FDM; 3D printer; nozzle; temperature control; fuzzy control; PID

在包装产品竞争日益激烈的情况下, 具有创造力、新颖且设计周期短的包装产品才能脱颖而出, 但此类产品常因加工困难而停留在概念阶段<sup>[1-2]</sup>。熔融沉积制造(FDM)简称熔融挤出成型, 是采用热熔喷嘴将半流动的热熔材料按三维切片截面轮廓路径挤压喷涂在工作台上凝固成型, 逐层沉积、凝固后形成整个物理模型, 其具有适应复杂模型、生产周期短、产品多样化而不增加成本的优点, 被广泛应用于新产品开发<sup>[3]</sup>。

FDM 打印机除传动结构上的精度误差外, 喷头温度是影响产品精度的主要因素。喷头温度过高会增加喷嘴内耗材的流通性, 使熔化的耗材在重力的作用

下产生漏液而增加模型表面的毛刺和褶皱数量, 甚至造成耗材碳化后堵塞 FDM 打印机喷嘴; 喷头温度过低会减少喷嘴内耗材的流通性, 造成喷嘴吐丝断续和模型 z 轴方向隔层结合度不紧密。打印机加热系统温度速率变化快且热传递本身具有滞后性, 运用传统 PID 控制容易出现超调和震荡环节。模糊控制是基于规则的控制算法, 具有不依赖于被控对象的精确数学模型即可适用于滞后、时变、非线性控制系统的优点<sup>[4]</sup>。文中对 FDM 打印机实际运行测试和观察, 然后整合、精简专家知识和操作经验, 建立 PID 参数规则库, 利用模糊控制对传统 PID 控制器的 3 个参数进行整定, 结合 PID 控制和模糊控制的优点,

收稿日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(41171275); 西京学院科研基金(XJ160231)

作者简介: 胡亚南(1986—), 男, 硕士, 西京学院助教, 主要研究方向为智能控制技术、3D 打印技术。

提高FDM打印机的喷头温度控制精度。通过Matlab仿真表明,模糊PID较传统PID控制具有较好的动态响应能力和鲁棒性,将喷头内温度控制在最佳成型温度附近,提升打印精度和打印效率。

## 1 FDM打印机加热系统

以西安华予科技有限公司生产的H-riorH型FDM桌面级打印机温度控制系统为研究对象,其主要部件包含60W单端加热丝、E3D散热器、铝制导热体(20 mm×20 mm×10 mm)、NTC热电阻温度传感器。FDM打印机喷头温度设定依据耗材类型进行设定,PLA和ABS的喷头温度分别设定为190 °C和210 °C。FDM温度控制示意见图1,依据耗材类型设定喷头温度,控制器发出加热指令到驱动器使加热器进行加热工作,喷头加热腔温度逐渐升高,NTC热电阻温度传感器检测加热腔温度,获得热敏电阻两端电势差信号,然后经过滤波和放大环节后传输给控制器,形成闭环控制方式<sup>[5-6]</sup>。

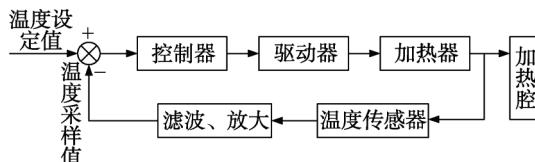


图1 FDM温度控制  
Fig.1 FDM temperature control

## 2 FDM打印机温度控制数学模型建立

FDM打印机温度控制精度关系着物理模型的加工质量和加工精度。由于电加热装置可用一阶惯性滞后环节近似描述被控对象的数学模型,所以文中的FDM打印机喷头的数学模型为:

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

式中:  $K$  为对象增益;  $T$  为时间常数;  $\tau$  为滞后时间。

为获取喷头数学模型参数,对FDM打印机进行小范围内升温实验,并采用科恩-库恩公式计算模型参数近似值。具体实验过程为:在喷头温度稳定在160 °C时,使喷头温度由160 °C升高到200 °C,温度升高了40 °C,按照每2 s记录喷头温度,最后依据所获得的实验数据拟合对象阶跃响应曲线,并求取对象模型参数值。依据升温实验数据,使用Matlab2013a进行升温实验数据拟合,绘制FDM温度阶跃响应曲线见图2。

由图2可知,FDM打印机喷头温度响应曲线可近似为S形,由Ziegler-Nichols反应曲线法验证了FDM打印机温度数学模型可近似描述为一阶惯性滞后环节,科恩-库恩公式为<sup>[7]</sup>:

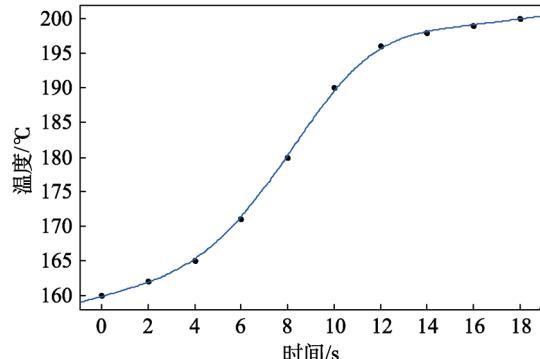


图2 FDM温度阶跃响应曲线  
Fig.2 FDM temperature step response curve

$$\begin{cases} K = \frac{\Delta C}{\Delta M} \\ T = 1.5(t_{0.632} - t_{0.28}) \\ \tau = 1.5\left(t_{0.28} - \frac{t_{0.632}}{3}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta C$  为系统输出响应;  $\Delta M$  为系统阶跃输入;  $t_{0.28}$  为升高温度达到0.28ΔC的时间;  $t_{0.632}$  为升高温度达到0.632ΔC的时间。把相关数值代入式(2)求解可得:  $K=0.232$ ,  $T=23.4$ ,  $\tau=10.6$ 。FDM打印机喷头温度的数学模型为:

$$G(s) = \frac{0.232}{23.4s + 1} e^{-10.6s} \quad (3)$$

## 3 模糊PID控制算法

### 3.1 PID控制算法

PID控制器因结构简单、技术成熟而被广泛应用,其根据设定值 $S_p$ 和采样值 $P_v$ 的误差值 $e(t)$ 的比例、积分、微分运算的叠加,获得控制器的输出信号 $u(t)$ 。其数学表达式为:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

式中:  $K_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_D$  为微分时间常数。PID控制原理见图3。

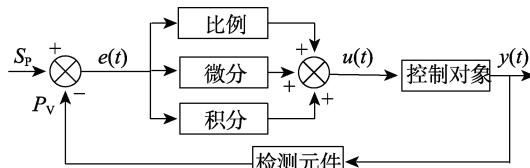


图3 PID控制原理  
Fig.3 Schematic diagram of PID control

比例系数的大小影响系统的响应速度和稳定性,比例系数较大时,系统具有较快的响应速度,同时也容易引起系统超调和震荡;积分增益的大小决定消除静态误差能力,积分增益较大时,消除系统静态误差能力强,同时容易引起积分饱和,所以PID控制器的性能优劣,关键在于PID参数的整定。

### 3.2 模糊控制算法

模糊控制因其不依赖于精确数学模型, 具有较强的鲁棒性而被广泛运用, 能够高效地处理测量不精确和系统的不确定性, 对于复杂的控制系统具有较好的适应性能<sup>[8-9]</sup>。模糊控制系统主要由模糊化、模糊推理、知识库、精确化、执行器、被控对象、检测元件几部分构成闭环控制系统, 见图 4。图 4 中  $r$  为系统输入量,  $e$  为系统误差变量,  $e_c$  为误差变化率,  $y$  为系统输出量,  $E$  为误差模糊变量,  $E_C$  为误差变化率模糊变量,  $U$  为控制输出模糊变量。



图 4 模糊控制系统  
Fig.4 Fuzzy control system

### 3.3 模糊 PID 控制算法

FDM 打印机喷头温度受到环境温度、喷头移动速度、喷头结构、单位时间内熔化耗材量及耗材种类等多种因素综合影响, 另外热量传递本身具有滞后性, 因此温度控制系统具有非线性和滞后性, 所以运用传统的、采用固定参数值的 PID 控制器很难实现对 FDM 打印机喷头温度的精确控制。文中结合 PID 算法和模糊控制算法的优点, 利用模糊控制对 PID 的 3 个参数进行实时增量调节, 构建模糊 PID 算法, 提高温度控制的精度<sup>[10-11]</sup>。模糊 PID 控制原理见图 5。为提高模糊 PID 控制系统的稳定性和动静态能力, 文中设计 PID 参数输入公式为:

$$\begin{cases} K_p = K_{pI} + \Delta K_p \\ K_I = K_{II} + \Delta K_I \\ K_D = K_{DI} + \Delta K_D \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  分别为输入 PID 控制器的实时参数;  $K_{pI}$ ,  $K_{II}$ ,  $K_{DI}$  分别为 PID 控制器初始参数;  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_D$  分别为模糊控制输出的参数调整增量。图 5 中  $S_p$  为 3D 打印机温度设定值,  $P_v$  为 3D 打印机温度采样值。

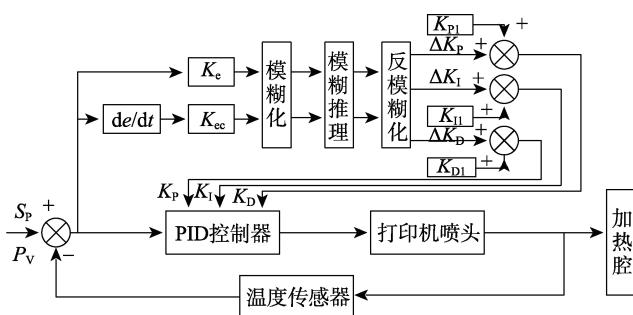


图 5 模糊 PID 控制系统  
Fig.5 Fuzzy PID control system

## 4 模糊 PID 温度控制系统设计及仿真

### 4.1 模糊控制器的设计

结合模糊控制鲁棒性强和 PID 动态控制效果好的优点, 利用模糊规则对 PID 参数进行实时在线增量调节, 可以很好地解决 FDM 打印机喷头温度控制过程的不足。使用 Matlab2013a 中 FIS Editor 对 FDM 打印机喷头温度控制系统的模糊控制设计如下所述。

1) 确定温度控制系统输入输出语言变量。文中采用二输入三输出的二维模糊控制器, 即温度设定值和采样值的误差  $e$  和误差变化率  $e_c$  为输入信号,  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_D$  为输出信号<sup>[12-13]</sup>。设定输入变量  $e(e_c)$  的模糊论域  $E(E_C)=\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$ , 选取 7 个模糊子集: NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、ZO(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大), 其量化因子  $K_e=0.02$ ,  $K_{ec}=0.5$ ; 输出变量  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_D$  的模糊论域分别为:  $\Delta K_p \in [-0.5, 0.5]$ ,  $\Delta K_I \in [-0.5, 0.5]$ ,  $\Delta K_D \in [-0.3, 0.3]$ , 并选取与输入变量相同的模糊子集。

2) 确定隶属度函数。常用的隶属度函数有三角形、正态分布形、高斯形等, 其曲线形状特征决定控制特性。为使 FDM 打印机喷头温度控制系统达到控制精度高和稳定性好的效果, 在  $E(E_C)$  值较大区域选择曲线平缓(控制稳定性好)的高斯形隶属函数, 在  $E(E_C)$  值较小区域选择曲线尖锐(控制灵敏度高)的三角形隶属度函数。另外, 文中系统输出变量  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_D$  选用与输入变量相同的隶属度函数。

3) 建立模糊控制规则。模糊 PID 控制器的核心环节是利用模糊规则实时在线推理 PID 增量参数, 依据专家知识和操作经验, 分析总结不同时刻喷头温度偏差值和偏差变化率对输出参数的影响, 得到模糊控制规则表, 见表 1。

在 Rule Editor(模糊规则编辑器)中, 依据  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_D$  的 49 条控制规则, 编辑模糊控制规则。在模糊规则观测器中, 可以清晰的查看各模糊变量隶属度函数对系统输出结果的影响, 同时可以计算出  $E$  和  $E_C$  输入组合的 PID 参数增量参数<sup>[14]</sup>。例如, 当  $E=-1$ ,  $E_C=-3$  时,  $\Delta K_p=-0.145$ ,  $\Delta K_I=0.152$ ,  $\Delta K_D=-0.084$ 。利用此方法, 针对不同  $E$  和  $E_C$  输入组合, 分别计算出模糊输出变量值, 可获得模糊控制查询表, 见表 2。

在 FIS Editor 工具箱下, 可以通过输出量 Surface Viewer(曲面观测窗)查看已经建立的温度模糊控制输出曲面<sup>[15]</sup>。由输出曲面特征可得, 误差  $E$  为正大且误差变化率  $E_C$  也为正大, 则误差由增大的趋势, 控制输出量  $\Delta K_p$  取负大, 表明控制器具有缩小误差的能力。

### 4.2 模糊 PID 控制器的仿真

为验证文中设计的基于模糊 PID 的 FDM 打印机喷头温度控制系统的控制效果, 利用 Simulink 工具箱

对模糊 PID 控制器和传统 PID 控制器进行仿真分析。首先,运用临界比例法确定传统 PID 的 3 个控制参数,并同时设定为模糊 PID 初始参数值,模糊 PID 和 PID 仿真比较模型见图 6<sup>[16—17]</sup>。

表 1 模糊控制规则  
Tab.1 Fuzzy control rule

e	$e_c$						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NB/NS	PM/NM/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/NS
NM	PB/NM/PS	PB/NM/NS	PM/NM/NS	PS/NM/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NM/PS	PM/NM/NS	PS/NM/NS	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
Z0	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NM/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/ZO	NMPM/PS
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	NM/PM/PS	NM/PM/PM
PM	PS/NS/PM	ZO/ZO/PM	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/PB	NS/PS/PM	NS/PM/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PM	NB/PB/PB

表 2 模糊控制查询  
Tab.2 Fuzzy control query

E	U	$E_C$								
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
	$\Delta K_P$	0.457	0.451	0.345	0.303	0.301	0.152	0.143	0.018	-0.006
-4	$\Delta K_I$	-0.481	-0.446	-0.349	-0.305	-0.306	-0.145	-0.082	-0.054	-0.001
	$\Delta K_D$	0.096	-0.084	-0.141	-0.178	-0.178	-0.178	-0.165	-0.182	-0.184
	$\Delta K_P$	0.448	0.443	0.320	0.235	0.234	0.139	0.137	0.009	-0.108
-3	$\Delta K_I$	-0.498	-0.441	-0.318	-0.206	-0.189	-0.127	-0.078	-0.018	0.045
	$\Delta K_D$	0.091	-0.076	-0.112	-0.107	-0.105	-0.098	-0.025	-0.006	-0.098
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	$\Delta K_P$	0.186	0.105	-0.094	-0.201	-0.208	-0.285	-0.301	-0.432	-0.446
3	$\Delta K_I$	0.127	-0.067	-0.216	-0.278	-0.324	-0.338	-0.298	-0.398	-0.487
	$\Delta K_D$	-0.289	-0.278	-0.236	-0.199	-0.189	-0.178	-0.130	-0.084	0.095
	$\Delta K_P$	0.198	0.167	0.078	-0.169	-0.298	-0.374	-0.402	-0.487	-0.498
4	$\Delta K_I$	0.189	0.074	0.067	-0.067	-0.178	-0.285	-0.325	-0.458	-0.476
	$\Delta K_D$	-0.297	-0.280	-0.254	-0.208	-0.167	-0.104	-0.058	0.008	0.097

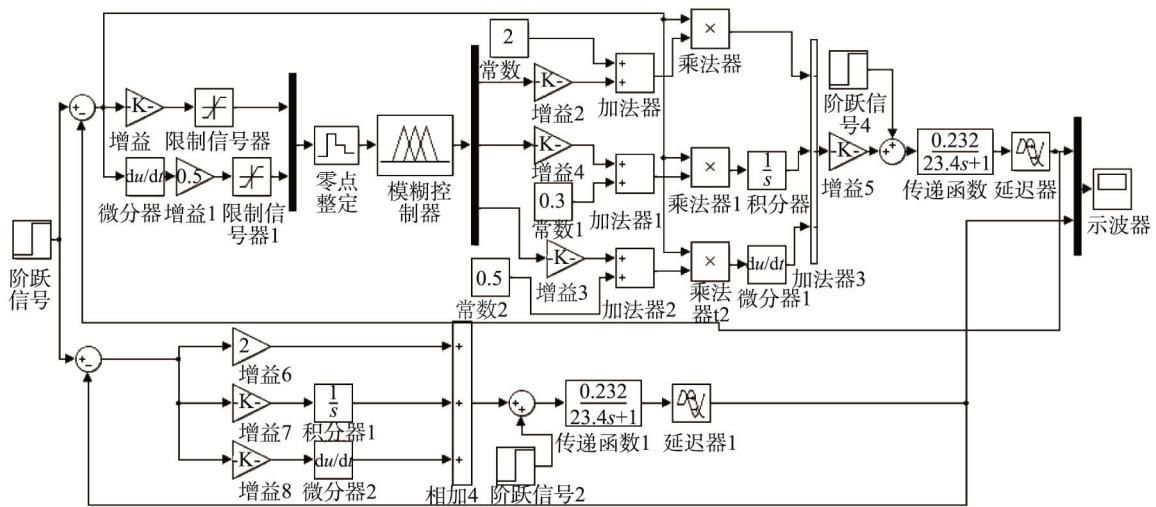


图 6 模糊 PID 和 PID 仿真比较模型  
Fig. 6 Simulation comparison model of fuzzy PID and PID

#### 4.2.1 模糊 PID 和传统 PID 抗干扰性能力比较

模糊 PID 和传统 PID 的抗干扰能力对响应曲线见图 7, 系统在单位阶跃响应曲线作用下, 模糊 PID 和传统 PID 的超调量为 5%, 23%, 稳定时间为 60, 70 s, 响应速度为 30, 20 s。对比分析可得: 虽然模糊 PID 响应速度稍慢与传统 PID, 但其具有达到稳定时间短, 超调量小的优势。在运行 100 s 时给系统增加 20% 的阶跃扰动信号, 由图 7 中可以看到, 稳定状态的响应曲线在 110.6 s 处出现扰动。模糊 PID 和传统 PID 的达到稳定时间为 23, 15 s, 超调量为 4%, 1%。对比分析可得, 在受到扰动情况下, 模糊 PID 的系统响应曲线到达稳定时间短, 超调量小, 体现了较好的稳定性和抗干扰性。

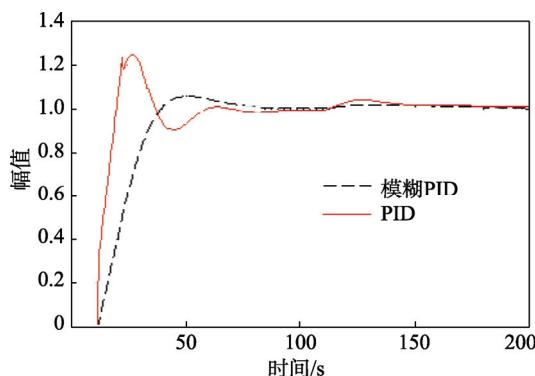


图 7 模糊 PID 和 PID 抗干扰对响应曲线

Fig.7 Fuzzy PID and PID anti-interference contrast response curve

#### 4.2.2 模型失配的鲁棒性比较

为验证模糊 PID 喷头温度控制系统应对模型失配状况的能力, 使系统模型时间常数增加 50% 进行仿真实验, 见图 8。

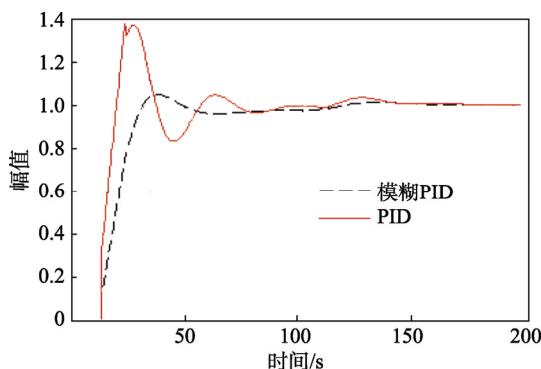


图 8 系统模型时间常数增加 30% 后对比仿真

Fig.8 Contrast simulation with the system model time constant increased by 30%

观察系统模型时间常数增加 30% 的单位阶跃响应曲线, 模糊 PID 和传统 PID 的达到稳定时间为 65, 135 s, 超调量为 40%, 7%。由响应曲线形状可看出传统 PID 超调较大、系统出现震荡、达到稳定状态时间较长; 模糊 PID 响应曲线没有震荡, 且较短时间内到

达稳定状态。由此可得模糊 PID 较传统 PID 鲁棒性更强, 从而证明利用模糊规则在线实时校正 PID 参数用于复杂温度控制系统具有较强的适应性和有效性。

## 5 结语

针对 FDM 型 3D 打印机喷头温度控制具有非线性, 导致打印产品的精度差及表面粗糙的问题, 提出一种基于模糊 PID 的 3D 打印机喷头温度控制系统。文中对喷头温度系统进行研究, 利用模糊规则对 PID 增量参数  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ ,  $\Delta K_D$  实时在线调整, 优化 PID 控制参数, 并将其与传统 PID 控制进行抗干扰能力、模型失配鲁棒性进行仿真对比。实验结果表明, 模糊 PID 控制较传统 PID 控制超调量小、达到稳定时间短、鲁棒性强, 能够有效地提高温度控制系统稳定性和控制精度。将该系统应用于 FDM 型 3D 打印机喷头温度控制系统中, 能够改善打印产品精度和表面质量。

## 参考文献:

- [1] 唐通鸣, 张政, 钱素艳, 等. 基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J]. 化工新型材料, 2015, 43(6): 228—234.  
TANG Tong-ming, ZHANG Zheng, QIAN Su-yan, et al. Research Status and Trend of 3D Printing Technology Based on FDM[J]. New Chemical Materials, 2015, 43(6): 228—234.
- [2] 乔益民, 王家民. 3D 打印技术在包装容器成型中的应用[J]. 包装工程, 2012, 33(11): 68—72.  
QIAO Yi-min, WANG Jia-min. Application of 3D Printing Technology in Container Molding Design[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(11): 68—72.
- [3] 束晓永, 韩江, 丁芳婷. 三维熔融沉积成型原理与技术研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2016, 25(5): 71—72.  
SHU Xiao-yong, HAN Jiang, DING Fang-ting. Study on Principle and Technology of Three Dimensional Fused Deposition Modeling[J]. Journal of Hunan City University(Natural Science), 2016, 25(5): 71—72.
- [4] 魏代海, 邓开发, 吴承刚, 等. x-y 平面 3D 打印的交叉耦合矢量控制研究[J]. 包装工程, 2014, 35(11): 118—121.  
WEI Dai-hai, DENG Kai-fa, WU Cheng-gang, et al. Vector Control of Cross Coupling Based on 3D Printing x-y Plane[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(11): 118—121.
- [5] 林宇, 王剑彬, 李林升, 等. FDM 技术 3D 打印机打印头结构优化设计[J]. 机械工程师, 2017(2): 3—4.  
LIN Yu, WANG Jian-bin, LI Lin-sheng, et al. Structural Optimization Design of 3D Printer Head Based on FDM Technology[J]. Mechanical Engineer, 2017(2): 3—4.

- [6] CHANG C C. Rapid Prototyping Fabricated by UV Resin Spray Nozzles[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2004, 10(2): 136—145.
- [7] 张俊, 熊家慧, 郭爱云. 定量包装控制系统的设计与实现[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 134—139.  
ZHANG Jun, XIONG Jia-hui, GUO Ai-yun. Design and Implementation of Quantitative Packaging Control System[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(13): 134—139.
- [8] 温玉春, 刘旗君. 基于模糊 PID 的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 109—113.  
WEN Yu-chun, LIU Qi-jun. Temperature Control of Heat-sealing Cutter of Packaging Machines Based on Fuzzy PID[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(3): 109—113.
- [9] 苏绍兴, 黄金梭. 模糊 PID 控制在复合纸板分切机速度控制中的应用[J]. 包装工程, 2014, 35(9): 80—84.  
SU Shao-xing, HUANG Jin-suo. Application of Fuzzy-PID Control in Crosscut Feeding Speed Control of the Composite Paperboard[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(9): 80—84.
- [10] 薛雷, 孙以泽, 李培兴, 等. 基于模糊 PID 的裤袜包装机热封切刀温度控制的研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 16—20.  
XUE Lei, SUN Yi-ze, LI Pei-xing, et al. Research on Temperature Control of Heat-sealing Cutting Knife of Panty-hose Packaging Machine Based on Fuzzy -PID[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(3): 16—20.
- [11] 彭博, 钟飞. 基于模糊 PID 控制的粉末包装计量控制系统[J]. 包装工程, 2017, 38(5): 1—6.  
PENG Bo, ZHONG Fei. Powder Packaging Metering Control System Based on Fuzzy PID Control[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(5): 1—6.
- [12] 方英武, 王轶, 赵海燕. 基于粒子群优化的 PID 自适应温度控制算法[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(12): 203—212.  
FANG Ying-wu, WANG Yi, ZHAO Hai-yan. A Self-adaptive Method of PID Temperature Control Based on the Particle Swarm Optimization[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2015, 43(12): 203—212.
- [13] 王琦. 中高速卫生纸全集成自动化系统的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2015.  
WANG Qi. Research on Totally Integrated Automation System for Middle and High Speed Tissue Paper Machine[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2015.
- [14] PAMELA H. Osteoconduction and Osteoinduction on Low-temperature 3D Printed Bio Ceramic Implants[J]. *Biomaterials*, 2008, 29(7): 944—953.
- [15] 李道龙. 基于模糊 PID 的 3D 打印机精度控制的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.  
LI Dao-long. Research on Precisoin Control of 3D Printer Based on fuzzy PID[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [16] 孟凡兴, 李丽娟, 程国清. 热合装置 PLC 温度控制系统研究与开发[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 128—133.  
MENG Fan-xing, LI Li-juan, CHENG Guo-qing. Research and Development of PLC Temperature Control System of Heating-sealing Device[J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(13): 128—133.
- [17] 韩金龙, 李方舟. FDM 型三轴并联桌面 3D 打印机研究[J]. 机械工程师, 2016(5): 19—21.  
HAN Jin-long, LI Fang-zhou. A FDM Type Desktop 3D Printer Based on Delta Structure[J]. *Mechanical Engineer*, 2016(5): 19—21.