

# 西南大学人工智能学院

## 《自动控制原理》课程

考试科目： 自动控制原理

教师： 李天舒

学 年： 2022-2023

学 期： 1

年级专业： 2020 级智能科学与技术

学 号： 222020335220177

姓 名： 严中圣

成 绩：

评 语：

人工智能学院制

# 自动控制原理课程论文（或案例等）

## （共 1 题，共 100 分）

### 要求：

- 1、综合运用所学理论与本专业的相关知识；能密切联系实际，分析问题正确、全面、具有一定深度或有所创新。（占 20 分）
- 2、方案设计合理、分析透彻、数据可靠。（占 30 分）
- 3、设计方案的性能指标优于要求指标。（占 30 分）
- 4、论文结构严谨、层次分明、格式规范。（占 20 分）

### 格式要求：

字数不限，大标题采用黑体二号，段落小标题采用宋体三号，正文采用宋体小四号，单倍行距。

本页打印在封面背后，下一页正式开始论文，全篇采用 A4 纸双面打印，左侧装订。

# 基于 Fuzzy-PID 的 3D 打印机喷头温度自适应控制系统设计

严中圣

2022 年 12 月 26 日

## 摘要

近年来, 3D 打印技术因其能够制造具有复杂形状和结构的物体而获得了广泛的关注。然而, 3D 打印的关键挑战之一是保持喷嘴的稳定温度, 因为它直接影响到打印部件的质量和精度。在本文中, 我们设计了一个用于 3D 打印机喷嘴温度的 Fuzzy-PID 控制系统。该系统旨在根据与设定点的偏差自动调整温度, 使用模糊逻辑将误差和导数误差映射到控制信号。我们通过在 MATLAB 中的模拟, 也进一步验证了设计控制系统的性能。仿真结果表明, 与传统的 PID 控制相比, Fuzzy-PID 控制系统能够实现更好的温度跟踪和快速响应。

## Abstract

3D printing technology has gained widespread attention in recent years due to its ability to fabricate objects with complex shapes and structures. However, one of the key challenges in 3D printing is maintaining a stable temperature of the nozzle, as it directly affects the quality and accuracy of the printed parts. In this paper, we propose a fuzzy-PID control system for the 3D printer nozzle temperature. The system is designed to automatically adjust the temperature based on the deviation from the setpoint, using fuzzy logic to map the error and derivative error to the control signal. The performance of the proposed control system is verified through simulations in MATLAB. The simulation results show that the proposed control system is able to achieve good temperature tracking and fast response, compared to the traditional PID control.

## 1 引言

三维打印 (3D Printing), 又称为增材制造, 是通过建立材料层来制造物理物体的过程, 它具有制造出复杂形状和结构的物体的优势, 这些物体使用传统制造方法很难或不可能制造出来。三维打印的内容可以来源于三维模型或其他电子数据, 其打印出的三维物体可以拥有任何形状和几何特征。[6] 熔融沉积成型 (Fused deposition modeling, FDM), 是一种将各种热熔性的丝状材料 (蜡、ABS 和尼龙等) 加热熔化成型的方法, 是 3D 打印技术的一种。[3] 对于熔融沉积型 3D 打印机, 在打印控制过程中, 喷头温度和送丝结构是极其关键的过程控制参数, 如果喷嘴温度过高, 将会导致丝材发生碳化分解反应堵住喷头, 影响正常工作, 如果喷嘴温度过低, 将无法使丝材达到熔融的可流动状态, 进而无法从喷头流出, 且不适宜的温度工作都会导致翘曲、收缩或层粘性差等问题。故为了获得稳定的熔融状态和丝材挤出速度, 打印控制系统对喷头的温度控制要求极高。

为了更好地介绍我们的控制方案, 首先我们对整个喷头系统的工作过程及温度响应模型进行介绍。3D 打印机在打印时, 打开气压模块, 通过给材料室加压, 将预热好的生物材料终送进挤出头, 当遇到制冷的喷头后, 材料由液态转变为熔融态, 此时具有可塑性和粘性, 在气压模块不断的持续挤压下生物材料从喷头被源源不断地挤出, 根据规划好的路径落到冷凝台低温冷却后最终打印成型。温度控制过程中, 加热管对热床和喷头持续加热后使其温度上升, 其相对应的热敏电阻阻值发生变化, 端电压也发生改变。热敏电阻两端的电压经过分压电阻后, 由温度控制板采集端口读取热床和喷头的热敏电阻端电

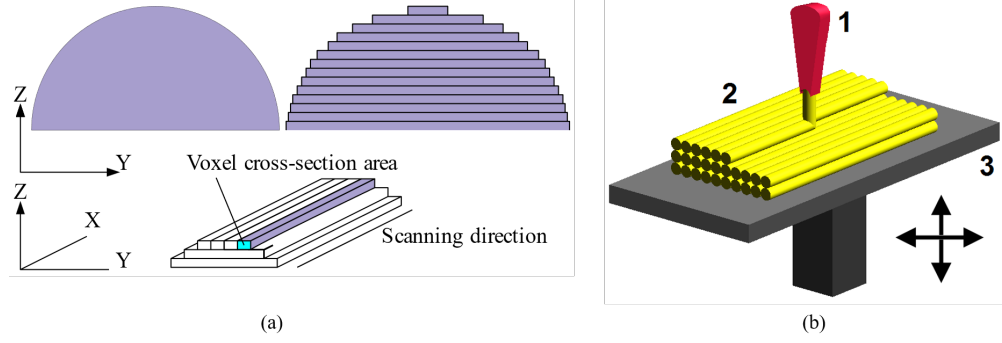


图 1: (a) 三维打印切片演示过程; (b) 熔融沉积成型: 1—注射熔体塑料喷嘴, 2—沉积材料 (模体), 3—可移动操控台

压, 并通过 A/D 转换获取实时电压值。当获取的电压值与设定数值相同时, 则喷头加热过程结束, 3D 打印机开始打印任务, 打印机的温度控制系统方框图如图2所示。

由方框图可知, 挤出式 3D 生物打印机打印过程中, 主要依赖喷头温度来控制生物材料在熔融状态, 模糊控制器输出控制量控制制冷片的动作, 进而对喷头加热或者制冷, 最终通过传感器系统反馈给控制器输入。整个温度控 3D 打印机挤出装置的温度变化与室内温度、保温结构质量、工作设备等密切相关。根据能量守恒定律, 装置储能的变化率等于进入的能量减去单位时间内的流出能量。温控盒利用硅胶管带走热量进行水循环制冷, 进入的能量包括来自制冷片工作的热量  $W_0$ , 来自挤出装置中的打印头温度和其他设备发出的热量  $W_1$  以及从外壳结构外部传递的热量  $W_2$ 。流出的能量是从硅胶管水循环带出的能量  $W_3$ 。

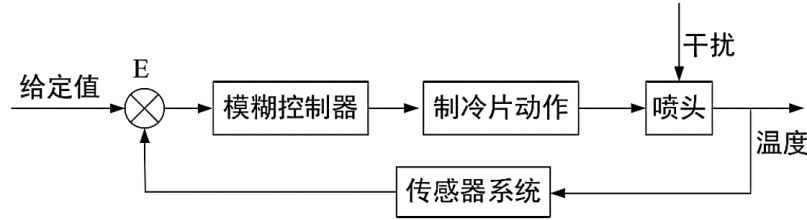


图 2: 3D 打印机温度控制系统方框图

假设整个挤出装置腔室的热容量为  $C$ , 实验部分的温度为  $t_T$ , 因此储能的变化率可表示如下:

$$\begin{aligned}
 C \frac{dt_T}{dt} &= W_0 + W_2 + W_3 - W_1 \\
 &= l\rho c t_0 - l\rho c t_T + W_2 + W_3 \\
 &= l\rho c (t_0 - t_T) + W_2 + \frac{1}{r} \lambda (t_z - t_T)
 \end{aligned} \tag{1}$$

其中,  $l$  表示供气量,  $\rho$  表示空气密度,  $c$  表示空气比热,  $t_0$  表示供气温度,  $r$  表示热阻从外部传递到喷头的热量,  $\lambda$  表示外壳结构的传热衰减系数,  $t_z$  表示环境温度。经计算:

$$\frac{C}{l\rho c + \frac{1}{r} \lambda} \frac{dt_T}{dt} + t_T = \frac{l\rho c}{l\rho c + \frac{1}{r} \lambda} t_0 + \frac{W_2 + \frac{1}{r} \lambda t_z}{l\rho c + \frac{1}{r} \lambda} \tag{2}$$

令:

$$T = \frac{C}{l\rho c + \frac{1}{r}\lambda}, K = \frac{l\rho c}{l\rho c + \frac{1}{r}\lambda} \quad (3)$$

$$t_f = t_{f1} + t_{f2} = \frac{W_2}{l\rho c} + \frac{1}{l\rho c} \cdot \frac{\lambda t_z}{r} \quad (4)$$

则式 (2) 可表示为:

$$T \frac{dt_T}{d\tau} + t_T = K(t_0 + t_f) \quad (5)$$

如果输入信号是时间的函数并且实验时的延迟时间是  $\tau_1$ , 则公式可以表示为

$$T \frac{dt_T(\tau)}{d\tau} + t_T(\tau) = K[t_0(\tau - \tau_1) + t_f(\tau - \tau_1)] \quad (6)$$

假设初始条件为零, 则进行拉普拉斯变换则得到系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{T_T(s)}{T_0(s) + T_f(s)} = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau_1 s} \quad (7)$$

由此可得, 整个 3D 打印机喷头系统温度响应模型是具有延迟分量的一阶惯性控制系统。在本次控制系统设计与分析中, 借用了西南大学工程技术学院的实验数据, 在 3D 打印工作过程处于稳定运行状态时, 向系统输入温度控制信号  $230^\circ\text{C}$ , 原始温度为  $185^\circ\text{C}$ , 以 10s 为一采样周期, 通过温度传感器对喷头温度数据进行采集, 根据实验获得结果作出阶跃响应曲线并利用 MATLAB 进行拟合。再通过齐格勒 - 尼科尔斯经验整定公式求解以上传递函数的比例系数  $K$ 、惯性常数  $T$ 、纯延迟时间常数  $\tau_1$ , 由科恩 - 库恩公式可得:

$$\begin{cases} k = \frac{\Delta C}{\Delta M} \\ T = 1.5(t_{0.632} - t_{0.28}) \\ \tau_1 = 1.5(t_{0.28} - t_{0.632}/3) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\Delta C$  为控制系统的输出响应;  $\Delta M$  为控制系统的阶跃输入;  $t_{0.632}$  为喷头温度升高到  $0.632\Delta C$  时所用时长;  $t_{0.28}$  为喷头温度升高到  $0.28\Delta C$  时所用时长。解得:  $k = 0.196, T = 24, \tau_1 = 20.7$ 。进而求得传递函数:

$$G(s) = \frac{0.196 \times e^{-20.7s}}{24s + 1} \quad (9)$$

针对 3D 打印机的喷头温度控制, PID (比例-积分-导数) 控制是一种广泛使用的控制方法, 因为它在许多应用中具有简单性和良好的性能。然而, 在应用于 3D 打印机喷嘴温度控制时, 传统的 PID 控制系统在温度调控过程往往会受到环境变化的影响, 从而导致控制精度下降; 此外, 由于比例项和积分项之间的相互作用, PID 控制器可能在温度响应中产生振荡或过冲。因此, 对于 3D 打印机喷头温度控制, 必须有一种具有自适应性的控制方法, 能够对环境变化做出及时的反应, 从而保证喷头温度控制的精确性和稳定性。

故为了克服 PID 控制器的局限性, 我们提出了一个用于 3D 打印机喷嘴温度自适应调节的模糊 PID (Fuzzy-PID) 控制系统。该系统由两部分组成: 一个模糊控制器和一个 PID 控制器。模糊控制器将测量温度和设定点之间的误差和导数误差作为输入, 并使用模糊逻辑将其映射到控制信号。然后, 模糊控制器的输出与 PID 控制器的输出相结合, 产生最终的控制信号, 该信号被发送到加热器以调整温度。本文首先介绍了 3D 打印机喷头的温度响应模型, 其次利用 MATLAB/Simulink 仿真软件, 在 3D 打印系统中引入 Fuzzy-PID 控制器实现对喷头温度响应模型的精确控制, 同时与传统 PID 控制器、模糊控制器等进行效果对比。通过分析得出 Fuzzy-PID 控制能力优于 PID 控制与普通模糊控制, 具有较强的可靠性。

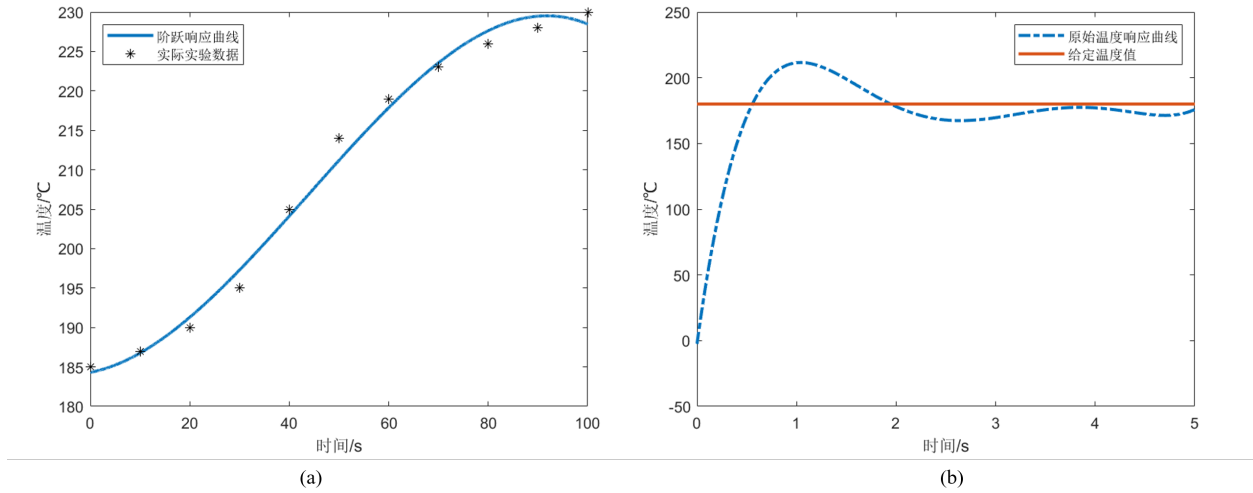


图 3: (a) 阶跃响应曲线; (b) 原始温度响应曲线

## 2 相关工作

### 2.1 PID 控制算法简介

PID 控制算法的发展可以追溯到 20 世纪 50 年代, 当时美国空军研究室的研究人员开发了一种新的控制算法, 称为“比例-积分-微分 (PID)”控制算法, 用于控制飞机的高度和航向。随后, PID 控制算法被广泛应用于各种工业控制系统中。PID 控制算法的发展后来受到了现代控制理论的推动, 现代控制理论提出了一系列新的控制算法, 使 PID 控制算法可以更加精确地控制系统, 使其与设定的目标值保持一致。此外, 现代控制理论也提出了一些新的控制算法, 使 PID 控制算法可以应用于更多的领域, 使其发挥更大的作用。

PID 控制器 (比例-积分-微分控制器), 由比例单元、积分单元和微分单元组成 [7]。可以透过调整这三个单元的增益  $K_p$ ,  $K_i$  和  $K_d$  来调定其特性。PID 控制器主要适用于基本上线性, 且动态特性不随时间变化的系统。PID 控制器是一个在工业控制应用中常见的反馈回路部件。这个控制器把收集到的数据和一个参考值进行比较, 然后把这个差别用于计算新的输入值, 这个新的输入值的目的是可以让系统的数据达到或者保持在参考值。PID 控制器可以根据历史数据和差别的出现率来调整输入值, 使系统更加准确而稳定。

PID 控制器的比例单元 (P)、积分单元 (I) 和微分单元 (D) 分别对应目前误差、过去累计误差及未来误差。若是不知道受控系统的特性, 一般认为 PID 控制器是最适用的控制器 [1]。借由调整 PID 控制器的三个参数, 可以调整控制系统, 设法满足设计需求。控制器的响应可以用控制器对误差的反应快慢、控制器过冲的程度及系统震荡的程度来表示。不过使用 PID 控制器不一定保证可达到系统的最佳控制, 也不保证系统稳定性。

有些应用只需要 PID 控制器的部分单元, 可以将不需要单元的参数设为零即可。因此 PID 控制器可以变成 PI 控制器、PD 控制器、P 控制器或 I 控制器。其中又以 PI 控制器比较常用, 因为 D 控制器对回授噪声十分敏感, 而若没有 I 控制器的话, 系统不会回到参考值, 会存在一个误差量。

PID 是以它的三种纠正算法而命名。受控变数是三种算法（比例、积分、微分）相加后的结果，即为其输出，其输入为误差值（设定值减去测量值后的结果）或是由误差值衍生的信号。若定义  $u(t)$  为控制输出，PID 算法可以用下式表示，系统的方框图如图4所示：

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (10)$$

其中  $K_p, K_i, K_d$  分别表示比例增益、积分增益、微分增益，均为调适参数； $e$  为误差，其值等于设定值 (SP) 与回授值 (PV) 的差； $t$  为目前时间， $\tau$  为积分变数，数值范围为  $0 \sim t$ 。

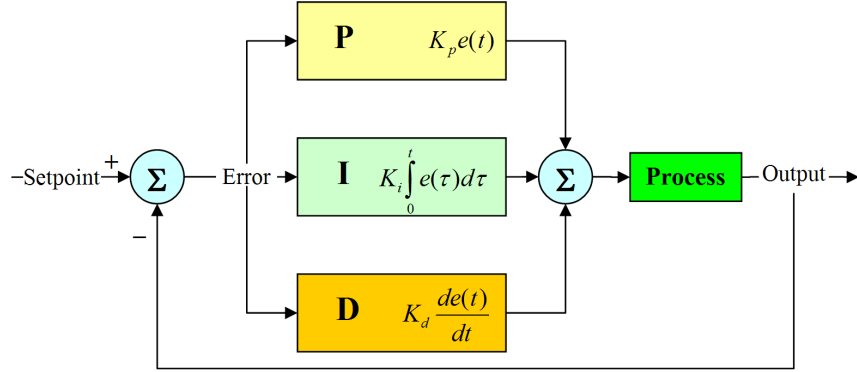


图 4: PID 控制器的方块图

PID 控制器的一般转移函数是：

$$H(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s + C} \quad (11)$$

其中  $C$  是一个取决于系统带宽的常数。

总的来说，PID 控制算法是一种经典的控制算法，它可以根据系统的反馈信息来调整系统的输出，从而达到控制系统的目标。PID 控制算法的发展受到计算机技术和现代控制理论的推动，它可以更加精确地控制系统，使其与设定的目标值保持一致，并且可以应用于更多的领域，使其发挥更大的作用。

## 2.2 模糊控制算法简介

1965 年美国加州大学 L.A.Zadeh 教授首次提出用“隶属函数”的概念来定量描述事物模糊性的模糊集合理论，从此奠定了模糊数学的基础。目前，许多学者提出模糊算法、模糊决策等概念，引入语言变量的表示方法，确定 IF-THEN 的模糊规则形式，推动了模糊控制基础理论的发展 [2]。

模糊控制 (fuzzy control) 理论通过数学中不确定关系来描述一些信息。一般而言，模糊控制是利用模糊逻辑或者模糊集合，借助于经典的控制理论，通过模拟专家解决问题方式作用于被控对象的控制方法。此理论一般以专家的经验为控制基础，可以根据自己以往工作经历处理再次遇到的问题。[4] 若把这些专家处理不同问题的经历通过一些语言总结起来，就构成了基本的模糊控制规则。最后将这部分规则数字化，可以变为模糊控制的算法，而形成模糊控制理论。模糊控制主要利用模糊语言，建立规则库描述系统的性能指标，优点在于它的强鲁棒性和抗干扰能力。



图5表示出了模糊控制的基本原理框图。模糊控制器的输入是经过 AD 转换的数字量，里面的数据操作和处理都是通过微机或者单片机来实现的，处理好信号以后再经过 D/A 变换通过执行机构从而加载到被控对象上，最后初始设定值进行对比，得出控制偏差  $e$ 。如公式12所示，偏差  $e$  作为控制器的输入信号，首先经过模糊量化处理得到她的模糊语言集合  $E$ ，通过计算机内集成的模糊控制规则通过模糊决策  $R$  得到模糊输出量  $U$ [5]。

$$U = E \cdot R \quad (12)$$

一般每个集合都有固定的数值，除了这些数以外其他数字都不属于这个集合。这也就是属于和不属于的 0-1 问题。但在实际复杂情况在，到底确定是 0 还是 1 无法准确给出结果。这些在经典数学理论中无法得出准备辨识，但是采用模糊理论分析就可以。

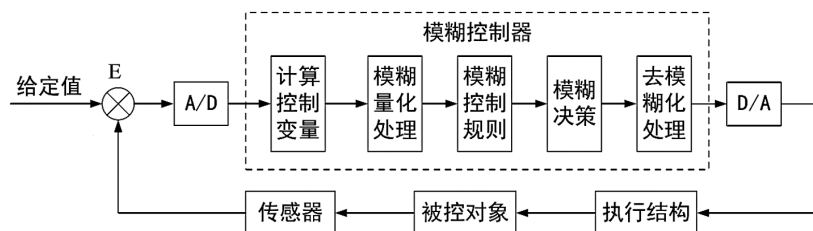


图 5: 模糊控制的基本原理框图

目前传统的 PID 控制算法在工业控制过程中得到了广泛应用，但是对某些复杂环境的控制效果的不理想暴露出了它的局限性。对此，研究学者尝试对这种算法进行优化改进，力求解决那些大滞后、时变、非线性之类的复杂系统。虽然模糊控制理论的诞生在解决这些问题上起到了一定程度的积极作用，但它的功能仍没有满足控制的高性能要求。于是在多方面考虑以后，科研人员将模糊控制与传统 PID 控制算法结合，充分发挥它们各处的优点，互补对方的缺点，组成了性能各方面都很不错的模糊 PID 控制算法。

模糊 PID 控制理论的主要核心是将基于模糊控制理论与经典的 PID 控制理论相结合，通过 PID 三个参数整定来构成一个完整的模糊 PID 控制器。控制器可以将外部检测机构通过 AD 转换来的数据进行模糊化，并且与控制器中的规则库和数据库进行对比，然后经过去模糊化操作，经过 D/A 转换接入到输出端接口。模糊 PD 控制方法作为一种先进的控制理论，能够进一步完善 PID 控制性能，虽然会存在一定的稳态误差，但具有鲁棒性强、稳定速度快、适应性强的特性，具有很高的工程应用价值，在多个应用背景下均有不俗表现。

## 2.3 3D 打印机喷头控制研究进展

近年来，越来越多的学者和研究者开始关注 3D 打印机喷头温度控制问题，并针对其中存在的问题提出了一系列有效的解决方案。其中研究者 Li. 等提出了一种基于粒子群优化算法的控制系统 [10]。该系统采用粒子群优化算法，以最小化均方误差来调节 PID 参数，从而达到良好的控制效果。Li. 等利用模型预测控制的方法 [9]，具体是指根据 3D 打印机喷头温度的物理模型，利用系统的状态变量和输入变量，建立模型，预测系统的未来输出，并对未来输出进行控制，以达到控制目标的方法。该方法优点是控制精度高，缺点是模型的建立需要大量的数据，耗时较长。Zhang. 等利用神经网络模型 [8]，根据系统的输入和输出，建立神经网络模型，以达到控制目标的方法。优点是模型建立简单，缺点是模型的



训练需要大量的数据，控制精度不高。本文基于传统 PID 控制，并引入了模糊控制的算法，从而提高了控制精度与响应速度，实现了对喷头温度响应模型的精确控制。

### 3 Fuzzy-PID 控制系统设计及仿真验证

为了克服 PID 控制器的局限性，我们提出了一个用于 3D 打印机喷嘴温度的模糊 PID 控制系统。该系统由两部分组成：一个模糊控制器和一个 PID 控制器。模糊控制器将测量温度和设定点之间的误差和导数误差作为输入，并使用模糊逻辑将其映射到控制信号。然后，模糊控制器的输出与 PID 控制器的输出相结合，产生最终的控制信号，该信号被发送到加热器以调整温度。

具体而言，即在 3D 打印机喷头温度控制过程中，通过温度传感器检测各个时刻的喷头温度值，同时与设定温度值进行对比，计算出此时温度偏差值，通过时间积分获得偏差变化率，在模糊控制器中输入温度偏差值与偏差变化率，通过模糊控制规则判断输出 PID 控制器参数值，实现对 3D 打印机喷头温度的实时控制。在 MATLAB/Simulink 仿真环境中使用 Fuzzy 工具箱设计模糊控制器，选用 Mamdani 型模糊控制器二维控制结构，即输入信号为实际采样值与设定值的偏差量  $e$  和偏差变化率  $e_c$ ，输出信号为模糊控制器计算得到 PID 参数修正值  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$ ，在 PID 控制器中输入信号参数修正值，从而实现 Fuzzy-PID 控制，Fuzzy-PID 控制器原理图如图6所示

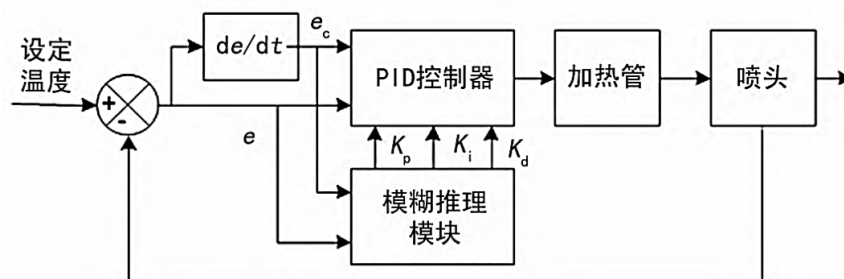


图 6: Fuzzy-PID 控制器的原理图

在模糊处理过程中，模糊控制规则是该过程中的关键部分，输入量与输出量的模糊子集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，根据喷头温度控制要求，参数  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  在不同  $e$  和  $e_c$  下自动整定时需符合以下调整规则：

- 误差如何变化，均应取较大的  $k_p$  和较小的  $k_d$ ，此外为防止系统响应超调量过大，还需削弱积分作用，即  $k_i$  取较小值。
- 设定较小数值，同时为了提高响应速度， $k_i$  和  $k_d$  取中等值，此时系统响应取决于  $k_d$  的取值。
- 当误差  $e$  取较小值时，为维持系统的稳定性， $k_p$  和  $k_i$  应取较大值，此外为防止系统在目标值周围发生连续波动，增强系统抵抗外界干扰能力，当  $e_c$  较小时， $k_d$  应取较大值；当  $e_c$  较大时， $k_d$  应取较小值。

根据以上控制规律进行控制规则归纳，得对应的输出信号  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  的模糊规则分别为下表所列。在 Matlab 模糊逻辑工具箱中，按表7所示在模糊规则编辑界面中设置控制规则，在 Matlab/Simulink 中选用模糊推理系统编辑器和隶属函数编辑器，根据控制规则设定输入量  $e$  和  $e_c$  的论域为-3, -2, -1, 0, 1, 2,

$k_p$	$e_c$							
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	
$e$	PB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	PM	NB	NM	NM	NM	PS	ZO	PS
	PS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	NS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	NB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

$k_i$	$e_c$							
	PB	P	PS	ZO	NS	NM	NB	
$e$	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
	PM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
	PS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NM
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	NS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
	NM	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
	NB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

$k_d$	$e_c$							
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	
$e$	PB	PB	PS	PS	PM	PM	PM	PB
	PM	PB	PS	PS	PS	PS	ZO	PB
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NS	NS	NM	NM	NS
	NM	ZO	NS	NM	NM	NB	NS	PS
	NB	ZO	NM	NB	NB	NB	NS	PS

图 7: 输出信号的模糊规则控制表

3，设定输出量  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  的论域为 0, 0. 5, 1, 1. 5, 2, 2. 5, 3，按照三角均匀分布型隶属度函数对输入数据进行模糊化处理，模糊控制器选用二维 Mamdani 控制器，模糊控制决策使用 Max - Min，选用重心法解模糊，设定完成后的界面如图8所示。在 3D 打印系统中，规定喷头起始温度为 0℃，目标

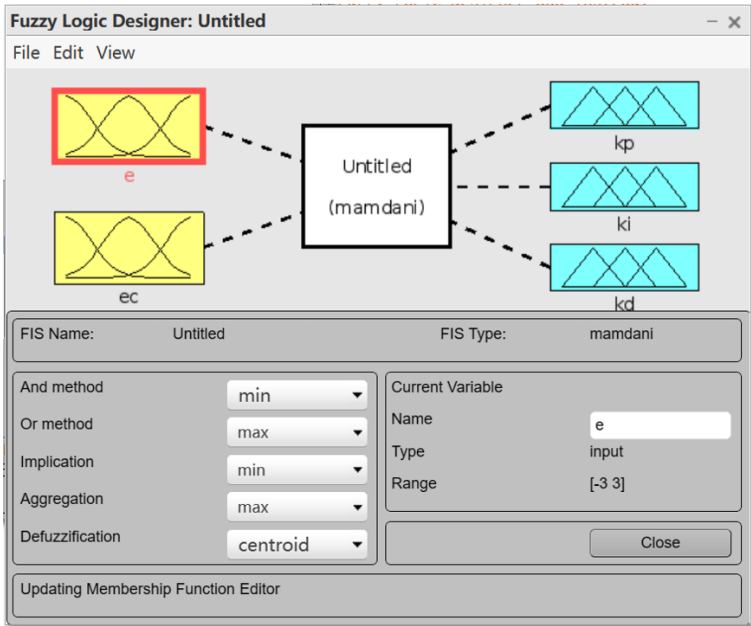


图 8: 模糊推理系统设置

温度为 180℃，量化因子  $e$  为 0. 4， $e_c$  取 0. 6，比例因子  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  均取 1，根据控制规则，整定 PID 控制中  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  的数值。如图9所示为控制仿真图。仿真结果响应曲线如图10所示。

此外为了更清晰地比较出 Fuzzy-PID 控制的控制能力，将 Fuzzy - PID 模型与 PID 控制进行对比，控制结果对比见表1。各控制方式的控制响应曲线如图10所示。

表 1: 不同方法实验结果指标对比

控制方法	调节时间/s	超调量/%	稳态误差
PID 控制	0.49	2.69	0.31
Fuzzy-PID 控制	0.31	0.14	0.24

从仿真图中可以看出，基于模糊 PID 算法的温度控制系统达到稳态所用时间更短，稳态误差更小，

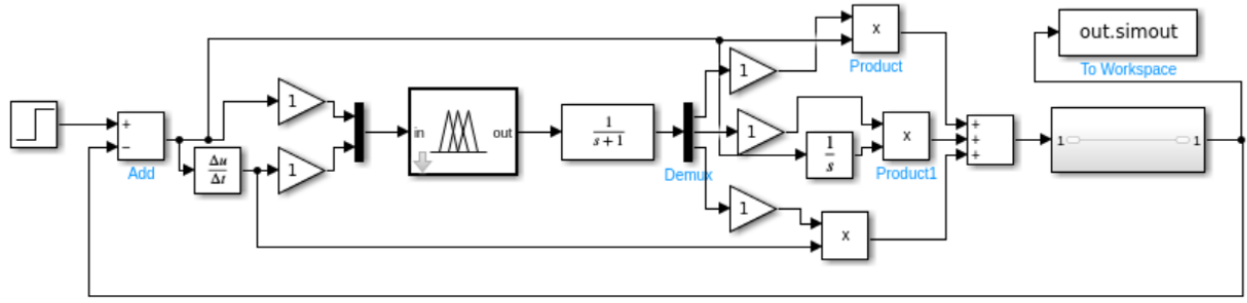


图 9: Fuzzy-PID 控制仿真图

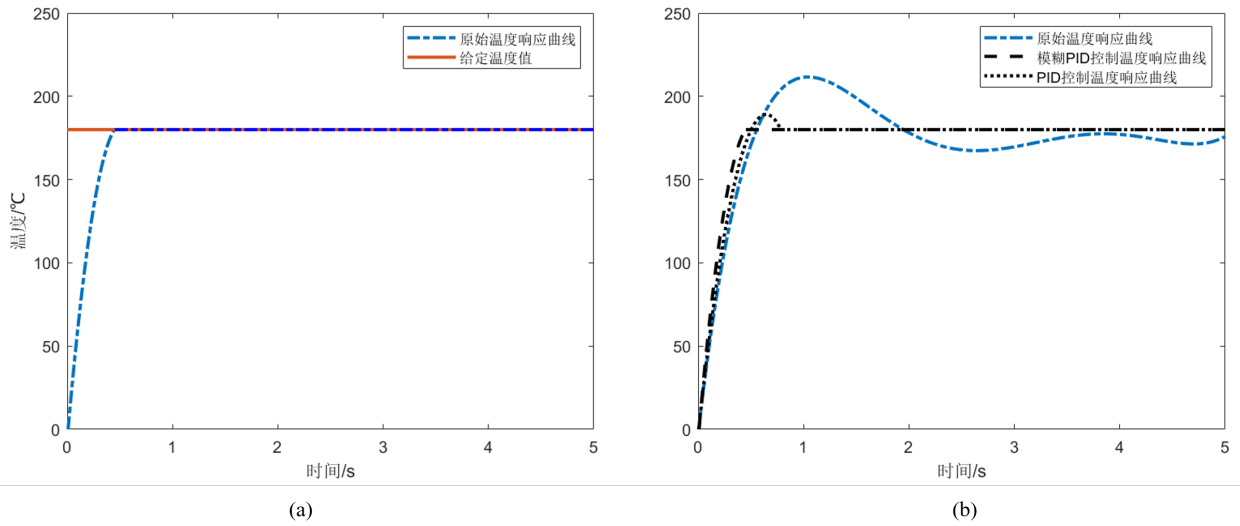


图 10: (a) Fuzzy-PID 控制响应曲线; (b) 与经典 PID 对比曲线

几乎无超调，由此可见模糊 PID 算法比常规 PID 算法有更加好的温度控制效果。将模糊算法与 PID 算法的优势很好的结合起来形成模糊 PID 算法，可以实现对 PID 的 3 个参数  $k_p$ 、 $k_i$  和  $k_d$  的实时整定，具有优秀的调控性能，从而能提高 3D 打印机喷头温度的稳定性，降低在打印过程中温度变化对打印用料流动性的影响，进而改善打印质量。由此可见，Fuzzy-PID 控制具有良好的控制适应能力与非线性逼近能力，满足 3D 打印机喷头温度控制系统实时控制的要求，Fuzzy-PID 控制具有调整时间短和稳态性能好等多种优点，充分体现了 Fuzzy-PID 参数自整定控制的优势。

## 4 结论

在本文中，我们提出了一个用于 3D 打印机喷嘴温度控制的模糊 PID 控制系统。该系统能够根据与设定点的偏差自动调整温度，使用模糊逻辑将误差和导数误差映射到控制信号。仿真结果显示，与传统的 PID 控制相比，Fuzzy-PID 控制系统能够实现更好的温度跟踪和快速响应。在未来的工作中，我们将在真实的 3D 打印机上实现所提出的控制系统，并评估其在实际场景中的性能。

## 参考文献

- [1] Stuart Bennett. *A history of control engineering, 1930-1955*. Number 47. IET, 1993.
- [2] James Carvajal, Guanrong Chen, and Haluk Ogmen. Fuzzy pid controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. *Information sciences*, 123(3-4):249–270, 2000.
- [3] Chee Kai Chua, Kah Fai Leong, and Chu Sing Lim. *Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company, 2010.
- [4] Clarence W De Silva. *Intelligent control: fuzzy logic applications*. CRC press, 2018.
- [5] Dimitar Driankov, Hans Hellendoorn, and Michael Reinfrank. *An introduction to fuzzy control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [6] Jon Excell and Stuart Nathan. The rise of additive manufacturing. *The engineer*, 24, 2010.
- [7] Yun Li, Kiam Heong Ang, and Gregory CY Chong. Patents, software, and hardware for pid control: an overview and analysis of the current art. *IEEE Control Systems Magazine*, 26(1):42–54, 2006.
- [8] 张金立. 3D 打印机智能温控系统及路径规划算法的研究. 上海工程技术大学, 2020.
- [9] 李哲. 基于 ARM 的 3D 打印机控制系统设计研究. 北京化工大学, 2017.
- [10] 李晓桐. FDM 式 3D 打印机控制系统设计及工艺参数优化. 哈尔滨理工大学, 2021.