

分类号: TN492

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220320161



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题目 基于自适应PID算法的即热式
饮水机温控系统设计

论 文 作 者 周杨阳

校 内 导 师 张肖强

校 外 导 师 朱标

专业学位类别 电子信息

研究方向(领域) 专业集成电路

论文提交日期: 2025 年 6 月 6 日

分类号: TN492
密 级: 公开

单位代码: 10363
学 号: 2220320161

题 目 基于自适应PID算法的即热式饮水机温控系统设计

题 目 DESIGN OF THE INSTANT-HEATING WATER
DISPENSER TEMPERATURE CONTROL SYSTEM BASED
ON ADAPTIVE PID ALGORITHM

学 生 姓 名: 周杨阳
指 导 教 师: 张肖强（副教授）
校 外 教 师: 朱标
专 业: 电子信息（085400）
研 究 方 向: 专用集成电路

论文答辩日期: 2025 年 05 月 10 日

二、安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：周杨阳

日期：2025 年 5 月 10 日

三、安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：周杨阳 指导教师签名：张青强

日期：2025 年 5 月 10 日

日期：2025 年 5 月 10 日

基于自适应PID算法的即热饮水机温控系统设计

摘 要

即热式饮水机作为当前商用和家庭的理想饮水设备，有着即开即热、多档出水、绿色节能以及维护便捷等优点，已经逐步取代传统饮水机成为用户的首选饮水方案。即热式饮水机的核心是温度控制系统，一个高效且先进的温控系统是即热式饮水机性能和用户受众的关键。目前，温度控制多采用传统PID控制算法，然而传统PID应用在即热式饮水机的效果并不理想，每个温度挡位都要对应一组独立的PID参数，需投入大量人力和时间调节参数以达到控制要求，且PID参数整定较为繁琐。当系统受外界干扰或控制条件改变后原参数并不能有效的适应当前状态进而会影响控制稳定性。因此，本文针对上述影响控制效果的问题进行改进和优化。本文的主要工作内容与创新点如下：

(1)基于即热式饮水机系统工作原理，完成基于STM32F407VET6 微控制器和Keil开发平台的系统搭建，各功能模块的软件以子程序封装，为后续系统升级或调用奠定基础。该方案在确保设备性能的前提下，能有效降低整体生产成本，为以后量产面向市场提供技术支持。

(2)为解决传统PID算法在即热式饮水机上的局限性，首先，将智能控制中的模糊控制与传统PID算法结合得到模糊自适应PID算法以解决PID参数的整定问题，进而减少时间和人力成本。其次，由于温度具有滞后性，单纯的模糊自适应PID算法通常会出现波动或超调，为了进一步提升控制效果，本文引入Smith预估算法并与模糊PID自适应算法结合，形成模糊-Smith自适应PID控制算法，从而优化了温度滞后性带来的影响。最后，使用MATLAB中的SIMULINK工具，建立传统PID、模糊自适应PID、模糊-Smith自适应PID的仿真模型，同时，搭建了实际实验平台进行验证，对比3种算法在即热式饮水机系统的控制效果。最终仿真和实际测试结果均表明，模糊-Smith自适应PID算法控制精度最高，误差控制在 0.2°C 左右，响应时间最短，约为6~7秒，较传统PID和模糊自适应PID有较大提升。

(3)模糊-Smith自适应PID控制算法在论域选择和隶属函数的确定上存在明显

弊端，其过程相当烦琐，需要大量实验和数据才能较为准确获得，这使得其在使用过程中难度较高、普及性较差，限制了在实际工程中的推广。本文采用变论域模糊控制理论，通过引入伸缩因子对论域进行自适应调整，能够在控制过程中动态优化论域范围，从而提高系统的控制精度和鲁棒性，减少超调现象。同时，变论域模糊控制理论简化了论域选择和隶属函数的过程，加快了响应时间。同样使用MATLAB和实际实验平台进行分析模糊-Smith自适应PID、变论域模糊自适应PID和变论域模糊-Smith自适应PID三种控制算法，实验表明变论域模糊-Smith自适应PID算法较模糊-Smith自适应PID精度进一步提高大约 0.06°C ，响应时间提高近 1 秒。

关键词：PID，温度控制，模糊控制，史密斯预估，变论域理论

DESIGN OF THE INSTANT-HEATING WATER DISPENSER TEMPERATURE CONTROL SYSTEM BASED ON ADAPTIVE PID ALGORITHM

ABSTRACT

As an ideal drinking water device for both commercial and household applications, the instant hot water dispenser has become the preferred choice for users by gradually replacing traditional water dispensers, thanks to its advantages such as instant heating, multiple temperature settings, energy efficiency, and easy maintenance. The core of an instant hot water dispenser lies in its temperature control system, where an efficient and advanced temperature control mechanism plays a critical role in determining its performance and user acceptance. Currently, traditional proportional-integral-derivative (PID) control algorithms are widely adopted for temperature regulation. However, their application in instant hot water dispensers has proven suboptimal, as each temperature setting requires a dedicated set of PID parameters. This necessitates significant manual labor and time investment to adjust parameters to meet control requirements, while PID parameter tuning itself is quite cumbersome. Moreover, when the system is subjected to external disturbances or changes in control conditions, the original parameters cannot effectively adapt to the current state, thereby compromising control stability. To address these issues affecting control performance, this paper proposes improvements and optimizations. The main contributions and innovations of this research are as follows:

(1) Based on the working principle of the instant hot water dispenser system, the system is built using the STM32F407VET6 microcontroller and the Keil platform. The software of each module is encapsulated as sub - programs, which lays the foundation

for the subsequent upgrade and invocation of the device. On the premise of ensuring the performance of the device, this design scheme effectively reduces the overall production cost and lays the foundation for future mass production and market - oriented promotion.

(2) To address the limitations of the traditional PID algorithm in instant hot water dispensers, the following steps are taken. Firstly, the fuzzy control in intelligent control is combined with the traditional PID algorithm to obtain the fuzzy adaptive PID algorithm, which solves the problem of PID parameter tuning and thus reduces time and labor costs. Secondly, due to the time - lag characteristic of temperature, the simple fuzzy self - tuning PID control algorithm often causes fluctuations or overshoots. To further improve the control effect, this paper introduces the Smith predictive control algorithm and combines it with the fuzzy PID adaptive algorithm to form the fuzzy - Smith adaptive PID control algorithm, thereby eliminating the influence caused by temperature lag. Secondly, using the SIMULINK tool in MATLAB, simulation models of the traditional PID, fuzzy adaptive PID, and fuzzy-Smith adaptive PID are established. An actual experimental platform is also built for verification. The advantages, disadvantages, and control effects of the three algorithms on the instant hot water dispenser system are compared. The final experimental results show that the fuzzy-Smith adaptive PID algorithm has the highest control accuracy, with the error controlled at around 0.2°C and the shortest response time of about 6-7 seconds, which represents a significant improvement over the traditional PID and fuzzy adaptive PID algorithms.

(3) The fuzzy-Smith adaptive PID control algorithm has obvious drawbacks in the selection of the universe of discourse and the determination of membership functions. The process is rather cumbersome and requires a large number of experiments and data to be obtained relatively accurately. This makes it difficult to use in the application process and has poor popularity, thus limiting its promotion in practical engineering. This paper adopts the variable - universe fuzzy control theory. By introducing a scaling

factor to adaptively adjust the universe of discourse, it can dynamically optimize the range of the universe of discourse during the control process, thereby improving the control accuracy and robustness of the system and reducing overshoot phenomena. At the same time, the variable-universe fuzzy control theory simplifies the process of selecting the universe of discourse range and membership functions, reduces the difficulty of system parameter adjustment, and speeds up the response time. Similarly, MATLAB and an actual experimental platform are used to analyze three control algorithms: the fuzzy-Smith adaptive PID, the variable-universe fuzzy adaptive PID, and the variable-universe fuzzy-Smith adaptive PID. Experiments show that the variable-universe fuzzy-Smith adaptive PID algorithm further improves the accuracy by up to 0.06 °C compared with the fuzzy-Smith adaptive PID, and the response time is improved by nearly 1 second.

KEY WORDS: PID, Temperature Control, Fuzzy Control, Smith Predictor, Variable Universe Theory

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外发展趋势及研究现状.....	2
1.3 论文结构安排.....	6
第 2 章 即热式饮水机系统理论基础.....	8
2.1 即热式饮水机系统工作原理.....	8
2.2 系统核心硬件.....	8
2.2.1 主控单元模块.....	9
2.2.2 温度检测模块.....	10
2.2.3 流量检测模块.....	11
2.2.4 水泵驱动模块.....	12
2.2.5 加热模块.....	12
2.2.6 显示模块.....	13
2.2.7 声音提示模块.....	13
2.3 PID控制	14
2.4 PID参数整定	15
2.5 模糊PID算法	17
2.6 本章小结.....	20
第 3 章 基于即热式饮水机系统PID算法的改进与实现	22
3.1 模糊-Smith自适应PID在即热式饮水机系统的实现	22
3.1.1 模糊自适应PID系统	22
3.1.2 Smith预估算法	26
3.1.3 模型搭建.....	27
3.1.4 实验结果分析.....	31
3.2 变论域模糊-Smith自适应PID在即热式饮水机系统上的实现	32
3.2.1 变论域算法.....	32

3.2.2 变论域模糊-Smith自适应PID系统	35
3.2.3 模型搭建.....	37
3.2.4 实验结果分析.....	39
3.3 本章小结.....	40
第 4 章 即热式饮水机系统软件设计.....	41
4.1 系统软件设计概述.....	41
4.2 主程序设计.....	41
4.3 水流量程序设计.....	42
4.4 控制算法程序设计.....	43
4.5 温度采集程序设计.....	44
4.6 蜂鸣器程序设计.....	45
4.7 本章小结.....	47
第 5 章 即热式饮水机实验平台的搭建和验证.....	48
5.1 实验平台搭建.....	48
5.2 模糊-Smith自适应PID算法实验数据分析	49
5.3 变论域模糊-Smith自适应PID算法实验数据分析	50
5.4 本章小结.....	51
第 6 章 总结与展望.....	52
6.1 论文总结.....	52
6.2 未来展望.....	53
参考文献.....	54
攻读硕士期间取得的学术成果.....	62
致谢.....	63

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

即热型饮水机是一种通过加热元件迅速加热水流的新型加热装置，其原理基于利用热传递原理，当水在水流通过加热管时迅速加热至所需温度，数秒内就可以提供持续不断的热水，十分方便，极大地满足了现代快节奏生活方式的需求。随着科技的进步，人们对生活质量的要求不断提高，消费者对饮用水的质量、温度、便捷性和智能化方面要求越来越高，即热式饮水机已成为办公、家庭、商业等场景中的首选饮水设备^[1]。传统饮水机以储水式和直饮式饮水机为主，储水式饮水机是当前市场上常见的饮水机类型，通过水箱储存水并加热，但该类型的饮水机加热时间较长，通常需要预热且水温控制控制较为困难。直饮式饮水机则通过多种过滤技术(如活性炭、RO反渗透等)直接提供净化过的饮用水，以高效便捷、健康环保等特性著称。但是直饮式饮水机安装过程较为复杂，如果安装位置不合适可能还需对原有的水管进行改动，同时直饮式饮水机需要定期更换滤芯或滤膜，维护成本较高^[2]。随着人们生活水平的不断提高，在快节奏的生活中，消费者对能够快速供热水的设备需求大幅增加，而即热式饮水机的出现正是满足了人们对高品质的饮水的需求。即热式饮水机相较于传统饮水机有快速加热、节能环保、优质水质、精准温控、操作便捷和高安全性等优势^[3]。通过即热温控技术，无需预加热或长时间等待，而且可根据不同使用场景有多种温度可以选择。传统饮水机通常需要持续加热保温，而即热式饮水机仅在使用时开始加热，无需长时间通电，可以降低能耗避免不必要的能源浪费。此外，传统饮水机的储水装置容易滋生细菌，而即热式饮水机的即热模式，极大的减少了饮用水二次污染的问题。即热式饮水机具备更加精准的温度控制和更小的体积，提高了用户的使用体验感^[4]。

即热式饮水机的核心是温度控制系统，PID控制算法作为一种常见的控制策略，在温控领域得到了广泛应用^[5]。随着智能化的发展，即热式饮水机通常配备多个挡位的温度调节功能以满足市场需求。若仍然采用传统PID控制算法，每个

挡位对应一组PID参数值，将投入大量的时间和人力进行参数整定，极大增加了开发成本^[6]。传统PID的控制效果主要基于比例、积分、微分三个参数值，虽然算法简单易理解，但只适用于单一的控制环境，而且传统PID控制不能根据外界环境变化来自动调整参数。例如在高原地区，由于水沸点的变化，传统PID控制的效果可能会受到影响导致温度控制不准确，故需要一种可自动整定PID参数的算法实时整定出一套新的参数以适应环境变化带来的影响^[7]。随着智能控制技术的发展，一些智能控制算法开始与传统PID算法结合，弥补了传统PID的不足，例如神经网络^[8]，模糊控制^[9]，遗传算法等^[10]。由于温度带有滞后性，需要选择合适的算法以解决温度滞后带来的控制精度问题。例如大林算法、串级控制、Smith预估算法等都可以有效提高温度控制精度。合适的算法不仅可以降低成本，还可以提高整体控制表现，随着数字化的发展，针对即热式饮水机的温度控制研究是非常有必要的^[11]。将智能控制与PID控制相结合，温控系统将朝着更先进、更精确的方向发展，从而进一步提升系统的灵活性、适应性，让PID控制算法继续在工业领域中得到广泛应用^[12]。

1.2 国内外发展趋势及研究现状

温度控制理论的发展主要经过古典控制、现代控制和智能控制三个阶段^[12]。其中古典控制发展于 20 世纪初，其原理基于反馈控制和频域分析，主要应用于单输入单输出(SISO)的线性时不变系统中^[13]。现代控制兴起于 20 世纪 50 年代，其原理基于状态空间方法和优化控制原理，主要用于多输入多输出系统(MIMO)。古典控制和现代控制统称为传统控制理论，两者共同的特点是都需要知道被控对象的数学模型才能设计或分析控制系统^[14]。智能控制兴起于 20 世纪末、21 世纪初，随着工业自动化技术的发展，控制系统的复杂性不断增加，古典控制和现代控制无法完全应对这些日益复杂问题^[15]。与此同时，数字时代的到来和计算机技术的飞速发展，使得人工智能开始步入大众视野^[16]。智能控制的形成是多学科高速发展交叉得到的产物，集成了控制理论、人工智能、计算机科学、数学等多个领域^[17]。智能控制可应用于非线性、复杂、动态和无法确定准确数学模型的控制系统，在一定程度上克服了传统控制方法的局限性^[18]。

随着科技的快速发展,温度控制在工业生产中的要求越来越高,在追求控制效果的同时,控制自动化和智能化的表现也尤为重要。温度控制技术的发展从机械控制阶段,主要依靠机械设备如温控阀、温度开关等,通常这些设备依靠液体膨胀、金属膨胀的原理来感知和调节温度,但是这些机械设备控制精度普遍不高,响应速度也存在一定的局限性^[19]。随着电子技术的发展,温度控制系统开始引入电子元件例如热敏电阻、传感器、继电器等,进而使温度控制系统有更高的精度和更广的应用范围。直到PID控制器的出现,极大提高了温度控制的精度和稳定性,已成为温度控制系统领域应用最广、效果最好的控制算法之一^[21]。进入数字化和智能化时代后,PID控制算法得到了改进和优化,通过结合不同的智能控制算法优化参数整定。

传统PID的参数整定方法大多还是使用凑试法或经验法,不仅费时而且未必能达到最优效果,通过结合智能算法可以简化或自动化参数整定过程,避免人工繁琐的调整,减少开发和维护成本,进一步提高了系统的控制精度和鲁棒性^[21]。同时,结合智能控制后能够支持未知或难以建立精确数学模型的控制系統,扩大了控制算法的应用范围^[22]。常见的智能控制算法包括神经网络、遗传算法、模糊控制等^[23]。

神经网络PID通过学习系统的输入和输出关系,动态调节PID控制器的参数或直接控制输出。神经网络的输入层一般是当前值与目标值的误差和误差变化率,隐藏层通过多层的非线性处理和学习系统的动态特性,计算出当前控制调节下合适的PID参数,输出层就是PID控制器的三个参数。神经网络PID可以实时整定PID参数,改善控制器性能,并具备自动学习和容错能力,能够有效逼近一些复杂系统^[24]。如文献[25]对变速变距型风力发电机组的液压驱动式变距执行机构,采用基于BP神经网络来优化传统PID的控制结构,结果表明BP神经网络的PID算法可有效克服液压系统参数时变、抗干扰波动等缺点,控制更加快速、准确,提高了液压系统的整体控制效果。文献[26]对神经网络PID做出进一步改进,在BP神经网络PID的基础上添加多重动量项,仿真和实验结果表明该方法可以有效的减少网络训练次数,从而优化神经网络PID算法。文献[27]通过引入神经网络进而优化传统PID控制,提高发电装置的最大功率,文章以永磁线性发电机建立动力

学模型, 仿真结果表明, 神经网络PID的控制方法提高了发电量, 较传统PID表现出更好的精度和稳定性。尽管神经网络PID在诸多领域表现优异, 但神经网络PID通常需要大量的训练数据来学习和优化, 会耗费大量的时间且对计算资源和硬件有较高要求, 故在工业生产应用上会增加开发成本并对数据依赖较大, 倘若数据量不足或者数据质量较差的情况下, 可能会导致模型过拟合, 进而影响控制效果^[28]。神经网络经过多年的发展其内部决策过程仍然难以解释, 缺少完备的理论体系证明, 故在使用时会存在一定的风险, 系统出现故障时难以追踪其原因^[29]。

遗传算法是一种启发式的全局优化算法, 主要通过模拟自然选择和遗传学的基本原理来进行搜索优化, 灵感来自于达尔文的自然选择理论^[30]。如文献[31]将遗传算法与传统PID结合应用于有刷直流电机中, 仿真与实验结果表明, 遗传算法有强于常规参数整定的能力, 使得PID参数整定的时间更少, 稳定时间更短, 同时还可以降低过冲。文献[32]对遗传算法PID选择的算子、交叉算子和变异算子进行改进, 进一步加快了算法的收敛速度。文献[33]采用了一种通过遗传算法优化传统PID控制的方法, 并将其应用于软体机器人控制系统。该研究对比了遗传算法优化PID控制与传统PID控制在机器人行走速度、误差、超调和响应时间等方面的性能。实验结果表明, 遗传算法优化的PID控制显著提升了机器人行走速度, 从 5 mm/s提高至 8 mm/s, 误差减少了 2.4064%, 超调降低了 12.55%, 响应时间缩短了 0.5 秒, 遗传算法显著增强了整体控制系统的性能。尽管如此, 遗传算法需要多代演化才能收敛到最优解, 整个过程耗时较长, 但是遗传算法还是凭借其原理简单和技术要求不高的优势在简单控制系统场景有很好的应用市场。

上述文献中的方法在即热式饮水机控制系统中都有一定的短板, 无法完全满足当下即热式饮水机的市场需求。模糊控制算法因其较快的计算速度和相对较低的硬件成本, 尤其适用于非线性控制系统, 所以可作为温度控制的首选智能控制算法。自从 1965 年美国学者L.A.Zadeh教授提出模糊集合理论以来, 模糊控制在理论和实际应用上都获得了巨大发展, 现已成为自动控制领域中最为活跃的控制算法之一, 并广泛应用于多个场景, 如工业控制、智能家电、国民经济等复杂等大对象预测、智能医疗、军工、汽车等^[34]。各国都在致力研究和发展模糊控制, 许多学者对模糊控制理论和实际应用做出了大量研究^[35]。例如文献[36]对列车自

自动驾驶系统(ATO)进行研究,将模糊PID和传统PID两者相互切换,通过系统仿真表明,模糊PID能够使ATO系统的调速更加平滑,提高了乘坐舒适性、提升停车精度、节约能源。文献[37]对双连杆电容性机械臂的主动控制进行研究,比较了传统PID与模糊PID控制效果。结果表明,模糊PID在快速响应性和稳态精度方面均优于传统PID。文献[38]针对为实现水下移动平台上的有效激光通信,进行了水下激光通信(UWLC)的主动跟踪对准技术的研究,针对水下扰动,设计了模糊PID控制器并与传统PID控制器进行比较,实验结果表明模糊PID算法比传统PID算法具有更好的抗干扰能力和跟踪性能,其动态跟踪精度比传统控制算法提高了30.29%,为水下移动平台上激光通信的发展提供了一定的参考。

由于热量传递和热熔效应的影响,温度控制具有强滞后性,为解决这一特性带来的影响,国内外学者在基于模糊控制算法的基础上进行进一步的深入研究^[39]。例如文献[40]采用大林算法来解决燃气热水器温度控制系统的纯滞后环节,通过对大林控制器的详细设计以及仿真结果分析,该方法在温度控制有着良好的表现。文献[41]采用一种基于串级模糊自适应的温度控制方法,将模糊控制与串级控制相结合,增加一条副回路与主回路同时控制应用在蒸发器上,研究结果表明温度响应的调节时间缩短二分之一,最大偏差降低幅度超过五分之四;温度提升负荷的调节时间缩短幅度超过五分之三,最大偏差降低幅度超过五分之四;过热蒸汽干扰的恢复时间缩短幅度超过二分之一,最低和最高温度偏差降低幅度超过十分之一,为解决蒸发器温度精确控制提供了一种有效的途径。文献[42]为减少热效应对微加速度计芯片的影响,国外学者采用了一种基于遗传算法的模糊PID,与传统PID和模糊PID相比有显著的改进效果。仿真实验结果表明,该温度控制方法具有快速响应、稳态误差小和超调低等优势。

由于我国智能控制起步较晚,在智能温度控制领域的精度和稳定性方面总体还是相对落后,随着智能时代的到来,不断研究开发更高精度的温度控制器和更智能的控制算法是不可或缺的。为了确保饮水机产品升级换代符合当下人们饮水的需求,智能温控算法是关键,尤其是在即热式饮水机产品上还有很大的提升空间^[43]。

1.3 论文结构安排

基于上述对自适应PID算法的即热式饮水机温控系统的背景导入和研究内容的介绍，文章主要分为六个章节，主要章节研究内容如图 1-1 所示：

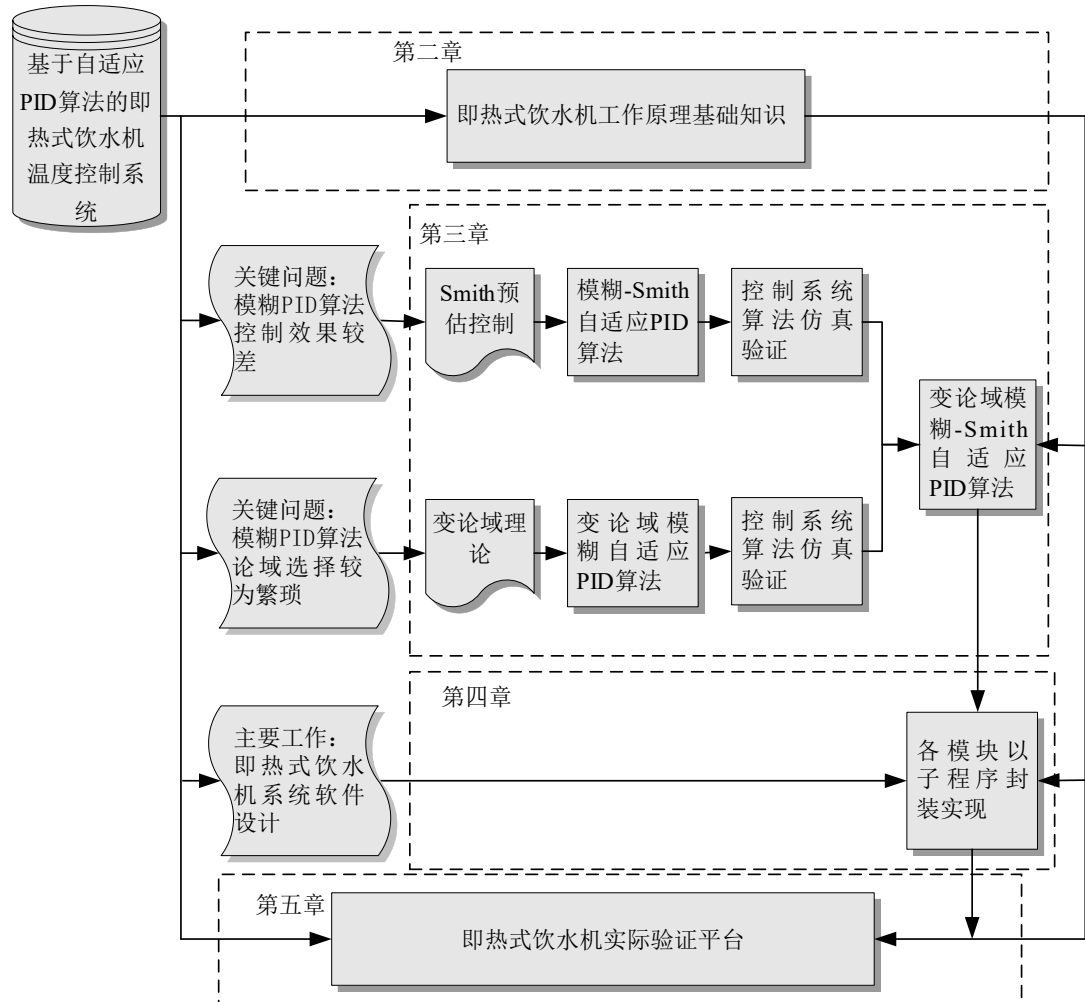


图 1-1 论文研究工作结构图

第一章是绪论：本章介绍了即热式饮水机的发展背景和应用意义，分析比较了几种常见PID温度控制算法的优缺点，通过对当前技术和市场环境的分析，最后确定了本文的研究内容和结构安排。

第二章是即热式饮水机系统理论基础：本章介绍了即热式饮水机的工作原理和相关硬件，并阐述了即热式饮水机系统所用到的控制算法原理。

第三章是基于即热式饮水机系统PID算法的改进与实现：针对模糊PID算法的两个局限性，基于即热式饮水机系统对算法做出改进和优化，并搭建仿真模型进行实验验证。

第四章是即热式饮水机系统软件设计：阐述系统的软件设计流程和部分程序代码的介绍。

第五章是即热式饮水机实验平台的搭建和验证：通过搭建即热式饮水机的实物平台对PID优化算法进行进一步验证。

第六章是总结与展望：对全文做出总结，分析其中需要改进的方向为后续进一步的研究提出展望。

第2章 即热式饮水机系统理论基础

2.1 即热式饮水机系统工作原理

即热式饮水机工作时，系统首先通过主控单元采集温度和流量信息，将采集到的模拟信号转化为控制器可识别的数字信号。然后控制器通过不同的控制算法生成相应的PWM(脉宽调制，Pulse Width Modulation)信号，控制算法会计算出一个合适的占空比(一个周期内高电平信号状态所占的时间比例)控制加热装置和水泵驱动装置，两者同时控制输出温度。整个装置实施温度和流量的双重控制来提升整体控制精度与稳定性^[44]。即热式饮水机工作原理图如图 2-1 所示。

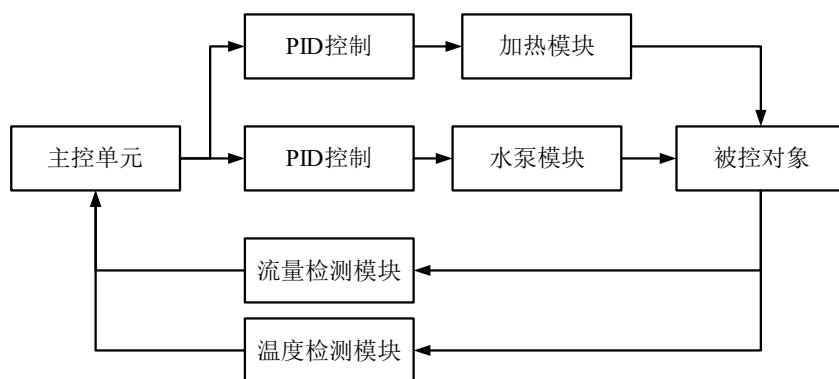


图 2-1 即热式饮水机系统工作原理图

2.2 系统核心硬件

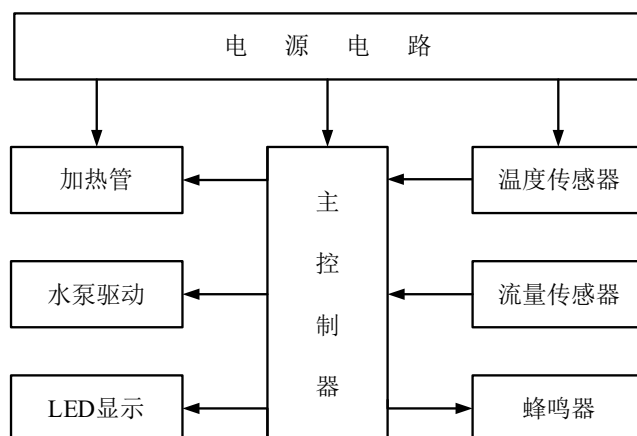


图 2-2 即热式饮水机硬件图

即热式饮水机由电源电路、水泵、加热管、蜂鸣器、显示设备、流量传感器、温度传感器、微控制器单元等电气组件构成。这些组件彼此组合分化为不同的功能模块，如控制器模块、显示模块、声音模块、温度检测模块、流量检测模块和加热模块等^[45]。即热式饮水机系统硬件如图 2-2 所示。

2.2.1 主控单元模块

主控单元作为整个硬件系统的核心，在即热式饮水机的控制架构中承担着关键的控制与处理功能。该控制器不仅需要实现PWM(脉宽调制)信号输出、A/D(模数)转换、还需要执行复杂控制算法的实时运算，同时配备多个I/O(输入/输出)端口以满足系统的连接需求。基于系统控制需求及性能指标综合考虑，主控电路选用了意法半导体公司推出的STM32F407VET6 系列高性能 32 位ARM Cortex-M4 微控制器。该控制器凭借其卓越的运算处理能力、丰富的外设资源以及优异的实时控制性能，能够有效支持即热式饮水机在温度控制、流量监测、用户交互以及安全保护等方面的需求。STM32F407VET6 的技术参数如表 2-1 所示。

表 2-1 STM32F407VET6 技术参数

名称	参数
核心处理器	ARM Cortex-M4
最大时钟频率	168MHz
Flash 存储	512KB内部闪存
RAM	192+4KB SRAM
工作电压	2.0V至 3.6V
GPIO	82 个通用输入输出引脚
外设接口	TIM ADC USART USB SDIO SPI等
低功耗模式	睡眠模式、停机模式、待机模式等
封装	LQFP100
开发环境	Keil、IAR、STM32CubeMX等
调试接口	支持JTAG和SWD调试

除了表 2-1 中所列出的主要参数之外，STM32F407VET6 微控制器还集成了多项功能模块，显著提升了系统性能和开发灵活性。内置的FPU(Floating Point Unit，浮点运算单元)和DSP(Digital Signal Processing，数字信号处理)指令集为复杂的数学运算和信号处理任务提供了硬件加速支持，特别适合用于对实时性要求较高的控制场景。此外，MPU(Memory Protection Unit，内存保护单元)可以有效增强系统的可靠性和安全性，通过内存访问权限管理防止非法操作导致的系统崩溃或数据损坏。在存储扩展方面，STM32F407VET6 支持FSMC(Flexible Static

Memory Controller, 灵活静态存储器控制器)接口,可方便地连接外部SRAM、NOR Flash等存储设备,满足大容量数据存储需求。在时钟系统方面,该微控制器内置了16MHz高速晶振和32kHz低速晶振,可以为不同工作模式提供精准的时钟源。同时,还集成了上电复位(OR, Power-On Reset)、掉电复位(PDR, Power-Down Reset)和可编程电压检测(PVD, Programmable Voltage Detector)功能,确保了系统在电源异常情况下能够可靠复位和恢复。在模拟信号处理能力方面,该控制器配备了3个12位高精度ADC(Analog-to-Digital Converter, 模数转换器),支持最高2.4 MSPS的采样率,能够实现多通道高速数据采集。除此之外,还集成了两个12位DAC(Digital-to-Analog Converter, 数模转换器),为模拟信号输出提供高精度的控制能力。综上所述,STM32F407VET6凭借其丰富的功能集成、优异的低功耗表现、极具竞争力的性价比以及完善的开发工具链支持,成为即热式饮水机控制系统的理想选择。其强大的处理能力、灵活的外设配置和可靠的系统保护机制,能够全面满足即热式饮水机的各项要求,为产品开发提供了高效、可靠的硬件平台。

2.2.2 温度检测模块

选择稳定性好、精度高的温度传感器对即热式饮水机系统至关重要,常见的一些温度传感器类型包括铂电阻(RTD)、热敏电阻(NTC、PTC)、热电偶以及红外温度传感器等。热敏电阻分为负温度系数(NTC)和正温度系数(PTC)两种类型,两种热敏电阻的工作原理类似,都是基于电阻随着温度变化的特性,通过测量电阻的变化进而推算出温度。NTC热敏电阻的电阻值随温度升高而减小,而PTC热敏电阻的电阻值随着温度的升高而增加。一般加热装置中常用NTC热敏电阻作为温度检测装置,PTC热敏电阻常用于电路保护,当温度超过设定范围,PTC热敏电阻会显著增加,从而限制电流流动,起到保护装置的作用。热敏电阻成本低,结构简单已经可以满足一些常规的温度检测需求,但是热敏电阻的稳定性较差,长期使用会导致测量精度下降,且对测量环境中的湿度和电磁干扰等因素较为敏感,可能影响测量的准确性^[46]。热偶电阻(TC)作为温度传感器的原理基于塞贝克效应,利用两种不同金属材料或合金在接触点处由于温度变化产生电压差的原理来测量温度。这种电压差与温度之间有一定的关系,经过转换后可以得到温度值。热

偶电阻的测量范围较广能从最低温度(-200°C)到高温(超过 2000°C)均可测量。然而,对于即热式饮水机来说并不需要如此过高的温度范围,与其他温度传感器相比,热电偶的测量精度较低,且输出的信号较弱,需要较为复杂的放大电路和高性能的信号处理硬件来读取信号,这样反而会增加系统的设计难度,徒增工作量^[47]。红外温度传感器通过利用物体辐射的红外线来测量温度,任何物体只要高于绝对零度都会向外辐射红外线,辐射的强度与物体的温度成正比,通过探测器如热电堆、光电探测器等接受物体的红外辐射信号再转换为电信号,再经过处理和转换输出相应的温度值。红外温度传感器属于非接触式测量,不需要与水直接接触即可输出温度信号,从而避免了传感器接触水产生的一些磨损和卫生问题,但是该传感器受环境的因素影响较大而且只能测量水体的表面温度无法直接测量水体内部温度,故也并不适用在即热式饮水机装置上^[48]。

铂电阻(RTD)由于其卓越的测量精度,能够提供稳定且准确的温度输出,还因其抗电磁干扰能力强,不易受到外部电磁噪声的影响,能够在各种环境条件下稳定工作。此外,铂电阻与温度之间呈现高度线性的关系,其稳定性在长时间使用中几乎没有衰减,从而有效延长了即热式饮水机的使用寿命。综上所述,本文选择PT100 铂电阻作为即热式饮水机系统的温度传感器。PT100 的工作原理与热敏电阻类似,其内部的金属电阻也会随着温度变化而变化,温度升高时,铂电阻的电阻阻值也相应增大^[49]。

2.2.3 流量检测模块

与温度检测模块相同,流量检测模块同样需要选择合适的流量传感器,常用的流量传感器有浮球式流量传感器、超声波流量传感器、电磁流量传感器、霍尔流量传感器。浮球式流量传感器内部有一个浮球,一般安装在水管内,可随着水流量的大小上下浮动进而触发内部的开关,触发后再输出信号给控制系统。浮球式通常只能安置在一些结构简单,对精度要求不高的设备中,由于浮球很容易受到水流波动的影响通常只使用于流量较大的应用场景^[50]。超声波流量传感器通过超声波传播的时间差来测量流量,但该款流量传感器的造价较高且能耗也比一般传感器要高,虽然测量精度较高,但综合考虑并不适用于即热式饮水机这种需要批量生产的设备^[51]。电磁流量传感器与超声波流量传感器有着相同的问题都

是生产造价和功耗过高，对设备整体的成本会产生较大的影响^[52]。

通过综合比较，最终选择了霍尔流量传感器作为即热式饮水机系统的流量检测装置。霍尔流量传感器通过水流推动叶轮的旋转，再利用霍尔效应将机械信号转化为电信号，进而得到流量值。该类型的传感器能快速感知水流的变化，响应速度较快，符合即热式饮水机对响应时间的要求。同时，霍尔流量传感器的测量方式避免了与水流的直接接触，通过涡轮等部件感知磁场变化，从而减少了因摩擦和磨损带来的影响，延长了传感器的使用寿命^[53]。

2.2.4 水泵驱动模块

目前市面上常见的水泵驱动装置有隔膜泵、自吸泵、离心泵、螺杆泵等。隔膜泵通过电机驱动使有弹性的隔膜往复运动，改变自身体积进行水流驱动，由于隔膜通常 3 年左右需要定期更换，使用成本较大。自吸泵的工作原理是通过排除水泵内部的气体，通过空气压力驱动水泵，虽然自吸泵的使用年限较长，但相对于其他类型的水泵效率较低，而且需要一定的空间用来排出空气，在设计上会相对占用更多的空间。螺杆泵通过螺旋的转子推动水流，可以实现水流的精准驱动，但是螺杆泵的造价较高，因此也排除在外。通过综合比较，最终选择离心泵作为系统的水泵驱动装置，离心泵通过旋转叶轮产生的离心力，驱动水流。离心泵的结构简单，适配范围广而且不易损坏，同时离心泵的体积较小，方便集成到即热式饮水机设备中。

2.2.5 加热模块

加热装置的种类较多，需要根据使用场景和预算综合考虑，常用的加热装置包括石英管、电热管、陶瓷PTC、厚膜加热等。石英管加热通过在石英玻璃内的电阻丝通电加热，但是石英管的材料较容易受到碰撞或者冷热突变时导致破裂，容易损坏。陶瓷PTC材料加热的功率相对较低、加热时间较长，所以较难达到即热式饮水机快速出水的要求，因此也排除在外。厚膜加热通过在陶瓷或者金属上印刷纳米级的电阻材料形成薄膜层加热，虽然热效率较高，但是其价格是普通加热管的 3 倍左右，出于成本管控的考虑也排除在外。经过综合比较，最终即热式饮水机选择了技术成熟的电热管加热，电热管由于其生产工艺稳定、造价低，同

时加热效率也相对良好，尤其适合即热式饮水机这种中小型加热设备。

2.2.6 显示模块

常用的显示设备有LED数码管、LED点阵屏、OLED屏和TFT液晶屏等。出于对即热式饮水机系统的显示要求，可以显示简单的温度数字即可，结合各显示设备的功能我造价综合对比来看LED数码管最为合适，其他显示设备虽然可以显示的图形更多，但是出于经济和实用性考虑LED数码管已经可以满足即热式饮水机设备的显示需求，不需要选用更好的显示设备，增加不必要的硬件成本。

2.2.7 声音提示模块

为了提高即热式饮水机的安全性，同时提供更加人性化的用户体验，需选择合适的蜂鸣器来为用户提供声音提示。以用来在出水完成或开始出水、状态提示和操作确认、设备故障、安全保护等各种使用状态下提供及时的反馈。市面上常见的蜂鸣器按工作原理分为压电式蜂鸣器和电磁式蜂鸣器，按驱动方式分为有源蜂鸣器和无源蜂鸣器。有源蜂鸣器内部集成了震荡电路元件，在长期使用过程中，可能会因为老化、发热等因素影响其使用年限，使用寿命相对较短。同时，有源蜂鸣器的制造工艺相对复杂、使用成本较高，并不适用于即热式饮水机这种需要大批生成的设备。有源蜂鸣器无法实现复杂的音效，只能发出固定频率的声音，因此也不适用即热式饮水机需要多种提示音的应用场景。无源蜂鸣器响应控制更为灵活，可以根据不同使用场景产生不同的音效，便于用户区分不同的状态。无源蜂鸣器不含内置振荡电路，因此功耗较低，且成本相对较低。电磁式蜂鸣是一种通过电磁振动产生声音的蜂鸣器，这种蜂鸣器的结构相对复杂、体积较大，对于内部空间有限的饮水机装置来说并不适用^[54]。

最终，本系统采用的是压电式无源蜂鸣器，压电式的原理是通过对压电陶瓷片施加交变电场，压电陶瓷会产生规律的周期性形变，进而引起空气震动，产生输出声音^[55]。由于压电式蜂鸣器没有复杂的机械传动结构，体积较小便于安置在饮水机设备中，同时压电式蜂鸣器的制作工艺难度不高，生产成本较低，可为后续饮水机设备投入量产打下基础。此外，压电式蜂鸣器通常性能稳定，不容易收到外界环境因素的影响，使用寿命较长^[56]。

2.3 PID控制

PID控制(Proportional-Integral-Derivative Control, 比例-积分-微分控制)是工业控制中常见的反馈控制策略,也是控制理论中的经典算法之一,自 20 世纪 90 年代初被提出以来,直至今日依然活跃在各大控制场景中,由于原理简单易懂、可适配多种控制场景故被广泛推广于实际应用中^[57]。PID控制算法原理图如图 2-3 所示。

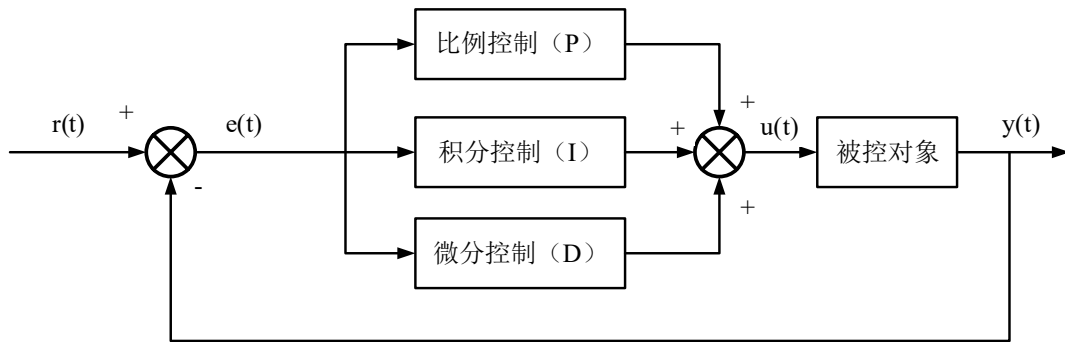


图 2-3 PID控制原理图

PID控制通过对设定的目标值 $r(t)$ 与实际值 $y(t)$ 之间的偏差 $e(t)$ 进行反馈调节,再通过比例控制(P)、积分控制(I)和微分控制(D)共同作用下生成控制系统的输出值 $u(t)$ 作用于控制对象。通过对该过程连续不断的反馈,系统会不断逼近目标值 $r(t)$ 与实际值 $y(t)$ 之间的误差,从而使控制系统达到预期的控制效果。最终的控制效果基于比例(P)、积分(I)和微分(D)三个参数的整定情况,只要三个环节的参数整定得当,合理搭配各控制部分的强度,就可达到较为满意的控制效果^[58]。

(1)比例控制(P)

比例控制根据输入偏差的大小来调整控制量,即对偏差乘以一个常数,在PID控制中比例控制是基础,可以帮助系统快速响应并使偏差不断减少,但仅仅靠比例控制是无法完全消除误差的,只会在目标值附近波动,尤其当系统还存在静态误差时。比例系数越大,控制作用越强,响应时间越短,但系数选择过大,容易使控制系统产生震荡破坏控制的稳定性,所以比例系数的选择要恰当,才能有稳定又准确的控制效果,比例控制的数学表达式为:

$$P = K_p * e(t) \quad (2-1)$$

(2)积分控制(I)

积分控制通过对历次的偏差累积进行调节,即对输入偏差进行积分运算,积分控制的主要作用是消除系统的静态误差。积分参数越大,积分的累积作用越小,偏差的消除过程所需时间较长但系统稳定性较高。积分常数越小,积分的累积作用越强,偏差的消除过程所需时间较短但系统易产生震荡导致系统稳定性降低。故需根据实际的控制情况来选择合适的积分常数,以实现既能有效消除误差又能保持系统稳定的控制效果,积分控制的数学表达式为:

$$I = \frac{K_p}{T_i} * \int_0^t e(t) dt \quad (2-2)$$

(3)微分控制(D)

微分控制通过偏差的变化趋势进行调整,即对输入偏差进行微分运算。微分控制主要通过“预测”未来的变化趋势,主要起到减少系统的超调,提高系统响应速度的作用。增加微分常数,抑制偏差变化的作用就越强,会加快系统的响应速度,提高系统的稳定性。减少微分常数,抑制偏差变化的作用就越弱,从而减慢系统的响应速度,降低系统的稳定性。但是,如果微分常数过大,会使系统对噪声过于敏感,产生过度反应使系统产生震荡。微分常数过小时,即缺乏足够的“预测”性,使系统更易产生超调或震荡,同时也会降低系统的响应速度^[59]。因此在设计PID控制器时微分常数的选择需要设计者来权衡,微分控制的数学表达式为:

$$D = K_p * T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-3)$$

最后整个PID控制器的输入输出数学表达式如下:

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (2-4)$$

2.4 PID参数整定

PID参数整定是指确定PID控制器的比例(P)、积分(I)和微分(D)三个参数的具体数值,使其特性和过程相匹配,进而改善系统的动态和静态性能。具体来说,PID控制的目标是使系统能够快速、稳定的跟踪设定目标值,并减少偏差取得最佳的控制效果。整定PID参数的方法有很多,通常可归纳为两大类:理论计算整

定法和工程整定法^[60]。工程整定法的特点是不需要预先知道控制系统的数学模型，直接在控制过程中进行现场整定，方法简单易于操作人员掌握，故在实际工业应用中应用广泛，常见的工程整定法有：

(1)凑试法

按照先调整比例(P)、在积分(I)、最后微分(D)的整定顺序，先将I和D的参数设置为零，让系统只在比例系数 K_p 的作用下运行，再逐步增大比例系数 K_p ，通过观察是否可以产生稳定的响应，以确定合适的比例系数 K_p ，理想状态下系统能较快达到目标值且不会过度震荡。其次开始引入积分作用，此时将比例系数 K_p 设定为第一步的 $6/5$ ，再将 T_i 从大到小调节，直到系统误差较小且响应较为稳定时，确定 T_i 的值。最后引入微分作用，通常可将 T_d 初值设为 $(1/3 \sim 1/4)$ 的 T_i ，再由小到大不断加入，以优化系统的超调量和响应速度。在实际操作时可能需要反复调整三个参数之间的值，因为它们之间会相互影响^[61]。

(2)临界比例法(Ziegler-Nichols法)

将PID控制器置于纯比例(P)的作用下，积分(I)，微分(D)设置为零，从小到大逐渐增加PID控制器的比例系数，直到得到等幅震荡的过渡过程。此时，比例系数为临界比例系数 K_u ，相邻两个波峰间的时间间隔称为临界震荡周期 T_u ，有的控制系统当控制器的比例系数 K_p 调到最大刻度时，系统仍然不产生等幅震荡，这种情况则需将最大刻度的比例系数作为临界比例系数 K_u 进行整定。 K_p 的计算公式为：

$$K_p = 0.6 * K_u \quad (2-5)$$

T_i 的计算公式为：

$$T_i = \frac{T_u}{2} \quad (2-6)$$

T_d 的计算公式为：

$$T_d = \frac{T_u}{8} \quad (2-7)$$

在此基础之上若仍然不满意控制效果，可按先P再I最后D的操作进行进一步调整，即结合凑试法整定PID参数。临界比例法能在较短的时间内为PID控制器提供一个初步的整定参数，为后续系统优化提供基础^[62]。

(3)经验法

凑试法和临界比例法整定PID参数都需经过多次的实验，为了减少整定次数，提高工作效率，整定工作可以借鉴他人的经验和对控制系统的理解，从而减少工作量，经验法通常没有固定的整定步骤，一般需根据实际情况在线整定。

理论计算整定法常见的方法有：

(1)对数频率特性法

对数频率特性法需要知道控制器和被控对象的开环传递函数，在建立精确的数学模型后利用频率响应分析工具绘制Bode图和Bode图，其中包括增益图(横轴为对数频率，纵轴为增益)和相位图(横轴为对数频率，纵轴为相位角度)两部分。通过调整PID参数，使系统达到理想的增益裕度、相位裕度和稳定性等要求。目标增益裕度(通常为 6-12 dB)，相位裕度(通常为 45° - 60°)，直到这些指标满足要求即可得到合适的PID参数^[63]。

(2)根轨迹法

根轨迹法是一种时域分析方法，同样需要知道控制器和被控对象的开环传递函数，通过绘制根轨迹图来调试合适的PID参数。根轨迹图是系统极点的位置随着PID参数的变化而发生变化的轨迹，通过观察根轨迹图的变化来整定PID参数，确保系统的极点位于左半平面，从而保证系统的稳定。

基于上述PID算法的介绍，虽然在算法原理方面较为简单，基本都是基于简单的数学运算，易于操作人员的理解和实现，但在参数调节方面较为繁琐，若无精确的数学模型，往往需要大量试验来确定，才能得到一组较为满意的PID参数值，且这一过程非常依赖工程师们的经验。此外，在对温度这种范围变化较大的非线性控制系统，传统PID往往无法提供较为满意的控制效果，因为PID控制算法都是基于线性假设的，为了克服这一局限性，下一小节将介绍模糊PID控制^[64]。

2.5 模糊PID算法

模糊控制属于智能控制的一种，其理论基础是模糊集合理论的数学知识，使用模糊语言对控制量进行描述。模糊控制通过计算机等数字化技术来模仿人的控制语言，如一些不能被计算机准确识别的范围概念例如“温度过热，时间较长，

速度较慢”等模糊概念。这些模糊语言通常只有人类能够较为准确地理解其含义。通过模糊控制原理对人的语言进行描述，可以转变为计算机能够识别的语言，使得计算机控制跳出二值逻辑。尤其是当控制系统复杂，无法对系统内部机理进行准确的描述或者描述过于复杂时，往往使用模糊控制理论都会得到较好的控制效果。因此在工业实际应用中，在无需明白整个内部机理的前提下依然能得到良好的控制效果，对于工业生产的普及有着明显的优势。由此可以看出，模糊控制的基本出发点是基于人为的一系列经验并不断总结计算，再将这些经验提炼为控制规则。模糊控制理论是围绕控制规则的建立和应用而展开的，易于其他控制方法相结合^[65]。模糊控制系统包含模糊化，模糊推理，控制规则和逆模糊四个环节，其原理图如图 2-4 所示。

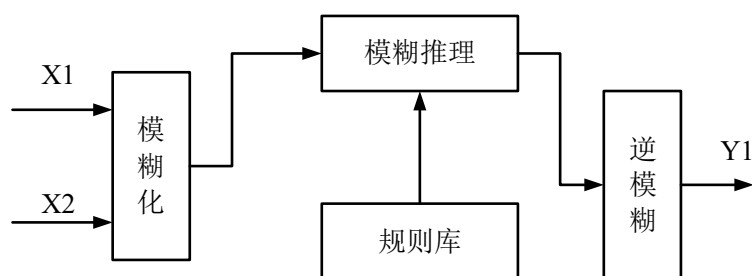


图 2-4 模糊控制系统原理图

(1)模糊化

模糊化是将输入信号或传感器检测到的物理信号转化为模糊信号，一般使用量化将实际物理论域通过量化因子转化为模糊论域。由于人在处理信息时没有量化的概念，都是根据自己主观经验进行判断，这些概念人可以理解但计算机无法直接理解。首先第一步，把输入信息转换为计算机可以处理的模糊量，模糊化包括论域的确定和隶属函数的选择，这同时也是模糊控制想要达到较好控制效果的两个关键因素。

(2)模糊推理和规则库

经过模糊化后，此时需要一些特定的规则对模糊量进行处理，这些规则称为模糊规则，整个控制系统的所有模糊规则统称为规则库，而模糊推理则是基于规则库中所有的模糊规则进行的，这使得系统能够在输入和输出之间进行模糊映射，不需要像传统PID控制器那样依赖精确的函数关系。模糊规则大多是经过专家和技术人员大量的数据和实验总结得来，呈现方式大多用表格的形式，这样为了便

于阅读，主要常见的有CRI查表法和Mamdani直接推理法，该过程也是整个模糊理论的核心。

(3)逆模糊

根据模糊规则进行推理得到模糊控制量其结果还是一个模糊信号，是一个模糊范围，由于还需要反映到实际控制中，输出给被控对象的控制量必须是明确的，所以需要最后一步反模糊化。将模糊推理的结果转化为输出控制的明确值，常见的反模糊方法有重心法、最大隶属度法、左取大和右取大法^[66]。

模糊自整定PID可以实时对PID的3个参数值进行调整，不需要人工干预调整PID参数，在控制的过程中即可完成参数整定。即使环境条件发生改变也能及时整定出新的参数使系统一直维持在稳定的工作状态，其控制流程图如图 2-5 所示^[67]。

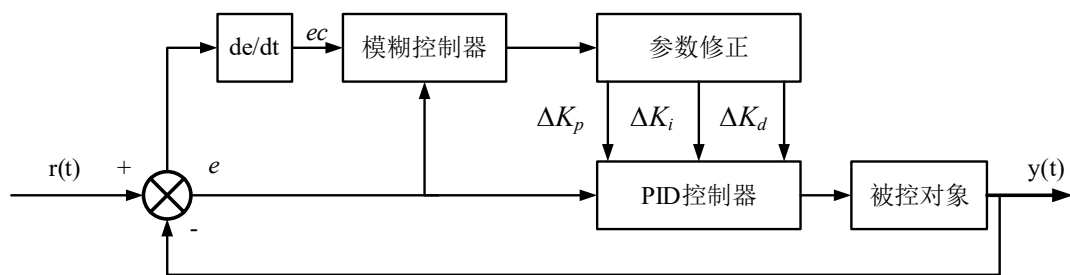


图 2-5 模糊PID控制算法原理图

传统PID控制想要实现理想的控制效果，依赖比例(P)、积分(I)、微分(D)这三个参数的整定情况，在实际操作过程中，通常需要结合系统的实际情况，不断地反复调试和优化，直至系统的响应特性符合既定的控制要求。这一过程往往复杂且耗时，因为每一次参数的调整都需要耐心等待系统的输出反馈，然后根据反馈信息再次调整参数，如此需要投入大量的时间资源和人力成本。与之相比，模糊自整定PID控制策略巧妙规避了传统PID控制中繁琐的参数整定环节。在现代工业生产开发大背景下，这一特性无疑具有很大的优势，能够显著降低时间和人力成本的投入，提高生产效率和项目推进速度。

在模糊控制体系架构中，输入变量的数量定义为模糊控制的维数。其中一维模糊控制器的结构过于简单，仅能处理单一的输入变量信息，所以很难准确地反映控制系统的动态特性，在实际应用中往往无法满足复杂工业系统对控制精度和动态响应的要求。三维模糊控制器虽然在理论上能够更为精确地描述系统的复杂

行为,但因其自身结构较为复杂,涉及到大量的计算和逻辑判断,这也导致了运算时间大幅延长。在大多数的工业场景中,除非是对控制精度有着极高要求的特殊控制系统,否则一般不会考虑采用三维模糊控制器,因为其高复杂性和长时间的运算可能会抵消掉其在控制精度上的优势,甚至可能影响整个系统的实时性。综合考虑后,最终本文选择了二维模糊控制器,二维模糊控制器在结构上既简单又高效,能够同时接收误差 e 和误差变化率 ec 两个变量,通过分析这两个变量,既能较为精准地捕捉到控制系统的动态变化趋势,又能以相对简洁的结构实现高效的控制运算。这种结构上的简洁性使得它能够与传统PID控制器能较好的融合起来,从而高效完成对P、I、D三个参数的实时整定。

在具体的参数整定流程中,首先将误差 e 和误差变化率 ec 输入到二维模糊控制器中,然后借助预先设定的比例因子和缩放因子对这些输入信息进行量化处理,再经过一系列复杂而有序的模糊推理运算,最终得到 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 这三个参数的动态调整量。与此同时,利用上述章节介绍的传统PID整定方法初步确定PID三个参数的初始值 P_0 、 I_0 、 D_0 ^[68]。需要注意的是,在此阶段并不需要对这些初始值进行精确的计算与确定,只要能够使系统产生一个大致的控制效果即可,因为后续的模糊控制器将会在这三个初始值的基础之上,依据系统的实时运行状态和动态变化情况进行进一步的精细化调整。该设计的优势在于能够在一个相对较小的范围内对PID参数进行实时动态整定,这种小范围的调整特性使得整个系统的参数不会出现大幅度的波动与变化,从而有效地避免了因参数突变而可能引发的不稳定现象^[69]。从整体效果来看,这一特性对于提高整个温度控制系统的稳定性和鲁棒性具有关键的作用。在实际的工业生产过程中,温度控制系统经常会面临各种内外部干扰因素,如环境温度的变化、负载的波动、能源供应不稳定等,具有良好稳定性和鲁棒性的控制系统能够在这些干扰因素下,依然保持稳定的控制,确保系统的输出温度始终精准地维持在设定值,从而保障生产过程的连续性、稳定性和产品质量的一致性^[70]。

2.6 本章小结

本章介绍了即热式饮水机系统的基础原理,涵盖了系统的工作原理、硬件模

块和基础控制算法等。在即热式饮水机的工作原理部分，阐述了整个系统对温度和流量的双重控制的工作流程。硬件模块阐述了系统相关部分硬件模块，包括主控单元模块、温度检测模块、流量检测模块、水泵驱动模块、加热模块、显示模块和声音提示模块。在控制算法方面，先介绍了传统PID控制原理和其整定方法，随后，在传统PID的基础上采用了模糊控制算法，对传统PID参数整定进行优化调整。

第3章 基于即热式饮水机系统PID算法的改进与实现

3.1 模糊-Smith自适应PID在即热式饮水机系统的实现

3.1.1 模糊自适应PID系统

模糊自适应PID系统实现流程如下：

(1)定义输入输出：确定控制器为二维模糊控制器，本文采用Ziegler-Nichols法和凑试法结合的方式，得出3个参数的大致初始值，其中比例系数P的初始值 P_0 设定为6，积分系数I的初始值 I_0 为0.12，微分系数D的初始值 D_0 为1.7。温度误差 e 和温度误差变化率 ec 为输入信号，为了使输入信号能够被模糊控制器更好的处理，需要通过特定的量化因子再将其输入到模糊控制器中。根据温度控制的精度范围和实际即热式饮水机的控制需求将 e 和 ec 的论域设为 $[-3,3]$ ，该论域范围可以有效覆盖即热式饮水机温度控制中可能出现的温度误差和误差变化率的情况。在输出信号方面，主要涉及到模糊控制器输出的三个重要参数，即 K_p 、 K_i 、 K_d ，它们分别对应着控制器的比例、积分和微分环节。在确定这三个参数的论域时，依据大致整定出的PID初值和实际运行过程中可能出现的上下波动情况，将 K_p 的论域设定为 $[-6,6]$ ， K_i 的论域设定为 $[-1,1]$ ， K_d 的论域设定为 $[-3,3]$ 。这种论域设定，能够使模糊控制器在输出这三个参数时，有一个合理的取值，从而实现对即热式饮水机的温度的精准控制，保障即热式饮水机的温度控制性能达到预期标准。

(2)定义模糊集合：模糊集合与传统集合的非黑即白，元素归属界限明确的特性不同，模糊集合反应的是元素属于该集合的程度。模糊集合在确立时并不是集合越多越好，虽然增加模糊集合的个数可以提高模糊控制精度但也会增加控制规则的数目，进而增加了模糊推理的计算量，使得整个控制变的繁琐，所以需根据实际的控制需求合理定义模糊集合。本文定义 $\{NB, NM, NS, Z0, PS, PM, PB\}$ 7个模糊子集，分别对应 $\{正大, 正中, 正小, 零, 负小, 负中, 负大\}$ 。

(3)隶属函数的确定：确定好论域和模糊集合后，接下来需要选择合适的隶属函数，隶属函数的值域为 $[0,1]$ ，越接近1隶属度越大，越符合实际情况。本文选

择三角型隶属函数，该函数能较好的反应系统的模糊特性，输入隶属函数误差 e 如图 3-1 所示, 输入隶属函数误差变化率 ec 如图 3-2 所示。

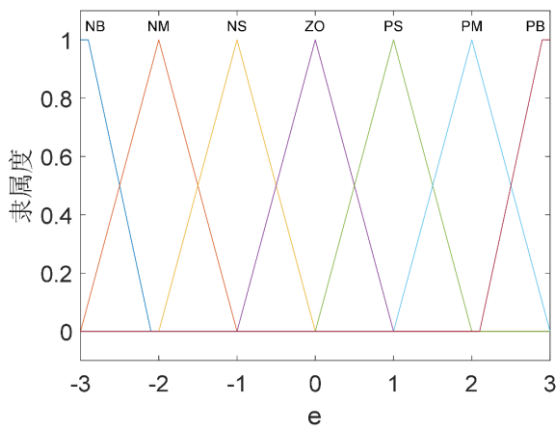


图 3-1 输入误差 e 隶属函数图

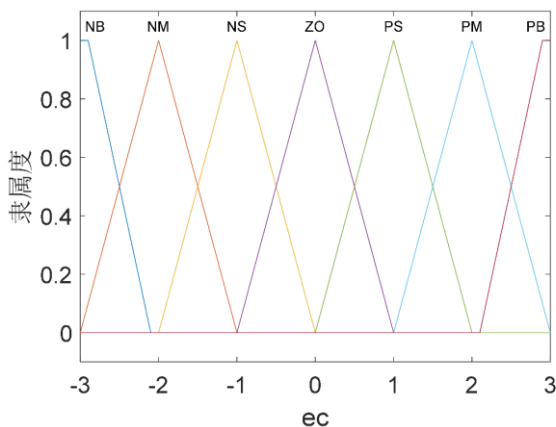


图 3-2 输入误差变化率 ec 隶属函数图

输出隶属函数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别如图 3-3、图 3-4 和图 4-5 所示。

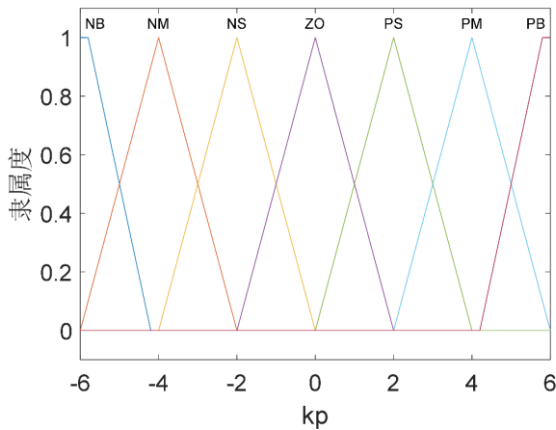
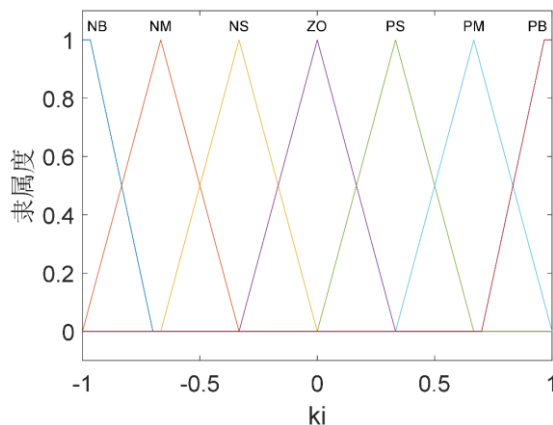
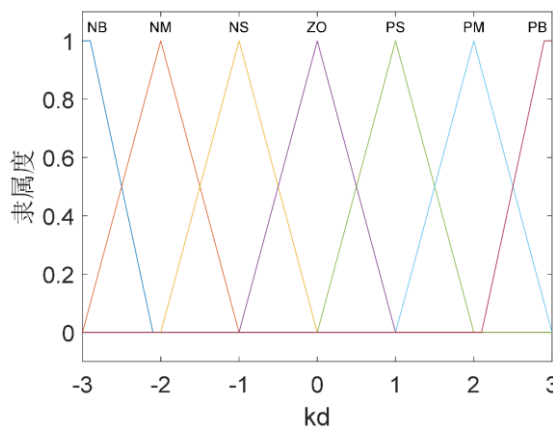


图 3-3 输出 K_p 隶属函数图

图 3-4 输出 K_i 隶属函数图图 3-5 输出 K_d 隶属函数图

(4)建立模糊规则表：常见的模糊规则使用if-and-then的条件语句描述，例如：“如果误差较高，误差变化率较高则 ΔK_p 输出较低”。该条语句翻译到对应模糊区间的条件语句为“if $e=PB$ and $ec=PB$ then $\Delta K_p=NB$ ”。每个模糊规则对应一条语句，根据专家经验和实际情况本文的三个参数每个各用到 49 条模糊语句，为了表达方便， ΔK_p ， ΔK_i ， ΔK_d 分别对应一组模糊规则表，如表 3-1、表 3-2 和表 3-3 所示^[71]。

表 3-1 ΔK_p 模糊规则

ΔK_p		ec						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3-2 ΔK_i 模糊规则

ΔK_i		ec						
e	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3-3 ΔK_d 模糊规则

ΔK_d		ec						
e	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	PS	NS	NB	NB	NB	PM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

根据表 3-1、表 3-2 和表 3-3，得到三个输出参数的模糊规则视觉图，如图 3-6 所示，该图可直观反映模糊规则之间的逻辑关系，对系统的模糊控制规则有着更为宏观上的把控。

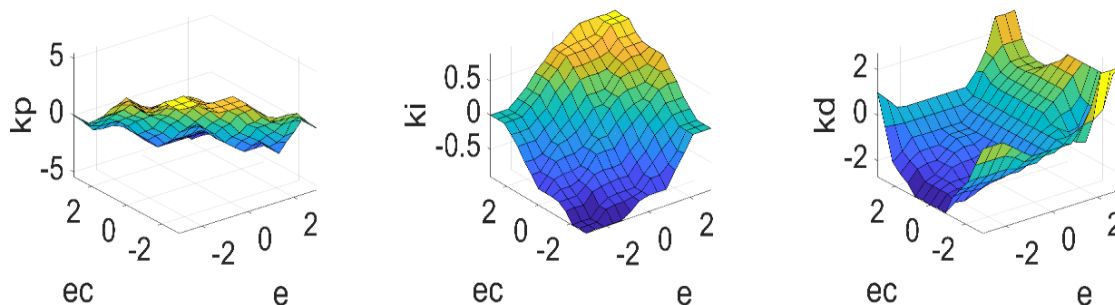


图 3-6 模糊规则视觉图

(5)逆模糊：通过上述模糊规则推理得到的参数并不能直接作用在控制系统中，最后推理结论是一个模糊集合 C^* 。在该过程中，常用的决策方法包括最大隶属度法、左取大法和右取大法，它们都是基于隶属函数中的最大值进行推导，虽然这些方法能够确定唯一的模糊元素，但在确定最终输出时，通常需要综合考虑多个因素。因此，重心法(中心化法)是一种常见的反模糊化策略，它通过计算模糊集合的重心来得到最终的输出。采用重心法后，仍然需要对结果进行量化处理，将其转换为实际物理领域中的可操作值，从而得出最终输出。

3.1.2 Smith预估算法

Smith预估控制算法对带有滞后性的控制量有良好的控制效果，尤其适配在温度控制等一些需要快速响应和精度要求高的系统中。该算法在不改变硬件结构的前提下，能够有效改善因系统滞后所引起的不稳定性和误差，具备设计灵活、抗干扰强等优点。虽然模糊PID控制可以通过模糊逻辑自动调整PID参数，但在处理具有滞后性的系统时，模糊PID控制往往难以满足工业控制对精度和稳定性的要求。温度控制系统的滞后性会导致模糊PID控制在动态响应和稳态精度上的不足，尤其是在滞后较大或系统变化较快的场合更加明显，模糊PID控制可能无法及时调整输出，从而导致误差积累和系统不稳定。为解决这一问题在模糊PID的基础上加入一个Smith预估控制器，这样可提高系统稳定性和控制精度。

Smith预估控制的核心思想是利用对控制对象滞后动态的预测进行补偿。通常，滞后性会导致控制系统反应迟钝、误差增大，尤其在温度控制这类具有明显滞后特征的系统中，滞后效应的存在会影响控制效果。Smith预估控制通过在闭环控制系统中引入一个基于滞后模型的补偿器，来补偿由滞后引起的延迟，使得控制系统能够在滞后影响尚未产生时，提前采取纠正措施^[72]。其原理为在原控制对象中引入一个 $Gp(s)(1-e^{-\tau s})$ 的补偿算法，原理图如图 3-7 所示。

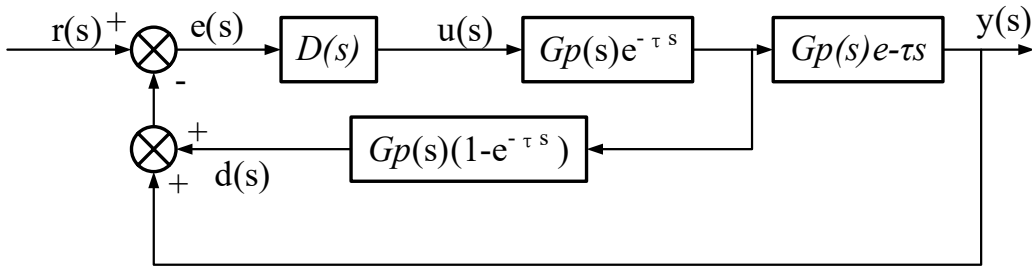


图 3-7 Smith预估算法原理图

补偿前的闭环传递函数和补偿后的闭环传递函数如下：

$$GB(s) = \frac{D(s)Gp(s)}{1 + D(s)Gp(s)} e^{-\tau s} \quad (3-1)$$

$$GB(s) = \frac{D(s)Gp(s)}{1 + D(s)Gp(s)e^{-\tau s}} \quad (3-2)$$

式(3-1)和式(3-2)对比可以看出，补偿前的 $e^{-\tau s}$ 项在分子出现，补偿后的 $e^{-\tau s}$ 项，

只在式子的分母出现，即系统的延时特性在整个环回路之外，不会影响控制系统的整体稳定性。具体表现为控制作用在时间上延迟了一个时间 τ ，控制系统的所有指标都与特性为 $Gp(s)$ 的对象完全相同。如此就消除了纯滞后部分对整体控制系统的影响，使得带有纯滞后控制量的控制系统控制精度得到提升^[73]。

因此，模糊-Smith自适应PID控制器就是在模糊PID控制的基础上并接一个Smith预估控制器，这样可在保证自整定的同时提高控制精度，减少温度延时带来精度上的影响，其原理结构如图 3-8 所示。

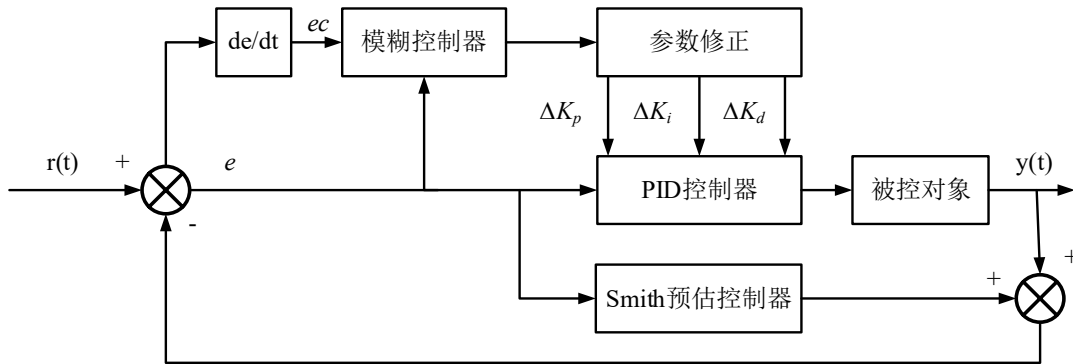


图 3-8 模糊-Smith自适应PID控制原理图

3.1.3 模型搭建

为了模拟即热式饮水机温度控制系统的性能，在这之前需要对其建立用于仿真的数学模型。在建立即热式饮水机仿真模型时需要考虑其机身高度和宽度、加热过程、出水控制、能源消耗、材料特性等，最主要的是其工作原理即能否模拟出其加热过程和出水情况，这直接关系到模型是否能够反映饮水机的基本性能。因此在建立数学模型时要突出主要因素，温度控制模型通常采用一阶惯性再加上纯滞后的数学模型来表达，其数学表达式如下式：

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s} \quad (3-3)$$

式中， K 为系统稳态增益， T 为时间常数， τ 为系统纯邂逅时滞时间。

通过实验与测试再结合MATLAB的系统识别工具箱拟合给出即热式饮水机系统的传递函数为：

$$G(s) = \frac{10}{55s + 1} e^{-\tau 0.3} \quad (3-4)$$

MATLAB是一款功能强大且全面的计算软件，是科学研究与工程设计领域的常用软件，其具备高效且精确的数值计算能力，能够迅速处理复杂的数学运算。强大的数据分析功能可对海量数据进行深入挖掘与解析，提取有价值的信息。卓越的仿真建模功能则为各类系统的模拟与优化提供有力支持，并且以直观、清晰的可视化方式呈现结果，助力研究人员更好的理解和把握数据及模型的内在规律。SIMULINK作为MATLAB中的重要组成部分，是一个基于图形化建模的仿真平台，在这个平台上，用户能够摆脱繁琐的代码编写过程，通过简洁直观的图形化界面轻松搭建仿真系统。随着模糊控制的逐步发展，越来越多的研究者从事相关研究并应用到实际领域，为了方便研究者的研究需求，MathWorks公司将模糊逻辑工具箱Fuzzy Logic加入到MATLAB中。模糊逻辑工具箱具备丰富多样的功能模块，涵盖了从模糊集的定义，隶属度函数的构建到模糊规则的制定与编辑，再到系统的性能分析与优化等一系列环节，为创建和深入分析模糊逻辑系统提供了完备的工具链，基于MATLAB的模糊-Smith自适应PID系统模型搭建流程如下：

(1)定义输入输出：在MATLAB的主操作界面中，通过输入“Fuzzy”指令，即可打开模糊控制工具箱(Fuzzy Logic Desingner)进行模糊控制器的编辑操作，如图 3-9 所示。进入工具箱选择建立上述章节介绍的二维模糊控制器，此架构定义双输入变量，即误差 e 以及误差变化率 ec ，同时设定三输出变量，分别为 K_p 、 K_i 、 K_d 。在逆模糊选项(Defuzzification)中选择重心法(Centroid)作为本系统的逆模糊方法。重心法通过计算模糊输出的质心来确定具体的控制输出，这是一种广泛应用于模糊控制系统中的经典方法，能够较好地平衡系统的响应速度与稳定性。

(2)定义隶属函数：首先，双击模糊控制器界面中五个输入输出变量的图标区域，进入各自的输入输出编辑界面。以输入变量误差 e 为例，如图 3-10 所示，在隶属函数类型选项(Type)中选择三角形隶属函数(Triangular Membership Function, 简称trimf)，在论域设置选项(Range)设置输入 e 的论域为-3 到 3。初始的设置界面默认只生成三个模糊子集，根据上述章节介绍,本系统共设计了 7 个模糊子集分别为：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z0)、正小(PS)、正中(PM)和正大(PB)。因此，需要额外增加四个模糊子集，并在每个子集的命名选项(Name)中，逐一为其修改对应的名称。

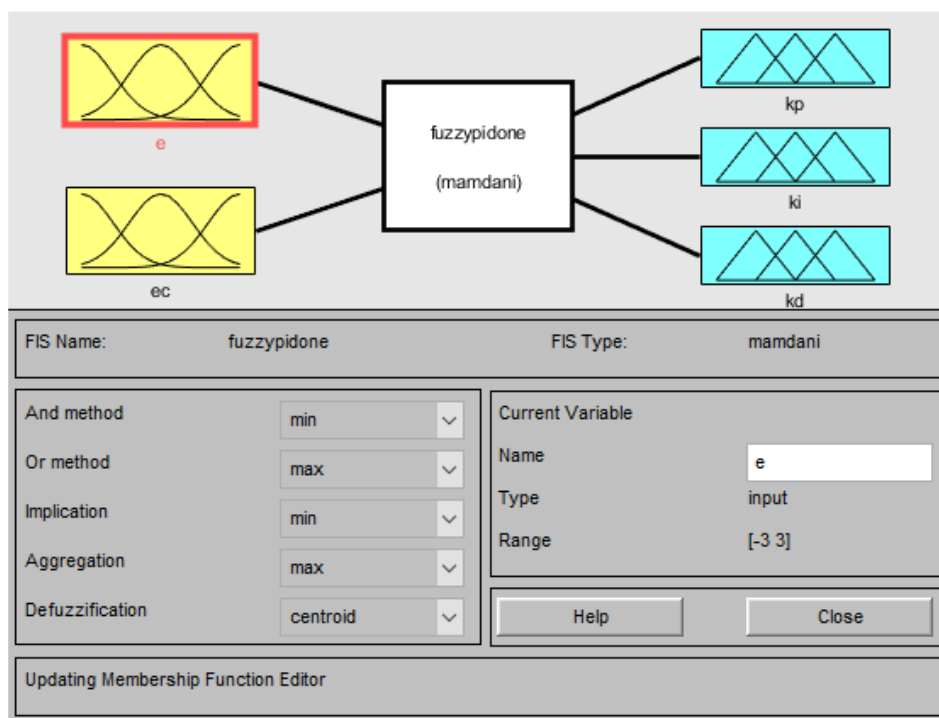


图 3-9 输入输出操作页面图

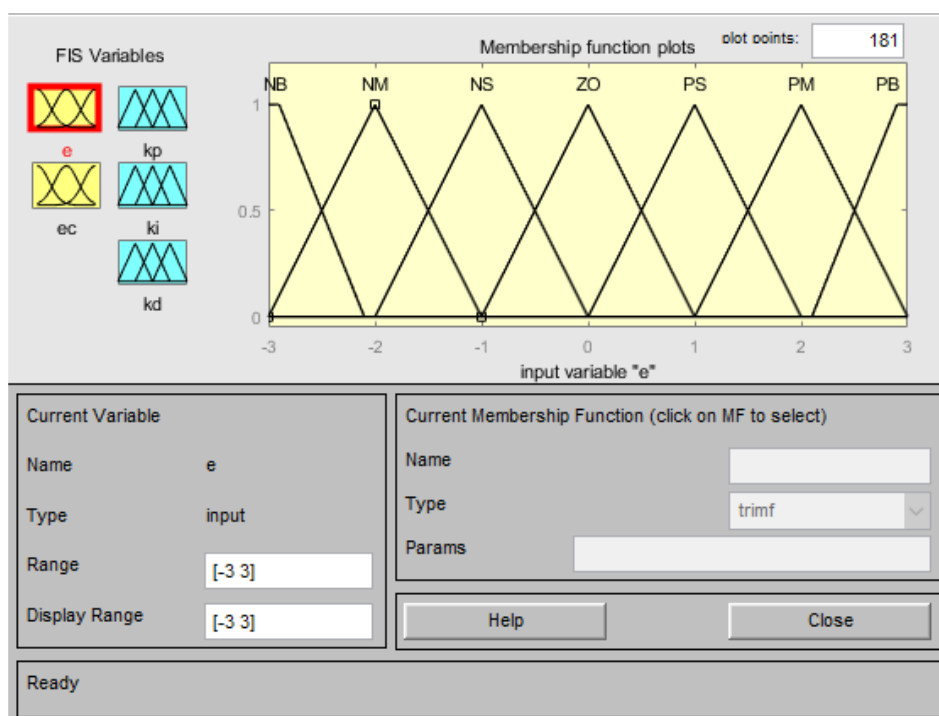


图 3-10 隶属函数操作页面图

(3)编辑模糊规则：在模糊控制器设计界面中，点击中央的白色图标，进入模糊规则编辑界面。值得注意的是，MATLAB模糊控制工具箱默认采用的是Mamdani推理法(Mamdani Inference System)，因此无需进行额外选择，系统将自动使用此推理方式进行模糊推理。进入模糊规则编辑界面后，在关系选项

(Connection)中选择“and”运算符，表示误差 e 和误差变化率 ec 是“与”的关系。根据上述章节介绍的模糊规则表，通过添加规则选项(Add rule)分别录入 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊规则共 49 条，操作页面如图 3-11 所示。

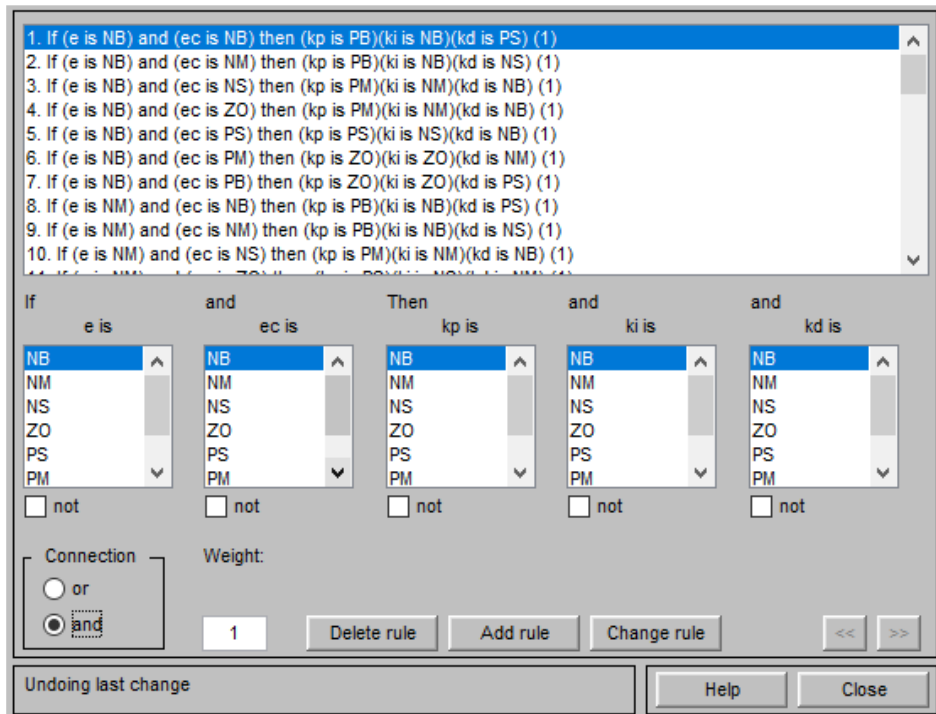


图 3-11 模糊规则操作页面图

(4)基础算法模型搭建：上述步骤全部完成后，模糊控制器编辑完成定义为“Fuzzy Controller1”便于后续仿真使用，返回MATLAB主界面，点击Simulink图标，进入Simulink模型仿真环境。在Simulink中，用户可以构建并仿真即热式饮水机的控制模型。即热式饮水机系统基础算法仿真模型在Simulink界面中如图 3-12 所示。

图 3-12 中展示了三种不同控制算法的仿真模型，分别为传统PID控制、模糊自适应PID控制以及模糊-Smith自适应PID控制。从上到下，依次排列这三种控制算法的仿真模型，且所有控制算法的输出波形汇总至一个示波器中，便于对比分析。在仿真过程中，调用了先前设计的模糊控制器，并将阶跃输入信号设为 1，仿真时间设置为 20 秒。通过模拟这三种控制策略，对即热式饮水机模型的控制效果进行对比。仿真结果显示了每种控制方法在给定输入信号下的系统响应，直观对比三种控制算法在控制精度、响应速度和稳定性等方面的优缺点。这些仿真结果将有助于进一步评估模糊控制与传统PID控制在即热式饮水机系统中的应

用效果，尤其是模糊自适应PID和模糊-Smith自适应PID控制策略在动态响应和鲁棒性方面的优势。

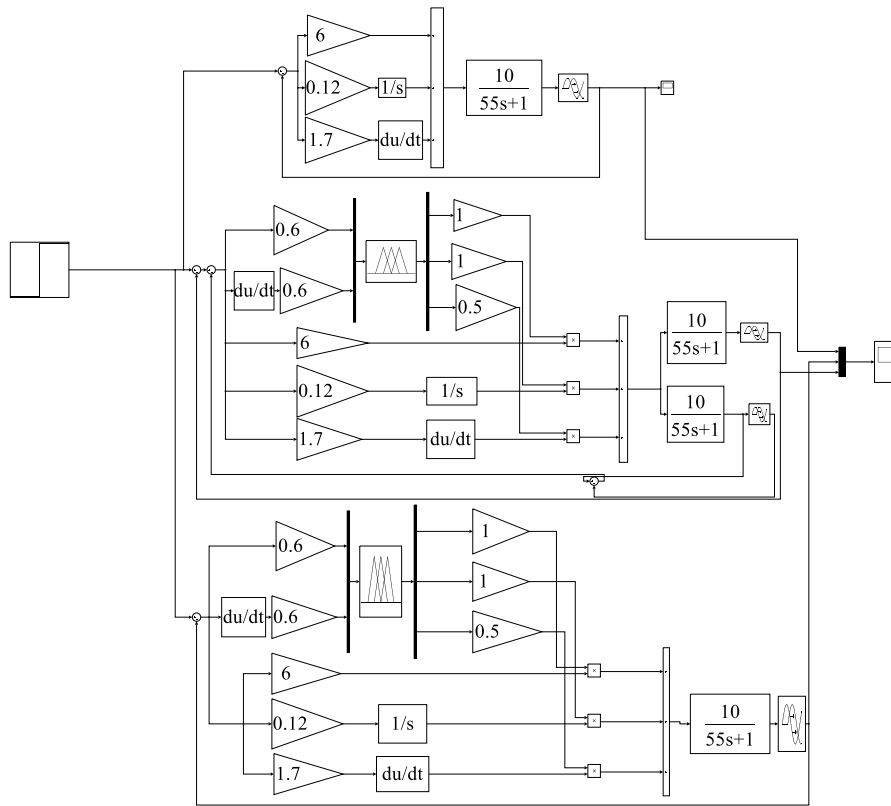


图 3-12 即热式饮水机系统仿真模型图

3.1.4 实验结果分析

即热式饮水机的三种基础算法仿真结果如图 3-13 所示，从图中可以看出，传统PID控制已经展现出较好的控制效果，系统稳定性良好，没有出现明显的超调或波动。这也是传统PID控制器在工业应用中未被淘汰的原因之一。由于其控制效果稳定和控制原理简单易懂，传统PID在许多场景中仍然广泛应用。然而，在加热时间和控制自动化方面，传统PID失去优势，特别是当系统需要多组PID参数来应对不同工况和外部环境因素的变化导致控制量波动时，传统PID的调节方式显得较为繁琐。若要针对每一组工况进行逐一调参，势必会消耗大量的时间和人力成本。此外，传统PID算法是三种控制方法中加热时间最长的，这使得其在即热式加热设备上不太适用。相比之下，模糊PID控制在参数整定上具有明显优势，它能够实现自适应调节，进而适配更加复杂的控制需求。与此同时，模糊PID

在加热时间上表现较为优秀，是三种算法中最快的。但是，模糊PID控制在稳定性方面相较于传统PID和模糊-Smith自适应PID明显不足。从图中可以观察到，模糊PID在开始加热时会出现明显的超调现象，这会显著影响控制精度。

模糊-Smith自适应PID控制则解决了超调的问题。通过引入Smith预估控制器，模糊-Smith自适应PID不仅避免了超调现象，同时也继承了模糊PID控制器自适应的优势，该算法能够根据系统的实际需求自适应调整控制参数，且在加热时间上明显快于传统PID控制。通过Smith预估控制的补偿，系统响应的稳定性得到了显著提升，而且整体控制性能在各个方面均优于传统PID和单纯的模糊PID。综合来看三种算法中模糊-Smith自适应PID控制效果最好，最能满足即热式饮水机装置的控制要求，保证了控制的稳定性的同时又缩短了加热时间，实现自适应调参。因此，模糊-Smith自适应PID控制是这三种算法中最适合应用于即热式饮水机设备的控制算法。

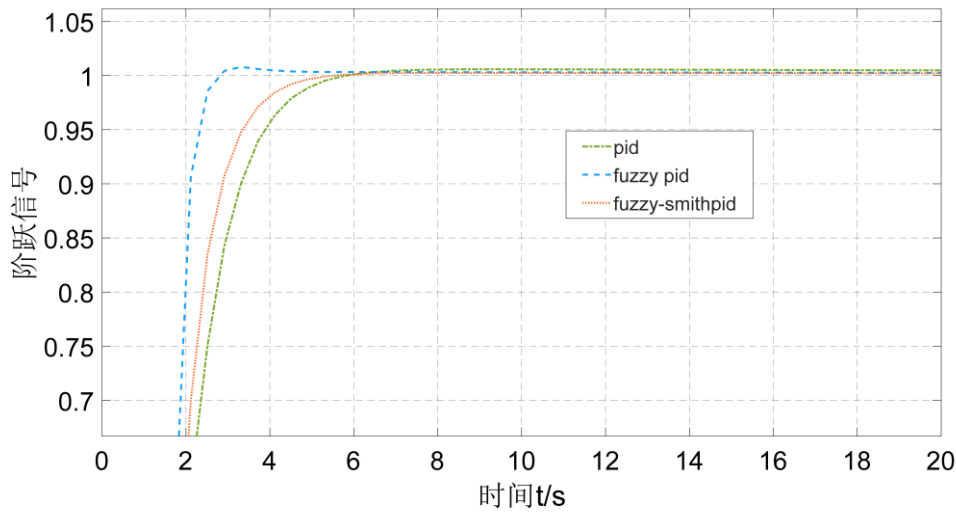


图 3-13 模糊-Smith自适应PID仿真结果图

3.2 变论域模糊-Smith自适应PID在即热式饮水机系统上的实现

3.2.1 变论域算法

模糊控制要想获得较为稳定的控制效果，论域的选择至关重要，它决定了模糊控制系统对不同输入响应的灵敏程度，一个合适的论域能够确保控制系统在不同工况下都能够实现精确和稳定的控制。过大的论域范围会导致系统响应出现超

调、震荡等不稳定现象。而过小的论域范围则可能导致系统无法响应误差，或者在稳态时无法达到理想的精度，导致控制时间过长、响应速度较慢等问题。

论域选择也是一项较为繁琐的工作，需要不断的测试或实验才能选择到合适的论域，控制条件或外界环境产生变化时，耗费大量时间选择的论域可能也不再适配，故在搭建模糊控制系统的初期，往往论域选择都不会那么精确，均需要根据后续大量实验和测试进行调整。模糊控制通常提升精度的方法是增加模糊集合和模糊规则，但过多的模糊规则会导致系统过于复杂，增加不必要的硬件成本。这样不仅会给系统的运行带来负担，还可能需要配备更加高端、昂贵的硬件成本，如此一来反而会加大控制难度^[74]。

鉴于传统模糊控制在面对工业温度控制的严苛要求所暴露出的局限性，为了降低论域选择难度，提高模糊控制的效果和自适应性，本文通过变论域理论优化上述这些问题，旨在对传统模糊控制器进行升级。变论域理论的核心在于能够根据系统的运行状态以及控制需求的变化动态调整论域范围，通过这种动态调整的方式，为工业生产中的温度控制等诸多应用场景带来更为卓越的控制性能与更高的可靠性。变论域理论原理图如图 3-14 所示。

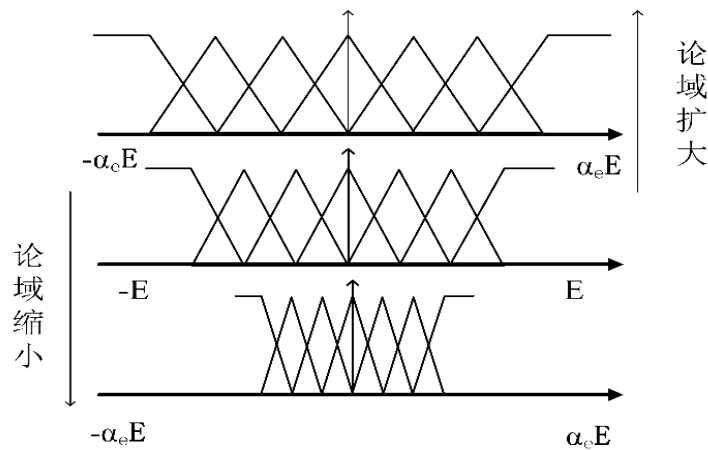


图 3-14 变论域原理图

从图 3-14 可以看出，隶属函数的缩放呈现出一致的等比规律，基于这一规律进而引入伸缩因子这一核心概念。在模糊控制系统的架构里，输入环节存在量化因子，而输出环节则配备有比例因子。当把这些输入的量化因子与输出的比例因子和伸缩因子进行运算时，便能达成对论域的等比伸长或者压缩处理。

在初始阶段，倘若系统检测到实际温度与预设目标温度之间存在着较大的偏

差，此时伸缩因子便会依据既定的算法启动相应机制，使得论域开始等比伸长。这一变化的实际意义在于，原本相对狭窄且局限的控制范围得到了大幅度的拓展与延伸，如此一来，模糊规则就如同被赋予了更广阔的“施展空间”，能够在更为宽泛的区间内充分发挥其调控作用。它可以更为全面的对温度进行调整与干预，促使温度能够以较快的速度朝着预设的目标值靠近并趋近。而当温度在控制作用下逐渐接近目标值，整个系统开始趋于稳定运行状态时，伸缩因子又会再次依据系统的实时状态信息，驱动论域进行等比压缩。这一过程使得模糊规则的作用范围逐步缩小并聚焦于一个更小、更精准的区间内。通过这种方式，能够极为有效地避免温度在接近目标值时出现不必要的波动或者超调现象，从而进一步提升了控制的精度与稳定性。这种基于伸缩因子实现的动态论域调整机制，赋予了模糊控制系统卓越的适应性和灵活性。无论是面对大幅度的温度偏差调整需求，还是高精度的稳态控制要求，该机制都能展现出良好的性能表现，有力地保障了工业生产过程的效率性与精准性。

变论域理论的核心是伸缩因子的选择，如何确定合适的伸缩因子则是整个变论域模糊自适应控制PID控制器的关键。常见的选择伸缩因子的方法是通过函数来表示，选择合适的函数，改变函数中参数的值，确定合适的缩放因子。定义函数为 X ，论域为 $[-E, E]$ ， $\alpha(X)$ 为论域的随机伸缩因子， $\alpha(X)$ 须满足如下 5 个特定性质：

(1)单调性:函数在 $[0, E]$ 上是严格单调递增的。

(2)对偶性: $\forall x \in R$ ，满足 $\alpha(x) = -\alpha(-x)$ ，即论域关于中心对称，论域在等比伸缩的同时两边的伸缩比例必须相一致。

(3)非零性:当 $x=0$ 时， $\alpha(0)=\varepsilon$ ， ε 为足够小的正数，为避免隶属函数产生 0 值，影响控制效果故不能取到零点。

(4)协调性: $\forall x \in X$ ， $(|x|) \leq \alpha(x)E$ ，确保伸缩因子的变化不影响模糊PID的基本论域。

(5)正规性: $\alpha(\pm E)=1$ 。

在当下的学术研究与工程实践领域中，关于伸缩因子函数的确定，尚未形成一套精准、清晰且被广泛认可的规范化规则体系^[75]。大多还是采用人工凑试法，这种方法虽然在一定程度上能够依靠研究人员的经验，不断尝试来探索合适的伸

缩因子，但它无疑是一种较为繁琐且效率低下的途径，因此并未从根本上解决论域选择的难度和提高控制的自适应性。对此本文在伸缩因子的选择再次选择引入模糊控制，通过几个简单的模糊规则对伸缩因子进行在线调整，在温度控制领域，通常需要应对较为宽泛的温度变化范围，从低温度到高温度的跨度可能非常大，这使得温度控制面临着巨大的搜索空间和复杂的不确定性。而在本文所探讨的情境下，由于伸缩因子的范围相对有限，所以在经过相对较少的次数尝试后，便能够以相对较高的效率确定出一个合理的伸缩因子论域范围^[76]。

3.2.2 变论域模糊-Smith自适应PID系统

与模糊PID控制器相同，变论域模糊PID控制器也包含模糊化，模糊推理，逆模糊三个部分，然而模糊化环节在复杂程度与上述章节介绍的模糊PID控制器形成了鲜明的对比，它在结构设计、逻辑关联以及运算规则等多个维度上都更为简单便捷，这使得伸缩因子的确定不会太复杂。变论域模糊自适应PID控制系统如图 3-15 所示。

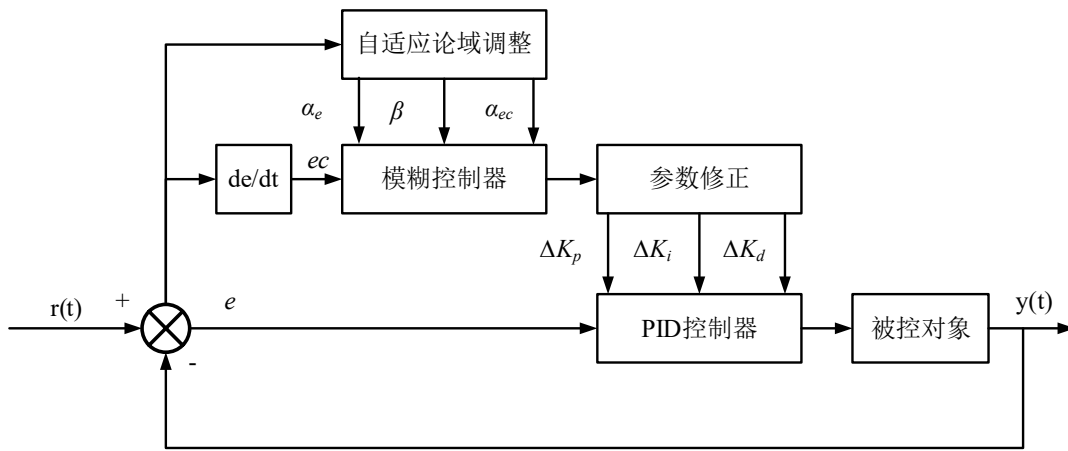


图 3-15 变论域模糊自适应PID控制原理图

模糊化阶段分别使用三个双输入的模糊控制器，输入量同样为误差 e 和误差变化率 ec ，模糊推理阶段采用Mamdani模糊推理法，与上述模糊控制器设定不同的是，伸缩因子调节论域为 $[0,1.2]$ ，模糊子集定义为 $\{CB, CM, CS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，分别代表 $\{大幅度压缩, 中度压缩, 轻度压缩, 保持不变, 轻度伸张, 中度伸张, 大幅度伸张\}$ 。逆模糊阶段的输出量为整定后的量化因子和比例因子，两个作用于量化因子 K_e 和 K_{ec} 对输入进行调整，一个作用于比例因子 K_u

，对输出进行调整。量化因子 K_e 负责对输入的误差 e 进行合理的量化，使其能够以一种更为适合系统内部运算处理的形式参与到后续的控制流程中。而量化因子 K_{ec} 则针对误差变化率 ec 执行相同的量化操作，通过对这两个输入量的量化处理，系统能够更为有效地提取其中所蕴含的信息，从而为控制决策提供更为可靠的数据支持。另外，比例因子 K_u ，它主要作用区域在系统的输出环节，负责对输出量进行调整^[77]。输入伸缩因子 α_e 与输入误差 e 和误差变化率 ec 的模糊规则如表 3-4 所示。

表 3-4 α_e 模糊规则

α_e	e	ec						
		CB	CM	CS	Z0	PS	PM	PB
e	CB	PB	PB	CM	CB	CM	CM	PB
	CM	PB	PM	CS	CB	CB	CS	PB
	CS	CM	CS	PB	Z0	Z0	CS	CS
	Z0	CM	CM	Z0	Z0	PM	CB	CM
	PS	CM	CM	CM	Z0	PM	PB	PB
	PM	PB	CS	CS	CM	CM	Z0	PM
	PB	PM	PM	PS	PM	PS	PS	PB

输入伸缩因子 α_{ec} 与输入误差 e 和误差变化率 ec 的模糊规则如表 3-5 所示。

表 3-5 α_{ec} 模糊规则

α_{ec}	e	ec						
		CB	CM	CS	Z0	PS	PM	PB
e	CB	PB	PB	CM	CB	CM	CM	PB
	CM	PB	PM	PM	CB	CB	CS	PB
	CS	CM	CS	PB	Z0	Z0	CS	CS
	Z0	CM	Z0	Z0	Z0	PM	CB	CM
	PS	CM	CM	CM	Z0	PS	PM	PM
	PM	PB	CS	CS	CM	CM	Z0	PM
	PB	PB	PM	PS	PM	PS	PS	PB

输出伸缩因子 β 与输入误差 e 和误差变化率 ec 的模糊规则如表 3-6 所示。

表 3-6 β 模糊规则

β	e	ec						
		CB	CM	CS	Z0	PS	PM	PB
e	CB	PB	PB	PS	CS	CM	CM	CB
	CM	PB	PS	PS	Z0	CS	CS	CS
	CS	PB	PM	PS	PS	CM	CS	Z0
	Z0	PS	PM	PB	CB	PB	PM	PS
	PS	Z0	PS	CM	PS	PS	PM	PB
	PM	CS	CS	CS	Z0	PS	PS	PB
	PB	CB	CM	CM	CS	PS	PB	PB

将变论域思想与Smith预估控制方法相结合，得到一种变论域模糊-Smith自适应PID温度控制算法。在这一算法中，首先基于变论域模糊控制策略，通过对

论域的动态调节，简化论域的选择同时提高系统的控制鲁棒性。然后，结合Smith预估控制器应用于控制系统中，以补偿系统中的时间滞后效应，进而提高控制精度和响应速度。该方法能够在保证模糊PID自整定和适应性控制的同时，有效降低由温度滞后引起的控制误差，提高温度控制系统的整体性能，其原理结构图如图 3-16 所示。

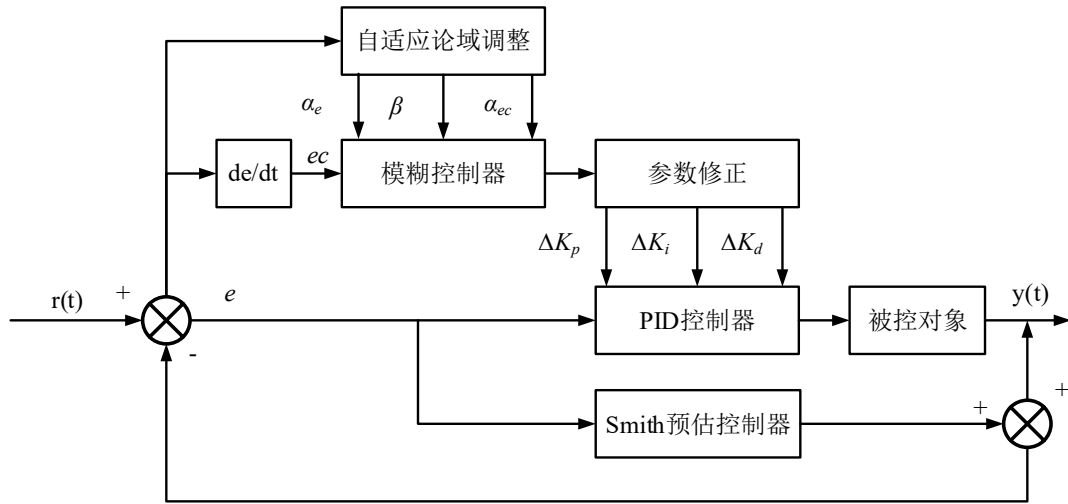


图 3-16 变论域模糊-Smith自适应PID控制原理图

3.2.3 模型搭建

在上述章节搭建完成基础模型后，由于控制系统需要适应变论域的要求，因此必须重新设计并实现一个新的模糊控制器。为此，我们重复前述步骤，构建第二个模糊控制器，并将其命名为“Fuzzy Controller2”。与上述步骤类似，设置其输入和输出变量。将变论域模糊控制器的输入定义为误差 e 和误差变化率 ec ，输出为输入伸缩因子 α_e ，输入伸缩因子 α_{ec} ，输出伸缩因子 β 。隶属函数和模糊推理方法与“Fuzzy Controller1”相同，选择三角形隶属函数和Mamdani模糊推理法，逆模糊方法同样选择重心法。然而，随着论域范围的变化，我们将该模糊控制器的论域范围设定为 $[0,1.2]$ ，重新定义新的模糊子集分别为：大幅度压缩(CB)、中度压缩(CM)、轻度压缩(CS)、保持不变(ZO)、轻度伸张(PS)、中度伸张(PM)和大幅度伸张(PB)。完成该模糊控制器的设计后，进入Simulink界面并搭建“Fuzzy Controller2”的仿真模型。并将该模型封装为子模块，便于在系统中进行复用。封装后的模糊控制器模型图如图 3-17 所示。

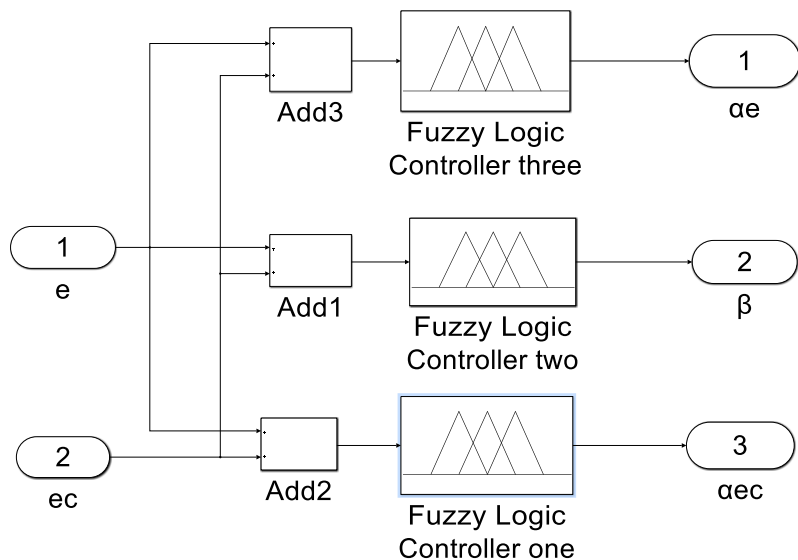


图 3-17 变论域模糊控制器仿真模型图

在变论域模糊控制器的系统封装完成后，其输出的 α_e 和 α_{ec} 分别与模糊控制器中的量化因子 K_e 和 K_{ec} 进行连接。与此同时，输出的 β 与模糊控制器中的比例因子 K_u 相连接。连接完成后，在这一框架下分别建立了变论域模糊自适应PID算法和变论域模糊Smith自适应PID算法的仿真模型。变论域模糊自适应PID仿真模型如图 3-18 所示。

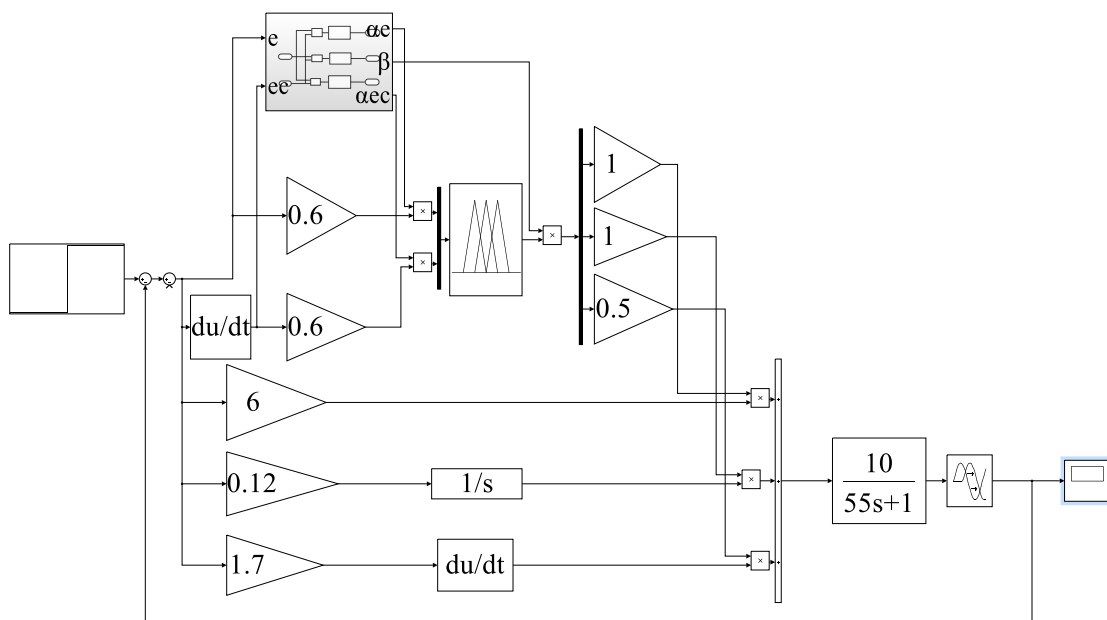


图 3-18 变论域模糊自适应PID仿真模型图

变论域模糊-Smith自适应PID仿真模型图如图 3-19 所示：

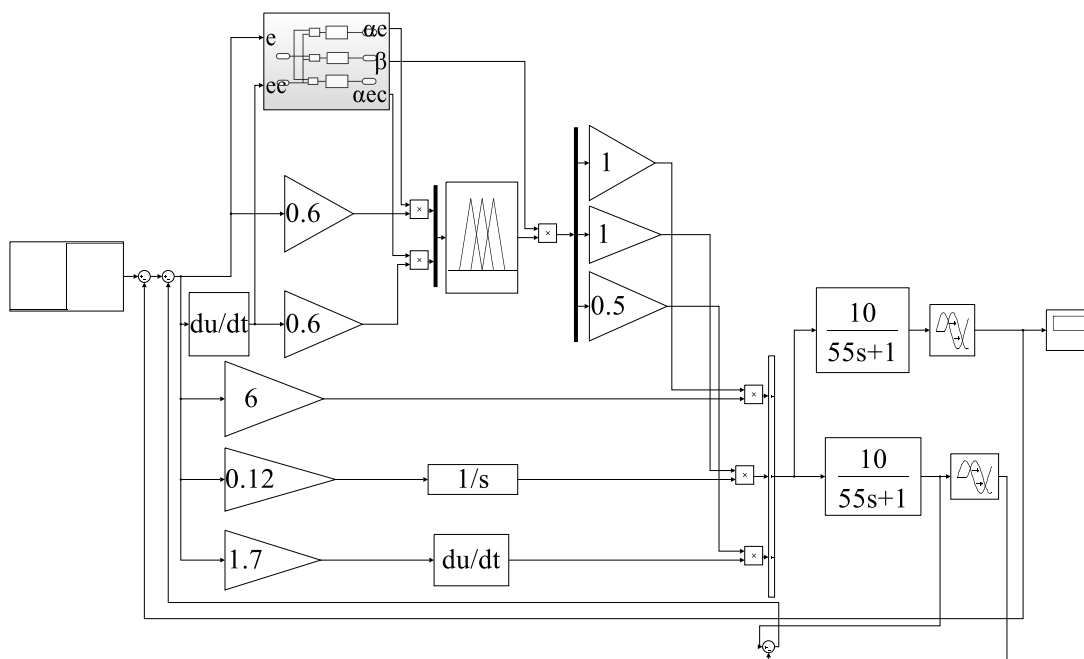


图 3-19 变论域模糊-Smith自适应仿真模型图

3.2.4 实验结果分析

将上一章节仿真效果最好的模糊Smith自适应PID算法为参照，同样设置仿真时间为 20 秒，阶跃信号为 1 进一步对比了变论域模糊自适应PID控制算法和变论域模糊Smith自适应PID控制算法的仿真结果，具体效果如图 3-20 所示。

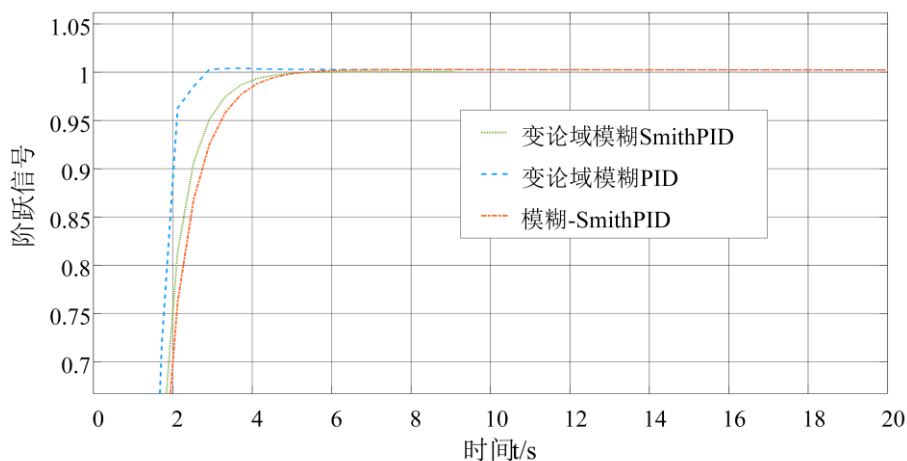


图 3-20 变论域模糊-Smith自适应PID仿真结果图

从图 3-20 中可以观察到，与上一章节的仿真结果相似，在未加入Smith预估控制策略时，变论域模糊自适应PID系统响应仍然会出现超调和波动(蓝色曲线所

示)。然而,通过引入Smith预估算法时,系统超调量得到了明显减小,并且系统输出的波动幅度相对较小,表现出更为平稳的响应特性(绿色曲线所示)。这表明,变论域模糊-Smith自适应PID控制算法在调节过程中具有更优的鲁棒性和稳定性,相较于单纯的变论域模糊PID控法,其超调现象得到了有效抑制。因此,效果最为理想的是变论域模糊Smith自适应PID控制算法,该算法在仿真过程中不仅成功避免了超调和波动的产生,而且其系统响应速度明显提高,同时控制精度也得到提升。与单纯的模糊Smith自适应PID算法相比,变论域模糊Smith自适应PID算法在动态响应性能和稳态控制精度方面均表现出更优的控制效果。

3.3 本章小结

本章介绍了基于即热式饮水机系统的PID算法改进与实现。首先,针对模糊PID算法中温度滞后性对控制性能的影响,引入Smith预估控制进行优化,提高控制表现。接着,搭建了传统PID、模糊PID和模糊-Smith自适应PID三种控制算法的即热式饮水机系统仿真模型。仿真结果表明,模糊-Smith自适应PID的控制在三算法中表现最佳。其次,针对模糊PID控制精度和论域选择复杂的问题,引入变论域理论对模糊PID进行优化。同样搭建了模糊-Smith自适应PID、变论域模糊PID和变论域模糊-Smith自适应PID三种算法的系统仿真模型。仿真结果表明变论域模糊-Smith自适应PID在模糊-Smith自适应PID的基础上进一步提升了控制精度和响应速度。同时变论域的引入有效解决了模糊PID论域选择困难,使得模糊PID应用复杂的问题得到改善。

第4章 即热式饮水机系统软件设计

4.1 系统软件设计概述

软件控制程序的编写是即热式饮水机系统正常运行的核心部分。本系统的控制程序使用C语言编写，并采用模块化设计和子程序调用结构，在一定程度上提高了软件程序的可读性，便于后期调试和维护。软件程序的开发环境基于Keil Software公司推出的Keil MDK嵌入式软件开发平台。该平台集成了Keil μ Vision集成开发环境，提供了包括项目管理、源代码编辑、编译设置、下载和调试以及模拟仿真等一系列功能，大幅度提高了开发效率。

Keil MDK所提供的编辑器有着出色的跨平台兼容性和直观的用户界面，较大提升了工程人员的工作效率。与此同时，Keil MDK支持多种编译器，并且可以为不同的硬件架构进行优化，工程人员能够根据不同的项目要求，可以灵活配置编译设置，进一步加快了开发进度。此外，通过自动化代码生成和模板使用，该平台环境可以有效减少一些软件上的低级错误，减少程序编写的工作量。Keil MDK平台还兼容了很多微控制器的型号，基本覆盖市面上的主流的嵌入式平台，包括ARM系列处理器、8051 系列以及C51 系列微控制器等，为各种类型的嵌入式开发提供了很大的便利。因此本系统选择采用Keil MDK的环境进行软件编写和开发。

4.2 主程序设计

主程序模块是整个软件系统的核心部分，负责对整个系统程序的框架搭建和相关子程序的调用和配置。程序开始时会根据不同的使用场景，调用相关子程序，例如蜂鸣器、温度采集、控制算法计算等相关模块，这些子程序模块都以单独封装的形式存在。调用之后，初始化相关信息，首先系统会采集当前温度和流量的信号值，通过两种不同的控制算法对信号进行处理，两种控制策略相互配合，温度控制作为主控制，流量控制作为辅助控制。控制算法计算完成后，温度和流量模块各自生成对应的PWM波形，共同调节最终的输出。此时，系统将更新当前

的温度和流量数据状态，并将实时数据重新反馈给控制算法。如果当前温度值没有达到设定的目标温度，控制算法将结合反馈回来的数据继续调整输出，直到达到设定的目标值才会结束流程。主程序流程图如图 4-1 所示。

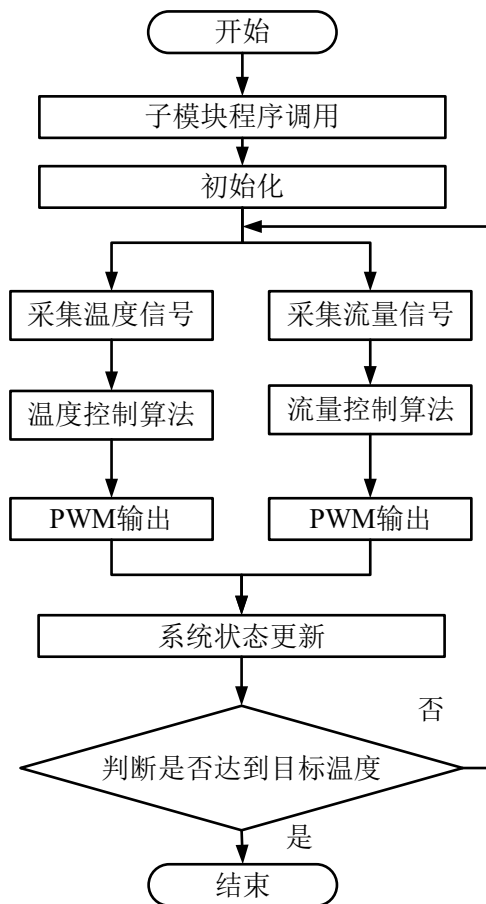


图 4-1 主程序设计流程图

4.3 水流量程序设计

水流量的控制程序采用的是传统PID控制算法，水流量程序开始时进行初始化的相关环节。之后，通过流量传感器采集到流量信号，通过A/D通道进行数据处理转换为数字信号。最后，通过传统位置式PID算法计算出相应的PWM波形信号输出,从而控制水泵。整段程序用于辅助调节即热式饮水机系统，提高温度控制的精度和稳定性。PWM是一种在固定周期内，通过占空比来灵活调节输出功率的方波信号，系统通过PID控制算法计算出不同的PWM值，然后通过定时器来输出不同的占空比，进而达到对水流的控制调节。水流量控制程序流程图如图 4-2 所示。

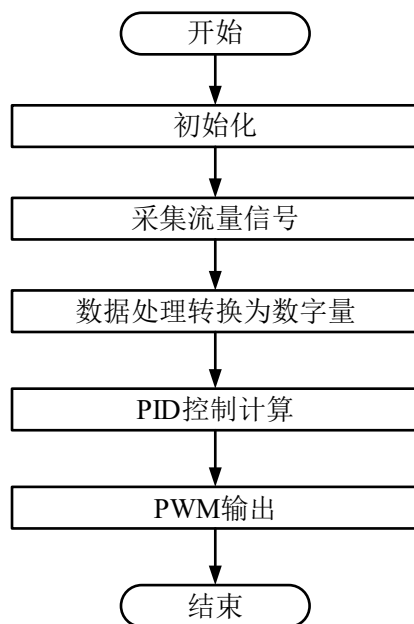


图 4-2 水流量控制程序设计流程图

4.4 控制算法程序设计

系统采用上述章节介绍的变论域模糊-Smith自适应PID算法进行温度控制，以优化即热式饮水机系统的控制性能。控制算法程序开始时进入程序进行初始化相关配置。首先，温度控制算法策略会设定PID控制器的初始参数值，然后通过实时采集控制对象的温度值，计算与设定目标值的误差 e 及其误差变化率 ec 。接着，通过Smith预估程序算法来预测系统的动态响应，将计算好的误差 e 和其误差变化率 ec ，通过Smith预估算法计算补偿后的误差 e 和误差变化率 ec 。经过补偿后的误差 e 和误差变化率 ec 再被输入到变论域模糊PID控制算法程序中，变论域模糊PID控制算法程序通过内置的模糊规则库自动调整模糊控制的论域范围，从而实现更加精确的温度调节。随后，模糊控制会推理出PID三个参数的调整量，与初始PID值相叠加，根据模糊推理得出的调整量，系统会实时修改PID控制器的三个参数。具体而言，三项PID参数(K_p 、 K_i 和 K_d)将根据推理结果进行动态调整，从而达到自适应优化控制的目的。最后，根据叠加后的PID控制参数计算得到PID的输出值，并进一步生成PWM波形，通过调整定时器输出的占空比，从而控制即热式饮水机的加热功率，实现对水温的动态调节。此时，判断是否达到目标温度，如果达到则程序结束，否则更新当前状态返回到计算误差 e 和误差变化率 ec 这一

环节，直到达到目标温度结束程序。控制算法程序流程图如图 4-3 所示。

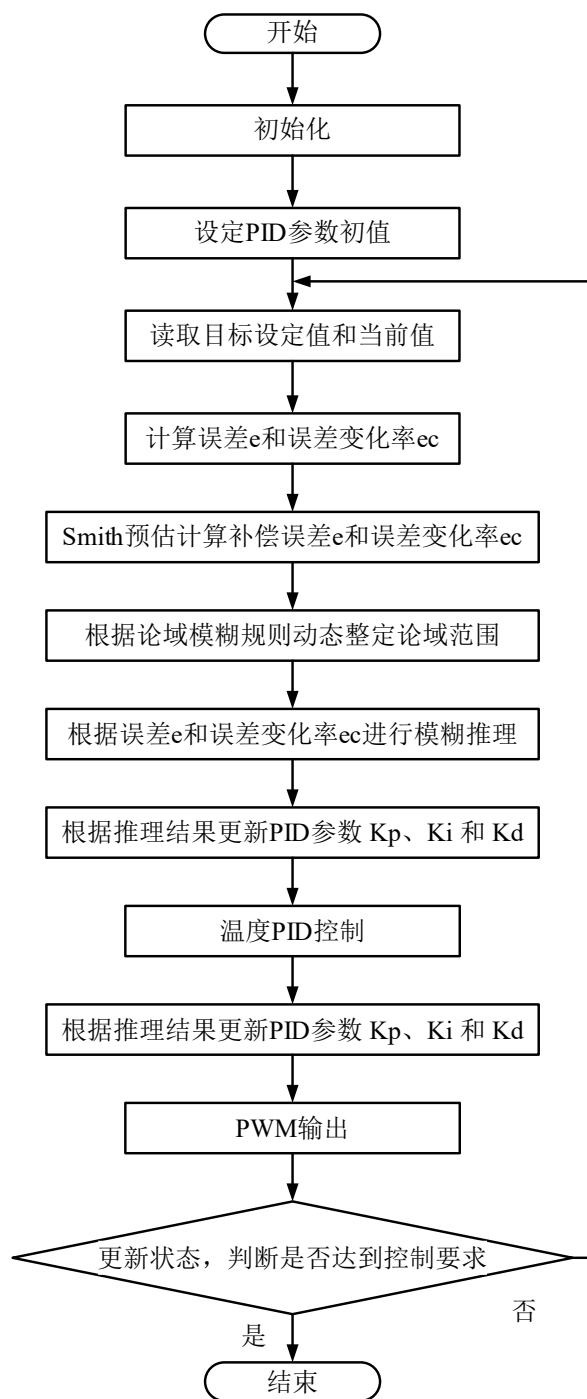


图 4-3 控制算法程序设计流程图

4.5 温度采集程序设计

温度采集模块的设计利用PT100 温度传感器的电阻变化与温度之间的关系，其原理是将电阻值转化为相应的电压变化。温度采集程序开始时，首先对相关寄

寄存器进行配置和声明。接着PT100 铂电阻会采集其电阻信号值，经过多次采样计算后取中间值。然后通过STM32F407VET6 微控制器内部的模拟-数字转换器(ADC)，将模拟信号转换为数字信号，便于后续的温度数据处理与分析。之后，利用二分查找法进行温度值的计算与推导，输出当前温度的采集值后结束整段程序。整个温度采集过程遵循严格的程序流程，确保数据准确稳定。相关流程图如图 4-4 所示。

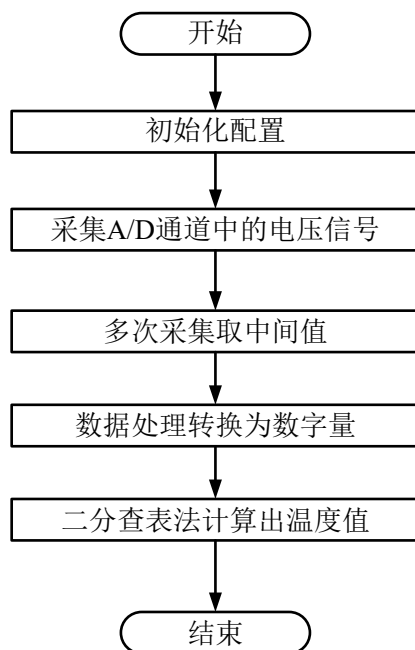


图 4-4 温度采集程序设计流程图

4.6 蜂鸣器程序设计

蜂鸣器程序在整个控制系统当中会多次出现调用，蜂鸣器程序开始时，进行初始化相关配置。首先，程序会根据不同的使用场景判断是否达到了蜂鸣器的触发条件，一旦触发条件满足，程序会根据预设的场景需求，配置不同的蜂鸣器参数，否则不会启用该段程序。这些参数包括有蜂鸣器的开启时间、关闭时间、鸣叫次数和循环次数，通过这些参数的灵活配置，可以实现不同的提示音效果。满足蜂鸣器的启动条件后，根据配置的参数生成相应的音频信号，产生特定的蜂鸣效果。不同的蜂鸣器提示音，可以根据实际使用场景进行个性化配置，以适应不同的场景需求，不同的响鸣声旨在提高用户操作体验并确保操作的及时反馈。蜂鸣器程流程图如图 4-5 所示。

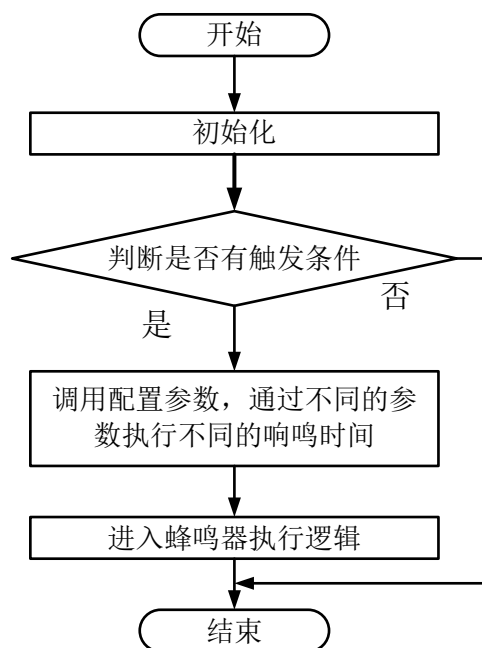


图 4-5 蜂鸣器程序设计流程图

蜂鸣器主要函数(Set_Buzz为蜂鸣器配置函数)和不同条件的配置情况如下:

```

void Set_Buzz(uint8_t num, uint16_t enat, uint16_t dist, uint8_t recyce)
{
    BuzzNum = num; //数据类型为uint8_t, 蜂鸣器单次鸣叫的次数
    BuzzEnaT = enat; //数据类型为uint16_t, 蜂鸣器开启的时间(ms)
    BuzzDisT = dist; // uint16_t类型, 鸣叫后蜂鸣器关闭的时间(ms)
    BeepRecyce = recyce; //uint8_t类型, 整个蜂鸣模式的循环次数
    Buzz_Flags = 0x01 //标志位
}
  
```

短鸣: Set_Buzz(1,2,18,1), 当接收到对应UART指令触发此模式时, 蜂鸣器开启 2ms, 发出一声短暂鸣叫, 然后关闭 18ms, 整个过程仅执行 1 次, 用于发出单次短提示音。

缺水检测: Set_Buzz(3,2,5,2), 当检测到缺水情况时, 蜂鸣器开启 2ms, 关闭 5ms, 连续进行 3 次, 形成一组声音; 然后重复这组声音, 总共循环 2 遍, 用于提示缺水状态。

温度异常(过高或过低): Set_Buzz(3,2,6,2), 蜂鸣器开启 2ms, 关闭 6ms, 连

续进行 3 次，形成一组“滴滴滴”声；然后重复这组声音，总共循环 2 遍，用于提示温度异常。

出水完成和首次通电：Set_Buzz(1,10,0,1)，蜂鸣器持续开启 10ms，在这 10ms 内一直保持鸣叫状态，整个过程执行 1 次，发出一声较长的鸣叫提示。

儿童锁状态：Set_Buzz(3,2,6,2)，蜂鸣器开启 2ms，然后关闭 6ms，连续进行三次，形成一组声音；然后重复这组声音，总共循环 2 遍，用于表示儿童锁状态的开启或关闭。

工厂模式：Set_Buzz(1,2,20,1)，当进入工厂模式时，蜂鸣器开启 2ms 发出一声短暂鸣叫，然后关闭 20ms，整个过程仅执行 1 次，提示已进入工厂模式。

错误恢复：Set_Buzz(1,2,2,1)，当故障恢复(如温度恢复正常)时，蜂鸣器开启 2ms 发出一声短鸣，然后关闭 2ms，整个过程执行 1 次，提示故障已恢复。

4.7 本章小结

本章介绍了即热式饮水机系统软件开发环境和相关程序设计。系统程序在 Keil 开发环境编写完成，分别介绍了主程序设计、温度采集程序、控制算法程序、流量调节程序和蜂鸣器程序等相关程序设计逻辑，每个软件模块通过流程图的方式呈现设计思路，以便于理解各环节之间的交互关系。

第5章 即热式饮水机实验平台的搭建和验证

5.1 实验平台搭建

实验平台如图 5-1 所示，将主控装置连接至可变电电压源，同时在出水端口安装工业温度计(精确度为小数点后一位)进行实时温度测量。为了评估装置在不同电压环境下的工作性能，电源通过可变电电压源与主控装置连接，用户可以通过调节输出电压的大小，模拟不同电压条件下装置的响应情况，从而验证其在负载变化或电源电压波动下的稳定性和精度。在软件部分，主控装置通过烧录器连接至计算机，计算机运行相应的控制程序算法。用户可根据实验需要，通过修改计算机中程序的参数(如模糊控制系统的论域范围、模糊规则)等，对系统进行调试与优化。通过这种方式，可以根据不同的输入电压与环境条件，灵活调整控制系统的输出，以满足实际应用中的控制精度和稳定性要求，从而确保系统在各种工作条件下都能提供理想的控制效果。这种软硬件结合的调试方式，能够有效地提高系统的调试速度，确保装置能够在动态变化的工作环境中持续稳定运行，满足不同应用场景下的控制需求。



图 5-1 实验验证平台搭建实物图

5.2 模糊-Smith自适应PID算法实验数据分析

在室温条件下,保持进水口温度为 5°C ,分别使用传统PID、模糊自适应PID和模糊-Smith自适应PID三种控制算法,在不同的设定温度条件下(分别为 45°C 、 50°C 、 55°C 、 75°C 、 85°C 、 90°C 、 100°C 共7组测试温度)进行温度控制实验,得到的实验数据如表5-1所示, T_t 表示目标温度($^{\circ}\text{C}$), A_t 为实测温度($^{\circ}\text{C}$), T 为加热时间(s), A_u 为误差($^{\circ}\text{C}$)。

从表5-1中数据可以看出,各种算法在不同温度档位下的表现差异。具体来说,传统PID算法在温控过程中存在一定的不足,其加热时间约为9~10秒,尽管能够在大多数情况下达到设定温度,但加热时间过长,无法满足即热式饮水机对快速加热和快速出水的需求。这是传统PID控制算法的一个明显缺点,尤其是在需要较高响应速度和快速温度调整的应用场景下,传统PID的性能较难满足要求。相比之下,模糊PID算法虽然能够显著缩短加热时间,减少至约5~6秒,但在温度控制精度上存在一定问题。实验数据表明,模糊PID算法的最大误差接近 3°C ,这一误差显然过大,无法满足对温度精度要求较高的应用场合,尤其在控制温度波动方面,模糊PID表现欠佳。最为优异的控制效果为模糊-Smith自适应PID算法,该算法的加热时间略长于模糊PID,约为6~7秒,较传统PID减少了4~5秒的时间,温度误差能够稳定控制在 0.2°C 左右,较传统PID提高了近似 1°C ,控制效果明显优于传统PID和模糊PID。

表5-1 模糊-Smith自适应PID实验数据

PID				模糊自适应PID			模糊-Smith自适应PID		
$T_t(^{\circ}\text{C})$	$A_t(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{s})$	$A_u(^{\circ}\text{C})$	$A_t(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{s})$	$A_u(^{\circ}\text{C})$	$A_t(^{\circ}\text{C})$	$T(\text{s})$	$A_u(^{\circ}\text{C})$
45	46.7	9.9	1.7	47.6	5.7	2.6	45.1	6.9	0.1
50	50.9	9.3	0.9	51.7	6.1	1.7	49.7	6.3	-0.3
55	55.6	9.1	0.6	53.2	5.6	-1.8	55.1	6.1	0.1
75	76.1	9.9	1.1	76.7	6.5	1.9	75.2	6.9	0.2
85	86.6	9.9	1.6	87.9	6.1	2.9	84.7	6.9	-0.3
90	91.7	10.1	1.7	91.6	5.6	1.6	90.1	7.1	0.1
100	99.5	9.7	0.5	97.9	5.7	2.1	99.7	6.9	-0.3

这一算法在加热时间和温度精度之间取得了较好的平衡,其控制精度高于其他两种算法,显示出更强的鲁棒性和优越的动态响应能力。综上所述,实验结果与上述章节的仿真结果相一致,进一步验证了模糊-Smith自适应PID算法在温控系统中的优越性。该算法不仅能够实现较短的加热时间,同时保持了较低的温度

误差，是三种控制算法中表现最为优越的一种。因此，模糊-Smith自适应PID在即热式饮水机的应用中具有显著的优势，尤其适用于要求高精度和快速响应的温控场景。

5.3 变论域模糊-Smith自适应PID算法实验数据分析

在与上述测试环境相同的室温条件下，进水口温度同样为 5℃，分别采用模糊-Smith自适应PID、变论域模糊PID和变论域模糊Smith自适应PID三种控制算法，进行温度控制实验。同样将温度设置为 45℃、50℃、55℃、75℃、85℃、90℃和 100℃，每个挡位的实验数据如表 5-2 所示， T_t 表示目标温度(℃)， A_t 为实测温度(℃)， T 为加热时间(S)， A_u 为误差(℃)。

表 5-2 变论域模糊-Smith自适应PID实验数据

模糊-SmithPID				变论域模糊PID			变论域模糊-SmithPID		
T_t (℃)	A_t (℃)	T (s)	A_u (℃)	A_t (℃)	T (s)	A_u (℃)	A_t (℃)	T (s)	A_u (℃)
45	45.1	6.9	0.1	47.1	5.2	2.1	45.2	5.9	0.2
50	49.7	6.3	-0.3	51.5	5.3	1.5	49.9	6.0	-0.1
55	55.1	6.1	0.1	52.9	5.5	2.1	55.2	5.8	0.2
75	75.2	6.9	0.2	76.1	5.1	1.1	74.9	6.1	-0.1
85	84.7	6.9	-0.3	87.6	5.4	2.6	85.2	5.7	0.2
90	90.1	7.1	0.1	91.3	5.2	1.3	89.9	5.8	-0.1
100	99.7	6.7	-0.3	98.1	5.1	-1.9	99.9	5.9	-0.1

实验结果表明数据与上述章节的仿真结果一致，变论域模糊自适应PID算法由于未加入Smith预估控制，导致其控制精度相对较差，最大误差达到 2.6℃，平均误差为 1.8℃。与传统的模糊PID控制算法相比，变论域模糊PID算法的精度仅略有提升，加热时间相较于模糊PID算法缩短了近 1 秒，但仍然精度过低并不适用于即热式饮水机系统。表现最为优异的是变论域模糊Smith自适应PID算法，在该算法中，不仅保留了模糊控制算法在自整定的优势而且对论域选择进行优化，在控制精度方面相比模糊Smith自适应PID算法进一步提高了约 0.06℃，同时加热时间缩短了近 1 秒。通过对比五种已经实验和仿真过的控制算法，变论域模糊Smith自适应PID算法无论是在控制精度、响应时间，还是控制效果，均表现出了最优的控制性能。在实际应用中，尤其是在即热式饮水机等需要快速温控的场景中，变论域模糊Smith自适应PID算法展示了其优异的控制能力和较为广泛的应用前景。

5.4 本章小结

本章介绍了即热式饮水机实验平台的搭建与验证过程,对所有相关算法进行实际测量和分析。实验数据验证结果表明,传统PID算法的响应时间较长,约为9~10秒;而模糊控制的响应时间为5~6秒,尽管响应时间缩短,但控制精度却大幅降低,最大误差接近3°C。加入Smith算法后的模糊-Smith自适应PID算法的误差可稳定控制在0.2°C左右,较传统PID精度提高近82.7%,响应时间缩短了约30.6%。通过变论域算法实验,以上实验控制效果最好的模糊-Smith自适应PID和变论域模糊自适应PID、变论域模糊-Smith自适应PID进行对比,在未加入Smith算法的变论域模糊PID控制精度较传统PID仅仅略有提升,加入Smith算法后的变论域模糊-Smith自适应PID较模糊-Smith自适应PID响应时间缩短近12.09%,控制精度进一步提高约30%。

通过本章的研究与实验,进一步验证了变论域模糊-Smith自适应PID算法在温控系统中的应用潜力,且为实际应用中的控制系统优化提供了理论依据和技术支持。

第6章 总结与展望

6.1 论文总结

本研究基于即热式饮水机系统对其控制算法进行改进和优化,以提高其性能表现,尤其是数字化控制和自动化水平的提升。具体而言,本文聚焦于即热式饮水机的温控系统,通过改进后的温度控制算法,解决了传统PID控制在参数整定过程中的局限性,进一步提升了控制精度,缩短了加热响应时间,且在保证性能的同时,有效控制了开发成本。此外,本研究还通过系统设计,提出了更为高效和稳定的控制策略,以期达到更优的加热效果和更精确的温度控制。为了验证设计的有效性,本文基于所提出的控制策略,建立了即热式饮水机的仿真模型,并通过实验平台进行了多次实验验证。仿真结果和实验数据均表明,该系统能够稳定运行,并能够满足即热式饮水机系统的预期性能指标,包括加热时间、温度精度以及系统稳定性等方面的要求。本文主要研究内容总结如下:

(1)基于STM32F407VET6 和keil环境平台搭建即热式饮水机系统,各环节以子模块封装,便于后续调试和升级。

(2)为克服传统PID控制在参数整定中的困难,本文引入了模糊控制算法,与传统PID算法结合。这一混合控制策略能够有效解决传统PID控制在参数调节难度较大的问题。通过自适应整定PID参数,本方法不仅提高了系统对不同操作环境的适应性,还使得控制算法能够适配多种型号的饮水机系统,极大地提升了控制系统的通用性和扩展性。

(3)在模糊控制基础上,引入Smith预估控制器以应对温度滞后性带来的影响。传统温控系统常常因为加热元件的滞后性导致温度变化缓慢,影响整体加热效果。Smith预估控制器通过对系统滞后动态的预测与补偿,提高系统控制精度,有效消除了滞后带来的影响,进而加快系统响应速度的同时提高系统控制精度。

(4)为了进一步优化模糊PID控制的效果,本文引入变论域思想。传统的模糊PID控制算法在论域选择上存在一定困难,变论域模糊控制通过动态调整模糊控制器的论域范围,使得控制系统能够更加灵活地应对不同的工作状态。在提高模

糊PID控制算法的应用性和精度的同时，本方法还进一步提高了系统的温控精度。结合Smith预估控制器后，得到变论域模糊-Smith自适应PID控制算法为本系统的最终优化控制策略。该算法能够在确保温度控制精度的同时，充分考虑系统的动态特性和负载变化，是一种高效且稳定的控制方案。

(5)在验证阶段，本文基于MATLAB仿真平台以及实验设备平台进行了大量测试，对所提出的控制算法进行了系统性的验证。通过对比仿真结果与实际实验数据，验证了变论域模糊-Smith自适应PID算法在解决传统PID控制的不足之处的同时，也展现了其在即热式饮水机系统中的卓越性能。实验结果表明，该算法不仅能有效提高控制精度、缩短加热响应时间，还能保持系统在各种环境条件下的稳定性和可靠性，满足即热式饮水机对高效温控的要求。

6.2 未来展望

本文实现了即热式饮水机的研究与设计，但在某些方面仍然存在一些需要后续继续研究，具体如下：

(1)可结合智能寻优策略例如强化学习算法，粒子群算法等依据历史温度控制数据与工况变化信息，不断寻优找到合适的伸缩因子，让伸缩因子选取更智能高效，进一步减少人工干预，使控制系统更加智能化。

(2)未来的工作可以通过精细化设计来降低硬件资源的消耗，同时确保系统在正常运行下的稳定性和可靠性。

(3)在温度控制精度方面，研究是否存在其他的自适应算法可以更好的解决温度滞后性带来的影响，可进一步提高温度控制精度。

参考文献

- [1] 陈蔚, 杨绍敏, 魏中科, 等. 即热式饮水机自抗扰温度控制系统[C]中国家用电器协会. 2021 年中国家用电器技术大会论文集. 美的集团厨房与热水事业部;中国海洋大学; 2021: 1714-1721.
- [2] 包健. 一种即热式饮水机温度控制方案[J]. 中国新技术新产品, 2021, (17): 103-105.
- [3] 张红梅, 唐明良. 即热式智能饮水机设计与实现[J]. 南方农机, 2019, 50(02): 200-201.
- [4] 王刚. 基于直热式新型饮水机的设计与实现[J]. 电子制作, 2016, (09): 30-31.
- [5] Qi R, Li J, in J, *etc.* Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 19008-19021.
- [6] 柴健, 陈刚, 陈鹏飞, 等. 基于PID算法的速热式饮水机控制器设计[J]. 电子技术, 2015, 44(07): 36-38.
- [7] Zhao C, Wang D, Xue W. Beyond linear limits: Design of robust nonlinear PID control[J]. Automatica, 2025, 173: 112075.
- [8] Jin L, Fan J, Du F, *etc.* Research on two-stage semi-active ISD suspension based on improved fuzzy neural network PID control[J]. Sensors, 2023, 23(20): 8388.
- [9] Han J, Shan X, Liu H, *etc.* Fuzzy gain scheduling PID control of a hybrid robot based on dynamic characteristics[J]. Mechanism and Machine Theory, 2023, 184: 105283.
- [10] Yuan, Ye, Jinli Li, and Xin Luo. "A fuzzy PID-incorporated stochastic gradient descent algorithm for fast and accurate latent factor analysis." IEEE Transactions on Fuzzy Systems (2024).
- [11] Qi R, Li J, Lin J, *etc.* Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 19008-19021.

- [12] He D ,Wang H ,Tian Y , *etc al.*A Fractional-Order Ultra-Local Model-Based Adaptive Neural Network Sliding Mode Control of n-DOF Upper-Limb Exoskeleton With Input Deadzone[J].IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica,2024,11(03):760-781.卢强. 控制理论的发展[J]. 电网技术, 1993, (04): 1-6.
- [13] Wan J, Xie J, Wang P, *etc.* Control system design for the once-through steam generator of lead-bismuth cooled reactor based on classical control theory[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 175: 109214.
- [14] Flores M, Payá L, Valiente D, *etc.* Deployment of a software to simulate control systems in the state-space[J]. Electronics, 2019, 8(11): 1205.
- [15] Bien Z Z, Suh I H. Intelligent Control: Its Identity and Some Noticeable Techniques[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2014, 20(3): 245–260.
- [16] Wang Y, Yu Y, Cao S, *etc.* A review of applications of artificial intelligent algorithms in wind farms[J]. Artificial Intelligence Review, 2020, 53(5): 3447–3500.
- [17] 姜伟杰. 电气工程中的智能控制技术的发展趋势综述[J]. 电子技术, 2024, 53(04): 304-305.
- [18] Er M J, Ma C, Liu T, *etc.* Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114562.
- [19] Bian J, Kang M, Xi Y, *etc.* A Review of the Measurement and Control Technologies for the Critical Parameters of Microwave Drying Processes: Temperature and Humidity[J]. Food and Bioprocess Technology, 2024: 1–24.
- [20] Miralles V, Huerre A, Malloggi F, *etc.* A review of heating and temperature control in microfluidic systems: techniques and applications[J]. Diagnostics, 2013, 3(1): 33–67.
- [21] Yang Q ,Zhang F ,Wang C .Deterministic Learning-Based Neural PID Control for Nonlinear Robotic Systems[J].IEEE/CAA Journal of Automatica

- Sinica,2024,11(05):1227-1238.Haiyan Z. Optimization algorithm for PID control parameters of electrical equipment in rural electric drainage and irrigation stations[J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022(1): 4268662.
- [22] Gong X, Wang X, Xiong W, *etc.* An effective PID control method of air conditioning system for electric drive workshop based on IBK-IFNN two-stage optimization[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111028.
- [23] 黎殿来, 董士崔, 宋向华. PID控制参数在线自整定方法综述[J]. 电子世界, 2016, (22): 127.
- [24] Siwek M, Baranowski L, Ladyżyńska-Kozdraś E. The Application and Optimisation of a Neural Network PID Controller for Trajectory Tracking Using UAVs[J]. Sensors, 2024, 24(24): 8072.
- [25] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳, 等. 基于BP神经网络的PID变桨距风电机组控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, (06): 681-686.
- [26] 刘益民. 基于改进BP神经网络的PID控制方法的研究 [D] . 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2007.
- [27] Fan X, Meng H. Research on Maximum Power Control of Direct-Drive Wave Power Generation Device Based on BP Neural Network PID Method[J/OL]. Actuators, 2024, 13(5): 159.
- [28] 肖国庆, 李雪琪, 陈玥丹, 等. 大规模图神经网络研究综述[J]. 计算机学报, 2024, 47(01): 148-171.
- [29] Sheng S, Yang B, Qin P, *etc.* Dynamic Analyses of Six Degree Freedom Platform Based on Improvement PID Neural Networks[C]||2015 5th International Conference on Computer Sciences and Automation Engineering (ICCSAE 2015). Atlantis Press, 2015: 486-493.
- [30] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, (10): 2911-2916.
- [31] 刘延飞, 彭征, 王艺辉, 等. 基于改进的遗传算法的有刷直流电机PID参数整定[J]. 计算机应用, 2022, 42(05): 1634-1641.

- [32] 徐传敬, 赵敏, 李天明. 一种改进遗传算法的PID参数整定研究[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(09): 12-15.
- [33] Meng H, Zhang S, Zhang W, *etc.* Optimizing actual PID control for walking quadruped soft robots using genetic algorithms[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 25946.
- [34] 王永富, 柴天佑. 自适应模糊控制理论的研究综述[J]. 控制工程, 2006, (03): 193-198.
- [35] Precup R E, Nguyen A T, Blažić S. A survey on fuzzy control for mechatronics applications[J]. International Journal of Systems Science, 2024, 55(4): 771–813.
- [36] 董海荣, 高冰, 宁滨, 等. 基于模糊PID软切换控制的列车自动驾驶系统调速制动[J]. 控制与决策, 2010, 25(05): 794-796+800.
- [37] 曹青松, 周继惠, 黎林, 等. 基于模糊自整定PID算法的压电柔性机械臂振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 181-186+247.
- [38] Guan D, Liu Y, Fu J, *etc.* Research on Tracking Control Technology Based on Fuzzy PID in Underwater Optical Communication[J/OL]. Photonics, 2024, 11(10): 957.
- [39] 周彬. 大滞后特性温度系统的控制[D]. 重庆大学, 2002.
- [40] 杜福银. 基于大林算法的燃气热水器温度Fuzzy-PID控制方法[J]. 工业加热, 2012, 41(03): 12-15.
- [41] 孙军, 张典, 黄青山, 等. 基于串级模糊自适应PID的蒸发器温度控制系统设计[J]. 过程工程学报, 2023, 23(09): 1290-1299.
- [42] Chen J, Lu Q, Bai J, *etc.* A temperature control method for microaccelerometer chips based on genetic algorithm and fuzzy PID control[J]. Micromachines, 2021, 12(12): 1511.
- [43] Bing L, Jinghong J. Design and Implementation of Automatic Control System for Intelligent Water Dispenser[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2074(1).
- [44] Qian T, Liu H, Chen C. Design of a new fast heating device in wireless portable

- water dispenser in the age of intelligence[J]. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 2024, 9(1).
- [45] Yang Y. Research on Design of Intelligent Water Dispenser Based on Micro Controller System [C]//4th International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering. Atlantis Press, 2015: 75-78.
- [46] Thangamalar J B, Gomathi R, Gopalakrishnan S, *etc.* A two-stage linearized model for thermistor circuit linearization using LSTM based multi-layer self-attention model[J]. *Measurement*, 2025, 246: 116733.
- [47] Dallmann A, Franz C, Hoffmann G, *etc.* Development of spacer warp knitted thermoelectric generators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2021, 30(3): 035034.
- [48] Jiao F, Cao F, Gao Y, *etc.* A biosensor based on a thermal camera using infrared radiance as the signal probe[J]. *Talanta*, 2022, 246: 123453.
- [49] Altinkaya S, Bayrak A, Daldal N, *etc.* Stable measurement system for platinum resistance temperature detector[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2023, 66(3): 514–521.
- [50] Korhonen I, Laine V. Estimating hovering of a mobile sensor in combustion boiler environment[J]. *Measurement*, 2017, 109: 100–104.
- [51] Garcia Oya J R, Sainz Rojas A, Narbona Miguel D, *etc.* Low-power transit time-based gas flow sensor with accuracy optimization[J]. *Sensors*, 2022, 22(24): 9912.
- [52] Ge L, Wang S, Li L, *etc.* Optimization of electromagnetic flow measurement system based on a new mesh electrode[J]. *Measurement*, 2023, 217: 113012.
- [53] Liu X, Song W, Chi Q, *etc.* Dynamic performance analysis of turbine flow sensor based on CFD simulations[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2022, 87: 102205.
- [54] 张正明, 王丽娟. 双定时器的蜂鸣器应用设计[J]. *中国新通信*, 2019, 21(16): 85-86.
- [55] El Fatnani F Z, Mazroui M, Guyomar D. Optimization of pyroelectric conversion of thermal energy through the PZT ceramic buzzer and natural convection[J]. *The*

- European Physical Journal Plus, 2018, 133(1): 1–10.
- [56] Jirungnimsitakul S, Somwan S, Limpichaiwanit A, *etc.* Electrical signal of piezoelectric buzzer by impact testing[J]. Integrated Ferroelectrics, 2019, 195(1): 178–186.
- [57] Hermouche B, Zennir Y, Kamsu Foguem B. Influence of meta-heuristic algorithms on the optimization of quadrotor altitude PID controller[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(10): 504.
- [58] Silva F, Batista J, Souza D, *etc.* Control and identification of parameters of a joint of a manipulator based on PID, PID 2-DOF, and least squares[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(6): 327.
- [59] Demir B E, Demir F. Comparison of metaheuristic optimization algorithms for quadrotor pid controllers [J] . Tehnički vjesnik, 2023, 30(4): 1096–1103.
- [60] Singh B, Verma B, Sharma S, *etc.* Indirect response-based tuning of PID controller with adjustable robustness [J] . Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2023, 45(16): 3049–3056.
- [61] Han J, Li Y, Lin Y, *etc.* Research on tuning method of PID controller parameter for hybrid magnetic bearing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(2): 931–941.
- [62] Lu C, Tang R, Li C, *etc.* A fast relay feedback auto-tuning tilt-integral-derivative (TID) controller method with the fractional-order Ziegler-Nichols approach[J]. ISA transactions, 2024, 150: 322–337.
- [63] Hu X, Tan W, Hou G. Tuning of PID/PIDD2 Controllers for Second-Order Oscillatory Systems with Time Delays[J]. Electronics, 2023, 12(14): 3168.
- [64] Sayin E, Bitirgen R, Bayezit I. Attitude Control and Parameter Optimization: A Study on Hubble Space Telescope [J] . Measurement Science Review, 2023, 23(4): 146–153.
- [65] Li N, Dong C, Wei L, *etc.* Oscillation Suppression Method of Digital Proportional Valve Based on Fuzzy Intelligent PID Control[J]. Applied Sciences, 2024, 14(23):

11177.

- [66] Samuel M, Yahya K, Attar H, *etc.* Evaluating the performance of fuzzy-PID control for lane recognition and lane-keeping in vehicle simulations[J]. Electronics, 2023, 12(3): 724.
- [67] Salgado-Gomes-Sagaz F, Zorrilla-Muñoz V, Garcia-Aracil N. Rehabilitation Technologies by Integrating Exoskeletons, Aquatic Therapy, and Quantum Computing for Enhanced Patient Outcomes[J]. Sensors, 2024, 24(23): 7765.
- [68] Zhang K, Liu Y, Jia H, *etc.* Research on a Three-Dimensional Fuzzy Active Disturbance Rejection Controller for the Mechanical Arm of an Iron Roughneck[J]. Processes, 2023, 11(5): 1409.
- [69] Liu J, Wei T, Chen N, *etc.* Fuzzy logic PID controller with both coefficient and error modifications for digitally-controlled DC-DC switching converters[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(4): 2859–2870.
- [70] Yang K, Li J, Yang J, *etc.* Research on Adaptive Closed-Loop Control of Microelectromechanical System Gyroscopes under Temperature Disturbance[J]. Micromachines, 2024, 15(9): 1102.
- [71] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(01): 166-172.
- [72] Zhu L, Qi Z, Lin L, *etc.* A novel Fuzzy-Smith predictive control algorithm application in laser interferometric dynamic positioning feedback control systems[J]. Measurement, 2024, 238: 115335.
- [73] Feng Y, Zhao C, Tong L, *etc.* Dynamic impact analysis of the time-delay levitation control system on maglev vehicle system after adding smith predictor[J]. ISA transactions, 2024, 154: 82–94.
- [74] Zhang Y, Liu L, He D. Application of Variable Universe Fuzzy PID Controller Based on ISSA in Bridge Crane Control[J]. Electronics, 2024, 13(17): 3534.
- [75] Li H, Hui Y, Ma J, *etc.* Research on variable universe fuzzy multi-parameter self-tuning PID control of bridge crane [J] . Applied Sciences, 2023, 13(8): 4830.

- [76] 邵诚, 董希文, 王晓芳. 变论域模糊控制器伸缩因子的选择方法[J]. 信息与控制, 2010, 39(05): 536-541.
- [77] Li H. Temperature control of beer fermentation based on variable domain fuzzy PID and neural network technology and its application analysis[J]. Advanced Control for Applications: Engineering and Industrial Systems, 2024, 6(3): e203.

攻读硕士期间取得的学术成果

发表论文:

- [1]周杨阳,张肖强,王宁,等.基于Fuzzy-smith预估自整定PID的即热式饮水机温度控制系统设计[J/OL].重庆工商大学学报(自然科学版),1-10[2025-05-09].
- [2]周杨阳,张肖强,王宁,等.基于变论域理论模糊自适应PID算法的温度控制研究[J].青岛大学学报(工程技术版),2025,40(01):9-16.

参与项目:

- [1]横向项目,广东瑞德智能科技有限公司,“PID自适应算法芯片项目”,2024.06-2025.12

致谢

时光荏苒，岁月如歌，转眼间，短暂的研究生生活即将画上句号。回顾这三年来在安徽工程大学的求学时光，我感慨万千。这段经历不仅让我在专业知识上得到了深刻的积淀，也让我在思想和认知层面获得了极大的提升。在这里，我不仅拓宽了视野，提升了学术素养，也在与同学、导师们的交流与合作中，收获了许多宝贵的经验与成长。我要特别感谢安徽工程大学为我提供了这样一个深造的平台，使我有机会在这片学术沃土上汲取知识，锤炼自我，勇敢追求卓越。

在即将踏入人生的新阶段时，我怀着无比感激的心情，想要向所有在我研究生阶段给予帮助与支持的人表达最真诚的谢意。特别是我的导师、同学、同门以及朋友们，正是因为有了你们的无私帮助与真挚关怀，我的研究生生涯才得以丰富多彩，收获满满。每一次讨论、每一场合作、每一份关心，都让我在成长的道路上走得更加坚定。你们的陪伴与支持，不仅让我在学术上有所突破，更让我在为人处事上得到了许多启发和指引。正是因为有了你们的存在，我的学生时代才如此精彩、充实。感谢你们，未来的路上，我将带着你们的期许与鼓励，继续前行。

首先我最想感谢的人是我的导师张肖强老师。张老师用他博学的专业知识和认证负责的工作态度，严谨的学术态度在我三年的研究生生涯给予了我极大的帮助，收益终身。在学术研究上，从论文的选题、编排框架、初稿到最后的定稿每个阶段都有张老师帮助的身影，正是有了老师的耐心讲解帮我理清思路，认清每个阶段的侧重点，同时对我的论文严格把关，不断鼓励着我使我信心倍增加，如此才顺利的完成该篇论文的写作。在生活中，张老师经常关系我们的身心健康，给我们提供了非常愉悦的科研氛围，不断鼓励我，给予我信心。至此我再次发自内心的感谢我的导师，谢谢您！同时也感谢研究生三年间所有的授课的老师，让我学习到了更多的知识。

其次,我要感谢我的家人和朋友们，有了他们的照顾和支持才能让我安心学习，沉下心来做科研，感谢你们对我的付出和陪伴。希望我的家人们身体健康，开心快乐；也祝福我的朋友们前程似锦，事业有成。

最后，感谢参与论文评审的各位老师对我的毕业论文进行评阅和检查，感谢你们提供的宝贵意见，对我后续的学术研究指明方向。今后，踏入新的征程我会更加严格要求自己，有自己的思想，努力回报家人、学校、老师和社会！