

分类号 TP202; TP23

密 级 .....

U D C 621.3

编 号 11458

上海电机学院硕士专业学位论文

# 基于模糊决策的注塑机低背压控制系统研究

## Research on Low Back Pressure Control System of Injection Molding Machine Based on Fuzzy Decision

硕 士 研 究 生

李 春

学 号

206002010123

校 内 导 师

张 栋 副教授

企 业 导 师

彭京启 副教授

工 程 领 域

电气工程

申 请 学 位

工程硕士

所 在 单 位

机械学院

答 辩 日 期

2023 年 1 月 12 日

授 予 学 位 单 位

上海电机学院

## 基于模糊决策的注塑机低背压控制系统研究

### 摘 要

随着注塑产品的大量运用和注塑工艺的不断发展,提高注塑机性能,降低生产成本,可以带来极大的经济效应。注塑机的性能主要体现在注射速度和计量精度两方面。其中计量精度受温度、黏度和储料压力等多种因素影响。控制计量精度的方式是调节注塑机注射油缸的回油背压力,例如采用 V9 阀和比例溢流阀调节背压。

但采用 V9 阀的方案成本较高,且最低起调压力不够低,其零背压控制性能仍有提升的空间。为降低背压控制系统的成本和实现优良的低背压控制性能,本文提出了一种基于模糊决策和间接闭环的注塑机被动式背压控制方法。本文所涉及的具体研究包括:

- (1)结合液压原理图,分析了根据注射油缸回退速度控制回油背压的原理。推导了通过背压和油缸流量调节回油背压的公式。根据该公式和注塑机相关参数设计了模糊控制器的规则和隶属函数,搭建了基于 MATLAB 和 AMESim 的联合仿真模型,通过仿真验证了该算法的可行性。
- (2)由于直接将模糊决策控制算法应用于微控制器较困难,因此研究了利用查表法实现模糊决策控制的方法。首先生成阀芯开度二维表替代模糊规则表,然后使用最邻近插值和拉格朗日二维插值算法实现反模糊化,并使用优选法判定输入参数在表格中的坐标位置。最后通过软件仿真进行了验证,并对比了两种插值反模糊化方法、最大平均反模糊化方法和传统闭环控制的控制性能。
- (3)设计了控制比例换向阀的电子放大器的软件和硬件,并测试了基本功能。
- (4)搭建了测试台架,测试了该注塑机背压控制系统的控制逻辑和控制

性能。结果表明，相比传统的通过调节进油路控制阀来间接控制背压的方法，该系统背压建压快，压力平稳，精度与闭环控制接近，且最低背压可为零。系统在最低背压下依然有较大的流量，控制性能优异，因此可以替换传统的闭环控制，节约系统成本，提高经济效益。

**关键词：**注塑机，低背压控制，模糊决策控制，查表插值法，  
MATLAB-AMESim 联合仿真

## **Research on Low Back Pressure Control System of Injection Molding Machine Based on Fuzzy Decision**

### **ABSTRACT**

With the extensive application of injection molding products, improving the performance of injection molding machines can bring great economic benefits. The performance of injection molding machine mainly includes injection speed and metering accuracy. The measurement accuracy is affected by many factors, such as temperature, viscosity and storage pressure. The way to control the metering accuracy is to adjust the return oil back pressure of the injection cylinder, for example, V9 valve and proportional relief valve are used to adjust the back pressure.

However, the cost of V9 valve is high, and the lowest starting pressure is not low enough, its zero back pressure control performance still has room for improvement. To reduce the cost of back pressure control system and achieve excellent low back pressure control performance, this paper presents a passive back pressure control method of injection molding machine based on fuzzy decision algorithm.

The specific research work involved in this paper includes:

- (1) Combined with the hydraulic schematic diagram, the principle of controlling the return oil back pressure according to the return speed of the injection cylinder is analyzed. The formula for regulating the return oil back pressure through back pressure and cylinder flow is derived. The rules and membership functions of the fuzzy controller are designed according to the formula, and a joint simulation model based on MATLAB and AMESim is built. The algorithm is verified by simulation.
- (2) The method of fuzzy control using look-up table is studied. First, a two-dimensional table of valve core opening is generated to

replace the fuzzy rule table, then a two-dimensional interpolation algorithm is used to achieve anti fuzziness, and finally, the position coordinates of input parameters in the table are determined using the optimization method. The feasibility of the algorithm is verified by software simulation.

- (3) The software and hardware of the special electronic amplifier for controlling the proportional directional control valve are designed, and the basic functions of the hardware are tested.
- (4) A test bench was built to test the control performance of the back pressure control system of the injection molding machine. The results show that compared with traditional schemes such as adjusting V9 valve in the oil inlet circuit, the back pressure of the system is faster, the accuracy is close to the closed-loop control, and the minimum back pressure can be zero. There is still a large flow under the lowest back pressure, and the control performance is excellent, which can replace the traditional closed-loop control, thus saving the system cost.

**KEY WORDS:** Injection molding machine, Low back pressure control, Fuzzy decision control, Look-up table interpolation, Matlab AMESim joint simulation

# 目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 注塑机低背压控制国内外研究现状 .....	2
1.2.1 低背压控制国外研究状况.....	2
1.2.2 低背压控制国内相关研究.....	4
1.3 注塑机模糊决策控制国内外研究现状 .....	6
1.3.1 模糊决策控制国内研究状况.....	6
1.3.2 模糊决策控制国外研究状况.....	6
1.4 研究内容与方法.....	7
第二章 注塑机低背压的控制方法与仿真研究 .....	10
2.1 引言.....	10
2.2 回油路被动式背压控制原理 .....	10
2.2.1 液压系统原理图.....	10
2.2.2 控制原理分析.....	11
2.3 使用模糊决策控制器实现注塑机低背压控制 .....	12
2.3.1 MATLAB 模糊控制工具箱 .....	12
2.3.2 注塑机低背压模糊决策控制器的设计 .....	12
2.3.3 参数模糊化及隶属函数.....	13
2.3.4 模糊规则表.....	16
2.3.5 模糊决策与推理.....	19
2.3.6 反模糊化及输出.....	20
2.4 基于模糊决策控制的注塑机背压控制系统联合仿真 .....	21
2.4.1 仿真软件介绍.....	21
2.4.2 基于模糊决策的 Simulink-AMESim 联合仿真模型 .....	22
2.5 本章小结.....	24
第三章 模糊决策控制在微控制器上的实现研究 .....	26
3.1 引言.....	26
3.2 根据理论公式和模糊规则生成阀芯开度表 .....	26
3.3 使用插值算法实现反模糊化输出 .....	28
3.4 系统仿真验证.....	31
3.5 根据 MATLAB 仿真模型生成微控制器代码 .....	36
3.6 本章小结.....	39
第四章 比例换向阀电子放大器设计 .....	40
4.1 引言.....	40

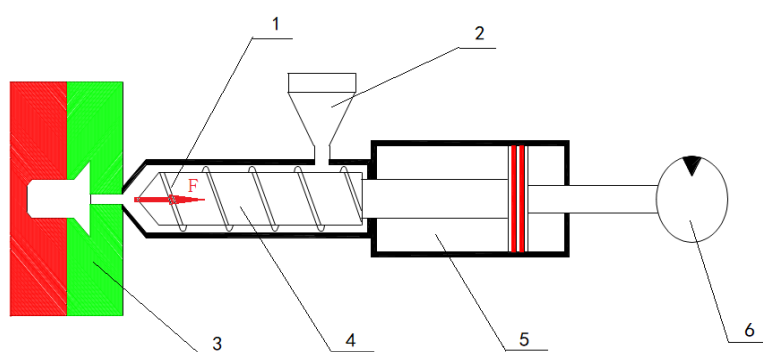
4.2 设备原理.....	40
4.2.1 比例电磁铁控制原理.....	40
4.2.2 注射油缸电子尺(位移传感器)原理.....	41
4.3 硬件电路设计.....	42
4.3.1 系统架构.....	42
4.3.2 电磁线圈驱动电路设计.....	43
4.3.3 电源系统设计.....	46
4.3.4 传感器接口设计.....	48
4.3.5 其他电路.....	49
4.4 软件设计.....	50
4.4.1 程序状态机.....	50
4.4.2 UCOSIII片上操作系统.....	50
4.4.3 电子放大器软件流程图.....	51
4.5 电子放大器实物.....	52
4.6 本章小结.....	53
第五章 系统测试研究 .....	54
5.1 本章引言.....	54
5.2 实验设备与实验原理.....	54
5.3 实验过程及结果分析.....	56
5.4 本章小结.....	61
第六章 结束语 .....	63
6.1 本课题的创新点及意义.....	63
6.2 课题不足和延伸.....	63
6.3 经验总结和反思.....	64
参考文献.....	65

## 第一章 绪论

### 1.1 研究背景与意义

随着越来越多新材料、新工艺的运用，塑胶产品不断替代传统材料，成为汽车、家电、医疗器械、餐饮、建筑等多领域的重要原材料。近年来塑料制品的生产规模在全球不断扩大，产品类型更加多样，产品质量更加苛刻。我国塑胶制品产量始终位居世界前列，注塑机产量和出口量也位居第一，是当之无愧的世界塑料制品生产大国<sup>[1]</sup>，但我国目前生产和出口的注塑机主要是传统的液压式注塑机，在电动注塑机和高性能注塑机领域依赖进口<sup>[2]</sup>。为提升产业价值，提高注塑机的国产化率和技术水平，需要对高性能的注塑机控制系统展开研究。

影响注塑机控制性能的两个关键因素是注射速度和背压。注射速度快，有利于缩短单个产品的生产时间，提高生产效率<sup>[3]</sup>。而背压是决定产品质量和精度的关键因素之一<sup>[4]</sup>，因此对背压的研究是注塑机一个非常重要的研究方向。背压也称塑化压力，它的基本原理如下：



1. 计量室 2. 进料筒 3. 模具 4. 注射螺杆 5. 注射主缸 6. 液压马达

图 1-1 注塑机原理简图

Fig.1-1 Schematic diagram of injection molding machine

如图 1-1，开始时，料筒 2 中的塑胶颗粒在重力的作用下掉入螺杆腔的进料端。螺杆 4 在液压马达 6 和齿轮箱的带动下旋转，同时在螺杆腔外壁的电加热装置的配合下，使得塑胶颗粒一边熔化一边被送入前端计量室 1。进料时螺杆 4 只旋转，不发生轴向运动。随着计量室 1 内液体塑胶逐渐增多，压力也随之升高。当压力升高到足够克服螺杆的摩擦阻力时，螺杆开始回退。在回退过程中，液压马达 6 继续带动螺杆 4 旋转，使得料筒 2 中的塑胶颗粒再次被送入进料室。当前端计量



室 1 内塑料体积达到设定值后, 回退停止, 旋转亦停止。注射主油缸 5 动作, 推动螺杆 4 向前运动, 将计量室 1 内的液态塑胶注入模具 3, 然后完成冷却、脱模、合模等工序, 如此循环。单次注射的塑胶量是由计量室的容积决定的, 可以通过机械位置设定, 而塑胶的密度是由温度和背压力共同决定的。

在注塑机螺杆回退过程中, 如果注射缸回油路阻尼过小, 会导致回退速度过快, 导致计量室内液体塑胶出现气泡和密度不均匀的现象, 影响产品质量。因此需要引入一个反作用力, 使得螺杆匀速回退, 这个反作用力被称为背压力。适当的背压能够增加塑胶密度, 排空胶内的空气, 使得塑胶充分注满模具, 同时改善产品表面的光滑度; 但背压过高, 会影响回退速度, 降低生产效率。

现今成熟的控制注塑机背压的方式有两种, 一种是传统的液压式注塑机, 主要通过背压阀控制注射油缸的回油压力<sup>[5]</sup>。另一种是全电动注塑机, 通过压力传感器和伺服电机控制背压<sup>[6]</sup>, 具体如 1.2 节所述。由于背压越高, 塑化越慢, 背压越低, 回退速度越快, 塑化越快<sup>[7]</sup>, 因此塑胶生产厂商希望回油背压尽可能低, 理想状态是最低背压接近于零, 即实现零背压控制。并且希望在降低背压的同时保持较大的流量, 以实现高速注射生产的目标。

目前市面上已有的方案是采用 V9 阀或比例溢流阀<sup>[8]</sup>, 调节注射油缸回油路阻尼, 从而改变背压。该方案回油背压不够低, 最小只能到 0.3-0.5MPa, 低于 0.3MPa 时流量过小。且回油压力建压较慢, 压力曲线略显疲软, 并且 V9 阀价格昂贵, 增加了设备的成本。因此该课题结合注塑机行业的实际需求, 研究了一种新型注塑机低背压控制方案, 能够实现低背压、大流量的控制性能, 以及更低的系统成本。该课题具有实际的市场需求、较大的创新意义和经济价值。

## 1.2 注塑机低背压控制国内外研究现状

目前国内外有关注塑机背压控制的研究相对较少。国外有关注塑机的研究方向十分繁杂, 包括材料、生物医药、纳米材料微结构等方面<sup>[9,10,11,12,13]</sup>, 针对特殊的领域采用了先进的研究方法和工具, 涉及多个学科的交叉和新材料的应用, 但直接有关注塑机背压控制的研究难以寻找。而国内有关注塑机背压控制的研究也较少, 一般采用控制泵和驱动电机, 对液压阀进行机械改造等方法。

### 1.2.1 低背压控制国外研究状况

文献[14]提出了一种自动化实时质量监测方法, 即利用计算机视觉检测和在线学习, 评估注塑过程中的模具和注塑件的质量, 并将检测结果反馈给注塑系统以

进行过程调整。

文献[15]针对传统过程控制在喷射速度和压力控制之间切换时可能对质量造成影响的问题，提出了一种自适应模型的注模跨相腔压力控制预测控制方法，在成型过程中仅控制一个变量，使用了时变模型和卡尔曼滤波器来估计所有过程状态和集总参数，从而控制腔体压力。

文献[16]对注塑成型技术(IM)进行了综述，指出熔体温度、保持压力、保持时间、注射速度、冷却时间、模具温度、注射压力、注射时间等工艺参数已经可以设定优化，并建立了工艺参数与被调查材料的行为之间的相关性。其他人则对 IM 的一些特定领域进行了优化研究，如冷却通道设计、闸板位置、转轮系统设计等。

文献[17]提出了基于集成学习的注塑工艺的自适应质量预测，采用贝叶斯参数优化法改善监督学习算法的性能，组合学习模型，在不同条件下获得良好的结果，能够实现注射成型质量的自动识别。

文献[18]利用从模内温度和压力传感器提取的实时数据，开发了一个基于人工神经网络的在线缺陷检测系统，提出了基于实时数据的多线性回归 (MLR) 和神经网络模型，证明了这种基于神经网络的专家系统集成到注塑过程中以改进在线尺寸监测的可行性。

文献[19]采用不同的 DOE 模拟了聚丙烯板试样的长度、宽度、重量和参数，作为训练数据库。使用全因子和分数因子设计、中心复合设计、正交田口阵列、D-最优设计和空间填充设计的方法，利用人工神经网络进行训练，评估了人工神经网络对未知测试数据的预测性能，找到了一种有效的注塑机建模策略。

根据以上查阅的文章，国外有较多有关注塑机工艺参数优化和质量在线监测和管理的研究，大多需要借助熔体温度、熔体压力等传感器，以及视觉传感器，对塑胶产品的质量进行实时监控和闭环控制。同时，通过引入卡尔曼滤波器、人工神经网络和专家系统等智能控制算法，对控制性能做了进一步优化，并探究了注塑系统建模和控制参数预测的问题。

在注塑机的背压控制方面，目前有较为成熟的技术方案。其中就有意大利著名的液压系统解决方案提供商 Atos 的技术方案，如下图所示：

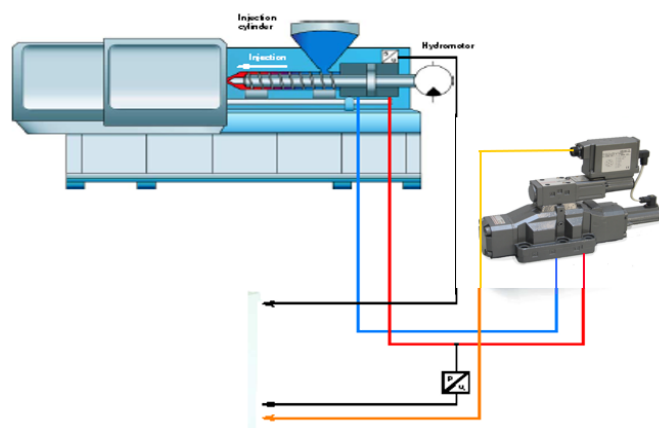


图 1-2 采用 V9 阀的注塑机背压控制方案  
Fig.1-2 Back pressure control scheme using V9 valve

如图 1-2，该方案使用了一种复合功能阀（V9 阀或 Q5 阀）来控制注塑机注射油缸的前进和后退动作，从而控制注射螺杆前进注射和回退储料的过程。根据官方的产品手册，V9 阀属于 P/Q 控制阀，可应用于注塑机注射循环的交替控制，管理注塑机的整个注入周期。当阀采用 Y 型中位机能时，AB 口通过比例阀与油箱直通，注塑机处于空闲状态；当阀处于右位时，PA 相通，BT 相通，螺杆前进注射；当阀采用 H 型中位机能时，注塑机处于锁模保压阶段；当阀采用 Y 型中位机能时，注塑机处于背压塑化阶段，液态塑胶被挤入计量室；当阀处于左位时，AT 相通，BP 相通，注塑机处于泄压阶段，注射螺杆回退，油压下降。

虽然 V9 阀和 Q5 阀具有强大的控制性能，用途广泛，但它们售价过于高昂，不利于提高注塑机生产企业大规模生产时的利润水平。同时，该方案的最低回油背压不够低，控制原理较为复杂，因此市场迫切需要一种成本更低、原理简单，且控制性能同样优异的解决方案。

### 1.2.2 低背压控制国内相关研究

针对注塑机的背压控制问题，郝思琪等<sup>[20]</sup>通过控制电机转矩来控制泵输出压力，从而控制输入油压，不受流量影响。徐小平<sup>[21]</sup>针对换向阀阀芯泄露引起注射缸误动作的问题，对背压阀进行分析和改造，改善了预塑背压阀压力曲线。刘松良<sup>[22]</sup>根据串级 PID 控制原理，提出了基于速度内环的压力控制方法，保证了全电动注塑机注射压力的精确控制。高俊等<sup>[23]</sup>针对传统注塑机溢流损失严重、电力消耗大等问题，提出了一种控制异步伺服电机转矩和转速，同时采用串联双齿轮泵，通过压力与流量反馈形成闭环控制，从而实现注塑机液压系统节能的方法。高华

等<sup>[24]</sup>针对注塑机液压元器件容腔泄漏，导致设备误动作，影响产品精度的问题，对液压元件阀体进行了改造，增加了动态阻尼孔，取得了一定成效。周会成<sup>[25]</sup>提出了一种根据经验并基于二次曲线的螺杆后退速度控制方法，基于该方法实现了全电动注塑机计量过程中背压的控制，通过实验观察了在不同设定背压值下的实际控制效果，验证了算法的有效性。

文献[26]研究了全电动注塑机熔体压力传感器的电压信号与熔体压力的关系，提出了一种校验塑胶压力的方法，从而提高了伺服电机控制背压的精度。

文献[27]设计了一种基于神经网络比例积分微分控制的伺服驱动注塑机恒压控制系统，通过径向基函数（RBF）神经网络实现压力 PID 参数的自适应在线调整，使得压力控制 PID 参数达到最优。

文献[28]建立了注射单元的保压工艺模型，提出了一种“PI 控制器+压力递增（减）”的方法，实现了保压压力响应的快速性，有效解决压力超调问题。同时也提出了“基于二次曲线的直接背压控制”方法，在计量过程中控制螺杆旋转速度恒定，以替代液压注塑机中利用调节单向背压阀弹簧的弹簧力来控制螺杆回退速度的方法。

文献[29]研究了影响注塑机能耗的因素，发现螺杆转速越高，能耗越大；料筒温度越高，能耗更低；回油背压越高，总能耗越高。因此降低背压有利于系统节能。对于大规模塑胶产品的生产企业而言，由于设备数量多，且 24 小时连续运行，因此降低背压带来的能耗经济价值将十分可观。

综上所述，目前绝大多数有关背压控制的研究都是针对全电动注塑机而言的。其采用熔体压力传感器和伺服电机控制背压，本质上是间接压力闭环的控制，技术较为成熟。因此大多数研究都是引用了各种各样的算法，以达到提升压力 PID 控制性能的目的。然而，我国大多数注塑机生产企业生产的仍然是传统的液压式注塑机，实际使用中也是以液压式注塑机为主。因此对液压式注塑机背压控制方法的研究仍然具有重要的价值和意义。

文献[21]和文献[24]对背压阀体进行改造的方法较复杂，且回位弹簧建压较慢；而采用伺服电机驱动液压马达，是通过调节注射油缸输入腔压力来间接控制背压的，其回油压力始终存在压力脉动的问题。而市面上采用 V9 阀的控制方案成本较高，且起调压力偏高，无法实现低背压和零背压控制。因此，该课题研究了一种可直接控制注射缸回油路背压的新型控制方法，在回油路串联一个比例换向阀，并且不使用压力传感器，仅利用回油流量和设定背压力值计算回油路比例换向阀的开度，实现回油路的压力直接调控。相比其他方法，该方法能适用于多

种型号的注塑机，可通用于液压式注塑机和全电动注塑机，且背压控制不与注塑机工艺控制相耦合，具有独立性，因此系统更加简单，可靠性更高。

### 1.3 注塑机模糊决策控制国内外研究现状

#### 1.3.1 模糊决策控制国内研究状况

文献[30]综述了 PID-模糊控制法和自整定 PID-模糊控制法在塑料注塑加工过程中温度、压力等工艺参数监控中的应用。文献[31]设计了一款具有自学能力的神经元 PID 控制器，利用模糊算法对其进行优化。在原有注射速度线性数学模型基础上，构建注塑机注射速度的非线性模型，并进行了 MATLAB 仿真实验。文献[32]针对注塑机料筒多区间温度场的相互耦合影响，造成温度振荡和稳定性差的问题，设计双模糊 PID 补偿控制策略。利用模糊补偿控制对温度耦合进行补偿，提高温度控制的稳定性和精确性。文献[33]针对塑料薄膜控制系统存在非线性强、大时滞性、薄膜厚度控制精度低等问题，设计了一种模糊控制规则、神经网络与传统 PID 相结合的塑料薄膜厚度自适应控制系统，利用模糊控制规则和神经网络的自学习能力，实现了传统 PID 控制参数的在线自适应调整。文献[34]针对传统注射成型装备中保压压力控制精度不高的问题，根据全电动注塑机的特点与性能，研究了基于模糊策略的非线性模型的注塑机保压控制方法，设计了一种压力控制方案，取得了良好的效果。文献[35]针对精密注塑机对注塑闭环控制效果要求较高的问题，引入粒子群算法改进模糊控制算法的模糊规则与隶属度函数，利用模糊算法推理了系统的非线性微分方程，对注塑过程的电液比例控制系统的参数进行优化，并通过 MATLAB 进行了验证。

#### 1.3.2 模糊决策控制国外研究状况

文献[36]针对注塑机筒体温度控制的耦合和非线性的问题，结合神经网络算法和模糊算法的优点，设计了模糊神经网络解耦补偿器，以提高温度控制的精度和稳定性。利用模糊控制调整温度误差，同时利用神经网络优化模糊控制规则，提高系统补偿精度和控制精度。仿真证明，该方法具有良好的抗干扰能力、模型失配鲁棒性和解耦能力。文献[37]采用了模糊控制算法解决机器人的局部路径规划问题，将模糊控制与生物行为感知结合，提出了针对移动机器人的完全接触障碍物的避障策略。文献[38]提出了一种基于模糊控制的权重决策量子狼群进化算法，采用双策略法和滑模交叉原理优化量子狼群初始位置和头狼的选择，采用一种新的

非线性收敛因子改进头狼的搜索方向算子，提高局部搜索能力。文献[39]提出了一种基于模糊逻辑控制器（FLC）的六相轴向磁通永磁同步电机（6P-AFPMSM）容错策略的实时实现，使得该电机更适用于大功率、电感谐波大和电动势影响大的场合。文献[40]介绍了用于快速拾取和放置操作的四肢并联运动的机器人的控制策略，采用了模糊滑模变结构控制，抑制驱动关节的抖振，使机器人末端执行器的位姿误差最小化。

## 1.4 研究内容与方法

为解决现有的注塑机背压控制起调压力偏高、建压较慢和设备成本高昂的问题，本文提出了一种新型注塑机背压控制方案，即回油路背压被动式控制。由于该方案仅使用一个位移传感器，获取油缸的运动速度，而非压力，反馈量和控制量非同一物理量，因此不能采用传统的闭环偏差控制方法。本文提出了一种根据背压和流量调节阀芯开度，从而间接控制背压的模糊决策控制方法。该方法根据流量和设定背压值，经模糊决策和推理，得到一个对应的阀芯开度信号，调节回油路比例换向阀的开度，从而实现回油路的压力调节。

文章首先从公式和液压系统原理图上分析了该方案的控制原理，搭建了基于模糊决策控制的联合仿真模型，并详细介绍了模糊控制器和模糊规则的建立过程，通过软件仿真验证了该背压控制方案的可行性。由于模糊控制等智能算法直接应用于微控制器较困难，程序和数据量较大，因此研究了使用查表和插值算法在微控制器中实现模糊控制的方法，并利用仿真工具进行了验证。理论工作完成后，叙述了该控制系统的执行机构——比例换向阀电子放大器的设计与制作过程，包括设备原理、硬件和软件，并附上了重要的电路图和程序代码。最后设计了简易的测试实验，并与传统的注塑机背压 PID 控制曲线相对比，证实了注塑机背压模糊决策控制和查表插值算法的创新性和可行性。

注塑机背压模糊决策控制的研究流程如下图 1-3 所示：

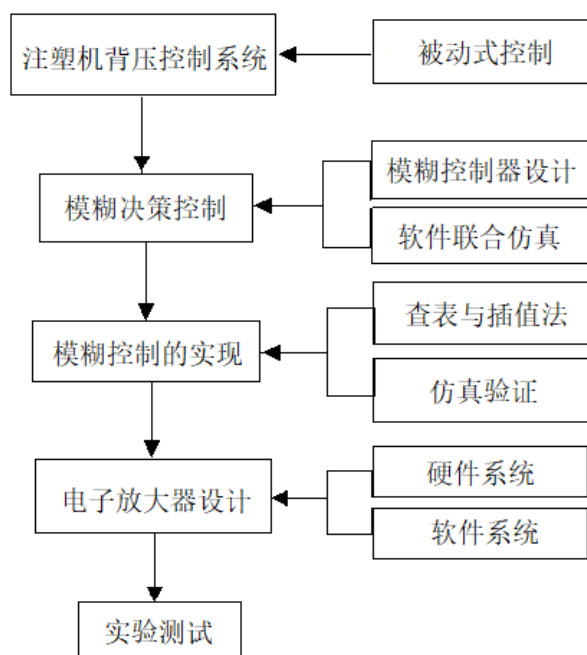


图 1-3 研究路线图  
Fig.1-3 Research Roadmap

具体而言，本论文中涵盖的主要研究内容如下：

第一章：绪论。本章节简要介绍了注塑机工作的原理和背压控制的基本概念，引出了背压控制的研究背景与意义。简要介绍了国内外有关注塑机背压控制的技术方案和研究现状，以及模糊决策控制的国内外研究状态。分析了相关研究的不足和可改进之处，叙述了本文的主要研究内容和研究路线。

第二章：基于模糊决策的注塑机背压控制系统的原理及其建模仿真。首先介绍了注塑机背压控制的液压油路，描述了该系统在宏观上的概念和控制方法。由于不能使用传统的负反馈偏差控制，因此采用了模糊决策控制和间接闭环控制的方法。通过模拟人的语言和思维，去完成背压的控制，不受温度和胶体黏度的影响，相比输入端油压的主动式控制，该方法亦克服了压力脉动的问题。结合注塑机的相关参数，详细介绍了模糊控制器和模糊规则设计的过程，并建立 MATLAB-AMESim 联合仿真模型，得到了背压力和流量曲线，验证了该模糊控制系统的可行性。

第三章：由于将模糊决策控制直接应用于单片机等微控制器较困难，代码和数据量均较大，因此研究了将模糊控制器应用于微控制器的简化方法。根据基本原理公式，计算出了阀芯开度二维表，并设计了相关程序，以代替模糊规则表。

同时考虑了采用最邻近插值法、拉格朗日插值法等反模糊化方法，并与传统的最大平均反模糊方法做比较。在 MATLAB 中搭建了仿真模型，证实了该方案可在微控制器中实现模糊控制的功能。

第四章：对控制系统的执行机构-比例换向阀电子放大器的设计过程进行了详细介绍。包括位移传感器和比例电磁铁的控制原理、硬件和软件的架构、每个硬件电路的设计、软件状态机、软件流程图、片上系统等。结合具体的电路和部分代码，探究了电子放大器的技术原理，并展示了电路板实物。

第五章：系统测试与验证。包括电路板上电测试，程序调试，带阀测试，台架工装测试等工作。测试对比了传统注塑机背压力曲线和该系统的背压力曲线的控制效果。结果表明，采用模糊决策控制和插值反模糊化控制后，系统背压控制精度与传统闭环控制相接近，控制性能较为优异，且使用的传感器更少。因为系统使用的比例换向阀相比 V9 阀等成本更低，因此可降低注塑机的成本，具有较大的运用价值。

第六章：结束语。总结了该课题的创新点和意义，以及本研究的运用途径和方式，在研究过程中的经验总结和不足。



## 第二章 注塑机低背压的控制方法与仿真研究

### 2.1 引言

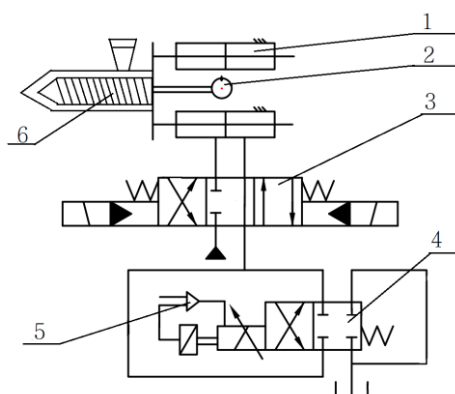
为降低成本,该注塑机低背压控制系统只包含一个油缸位移传感器,仅使用油缸的运动速度作为反馈信号。要求在任意回退速度下,通过调节回油路上的比例换向阀的阀芯开度,使得回油腔压力保持恒定,并且希望该系统最低背压接近于零。故分析了回油路被动式背压控制的原理,推导了根据螺杆回退速度和设定背压值控制回油压力的算法公式,并介绍了液压系统示意图和比例阀驱动的原理。

根据推导得到的注塑机低背压控制的理论公式,设计了注塑机低背压控制的模糊决策控制器,分析了控制器的结构、隶属函数、模糊规则表、反模糊化输出模块等,并详细介绍了利用MATLAB/Simulink搭建模糊决策控制器的过程,验证了该方案的可行性。

### 2.2 回油路被动式背压控制原理

#### 2.2.1 液压系统原理图

针对传统的液压式注塑机,只需要对注射油缸的回油路进行改造设计即可,如下图所示:



1. 注射油缸 2. 螺杆控制液压马达 3. 电液换向阀 4. 比例换向阀  
5. 电子放大器 6. 注射螺杆

图 2-1. 液压原理图

Figure 2-1. Hydraulic schematic diagram

在图 2-1 的液压原理图中, 在传统液压式注塑机注射油缸的回油路靠近油箱的一侧, 串联了双通道比例换向阀 4。比例换向阀 4 的 A 口与 P 口共同接普通电液换向阀 3 的 T 口, 而比例换向阀 4 的 B 口和 T 口共同接油箱, 以增大回油流量, 实现低背压大流量的控制性能。注射油缸 1 缸筒固定, 且为双出杆, A 口侧杆较粗, B 口侧杆较细, 以配合电液换向阀 3 的中位机能。3 为普通电液换向阀, 控制注射缸前进和回退, 采用 J 型中位机能, 即 P 与 A 口封闭, B 与 T 口相通, 注射缸活塞在塑胶压力的推动下可向一边回退, 同时液压泵不用卸荷。电子放大器 5 采集注射螺杆 6 的位移或速度信号, 根据回退速度计算得到控制量, 控制比例换向阀 4, 直接控制回油背压。

相比传统的背压控制方案, 该方案采用了间接闭环和被动式的回油压力控制原理, 不受输入端压力脉动和熔体温度等因素的影响, 响应速度快, 回油流量大, 背压更低更稳定, 且原理简明, 成本低廉。

### 2.2.2 控制原理分析

该系统的设计目标是采用尽可能少的传感器来实现回油背压的调控。反馈信号仅有油缸位移信号, 因此需要分析推导根据油缸运动参数来控制背压力的原理公式。

由圆柱滑阀的流量公式<sup>[41,42]</sup>:

$$Q = CA\sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (2-1)$$

$A$ ——阀口过流面积,  $A = \pi d\sqrt{x^2 + \delta^2}$

$d$ ——阀芯直径

$x$ ——实际的阀芯位移

$\delta$ ——阀芯与阀体配合间隙

$\rho$ ——油液密度

$C$ ——流量系数

$\Delta P = P_1 - P_2 \approx P_1$ ,  $P_1$  为比例换向阀输入端油压;  $P_2$  为换向阀输出端油压, 由于输出端直接接油箱, 故  $P_2$  为零。

又由注射油缸运动公式:

$$Q = A_1 V \quad (2-2)$$

$A_1$ ——回油腔面积,  $A_1 = \pi * (D_s^2 - d_s^2) / 4$

$D_s$  —— 活塞直径

$d_s$  —— 活塞杆直径

$V$  —— 油缸速度

由公式 (2-1) 和公式 (2-2) 可以得到根据注射缸回退速度 (流量) 和设定背压值计算比例换向阀阀芯开度的公式如下:

$$x = \sqrt{\frac{A_1^2 V^2 \rho}{2 C^2 \pi^2 d^2 P_1}} - \delta^2 \quad (2-3)$$

由于  $\delta^2$  非常微小, 因此可以舍去, 则公式简化为:

$$x = \frac{A_1 V}{C \pi d} \sqrt{\frac{\rho}{2 P_1}} \quad (2-4)$$

综上, 该系统在原理上可以利用传感器检测的油缸速度  $V$  和人为设定的背压目标值  $P_1$  对换向阀开度进行动态调节, 从而改变回油路的阻尼, 实现注塑机背压的直接控制。由于未采用压力传感器做直接闭环控制, 且输出控制参数都是根据公式提前生成的, 因此该控制方案可以采用模糊决策控制器和查表控制的方法来实现。根据公式 (2-4) 和系统参数表, 可以计算得到一个双输入单输出的二维阀芯开度表, 作为模糊决策控制器的原始样本数据。

## 2.3 使用模糊决策控制器实现注塑机低背压控制

### 2.3.1 MATLAB 模糊控制工具箱

MATLAB 自带模糊控制工具箱 “fis editor”, 即模糊推理系统编辑器<sup>[43]</sup>。使用时, 用户只需在命令行串口输入指令 “fuzzy”, 即可弹出编辑器界面。模糊控制工具箱包含输入量、模糊规则库、输出量三个部分。用户可以删除默认设置的参数, 自行添加输入参数的个数和三角函数规则。该工具箱可以直观地生成三角隶属函数曲线和三维曲线, 设计模糊规则亦十分简易, 效果如后文所示。设置完成后, 需要将模糊控制器保存为 “.fis” 格式的文件。除此以外, 还需在 Simulink 中搭建控制系统模型, 引入模糊控制函数模块, 同时在模块中引入同名的 “.fis” 格式文件, 方可进行仿真。

### 2.3.2 注塑机低背压模糊决策控制器的设计

该系统的传感器信号为油缸位移, 控制目标和对象为回油路背压力, 输出信号为比例换向阀的驱动信号, 即阀芯开口度百分数。由于反馈量, 控制量和输出

量不是同一物理量，不能直接做偏差计算，因而不能采用传统的偏差闭环控制思想，而是一个间接闭环的控制过程，因此采用模拟人的语言和思维控制的模糊决策控制器更为合理。根据公式（2-4），控制器具有两个输入量，即油缸速度和设定背压值，一个输出量即阀芯开度。根据油缸速度和设定背压，可以唯一确定一个阀芯开度信号，使得比例换向阀动作后的实际回油压力接近设定的压力值。因此选用双输入单输出的模糊决策控制器，控制器的输入为设定的目标背压值和油缸速度（流量），输出为阀芯开度百分数。控制器结构原理图如下所示：

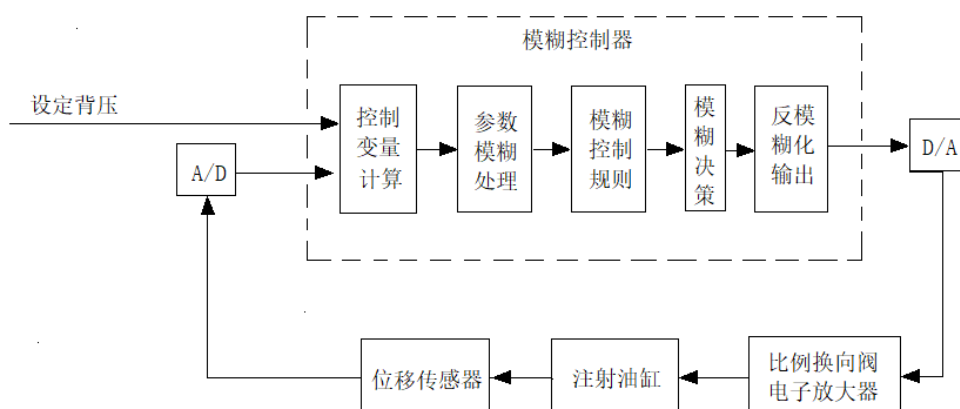


图 2-2. 注塑机背压模糊控制原理框图

Figure 2-2. Principle block diagram of back pressure fuzzy control

由上图可知，该系统为定值控制系统，类似于水位或恒温控制。输入参数为设定背压值，反馈量为注射油缸的位移。模糊控制器接收输入量后，首先将位移换算为流量，再对参数进行模糊化处理，之后按照模糊控制规则进行模糊决策，得到可信度最高的推理结果，最后采用不同的反模糊化方法得到精确输出。系统输出的值为阀芯开度百分数，需要转换为 0-20mA 的电流信号，输入比例换向阀的电子放大器中，通过放大器调节换向阀阀芯的移动，从而改变回油阻尼，实现调压。

### 2.3.3 参数模糊化及隶属函数

该背压控制系统仅对回退过程进行控制，因此输入量具有单极性，与一般考虑正负值的模糊集不同。可将输入量背压值划分为 5 个模糊集：PL(20-25bar)、PB(15-20bar)、PN(10-15bar)、PM(5-10bar)、PS(0-5bar)；将输入量油缸流量划分为 7 个模糊集：YA(0-30L/min)、YB(30-60L/min)、YC(60-90L/min)、YD(90-120L/min)、YE(120-150L/min)、YF(150-180L/min)、YG(180-210L/min)；将输出量阀芯开度百

分数划分为 5 个模糊集：KB(80%-100%)、KM(60%-80%)、KN(40%-60%)、KS(20%-40%)、KE(0%-20%)。

其中背压值对应的隶属函数表达式为：

$$\mu_{\text{背压}} = \begin{cases} \mu_{PS}(x) = (6.25 - x) / 6.25, 0 \leq x \leq 6.3 \\ \mu_{PM}(x) = \begin{cases} x / 6.25, 0 \leq x \leq 6.25 \\ (12.5 - x) / 6.25, 6.25 < x \leq 12.5 \end{cases} \\ \mu_{PN}(x) = \begin{cases} (x - 6.25) / 6.25, 6.25 \leq x \leq 12.5 \\ (18.75 - x) / 6.25, 12.5 < x \leq 18.75 \end{cases} \\ \mu_{PB}(x) = \begin{cases} (x - 12.5) / 6.25, 12.5 \leq x \leq 18.75 \\ (25 - x) / 6.25, 18.75 < x \leq 25 \end{cases} \\ \mu_{PL}(x) = (x - 18.75) / 6.25, 18.75 < x \leq 25 \end{cases} \quad (2-5)$$

同理，可以求出流量和阀芯开度的隶属函数表达式：

$$\mu_{\text{流量}} = \begin{cases} \mu_{YA}(y) = (35 - y) / 35, 0 \leq y \leq 35 \\ \mu_{YB}(y) = \begin{cases} y / 35, 0 \leq y \leq 35 \\ (70 - y) / 35, 35 < y \leq 70 \end{cases} \\ \mu_{YC}(y) = \begin{cases} (y - 35) / 35, 35 \leq y \leq 70 \\ (105 - y) / 35, 70 < y \leq 105 \end{cases} \\ \mu_{YD}(y) = \begin{cases} (y - 70) / 35, 70 \leq y \leq 105 \\ (140 - y) / 35, 105 < y \leq 140 \end{cases} \\ \mu_{YE}(y) = \begin{cases} (y - 105) / 35, 105 \leq y \leq 140 \\ (175 - y) / 35, 140 < y \leq 175 \end{cases} \\ \mu_{YF}(y) = \begin{cases} (y - 140) / 35, 140 \leq y \leq 175 \\ (210 - y) / 35, 175 < y \leq 210 \end{cases} \\ \mu_{YG}(y) = (y - 175) / 35, 175 < y \leq 210 \end{cases} \quad (2-6)$$

$$\mu_{\text{开度}} = \begin{cases} \mu_{KE}(z) = (25 - z) / 25, 0 \leq z \leq 25 \\ \mu_{KS}(z) = \begin{cases} z / 25, 0 \leq z \leq 25 \\ (50 - z) / 25, 25 < z \leq 50 \end{cases} \\ \mu_{KN}(z) = \begin{cases} (z - 25) / 25, 25 \leq z \leq 50 \\ (75 - z) / 25, 50 < z \leq 75 \end{cases} \\ \mu_{KM}(z) = \begin{cases} (z - 50) / 25, 50 \leq z \leq 75 \\ (100 - z) / 25, 75 < z \leq 100 \end{cases} \\ \mu_{KB}(z) = (z - 75) / 25, 75 < z \leq 100 \end{cases} \quad (2-7)$$

根据隶属函数表达式，将以上参数输入 MATLAB 的模糊控制工具箱，得到背压和流量的三角形隶属函数曲线如下：

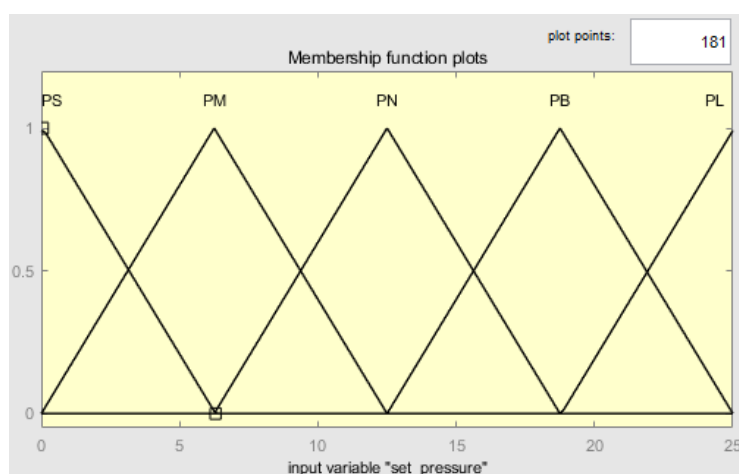


图 2-3. 背压三角隶属函数

Figure 2-3. Triangular membership function of back pressure

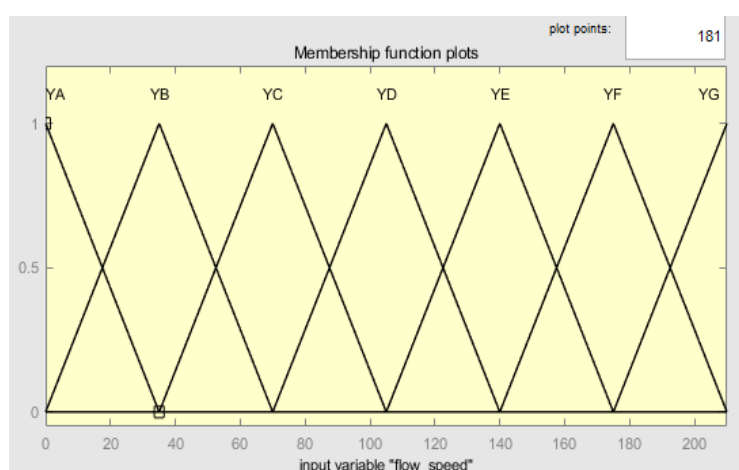


图 2-4. 流量三角隶属函数

Figure 2-4. Flow trigonometric membership function

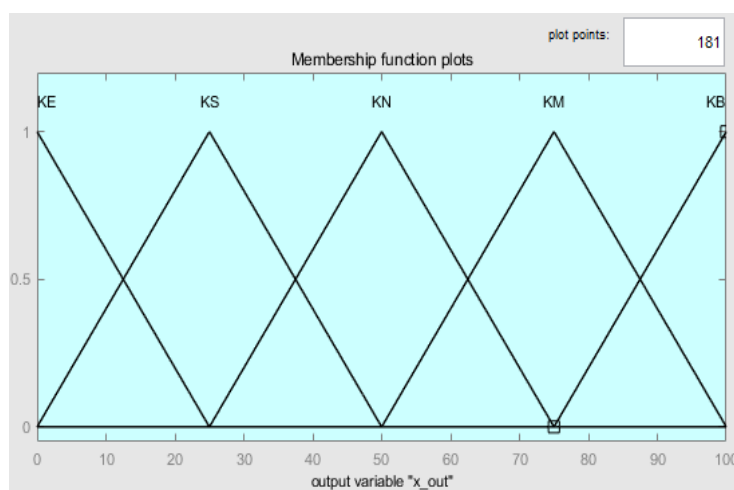


图 2-5. 阀芯开度三角隶属函数

Figure 2-5. Triangular membership function of valve core opening

### 2.3.4 模糊规则表

根据专家意见,注塑机回油路背压被动式控制的基本原则为:“设定背压越高,则应输出的阀芯开度越小”;“设定背压越低,则应输出阀芯开度越大”;“检测反馈的流量越大,则对应的阀芯开度越大”;“反馈的流量越小,则对应输出的阀芯开度越小”。按照此模糊规则,建立模糊控制表如下所示:

表 2-1 注塑机背压控制模糊规则表

Table 2-1 Fuzzy rule table for back pressure control of injection molding machine

输出阀芯开度		流量 x						
百分数 z		YA	YB	YC	YD	YE	YF	YG
背压 y	PS	KN	KN	KN	KM	KB	KB	KB
	PM	KS	KN	KN	KM	KM	KB	KB
	PN	KE	KS	KN	KN	KM	KM	KB
	PB	KE	KE	KS	KN	KN	KM	KM
	PL	KE	KE	KE	KS	KN	KM	KM

将以上规则输入 MATLAB 的规则编辑器,得到 35 条规则语句如下:

1. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YA) then (x\_out is KN) (1)
2. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YB) then (x\_out is KN) (1)

3. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KN) (1)
4. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KM) (1)
5. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YE) then (x\_out is KB) (1)
6. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YF) then (x\_out is KB) (1)
7. If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YG) then (x\_out is KB) (1)
8. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YA) then (x\_out is KS) (1)
9. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YB) then (x\_out is KN) (1)
10. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KN) (1)
11. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KM) (1)
12. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YE) then (x\_out is KM) (1)
13. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YF) then (x\_out is KB) (1)
14. If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YG) then (x\_out is KB) (1)
15. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YA) then (x\_out is KE) (1)
16. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YB) then (x\_out is KS) (1)
17. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KN) (1)
18. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KN) (1)
19. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YE) then (x\_out is KM) (1)
20. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YF) then (x\_out is KM) (1)
21. If (set\_pressure is PN) and (flow\_speed is YG) then (x\_out is KB) (1)
22. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YA) then (x\_out is KE) (1)
23. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YB) then (x\_out is KE) (1)
24. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KS) (1)
25. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KN) (1)



26. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YE) then (x\_out is KN) (1)
27. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YF) then (x\_out is KM) (1)
28. If (set\_pressure is PB) and (flow\_speed is YG) then (x\_out is KM) (1)
29. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YA) then (x\_out is KE) (1)
30. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YB) then (x\_out is KE) (1)
31. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KE) (1)
32. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KS) (1)
33. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YE) then (x\_out is KN) (1)
34. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YF) then (x\_out is KM) (1)
35. If (set\_pressure is PL) and (flow\_speed is YG) then (x\_out is KM) (1)

根据模糊规则表生成的三维图如下：

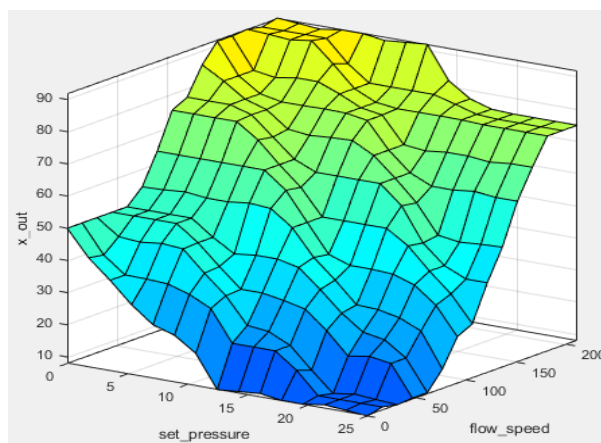


图 2-6. 模糊规则曲面观察器  
Figure 2-6. Fuzzy regular surface observer

由图 2-6 可知，流量越大，设定背压越小，则阀芯开度越大，这与一般的控制原则是一致的。但由于是自然语言控制，模糊集个数有限，曲面图平滑度差，因此直接输出的参数连续性必然较差。

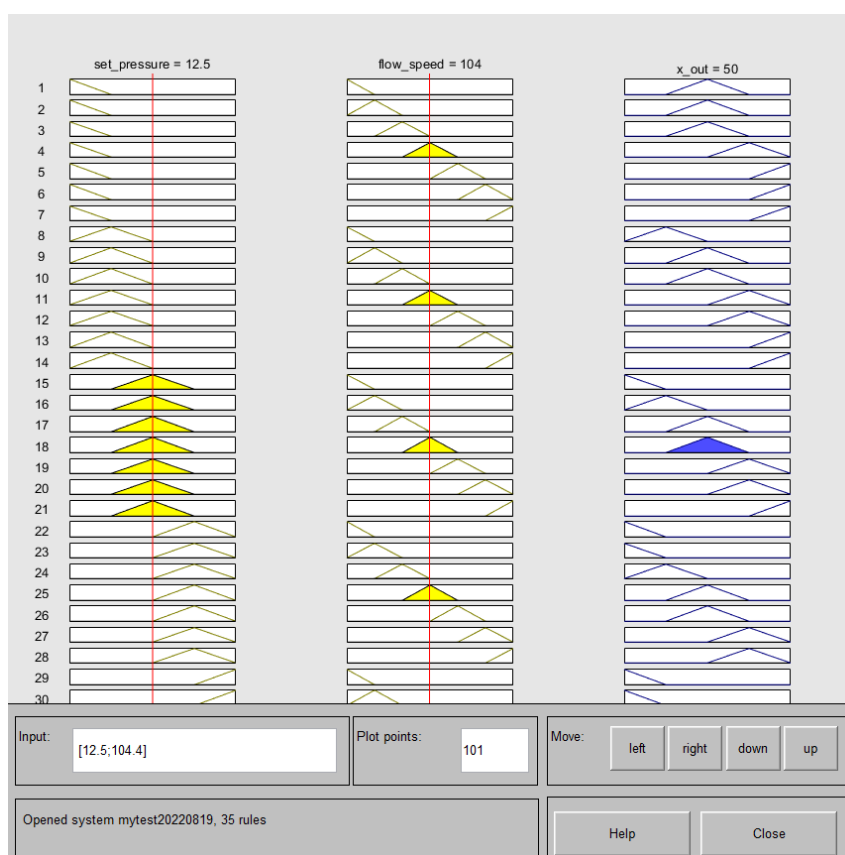


图 2-7. 模糊规则观察器  
Figure 2-7. Fuzzy rule observer

图 2-7 为模糊规则观察器，其反映了输入量和输出量之间的对应关系，红色竖线代表输入值，黄色三角形代表输入变量所属的输入模糊集，蓝色三角形代表输出的模糊集。

### 2.3.5 模糊决策与推理

假定某一时刻传感器检测到油缸回退速度为  $x_0$  (流量)=100L/min，设定背压  $y_0$ =5bar，分别代入所属隶属函数可得流量隶属度为（若隶属度值为负，则取零）：

$$\begin{cases} \mu_{YA}(100) = 0, \mu_{YB}(100) = 0, \mu_{YC}(100) = \frac{1}{7}, \mu_{YD}(100) = \frac{6}{7} \\ \mu_{YE}(100) = 0, \mu_{YF}(100) = 0, \mu_{YG}(100) = 0 \end{cases}$$

同理，背压的隶属度为：

$$\mu_{PS}(5) = \frac{1}{5}, \mu_{PM}(5) = \frac{4}{5}, \mu_{PN}(5) = 0, \mu_{PB}(5) = 0, \mu_{PL}(5) = 0$$

因此可以得到 4 条相匹配的模糊规则，如下表所示：

表 2-2 模糊推理结果表  
Table 2-2 Fuzzy inference result table

阀芯开度 z	流量 x						
	YA	YB	YC(1/7)	YD(6/7)	YE	YF	YG
背压 y	PS(1/5)	0	0	$\mu_{KN}(z)$	$\mu_{KM}(z)$	0	0
	PM(4/5)	0	0	$\mu_{KN}(z)$	$\mu_{KM}(z)$	0	0
	PN	0	0	0	0	0	0
	PB	0	0	0	0	0	0
	PL	0	0	0	0	0	0

根据模糊推理结果，有 4 条规则被触发：

规则 1：If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KN)

规则 2：If (set\_pressure is PS) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KM)

规则 3：If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YC) then (x\_out is KN)

规则 4：If (set\_pressure is PM) and (flow\_speed is YD) then (x\_out is KM)

可信度取小运算，则每条规则前提的可信度为：

规则 1 前提可信度： $\min(\frac{1}{5}, \frac{1}{7}) = \frac{1}{7}$

规则 2 前提可信度： $\min(\frac{1}{5}, \frac{6}{7}) = \frac{1}{5}$

规则 3 前提可信度： $\min(\frac{4}{5}, \frac{1}{7}) = \frac{1}{7}$

规则 4 前提可信度： $\min(\frac{4}{5}, \frac{6}{7}) = \frac{4}{5}$

将模糊推理结果与每条规则的前提可信度进行“与”运算，再取并集，即可得到模糊系统总的可信度输出：

$$\begin{aligned}\mu_{at}(z) &= \max \left\{ \min(\frac{1}{7}, \mu_{KN}(z)), \min(\frac{1}{5}, \mu_{KM}(z)), \min(\frac{1}{7}, \mu_{KN}(z)), \min(\frac{4}{5}, \mu_{KM}(z)) \right\} \\ &= \max \left\{ \min(\frac{1}{7}, \mu_{KN}(z)), \min(\frac{4}{5}, \mu_{KM}(z)) \right\}\end{aligned}\quad (2-8)$$

由此可见，在当前条件下，有两条规则被触发。

### 2.3.6 反模糊化及输出

注塑机模糊决策控制系统总的输出实质上是以上两个规则推理结果之并集，通过反模糊化，方可得到精确的推理结果。若以最常用的最大隶属度平均法进行

反模糊化，则可由公式（2-8），得到阀芯开度最大隶属度值为  $\frac{4}{5}$ ，再将其代入阀芯开度隶属函数中的  $\mu_{KM}(z)$ ：

$$\frac{z_1 - 50}{25} = \frac{4}{5}, \frac{100 - z_2}{25} = \frac{4}{5}$$

解得  $z_1 = 70, z_2 = 80$ ，采用最大平均法，可得精确输出为：

$$z^* = \frac{z_1 + z_2}{2} = 75$$

即当油缸回退速度为  $x_0$  (流量)=100L/min，设定背压  $y_0=5\text{bar}$  时，模糊决策控制输出的阀芯开度百分数为 75%。

## 2.4 基于模糊决策控制的注塑机背压控制系统联合仿真

### 2.4.1 仿真软件介绍

搭建基于 MATLAB 和 AMESim 的液压控制系统联合仿真模型，对 MATLAB 不再赘述。AMESim 全称为 LMSImagine.Lab AMESim，它是一款多学科领域复杂系统建模与仿真平台<sup>[44]</sup>，AMESim 可应用于动力传动、燃油喷射、液压系统、机电系统、制动系统等多个工程领域的元件分析和半实物分析，支持研究任何元件或系统的稳态和动态性能。AMESim 集成了一整套物理模型库，包含液压元件库、机械库、液压及其管道库、电机及驱动库、信号控制库、流体动力学库等等。有了这些模块化和半实物的物理模型，用户可以将研究对象抽象化为简单的物理模型，无需编写复杂的代码，直观地研究物理系统本身，从而提高了建模和分析的效率。

本课题结合 MATLAB 和 AMESim 软件各自的优点，搭建联合仿真模型。利用 AMESim 搭建注塑机背压控制的液压系统物理模型，而无须分析整个注塑机机械系统的数学模型和运动方程。利用 MATLAB/Simulink 中的二维表和用户自定义函数等模块搭建了算法控制器。在 AMESim 中建立注塑机注射缸回退背压控制物理模型，并创建与 MATLAB 联合仿真的 interface 接口，经过系统编译和参数设置生成供 Simulink 使用的 mexw64 文件。通过该文件将注射缸回退速度和设定背压传递到 Simulink 中，同时 Simulink 中对应的 S 函数模块将比例换向阀阀芯开度信号通过该模块输出给 AMESim，从而实现两个软件的联合仿真<sup>[45]</sup>。

### 2.4.2 基于模糊决策的 Simulink-AMESim 联合仿真模型

搭建AMESim物理仿真模型如下图2-8所示:

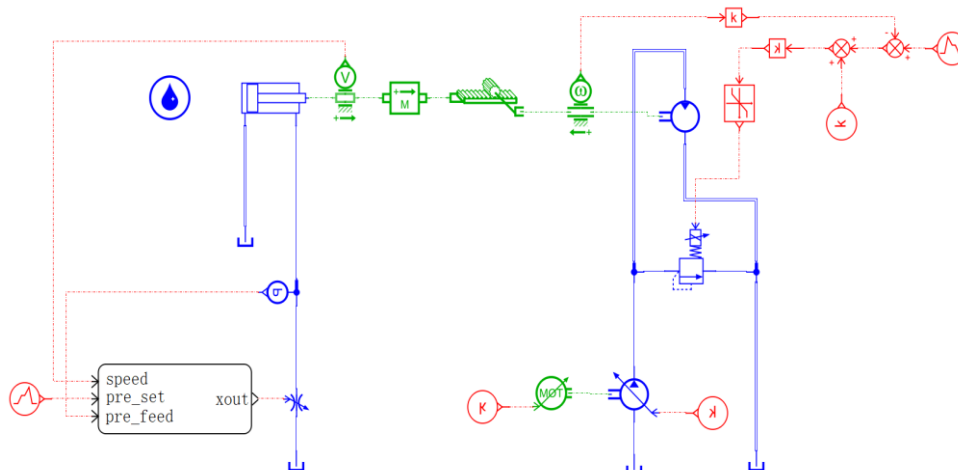


图 2-8 AMESim 仿真模型图  
Fig.2-8 AMESim joint simulation model diagram

图 2-8 中,仅考虑了注射油缸回退的过程,将液压马达带动螺杆旋转进料,液态塑胶压力上升反推螺杆回退的过程等效简化为液压马达直接通过减速机构带动油缸回退的过程。根据文献[46],注射油缸回退速度一般可取 0.05m/s,因此液压泵转速设定为 1000rpm,液压马达转速可设定为 500rpm,目标背压设定为 3bar,其他参数设定参照表 2-1。在该图中,回油路安装的压力传感器将采集的压力传到 Simulink 中的示波器进行显示,并不参与控制,系统的反馈量仅有油缸的运动速度。

搭建 Simulink 联合仿真模块如下 2-9 所示:

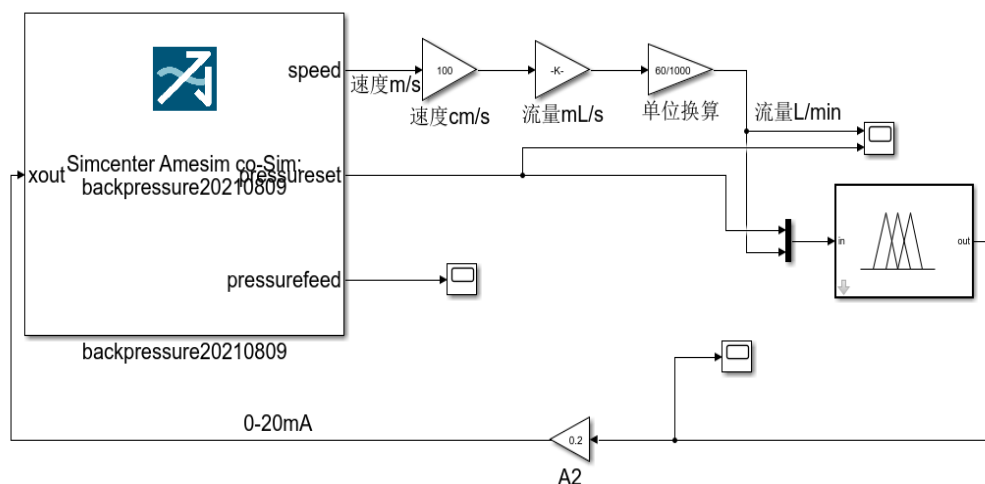


图 2-9 Simulink 联合仿真模型图  
Fig.2-9 Simulink joint simulation model diagram

如图 2-9, Simulink 模型从 interface 接口得到油缸回退的速度和设定的背压值。将速度换算为流量, 作为第一个输入量, 同时将设定压力作为第二个输入量, 送入模糊逻辑控制器。经过控制器的参数模糊化、模糊推理决策和反模糊化输出, 得到一个阀芯开度输出值, 再转换为标准电流信号, 通过 interface 接口传递给 AMESim 仿真模型。设定背压指令信号为阶跃信号, 幅值为 15bar, 背压及流量的仿真结果如下图 2-10 所示:

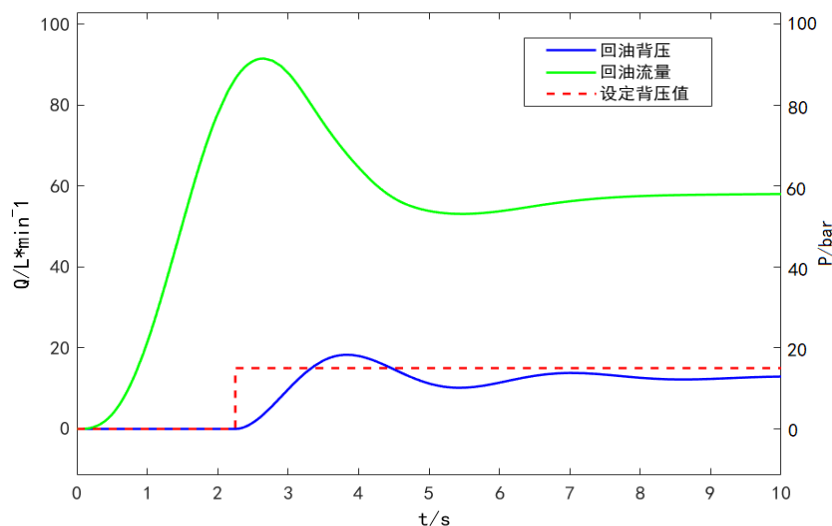


图 2-10 模糊决策控制阶跃信号联合仿真  
Fig.2-10 Joint simulation of step signals in fuzzy decision control

由图 2-10 可知, 该模糊决策控制系统可以实现注塑机回退过程中流量和背压

的控制。仿真得到背压响应曲线与 PID 闭环控制曲线相似，但存在一定的静差，这是由于本文中的模糊决策控制系统本质上是一个间接闭环控制系统，难以像偏差闭环控制一样完全消除误差。图中绿色曲线为流量曲线，开始时背压为零，阀全开，流量呈指数上升；设定背压跃升至 15bar 后，阀口关小，流量迅速下降，经过一个动态的调节过程，最终稳定在 60L/min 左右。

设定背压为斜坡信号，最大值为 60bar，仿真结果如下：

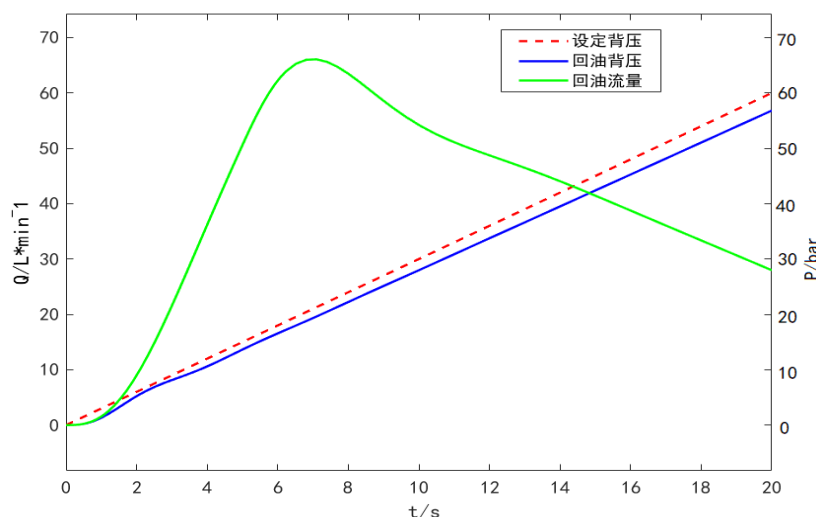


图 2-11 模糊决策控制斜坡信号联合仿真

Fig.2-11 Joint simulation of fuzzy decision control slope signal

由图 2-11，设定斜坡信号最大值为 60bar，得到回油背压基本呈线性，但存在一定误差。启动阶段背压较小，阀芯开度大，流量逐步上升，约 7s 时达到最大值 65L。随着背压继续升高，阀芯开度减小，流量下降，20s 时降至 28L。

从联合仿真结果看，模糊决策控制系统具备较好的背压控制性能，较大的流量，能够在一定场合替代传统压力闭环的控制方案，从而降低成本。

## 2.5 本章小结

本章从基本的圆柱滑阀公式出发，经过一系列推导，得到了根据油缸回退速度调节回油路比例换向阀，从而控制背压的原理公式，从理论上分析了对背压力进行被动式控制的可能性，为仿真建模奠定了基础。由于系统属于间接闭环控制，控制思想与模糊控制相似，因此引入了模糊决策控制的设计方法。从参数模糊化、模糊规则推理和反模糊化等方面详细介绍了该模糊决策系统的设计过程。然后搭建了基于 MATLAB 和 AMESim 的联合仿真模型，以回油流量和设定背压作为模

糊控制器的输入，阀芯开度百分数作为输出。通过仿真得到了理想的背压和流量曲线，证实了该模糊决策控制系统在理论原理上的可行性和正确性。



## 第三章 模糊决策控制在微控制器上的实现研究

### 3.1 引言

为降低成本,该系统采用了不使用压力传感器的间接被动控制法,在第二章中使用模糊决策控制实现了这一方案。但在实际运用中,直接将模糊决策控制器写入微控制器,程序编写较为复杂,代码量庞大,影响微控制器的性能。因此,文献[43]和[47]均提出了利用查表法来实现模糊控制器的方法,即将模糊控制规则表转换为二维数据表,存储于微控制器的内存中。控制器根据传感器的输入量,自动从表格中查找一个符合模糊规则的输出量作为参考输出,再经过一定的修正,最终得到较为精确的输出值。

但按照模糊规则直接生成的二维阀芯开度表数据是离散的,若直接输出,会使得压力曲线缺乏平滑度,且误差较大。因而要使得输出的曲线平滑,就必须增大表格的密度,这样会导致数据容量的大幅增加。由于二维表格类似于灰度表,因此可以借鉴图像处理中的二维插值算法对阀芯开度表进行处理,既不增大表格的容量,又提高了输出精度,这一过程类似于反模糊化过程,但精度高于传统的反模糊化方法。拟采用较为成熟、且计算机开销较小的最邻近插值算法和拉格朗日插值算法进行插值,并与最常用的反模糊化方法-最大平均法和闭环控制作比较。

### 3.2 根据理论公式和模糊规则生成阀芯开度表

在第二章中,将输入量背压划分为了5个模糊集,流量划分为了7个模糊集,而输出量阀芯开度仅有5个模糊集,对应的模糊规则表只有35个输出结果,需要经过反模糊化算法才能得到平滑的输出。若直接将模糊规则表转化为阀芯开度表,则误差较大。因此在工程上可以考虑从基本的原理公式(2-4)出发,将输入量和输出量看作向量矩阵,利用矩阵运算直接得到阀芯开度二维表,再存储在微控制器的内存中。系统根据输入量自动查找若干邻近的开度信号,再经过插值运算,得到精确的输出,其本质上与模糊规则表的数据内容一致,但精度更高,且计算过程更为简化,使之具有实用性。

参考文献[46]和意大利 Atos 比例换向阀的产品手册,设定系统参数如下表3-1所示:

表 3-1 注塑机背压控制系统参数设定<sup>[15]</sup>

Table 3-1 Parameter setting of back pressure control system

参数	单位	数值
活塞杆直径 $d_s$	$mm$	110
活塞直径 $D_s$	$mm$	150
活塞面积 $A_1$	$cm^2$	81.68
换向阀通径 $\Phi$	$mm$	10
阀芯行程 $X$	$mm$	2.75
阀芯直径 $d$	$mm$	15.99
注射油缸行程 $L$	$mm$	300
油液密度 $\rho$	$Kg \cdot m^{-3}$	900
流量系数 $C$		0.6
阀芯阀体配合间隙 $\delta$	$mm$	0.02
转动惯量 $m_i$	$Kg \cdot m^2$	100

根据公式 (2-4)，可由注射油缸回退时的流量和设定的背压计算得到阀芯开度表。首先需要量纲归算，将公式中的全部物理量统一为牛顿第二定律下的量纲：

$$1bar = \frac{1.0197kgf}{1cm^2} = \frac{9.80665N}{1cm^2} = \frac{9.80665 \times 1kg \cdot m \cdot s^{-2}}{1 \times 10^{-4}m^2}$$

因此可将表格 3-1 中的参数带入公式 (2-4)，化简可得：

$$\begin{aligned} x &= \frac{Q}{1803} \cdot \sqrt{\frac{900}{P_1 \times 19.6133 \times 10^4}} \times 1000 \\ &= 0.03757 \frac{Q}{\sqrt{P_1}} \end{aligned} \quad (3-1)$$

该公式中流量  $Q$  的单位是  $L/min$ ，压力单位取  $bar$ ，计算结果  $x$  的单位是  $mm$ 。实际比例换向阀最大行程是  $2.75mm$ ，那么开关表中的百分率为：

$$Y = \frac{x}{2.75} \times 100\% = 1.3662 \frac{Q}{\sqrt{P_1}} \% \quad (3-2)$$

根据此公式，可以完成开关表的参数求解。假设注射油缸流量范围为  $0 \sim 200L/min$ ，设定回油背压范围是  $0 \sim 2Mpa(0 \sim 20bar)$ ，根据公式 (3-2)，可以得到一个  $201 \times 21$  个粗略原始数据的表格，其横坐标为流量，刻度为  $1L/min$ ；纵坐标为设定的背压力，刻度为  $0.1Mpa(1bar)$ 。而表格中存放的数据即为不同流量和设定

压力下回油路比例换向阀阀芯的开度位置。将流量和背压放入 EXCEL，构成两个列向量，再利用 MATLAB 的矩阵计算得到开关表，算法如下：

```
Q=flow;/*流量规则矩阵*/
P1=backpressure;/*压力规则矩阵*/
A=1.31825*Q;
B=sqrt(P1');
for i=1:101
if B(i)==0 X(i)=0;
else X(i)=1.00000/B(i)
end
end
Y=X'*A';/*换向阀开度百分数矩阵%*/
```

以上代码实现了阀芯开度表的计算，但还存在不足，即设定背压为零时，开关度应该是 100%，但有些数已超过了 100%，因此需要根据实际情况对矩阵计算得到的开度表做一下处理，使得最大开度信号不超过 100%，最小开度不低于 0%。最后将 EXCEL 表格中的阀芯开度数据填写到 Simulink 的二维查表模块中，以作为仿真验证。

### 3.3 使用插值算法实现反模糊化输出

使用二维数据表替代模糊规则表后，需要考虑反模糊化输出的问题。文献[47]提出了一种空间几何坐标算法，以输入量为空间坐标，计算得到目标点的函数值。但该方法原理较复杂，计算量较大，因此拟采用最常用的最邻近插值算法、拉格朗日插值算法进行插值，得到反模糊化输出，并与传统的最大平均反模糊法做比较。

最邻近插值算法<sup>[48]</sup>是最常用，也是最简单的插值算法。其按照距离最短原则，将模型表中距离求解点最近的坐标作为求解点的坐标输出。如下图3-1，未知点设为点  $G(x, y)$ ，距离它最近的坐标为 A 点，B 点，C 点和 D 点，假设  $A(x_1, y_1), B(x_2, y_1), C(x_1, y_2), D(x_2, y_2)$ 。

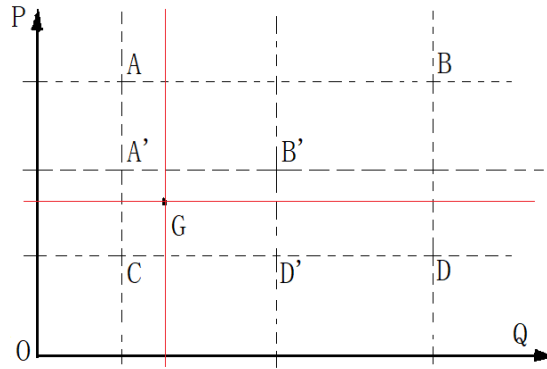


图 3-1 逐次最临近插值和拉格朗日插值

Fig.3-1 Nearest neighbor interpolation and Lagrange interpolation

由图3-1，由于C点与G点的几何距离最近，因此在一次迭代时取C点坐标作为G点坐标进行输出。为提高此算法的精度，可采用逐次最邻近插值算法<sup>[49]</sup>，即二次迭代时以  $A'((x_1 + x_2)/2, (y_1 + y_2)/2)$  代替A点， $B'((x_1 + x_2)/2, (y_1 + y_2)/2)$  代替B点， $D'((x_1 + x_2)/2, y_2)$  代替D点，而C点不变。此时距离点G距离最近的是A'点，因此取A'点的坐标输出。增加迭代次数可提高插值精度。

逐次最邻近插值算法的坐标更新公式为：

$$\begin{aligned}
 U(m+1) &= \frac{\sum_{n=1}^4 U_n(m)}{4} \\
 &= \frac{1}{4} \left[ \frac{U_n(m) + U_{n+1}(m)}{2} + \frac{U_n(m) + U_{n-1}(m)}{2} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{U_n(m) + U_{n-2}(m)}{2} + \frac{U_n(m) + U_{n+2}(m)}{2} \right]
 \end{aligned} \quad (3-3)$$

该公式描述了目标点左上角、右上角、左下角和右下角的坐标点的更新方法。采用逐次最邻近插值算法时，需要设定一个最大插值次数  $M$ ，当插值次数  $m \geq M$  时，插值结束，输出目标函数值。

目标点四周的4个坐标点与目标点之间的几何距离为：

$$\begin{cases} d_A^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ d_B^2 = (x_2 - x)^2 + (y_1 - y)^2 \\ d_C^2 = (x_1 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \\ d_D^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 \end{cases} \quad (3-4)$$

则最邻近插值输出的是距离目标点几何距离最近的点的坐标：

$$Z_m = U_x, |U_x - G_x|^2 = \min\{d_A^2, d_B^2, d_C^2, d_D^2\} \quad (3-5)$$

拉格朗日插值法也叫双线性插值法，是一种兼顾插值精度和计算机开销的格网DEM插值方法<sup>[50]</sup>。拉格朗日插值法<sup>[51,52]</sup>利用待求像素点四个相邻像素灰度在两个方向上做线性内插，即在水平方向和竖直方向分别进行一次线性插值。输出像素值为距离该像素点最近的2\*2邻域内采样点像素的加权平均值。

同样在图3-1中，假设A,B,C,D这四个点处的阀芯开度值为：

$$\begin{cases} Z_1 = f(x_1, y_1), Z_2 = f(x_2, y_1) \\ Z_3 = f(x_1, y_2), Z_4 = f(x_2, y_2) \end{cases} \quad (3-6)$$

再令  $u = \frac{x-x_1}{x_2-x_1}$ ,  $v = \frac{y-y_1}{y_2-y_1}$ ， $u$ 、 $v$  是[0,1) 区间内的浮点数，构造基函数：

$$\begin{cases} l_1 = (1-u)(1-v) \\ l_2 = u(1-v) \\ l_3 = uv \\ l_4 = (1-u)v \end{cases} \quad (3-7)$$

则待求点G的阀芯开度插值函数值为：

$$Z_m = Z_1(1-u)(1-v) + Z_2u(1-v) + Z_3uv + Z_4(1-u)v \quad (3-8)$$

3.2节中得到了阀芯开度百分数表，该表格中存放的数据即为不同流量和设定压力下回油路比例换向阀阀芯的开度位置，但数据较为稀疏，需要查表再插值，得到一个开度信号输出。

第一步是查找待求点最邻近的四个坐标点位置。待求点的坐标是已知的，它的横坐标是用户设定背压，纵坐标是传感器采集换算的流量。但是它在表格中的位置是未知的，它的横纵坐标不一定在表格的单位刻度线上，因此需要利用一定的算法查找出距离待求点位置最近的四个坐标点的位置。根据这四个坐标点进行插值，而这四个坐标点的函数值就是阀芯的开度信号。利用插值算法，就可以得到待求点对应的阀芯开度信号，然后输出。

由于开关表数据量较大，通过冒泡排序法计算待求点位置时间较长，因此本研究采用“优选法”<sup>[53]</sup>，即“黄金分割法”判定待求点坐标位置。以压力为例，假设开关表压力量程为[0,20]，求解压力待求点位置的算法如下图3-2所示：

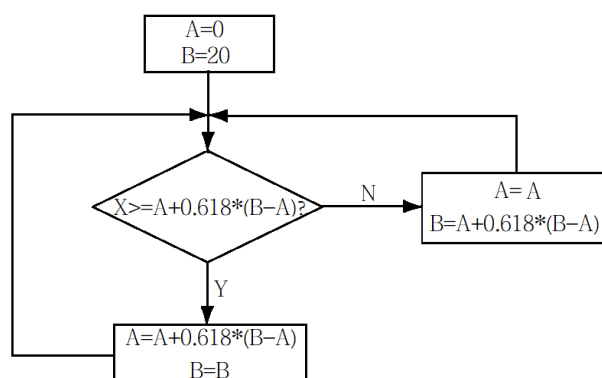


图 3-2 使用“优选法”计算坐标位置

Fig.3-2 Calculation of coordinate position by "optimization method"

如图3-2，取左端点A为0，右端点B等于20。首先判定待求点压力坐标 $x$ 是否大于等于黄金分割点，即12.36；若满足，说明 $12.36 \leq x \leq 20$ ，更新左端点 $A=12.36$ ，右端点 $B=20$ ，再次判断；若不满足，说明 $0 \leq x \leq 12.36$ ，则令左端点 $A=0$ ，右端点 $B=12.36$ ，再次判断。每判断一次， $x$ 的范围就缩小一次，只需循环判断若干次，即可得到距离待求点位置最近的4个表格坐标点的位置。

### 3.4 系统仿真验证

在第2章模糊控制联合仿真模型的基础上，将模糊控制器替换为 MATLAB 的二维表格模块 2-D LookupTable，并将前面计算生成的阀芯开度表数据录入该模块中，同时建立最邻近插值、拉格朗日插值和最大平均法的反模糊化模块，串联在 LookupTable 模块之后。最终得到可直接运用于微控制器中的模糊控制器模型，利用 Simulink 仿真验证其可行性。

AMESim 模型不做改变，Simulink 仿真模型修改如下图 3-3 所示：

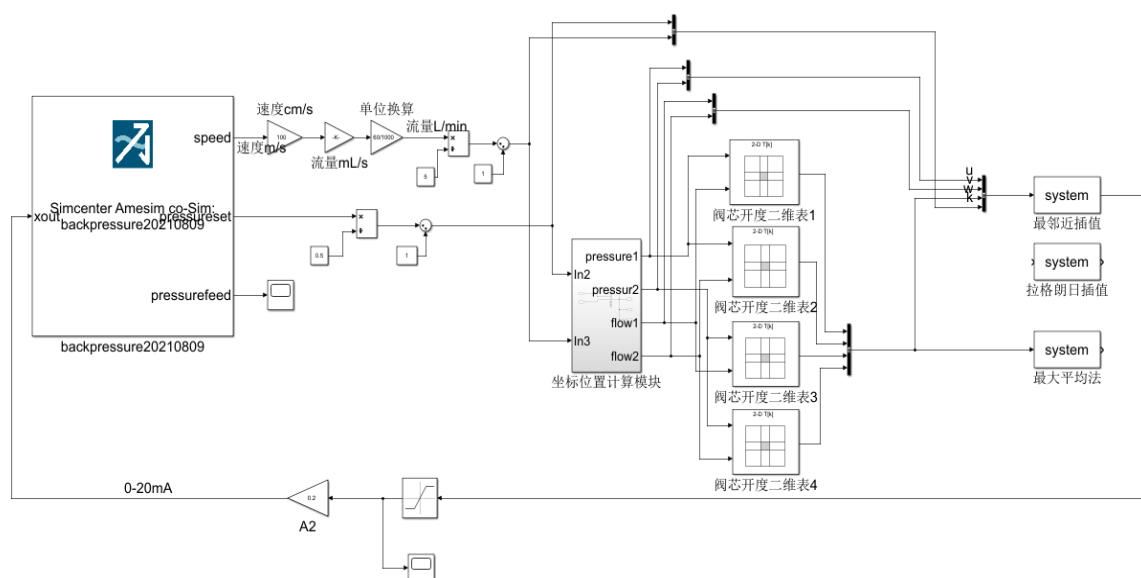
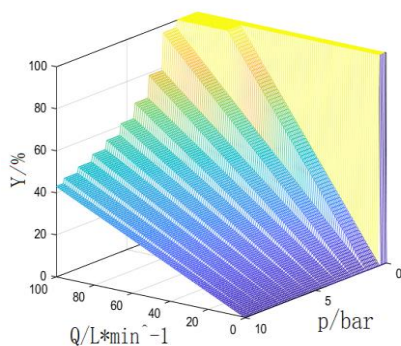


图 3-3 查表法实现模糊控制仿真模型

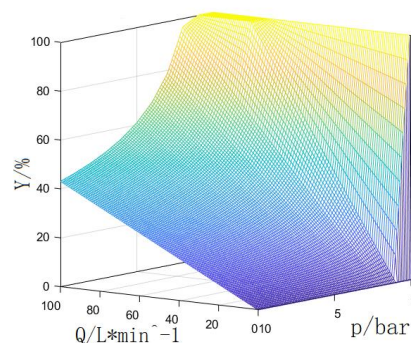
Fig.3-3 Simulation model of fuzzy control by look-up table method

由图 3-3 可知，背压和流量信号首先送入坐标位置计算模块。该模块采用“优选法”，计算得到距离输入坐标点最近的 4 个表格坐标点的位置，即 2 个整数刻度的背压值，2 个整数刻度的流量值。再利用这 4 个坐标点，从阀芯开度二维表中分别查询得到 4 个对应的阀芯开度信号。最后将这 4 个点的横纵坐标和 4 个阀芯开度值一起传送到插值函数模块中，同时将传感器反馈的背压和流量值也输入插值函数模块，进行插值运算，即可实现反模糊化，得到一个精确的阀芯开度信号。最后将其转换为电流信号，通过 interface 接口送回 AMESim。采用平均法时，只需要知道 4 个阀芯开度，直接求解其算术平均数即可。

分别采用最邻近插值和拉格朗日插值反模糊化方法，仿真得到的阀芯开度-流量和背压的三维关系曲线如下：



a) 最邻近插值反模糊化  
a) Nearest neighbor interpolation



b) 拉格朗日插值反模糊化  
b) Lagrange interpolation

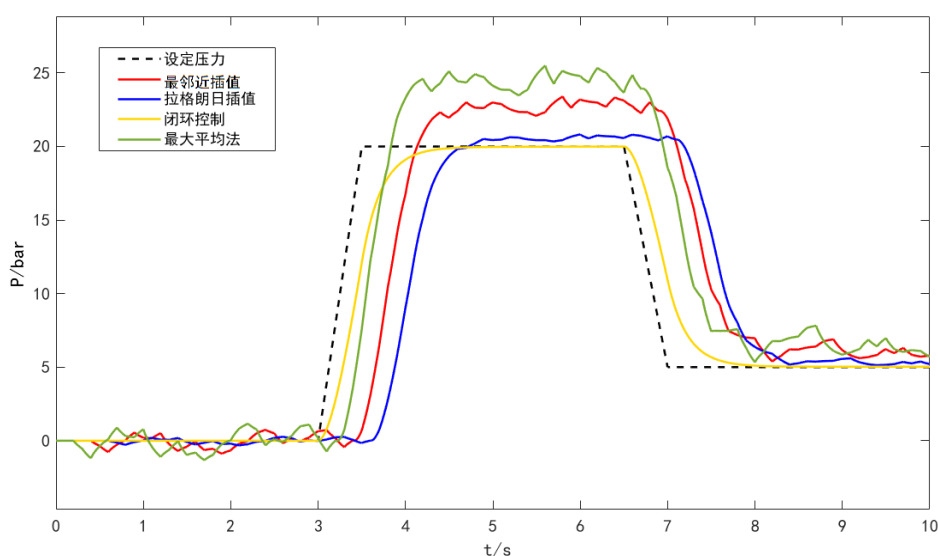
图 3-4 阀芯开度-流量-背压三维关系图  
Fig.3-4 Nearest neighbor interpolation inverse fuzzification

由图 3-4 可知，采用最邻近插值，输出阀芯开度呈阶梯扇面状，仍然类似查表控制的效果。其输出开度在启动阶段呈阶梯状上升，而压力曲线存在较大的波动，曲线不够平滑。进入稳态后曲线不再波动，但存在一定误差。采用拉格朗日插值法进行反模糊化后，关系曲线更加平滑，输出结果更加线性，精度更高。

设定背压信号指令函数如下：

$$P(t) = \begin{cases} 0 \text{ bar} & , t \in [0,3] \\ 20 \text{ bar} & , t \in [3,6] \\ 5 \text{ bar} & , t \in [6,10] \end{cases} \quad (3-9)$$

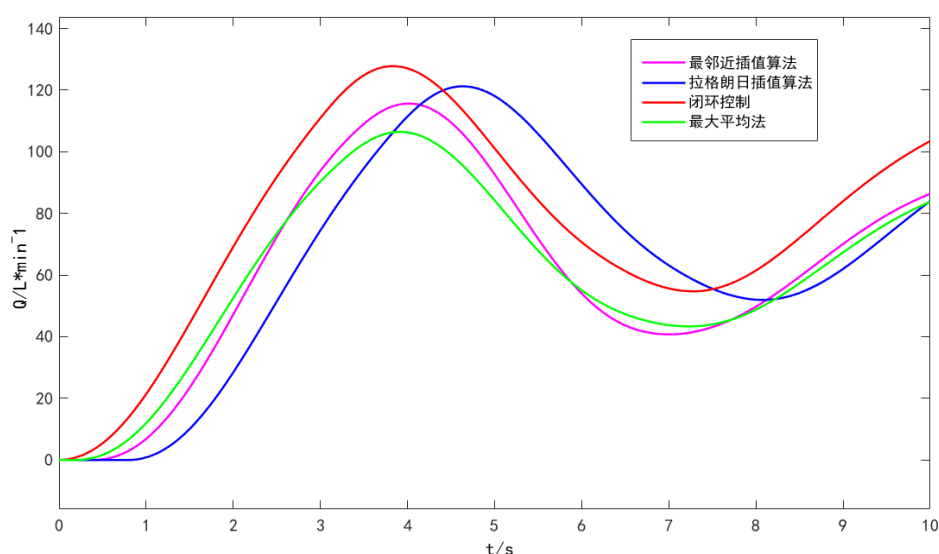
由公式 (3-9) 可知，背压指令信号考虑了零背压、较低背压和一般背压三种情况，简单模拟了注塑机注射油缸回退过程中的工况。分别采用最邻近插值、拉格朗日插值、压力闭环控制和传统的最大平均反模糊化方法，仿真得到系统的背压和流量响应曲线如下：



a) 背压响应曲线

a) Back pressure response curve





b) 流量响应曲线

b) Flow response curve

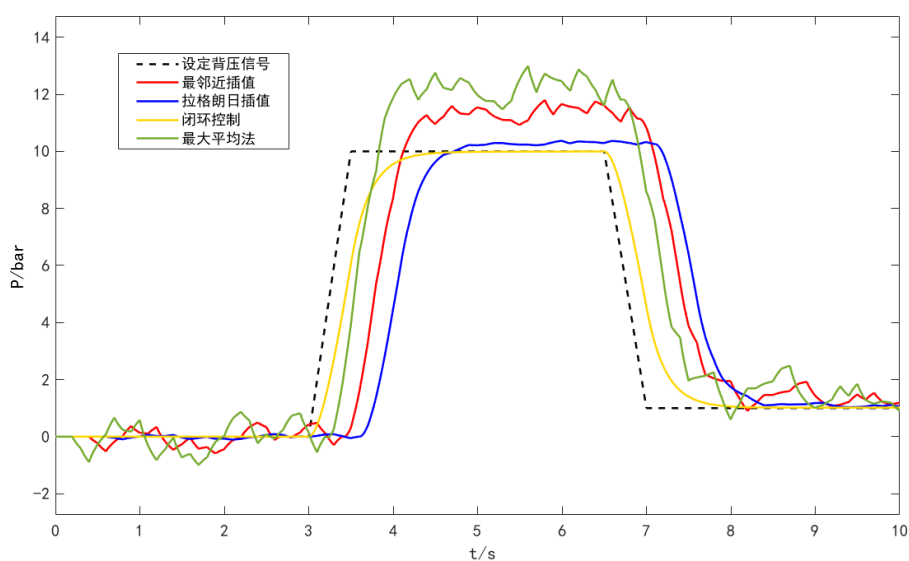
图 3-5 20bar-5bar 仿真结果

Fig.3-5 20bar-5bar simulation results

由图 3-5 背压响应曲线可知, 采用模糊决策控制算法后, 压力响应速度比闭环控制慢了 0.2s 至 0.6s。最大平均法响应速度最快, 但误差最大, 接近 5bar。拉格朗日插值最慢, 但最接近闭环控制, 误差不超过 1bar。最邻近插值的压力响应速度和误差居中。

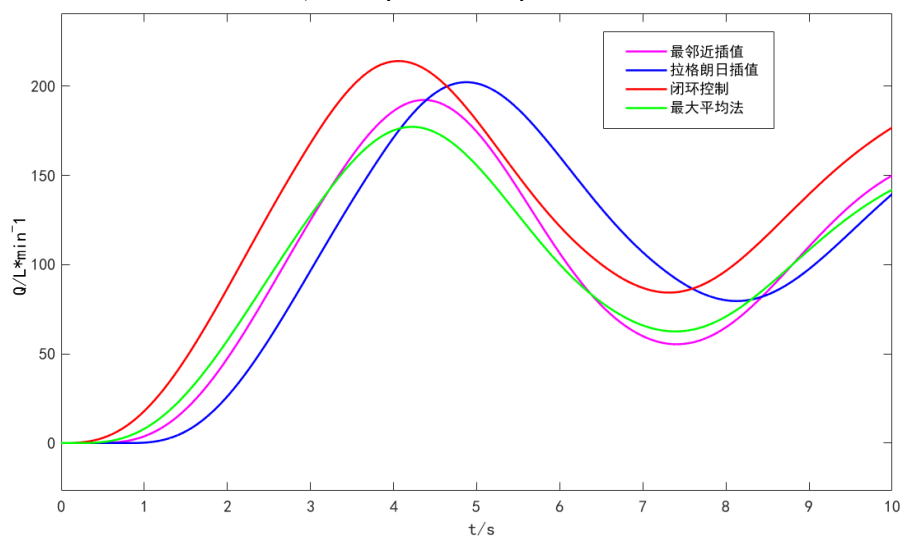
由流量响应曲线可知, 在 0s 到 3s 时间内, 背压为 0bar, 回油路比例阀全开, 流量快速上升, 其中闭环控制的流量曲线响应最快, 其次是运算量较小的最大平均法和最邻近插值法, 最慢的是拉格朗日插值法。3s 以后, 设定背压为 20bar, 阀开度减小, 背压上升, 而流量下降。由于系统存在较大的惯性, 最大流量和背压均在 4s 前后出现。在流量尚未进入平稳阶段时, 背压由 20bar 降至 5bar, 阀开度增大, 导致流量曲线降至最低点后即刻上升, 直到到达新的稳态。在 4 条流量曲线中, 闭环控制背压超调最小, 因此其流量最大。而最大平均法背压最大, 因而其流量最小。拉格朗日的背压及流量曲线均与闭环控制最为接近, 但它的响应速度最慢。

为进一步检验系统的低背压控制性能, 设定指令函数不变, 最大背压力降为 10bar, 最小背压力降为 1bar, 仿真结果如下图 3-6 所示:



a) 背压响应曲线

a) Back pressure response curve



b) 流量响应曲线

b) Flow response curve

图 3-6 10bar-1bar 仿真结果

Fig.3-6 10bar-1bar simulation results

由图 3-6 可知,降低背压水平后,背压控制精度变差,误差增大。依然是最大平均法误差最大,拉格朗日插值误差最小。由流量曲线可知,背压降低,系统流量升高,最大流量由 130L/min 上升至 220L/min,且背压越靠近 0bar,流量上升幅度越大。

综上,该模糊决策控制系统在背压控制上具有媲美传统闭环控制的控制性能。在低背压下具有较大的回油流量,在一般背压范围内具有较高的控制精度。能够

在较多塑胶产品的制造场合替代传统的闭环控制，减少了传感器，节约了成本。

### 3.5 根据 MATLAB 仿真模型生成微控制器代码

在 MATLAB 等仿真软件中搭建和验证控制系统后，需要将控制系统写入微控制器中，方可实现对应的控制功能。一种方法是使用 MATLAB 中的 RTW 功能模块，自动生成能应用于各种嵌入式设备的代码。但该方法较为复杂，且生成的代码与底层硬件存在兼容问题，不方便直接使用，相关研究还不够成熟，缺乏参考。因此该课题提出了一种等效方法，将抽象的高级算法简化为容易编程的形式，再写入微控制器中，即使用查表法和插值法实现模糊决策控制。

因此，在微控制器的 C 语言程序中，可以参考模糊控制规则，根据公式(3-2)直接生成阀芯开度表，如前文所述。再将开度表编写为二维数组，并以流量和设定背压作为数组指针，查询得到输出值。由于数组数据量较庞大，因此截取局部如下图所示：

```

78 ////////////////////////////////////////////////////消息队列//////////////////////////////////////
79 ////////////////////////////////////////////////////
80 #define ADCMSG_Q_NUM 1 //发送ADC的消息队列的数量
81 #define PREMSG_Q_NUM 1 //发送背压的消息队列的数量
82
83 OS_Q ADC_DATA_Msg; //定义消息队列，用于发送油缸速度的ADC采样数据以及背压
84 OS_Q PRE_DATA_Msg;
85
86
87 const float table[20][50]={
88     /*这组数据是0.6bar,1L开始!*/
89     11.9273, 3.8546, 5.7819, 7.7092, 9.6365, 11.5637, 13.4910, 15.4183, 17.3456, 19.2729,
90     21.2002, 23.1275, 25.0548, 26.9821, 28.9094, 30.8366, 32.7639, 34.6912, 36.6185, 38.5458,
91     40.4731, 42.4004, 44.3277, 46.2550, 48.1823, 50.1095, 52.0368, 53.9641, 55.8914, 57.8187,
92     59.7460, 61.6733, 63.6006, 65.5279, 67.4552, 69.3824, 71.3097, 73.2370, 75.1643, 77.0916,
93     79.0189, 80.9462, 82.8735, 84.8008, 86.7281, 88.6554, 90.5826, 92.5099, 94.4372, 96.3645,
94     98.2915, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100, 100,
95
96     /*这组数据是1.0bar,1L开始!*/
97     11.3628, 2.7255, 4.0884, 5.4512, 6.8140, 8.1769, 9.5396, 10.9024, 12.2652, 13.6280,
98     14.9908, 16.3535, 17.7164, 19.0792, 20.4420, 21.8048, 23.1676, 24.5304, 25.8932, 27.2560,
99     28.6188, 29.9816, 31.3444, 32.7072, 34.0700, 35.4328, 36.7956, 38.1584, 39.5212, 40.8840,
100    42.2468, 43.6096, 44.9724, 46.3352, 47.6980, 49.0608, 50.4236, 51.7864, 53.1492, 54.5120,
101    55.8748, 57.2376, 58.6004, 59.9632, 61.3260, 62.6888, 64.0516, 65.4144, 66.7772, 68.1400,
102    69.5028, 70.8656, 72.2284, 73.5912, 74.9540, 76.3168, 77.6796, 79.0424, 80.4052,
103
104    [1.127, 2.2254, 3.3382, 4.4509, 5.5636, 6.6763, 7.7891, 8.9018, 10.0145, 11.1272,
105    12.2399, 13.3527, 14.4654, 15.5781, 16.6908, 17.8035, 18.9163, 20.0290, 21.1417, 22.2544,
106    23.3672, 24.4799, 25.5926, 26.7053, 27.8180, 28.9308, 30.0435, 31.1562, 32.2689, 33.3816,
107    34.4944, 35.6071, 36.7198, 37.8325, 38.9453, 40.0580, 41.1707, 42.2834, 43.3961, 44.5089,
108    45.6216, 46.7343, 47.8470, 48.9597, 50.0725, 51.1852, 52.2979, 53.4106, 54.5234, 55.6361,
109    56.7488, 57.8615, 58.9742, 60.0870, 61.1997, 62.3124, 63.4251, 64.5378, 65.6506,
110
111    [0.9636, 1.9273, 2.8909, 3.8546, 4.8182, 5.7819, 6.7455, 7.7092, 8.6728, 9.6365,
112    10.6001, 11.5637, 12.5274, 13.4910, 14.4547, 15.4183, 16.3820, 17.3456, 18.3093, 19.2729,
113    20.2365, 21.2002, 22.1638, 23.1275, 24.0911, 25.0548, 26.0184, 26.9821, 27.9457, 28.9094,
114    29.8730, 30.8366, 31.8003, 32.7639, 33.7276, 34.6912, 35.6549, 36.6185, 37.5822, 38.5458,
115    39.5094, 40.4731, 41.4367, 42.4004, 43.3640, 44.3277, 45.2913, 46.2550, 47.2186, 48.1823,
116    49.1459, 50.1095, 51.0732, 52.0368, 53.0005, 53.9641, 54.9278, 55.8914, 56.8551],
117
118    [0.8619, 1.7238, 2.5857, 3.4476, 4.3096, 5.1715, 6.0334, 6.8953, 7.7572, 8.6191,
119    9.4810, 10.3429, 11.2048, 12.0667, 12.9287, 13.7906, 14.6525, 15.5144, 16.3763, 17.2382,
120
121
122

```

图 3-7 模糊控制规则数组  
Fig.3-7 Fuzzy control rule array

如图 3-7，根据模糊规则和系统参数生成的阀芯开度表，以二维数组的形式写入 C 语言程序中。数组横坐标指针代表背压，纵坐标指针代表流量。在主程序中，通过传感器反馈的变量，可作为数组的指针，查询到唯一一个阀芯开度输出。再经过插值和其他运算，得到最终的信号输出。

数组的第一个输入坐标为背压，其通过电脑上位机设定，并通过串口传递给下位机。逻辑代码如下：

```

uart_init(115200); // 串口初始化
if(USART_RX_STA < 0x8000)
{
    if(USART_RX_BUF[0] == 'A' && USART_RX_BUF[5] == 'B') // 格式校验
    {
        res = (USART_RX_BUF[1] - 48) * 10 + (USART_RX_BUF[2] - 48) * 1 + (USART_RX_BUF[4] - 48) * 0.1; // ASCII 转十进制, 带一位小数
    }
    else printf("数据接收异常! \r\n");
    USART_RX_STA = 0;
}

```

经以上代码, 设定背压值被保存在变量 `res` 中。数组的第二个坐标为流量, 需要将位移传感器的位移信号换算为速度, 再乘以油缸活塞面积得到流量。根据位移换算速度时, 需要设定一个 10ms 的定时器, 在定时器中断服务函数中接收位移传感器信号。并将本次采集位移值与上次采集的位移值作差后, 再除以 10ms, 即可得到油缸回退的速度。逻辑代码如下:

```

void TIM3_IRQHandler(void) // 中断服务函数
{
    if(TIM_GetITStatus(TIM3, TIM_IT_Update) == SET)
    {
        adc = Get_Adc(ADC_Channel_3) * 300 / 4096 / 10; // 获取油缸位移, 单位 cm
        speed = (adc - temp) * 100; // 除以 10ms, 得到速度 cm/s
        temp = adc; // 更新迭代
    }
    TIM_ClearITPendingBit(TIM3, TIM_IT_Update);
}

flow = speed * 81.68 * 60 / 1000; // 换算流量 L/min

```

得到背压和流量后, 以它们为数组指针查表得到阀芯开度输出, 并改变 PWM 的占空比:

```

TIM3_PWM_Init(10000 - 1, 84 - 1); // 1MHz 的计数频率, PWM 频率 100Hz
cpr = table[(int)(res * 2)][(int)flow]; // 查表结果保存在 cpr 中
printf("背压: %.1f bar 流量: %d L 开度: %.2f 高电平占空比: %.2f \r\n", res, (int)flow, cpr, (cpr * 100 + 1) * 100 / 10000);
TIM_SetCompare2(TIM3, cpr * 100 + 1); // 根据查表结果改变占空比

```

```
TIM_SetCompare4(TIM3,cpr*100+1);
```

插值算法以拉格朗日插值为例，逻辑代码如下：

```
const int N=4;//插值节点个数
float lglr(float pressure[], float flow[],int n,float t)
{
    float yResult=0.0;
    float LValue[N]; //LValue[N]存放的是每次求解的插值基函数的通
项
    int k,m;//循环变量 k,m
    float temp1,temp2; //插值基函数中的上下累乘 temp1,temp2
    for(k=0;k<n;k++)
    {
        temp1=1.0;
        temp2=1.0;
        for(m=0;m<n;m++)
        {
            if(m==k)
            {
                continue;
            }
            temp1 *= (t-pressure[m]);
            temp2 *= (pressure[k]-pressure[m]);
        }
        LValue[k]=temp1/temp2;
    }
    for(int i=0;i<n;i++)
    {
        Result += flow[i]*LValue[i];
    }
    return Result;//返回插值结果
}
```

经以上插值运算，可实现模糊决策控制的反模糊化，得到更加线性的输出。最邻近插值等算法与之类似。

### 3.6 本章小结

针对虚拟仿真软件的仿真模型难以直接应用于微控制器的问题，本章研究了如何将注塑机模糊决策控制器简化等效，从而更方便地用于嵌入式设备的方法。首先根据第二章中的回油背压控制原理公式和注塑机系统参数，计算得到了阀芯开度二维表。而后详细介绍了使用最邻近插值法和拉格朗日插值法等效代替传统反模糊化方法的原理，以及利用优选法判定目标点的位置。通过搭建联合仿真模型，验证了通过插值法实现反模糊化的可行性，并对比了几种插值算法各自的控制性能。最后研究了如何在微控制器中编写该控制系统代码的问题，提出将阀芯开度二维表写作二维数组，并编写相关函数实现了各插值算法。

## 第四章 比例换向阀电子放大器设计

### 4.1 引言

本章主要介绍注塑机低背压控制系统的控制器和执行机构——比例换向阀电子放大器的设计和制作过程。详细介绍了控制换向阀的电子放大器的软硬件设计方面的内容，包括比例电磁铁的控制原理、位移传感器原理、系统架构、芯片选型、电路模块设计，软件状态机和程序流程图等，基本完成了电子放大器实物的设计和制作，为后续的实际测试做了准备。

由于现有的比例阀电子放大器均是直接与阀体配套生产的，具有标准化、封闭式、不开源的特点，只能通过厂商的上位机进行 PID 调控，很难加入模糊控制等智能控制算法进行操作。因此本课题决定自行制作一款简易的电子放大器，使之满足本课题的基本需求。

### 4.2 设备原理

#### 4.2.1 比例电磁铁控制原理

回油路比例换向阀需要自行设计电子放大器，用于驱动比例阀线圈。比例阀线圈本质上是一个比例电磁铁，其控制原理如下图 4-1 所示：

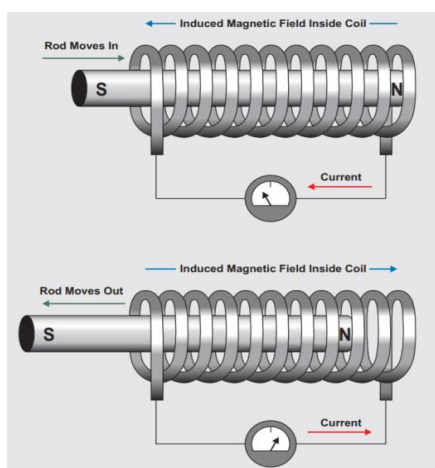


图 4-1. 比例电磁铁控制原理

Figure 4-1. Proportional electromagnet control principle

如图 4-1，比例阀使用比例电磁铁<sup>[54]</sup>推动阀芯动作，根据右手螺旋定则，当电流

流过线圈，在线圈中产生的电磁场极性和磁铁铁芯极性相反时，铁芯收缩；当改变电流方向，使得电磁场和磁铁极性相同时，铁芯伸出。铁芯与阀芯活塞是同轴紧密配合的，因此在同一阀芯的两端配置两个比例电磁铁，可以控制阀芯运动到行程内的任何位置，实现精确控制。

为减少零部件数目，降低成本和提高可靠性，实际的比例电磁阀多只有一个比例电磁铁，且铁芯不带有磁性，不管电流方向如何，通电后铁芯都只会朝一个方向动作。而比例电磁铁的复位靠阀芯另一端的弹簧，当电流增大时，电磁力大于弹簧力，阀芯推出；电流减小时，弹簧力大于电磁力，阀芯回退。但不管是一个线圈还是两个线圈的阀，任何时刻都只有一个线圈工作，因此最大工作电流不能超过电源电压与线圈电阻的比值，否则会烧毁线圈。该系统设定最大持续工作电流为 3A。

比例电磁铁主要采用电流控制，可以通过调节 PWM 占空比的方式控制，同时改变线圈的平均电流和平均电压。输出信号占空比越小，实际电流越小，产生的电磁力也就越小，因此可以认为占空比与电磁力成正比，这也是后文控制电路设计的依据。

#### 4.2.2 注射油缸电子尺（位移传感器）原理

传感器为常用的磁致伸缩位移传感器，其工作原理如下图所示：

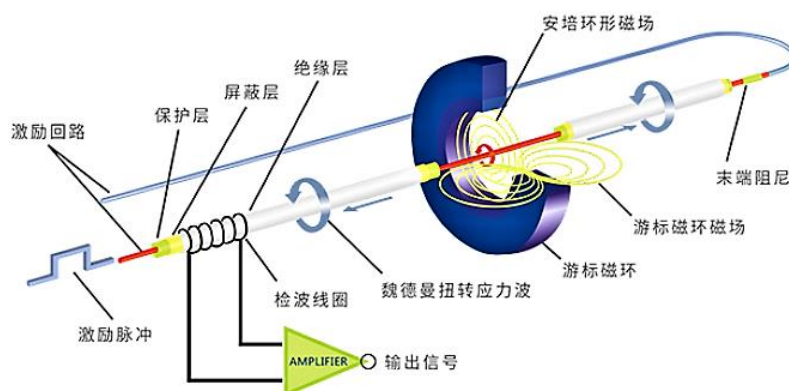


图 4-2. 位移传感器原理

Figure 4-2. Principle of displacement sensor

如图 4-2，磁致伸缩位移传感器<sup>[55]</sup>主要由测杆、电子仓和套在测杆上的非接触游标磁环组成。电子仓控制器固定在静止物体上，游标磁环固定在移动目标上。测量时，电子仓向激励回路（磁致伸缩波导丝）发出一个激励脉冲（查询脉冲），该脉冲以光速在波导丝周围形成安培环形磁场。该环形磁场与游标磁环的偏置永磁场耦合，形成扭转应力波，即魏德曼效应。应力波以声速由游标磁环位置点向两端传播，传



到末端的被末端阻尼吸收，而传到电子仓的被检波线圈吸收。电子仓中的控制模块计算出查询脉冲与接收脉冲间的时间间隔，再乘上应力波在波导丝中的传播速度，即可计算出游标磁环与电子仓基准点之间的距离，也就是移动块相对固定端的运动距离。

又由文献[56]，如果激励脉冲发出时刻为 $t_1$ ，脉冲到达游标的时刻为 $t_2$ ，检测线圈检测到扭转波的时刻为 $t_3$ ，则油缸运行位置为：

$$L = \frac{(t_2 - t_1) \times 3 \times 10^8 + (t_3 - t_2) \times V}{2} \quad (4-1)$$

式中， $V$  表示扭转波波速，对于铁镓合金，20℃时取 2855m/s。位移计算过程由电子仓中的微控制器完成，传感器对外输出的信号为 10V 模拟信号，再对应油缸的实际行程进行标定即可。

由该传感器检测到的是油缸的位移量，需要计算油缸回退速度时，可利用微控制器中的定时器模块，计算单位时间内的位移量，即可获得油缸运动速度，再转换为流量。

## 4.3 硬件电路设计

### 4.3.1 系统架构

由于现有的电子放大器产品不能直接支持本研究的算法，也不具备数据存储等功能，不支持查表控制和特定的算法，因此需要专门设计用于低背压控制的电子放大器。硬件部分的总体构成如下图所示：

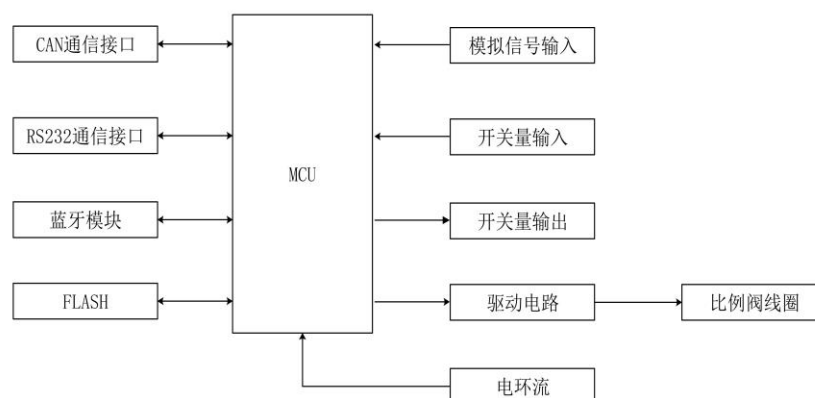


图 4-3. 系统整体结构图

Figure 4-3. Overall structure diagram of the system

如图 4-3，该电子放大器包含 MCU 最小系统，CAN、RS232 和蓝牙三个通信接

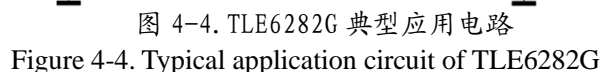
口, FLASH 存储单元, 模拟信号输入接口, 数字开关量输入接口, 开关量输出接口, 驱动电路及其电流反馈环几个部分组成。系统功能为: 通过蓝牙或 RS232 串口与电脑上位机通信, 获得系统参数和设定目标背压力值, 存储在 FLASH 芯片中。通过模拟信号接口连接油缸位移传感器, 经 ADC 采样获取油缸回退速度, 并计算回油流量。通过开关量输入接口获取驱动电路故障状态信号, 同时输出驱动芯片使能信号。在系统正常启动后, 输出 PWM 控制信号给驱动电路, 经驱动电路放大, 产生 0~24V, 0~3A 的驱动电流给比例换向阀线圈, 推动比例换向阀阀芯动作。同时通过电流检测模块监测线圈电流, 当电流大于 3A 时反馈给单片机 MCU, 减小 PWM 占空比, 从而减小平均电压和电流, 保护线圈。

CPU 单元采用意法半导体的 STM32F407 芯片, 其采用了 ARM 的 Cortex-M4 内核, 工作频率高达 168MHz, 其内存、定时器、通信协议和 ADC 采样等功能均十分强大, 且物美价廉, 适合作为工业控制器的 CPU。

#### 4.3.2 电磁线圈驱动电路设计

根据比例电磁铁的工作特点, 驱动电路负载工作频率不高, 且长时间停留在同一位置, 线圈呈阻性, 且阻值较小。因此线圈发热量较大, 容易烧毁线圈和功率器件, 因此必须设计电流环, 限制线圈电流的大小。驱动电路设计如下:

采用英飞凌的电机和阀控制专用的高性能驱动芯片 TLE6282G, 作为驱动模块的信号放大器, 接收来自 MCU 的 PWM 控制信号, 输出 +10V 的门极信号, 控制 MOS 管的开通与关断。典型应用电路图如下图 4-4 所示:



The circuit diagram illustrates a four-quadrant multiplier implemented using a TLE6283G multiplier core and two LM358AD operational amplifiers.

**Signal Amplifier (Top Left):** The input signal  $V_{IN}$  is connected to the  $P_{IN}$  pin of the TLE6283G through a 100k resistor  $R_{17}$ . The  $N_{IN}$  pin is connected to ground through a 10k resistor  $R_{18}$ . The  $V_{CC}$  pin is connected to  $V_{CC5}$  through a 47k resistor  $R_{15}$ . The  $GND$  pin is connected to ground through a 47k resistor  $R_{16}$ . The TLE6283G is configured with its  $V_{CC}$  pin to  $V_{CC5}$  and its  $GND$  pin to ground. The output of the signal amplifier is connected to the  $P_1$  pin of the H-bridge.

**H-bridge (Top Right):** The H-bridge consists of four MOSFETs ( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ ) and two diodes ( $D_1, D_2$ ). The  $P_1$  pin of the TLE6283G is connected to the gate of  $Q_1$ . The  $P_2$  pin is connected to the gate of  $Q_2$ . The  $P_3$  pin is connected to the gate of  $Q_3$ . The  $P_4$  pin is connected to the gate of  $Q_4$ . The  $V_{CC}$  pin of the H-bridge is connected to  $V_{CC5}$  through a 47k resistor  $R_{15}$ . The  $GND$  pin is connected to ground through a 47k resistor  $R_{16}$ . The output of the H-bridge is connected to the  $P_1$  pin of the current loop.

**Current Loop (Bottom):** The current loop consists of two LM358AD operational amplifiers ( $U_{6A}, U_{6B}$ ). The  $P_1$  pin of the H-bridge is connected to the non-inverting input of  $U_{6A}$ . The  $P_2$  pin is connected to the non-inverting input of  $U_{6B}$ . The  $P_3$  pin is connected to the inverting input of  $U_{6A}$ . The  $P_4$  pin is connected to the inverting input of  $U_{6B}$ . The  $V_{CC}$  pin of the current loop is connected to  $V_{CC5}$  through a 47k resistor  $R_{15}$ . The  $GND$  pin is connected to ground through a 47k resistor  $R_{16}$ . The output of the current loop is connected to the  $P_1$  pin of the output stage.

**Output Stage (Bottom Right):** The output stage consists of a single MOSFET ( $Q_5$ ) and a diode ( $D_3$ ). The  $P_1$  pin of the current loop is connected to the gate of  $Q_5$ . The  $P_2$  pin is connected to the gate of  $Q_5$ . The  $P_3$  pin is connected to the gate of  $Q_5$ . The  $P_4$  pin is connected to the gate of  $Q_5$ . The  $V_{CC}$  pin of the output stage is connected to  $V_{CC5}$  through a 47k resistor  $R_{15}$ . The  $GND$  pin is connected to ground through a 47k resistor  $R_{16}$ . The output of the output stage is connected to the  $P_1$  pin of the output stage.

图 4-5. 基于 TLE6282G 的驱动电路  
Figure 4-5. Driving circuit based on TLE6282G

如图 4-5，该驱动电路包括信号放大器、H 全桥和电流反馈环三个部分。信号放大器接收来自 MCU 控制单元的 PWM 弱信号，放大为 10V 以上的门极信号，即输出低边开关 GL 和高边开关 GH 信号，控制功率 MOS 管的开通与关断。该芯片主要的时序真值如下表 4-1 所示：

表 4-1 TLE6282G 时序逻辑表  
Table 4-1 TLE6282G sequential logic table

输入					条件			输出			
IL1	IH1	IL2	IH2	DT/DIS	UV	SC	GL1	GH1	GL2	GH2	ERR
1	1	0	0	<3.5V	0	0	1	0	0	1	5V
1	0	1	0	<1V	0	0	1	1	1	1	5V
0	1	0	1	<3.5V	0	0	0	0	0	0	5V
1	1	0	0	<3.5V	1	0	B	0	0	B	C
1	0	1	0	<1V	1	0	B	B	B	B	C
0	1	0	1	<3.5V	1	0	0	0	0	0	C
1	1	0	0	<3.5V	0	1	E	0	0	E	F
1	0	1	0	<1V	0	1	E	E	E	E	F
0	1	0	1	<3.5V	0	1	0	0	0	0	F

注：ILx,IHx—输入低边控制信号，输入高边控制信号；

GLx,GHx—输出低边开关信号，输出高边开关信号；

DT/DIS—使能和死区调节信号，0-1V 关闭死区，系统正常工作；1.5-3.5V 调节死区信号宽度；>4V，关闭系统输出。UV—电压故障，低电平无效；

SC—电流故障，低电平无效；

ERR—故障信号输出，低电平有效；

B—受故障影响时为 0，不受影响时为 1；

C—输出与输入模式不一致时为 0，正常时为 1；

E—受故障影响时为 0，不受影响时为 1，关闭受故障影响的半桥并锁定直到重置；

F—输出与输入模式不一致时为 0V，输出与输入相对应时为 5V，关闭受故障影响的半桥并锁定直到复位。

同时，该芯片在程序控制上亦有时序的要求。程序初始化时，首先确保电源稳定，然后关闭 DT/DIS，置 1，等待 MOS 管门极的自举电容  $C_{BX}$  充电，充电时间为

$T_{wait} \approx 3 \times C_{BX} \times 2 \times R$ ,  $R = 10K\Omega$ , 一般设置为几个毫秒即可。在自举电容充电完成之前, 不能输入 PWM 信号。然后使能 DT/DIS 管脚, 置 0。最后输入 PWM 信号即可。

H 全桥采用交叉控制, MOS 管 Q1 和 Q4 一组, 对应输出 GH1 和 GL2, 作为负载 1 的上桥臂和下桥臂, 驱动一个阀的线圈; MOS 管 Q2 和 Q3 一组, 对应输出 GH2 和 GL1, 作为负载 2 的上桥臂和下桥臂, 驱动另一个阀的线圈。

为限制电流大小, 在 H 桥接地端串联电流反馈环。使用  $50m\Omega$  精密采样电阻, 将电流信号转换为电压信号。该电压信号约为  $0 \sim 0.1V$ , 非常微小, 需经过 LM358 运算放大器放大, 放大倍数为  $1 + R_{25} / R_{26} = 18$ , 得到  $0 \sim 3.3V$  之间电压信号 AOUT\_IN, 才能输入单片机采样。第二个运算放大器用作比较器, 其同相输入端接 5V 的电位器, 设定基准电压, 使得负载电流大于 3A 时输出低电平中断信号 I\_STOP 给单片机, 由单片机程序控制减小 PWM 占空比, 从而减小线圈电流。

### 4.3.3 电源系统设计

该电子放大器所需的电源较多, 驱动阀芯线圈动作的电源与系统电源相同, 都为 24VDC; 传感器使用的电源为 10VDC; 光耦和 IC 芯片使用的电源为 5VDC; 单片机最小系统使用的电源为 3.3VDC。

24VDC 电源如下图所示:

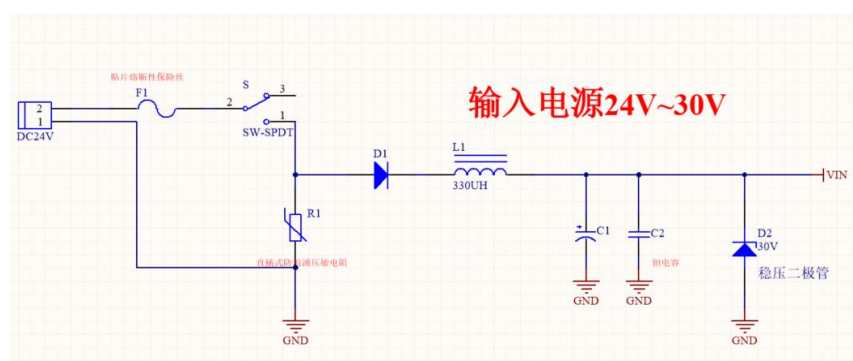


图 4-6. 24V 系统电源

Figure 4-6. 24V system power supply

图中, R1 为压敏电阻, 防止浪涌电压。D1 为 SMB 封装的肖特基二极管, 防止电源反接。电感和两个电容构成低通滤波器, 过滤高频干扰。D2 为稳压二极管, 电压大于 30V 时击穿, 从而将最高电压钳位到 30V。

24V 转 10V 的 DCDC 电源模块如下图所示:

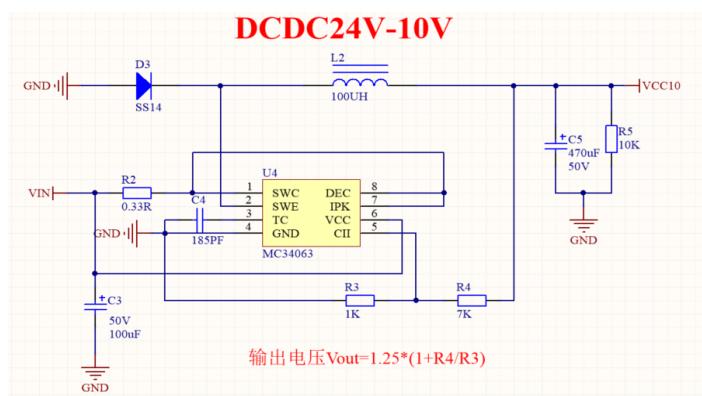


图 4-7. 24V-10V 电源模块

Figure 4-7. 24V-10V power module

该模块主要用于传感器电源, 根据设计指标, 两个传感器负载电流不超过 200mA, 但对电压精度要求较高。

24V 转 5V 的 DCDC 电源模块如下:

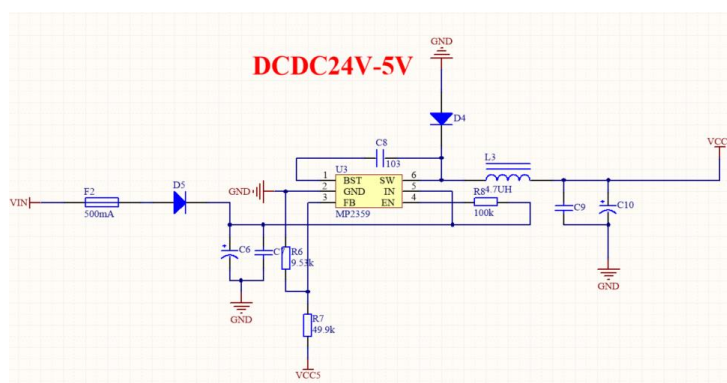


图 4-8. 24V-5V 电源模块

Figure 4-8. 24V-5V power module

该电路采用了常用的 5V 开关电源芯片 MP2359, 该芯片额定输入电压 26V, 输出电压 0.81V-15V, 正常工作的温度范围是 -40°C~+85°C。计算公式为  $R_6 = R_7 \div (V_{out} \div 0.81V - 1)$ , 取  $R_6 = 9.53K\Omega(1\%)$ ,  $R_7 = 49.9K\Omega(1\%)$ , 即可得到  $V_{out} = 5V$  的精准电压。

单片机电源需要 3.3V 电压, 可使用常用的 AMS1117 电源芯片。该电源芯片为线性电源, 不是开关电源芯片, 若直接以 24V 系统电源作为输入, 电压相差较大, 会导致转换效率太低, 发热严重, 容易烧毁芯片。因此采用 5V 电压作为输入, 以提高电源效率。同时为了保护单片机, 增设了 100mA 的自恢复保险丝。电路图如下:

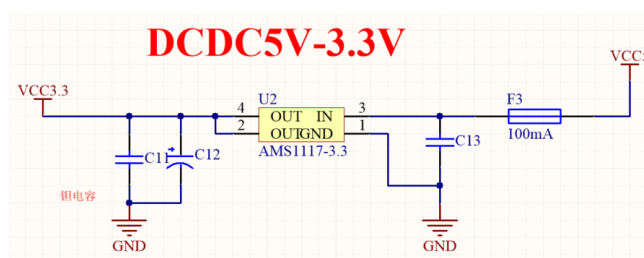


图 4-9. 5V-3.3V 电源模块  
Figure 4-9. 5V-3.3V power module

#### 4.3.4 传感器接口设计

该电子放大器可接收油缸位移传感器和压力传感器信号，二者均为模拟电压信号，电压范围 0-10V。STM32 单片机自带的 ADC 采样 IO 口的最高容忍电压只有 5V，且默认采样精度为 12 位，只能精确识别 0~3.3V 电压范围内的信号。因此必须设计信号接口电路，使之具备电平转换和信号隔离的功能。

##### (A) 模拟信号输入

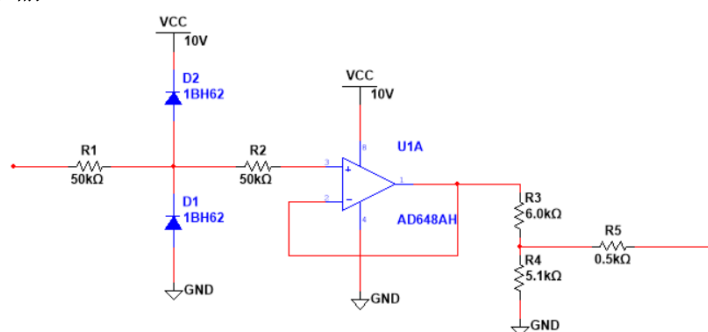


图 4-10. 模拟信号输入  
Figure 4-10. Analog signal input

图 4-10 为一路模拟信号输入端口，输入端有两个二极管，将信号电压钳位在电源电压范围内，防止过电压。运算放大器做电压跟随器，不改变输入电压的大小和相位，仅作隔离作用。由于传感器电压较高，不能直接输入微控制器，因此在出口设计了分压电路，将 10V 模拟信号降低到 3.3V。又因信号经过电压跟随器后有一定衰减，因此分压电阻的比值需要调整。

##### (B) 开关信号输入

数字开关信号输入采用高速光耦 EL817 做隔离，电路如下：

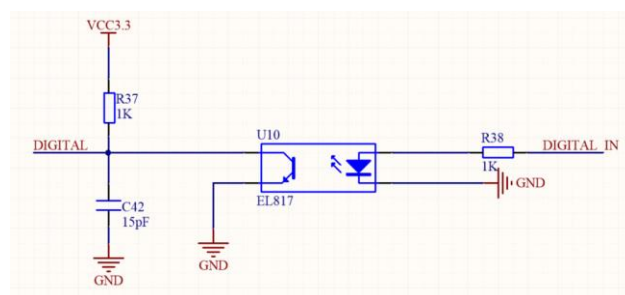


图 4-11. 开关量输入

Figure 4-11. Switching value input

光耦 EL817 将外部高电压的开关信号与单片机的低电压信号完全隔离。当外部电压为高时，内部发光二极管发出光线，受光器二极管接受光线后导通，使得单片机对应的 IO 口接地，输入低电平。单片机默认端口上拉，低电平有效，在逻辑上与开关信号相反。

### (C) 开关信号输出

开关量输出主要是输出 PWM 信号，同样采用光耦。

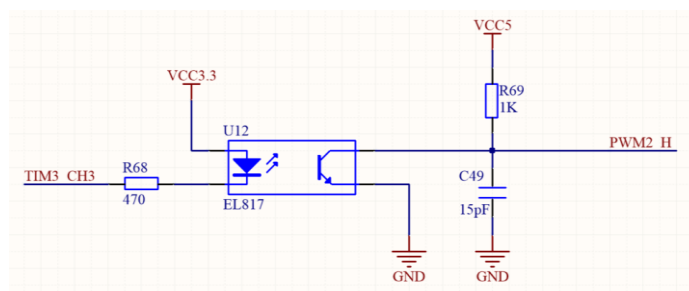


图 4-12. 开关量输出

Figure 4-12. Switching value output

如图，PWM 信号为高时，光耦发光器两端电压都为 3.3V，发光器不发光，光耦受光器截断，输出端 PWM2\_H 电压上拉为 5V。PWM 信号为低时，发光器两端产生压差，电流经发光器灌入单片机 IO，发光器发出光线，受光器导通，光耦输出端接地，输出低电平。开关量输出模块的逻辑与程序逻辑相同。

### 4.3.5 其他电路

FLASH 存储芯片采用 W25Q128，CAN 通信芯片采用 TJA1050，RS232 串口通信采用 CH340G 芯片。由于应用非常成熟，相关资料丰富，故本文不再赘述。



## 4.4 软件设计

### 4.4.1 程序状态机

状态机是描述嵌入式软件功能和架构的重要图形，电子放大器状态机控制逻辑如下所示：

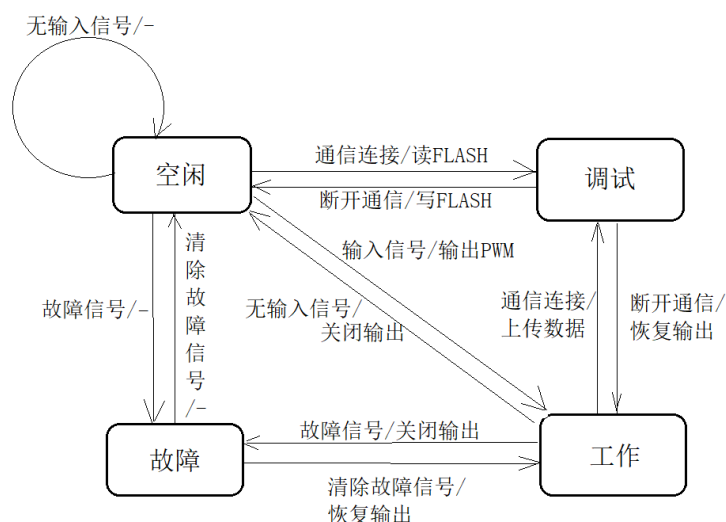


图 4-13. 放大器程序状态机

Figure 4-13. Amplifier program state machine

如图 4-13，放大器的工作状态包括“空闲”、“调试”、“故障”和“工作”四个部分。系统初始化后首先检查是否有故障信号，包括驱动电路故障和上位机发送的故障信号。若有故障，则进入故障状态，关闭输出；若没有故障，且没有接收到上位机发来的指令，则处于空闲状态，循环等待输入信号。若检测到通过 RS232 串口通信线或蓝牙与电脑端的上位机发生了连接（接收到调试指令），则进入调试状态，读取 FLASH 中存储的数据。断开该通信连接，即可退出调试模式。由于上位机仅用于调试，正常工作时不需要，因此可用串口助手代替，无须专门设计。

在系统故障信号清零，接收到上位机发送的控制指令，且断开调试通信线的前提下，系统进入正常工作状态。接收上位机发送的背压力信号和传感器位移信号，根据公式算法计算输出的 PWM 占空比数值，通过定时器输出 PWM 信号。

### 4.4.2 UCOSIII片上操作系统

由于系统程序功能模块较多，单片机系统不支持并行运行，因此存在任务冲突的可能。通过设定定时器中断优先级可以保证任意时刻只有一个任务执行，但中断越多，系统可靠性越差，程序容易跑飞，且容易造成优先级翻转，即低优先级先于高

优先级执行，使程序执行逻辑混乱。为解决此问题，引入了 UCOSIII 片上实时操作系统进行任务调度，实现多个子程序并行运行的效果，避免了任务优先级冲突，提高系统鲁棒性。任务调度原理图如下：

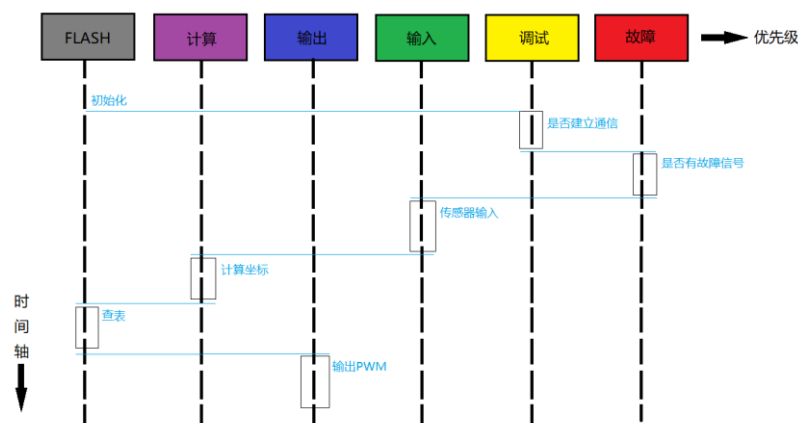


图 4-14. 任务调度原理  
Figure 4-14. Principles of task scheduling

如图 4-14，系统包含 FLASH 存储、参数和坐标计算、PWM 输出、ADC 采样输入等多个子程序，部分程序优先级相同，部分不同。从左至右，任务优先级依次提高，纵坐标为时间。采用片上实时操作系统后，系统将整个循环周期划分为多个时间片，每个时间片的宽度在 5ms 到 15ms 不等，不同子程序需要的时间片个数不同，依照子程序执行周期而定。上图中，系统初始化完成后，按照流程顺序首先执行判断是否与上位机建立通信的子程序，执行 1 个时间片后交出权限，接着执行判断是否有故障信号的程序。由于故障检测程序的优先级高于通信检查程序，因此当通信程序和故障程序同时申请资源时，系统将优先执行故障程序。但在通信程序已经执行的过程中，即使发生优先级更高的请求，该程序的执行仍然不会被打断，直到申请的时间片全部结束，才会将 CPU 资源交给申请者中优先级最高的程序。片上实时操作系统的这一特性有效避免了多优先级中断的逻辑混乱问题，提高了电子放大器工作的可靠性。

#### 4.4.3 电子放大器软件流程图

电子放大器程序流程图如下：

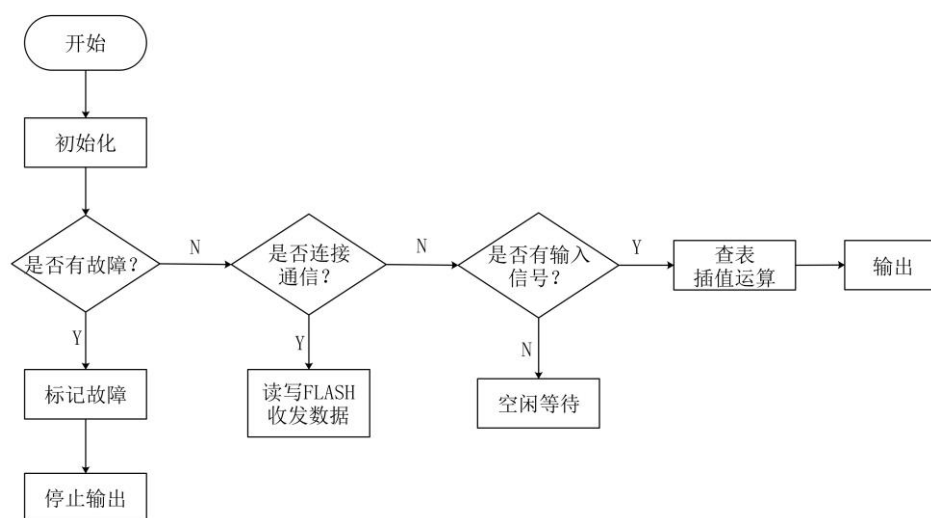


图 4-15. 电子放大器软件流程图

Figure 4-15. Software flow chart of electronic amplifier

由图 4-15 可知，系统上电后，首先初始化，完成传感器 ADC 采样、串口读数据和启动 FLASH 的工作。初始化完成后，首先检查是否存在故障，如传感器未连接、驱动电路故障等。若有故障，就进入故障状态，设置故障标志位，关闭输出。若没有故障，系统再检查是否与上位机建立串口通信。若收到上位机的输入信号，则进入调试模式，读写 FLASH 中存储的开度数据，完成与上位机的数据交换。若没有收到上位机调试指令，却收到了注射缸位移传感器的 ADC 采样信号，则进入正常工作状态。根据传感器位移信号，计算回退速度和流量，再根据上位机设定的背压目标值查表，再使用插值算法得到最终的输出，完成一个循环周期。若没有接收到，则进入空闲状态，即不断循环以上程序流程但没有输出，对外表现为死循环。

由于 STM32 单片机程序文件和代码量较大，部分代码见第三章 3.5 节，本节不再详细叙述。

## 4.5 电子放大器实物

经过多次改版设计和调试修改，最终得到硬件实物如下：

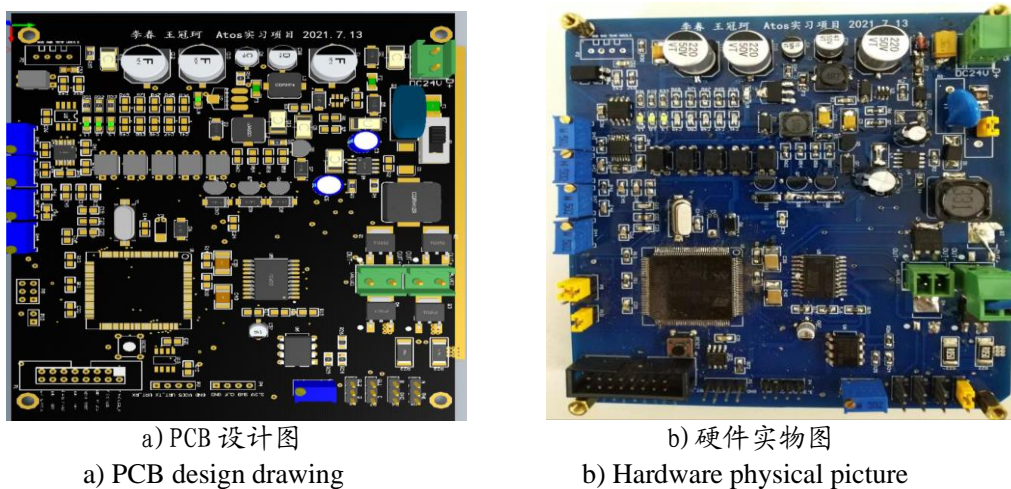


图 4-16. 硬件实物图

Figure 4-16. Hardware physical drawing

图 4-16 左侧为 PCB 三维图，右侧为焊接完成的硬件实物图。相比一般的电子放大器产品，该电子放大器将信号采集、通信和驱动电路等集成到一起，功能更加丰富，集成度更大，支持功能扩充和后期开发。

## 4.6 本章小结

本章主要介绍了控制比例换向阀的电子放大器的设计与制作过程，包括磁致位移传感器和比例电磁铁的原理、系统硬件架构及模块电路的设计、软件系统架构和程序流程图等。给出了从宏观到微观的设计思路，参数计算，并设计和制作了电路板实物，经过了通电测试和多次改版，为下一章测试做了准备。

## 第五章 系统测试研究

### 5.1 本章引言

该课题的研究重点在于提出一种新型的间接闭环被动式背压控制方法，并使用模糊决策控制实现了这一方案。根据第三章仿真实验可知，几种插值反模糊化方法存在一定的性能差异，但差异并不算太大，且反模糊化方法并非本课题的研究重点。加之时间有限，工作量巨大，因此系统测试研究仅采用性能较好的拉格朗日插值反模糊化方法。通过设定多组背压值，检测回油路压力和流量，再与传统闭环控制的流量及压力做对比，验证了该系统间接闭环被动式背压模糊决策控制的可行性。

为验证系统的控制原理和设计方案，搭建了工装测试台架模拟注塑机注射缸工作过程，设计了注射缸回退过程的等效液压系统。液压系统测试首先利用自主设计的放大器驱动比例换向阀，观察驱动信号与流量是否呈线性关系，以验证该放大器的可控性。然后搭建简单的液压系统，用试验油缸模拟注塑机注射缸，用普通的电磁阀驱动油缸回退，在回油路串联双通道的比例换向阀，并使用自主设计的电子放大器作为驱动控制器。以电脑作为上位机，通过串口通信向自制的电子放大器中输入设定的多组背压值，并使用测试台的上位机连接流量和压力传感器，得到了对应的实验结果。

### 5.2 实验设备与实验原理

由于疫情和条件所限，难以直接使用注塑机进行试验。因此借助 Atos 厂商提供的比例换向阀组件及其配套设备，搭建了系统模拟测试台架。实验设备包括一个压力油源、两个普通电液换向阀、两个液压油缸、一个流量传感器、一个油压力传感器、一个磁致位移传感器、一个比例换向阀、电子放大器电路板、电脑、直流电源、上位机示波器等。系统组成由下图 5-1 和 5-2 所示：

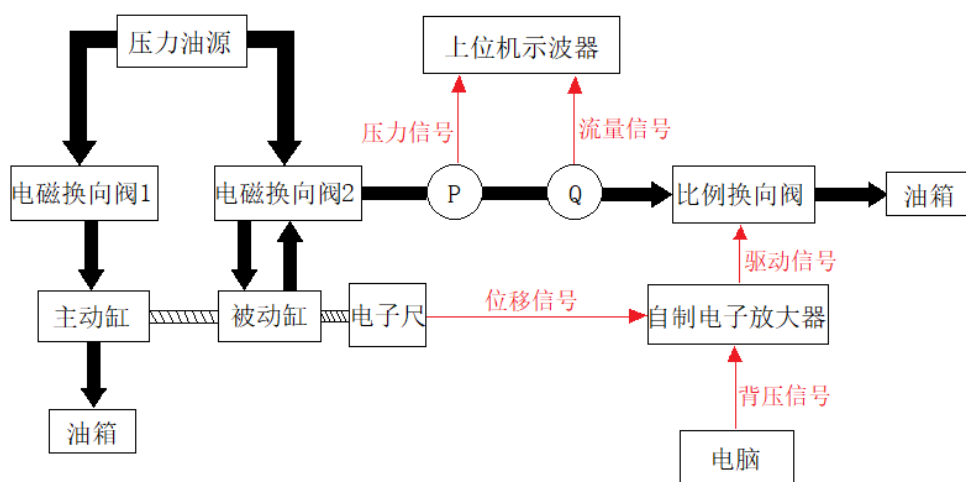


图 5-1. 实验系统原理框图

Figure 5-1. Principle block diagram of experimental system

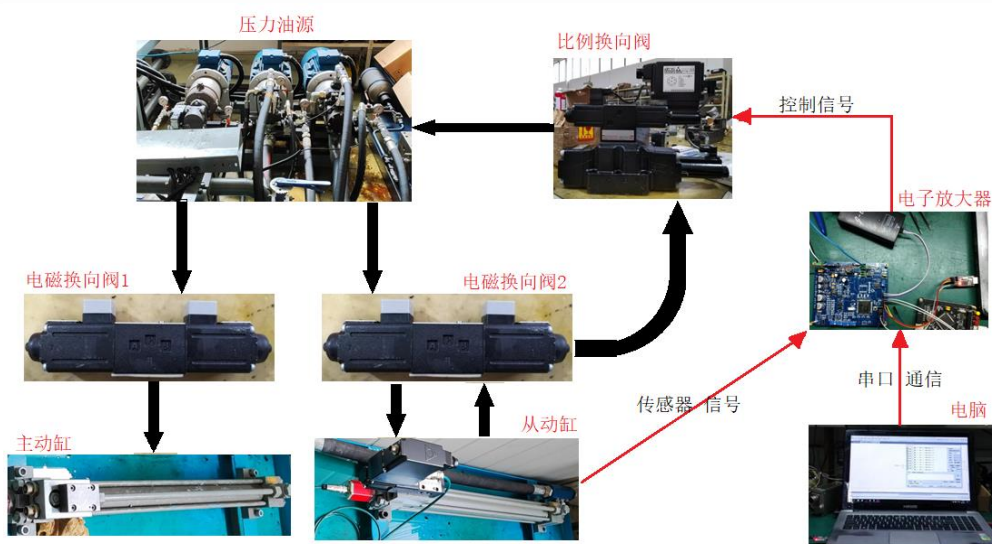


图 5-2. 实验系统实物图

Figure 5-2. Physical diagram of experimental system

由以上两图，该实验的方案为：

(1) 采用主动缸-从动缸搭配组合，由主动缸产生推力，推动从动缸回退，模拟注塑机计量室内塑胶熔体对螺杆产生的反推力。主动缸以恒定速度推动，使得施加在从动缸上的力保持不变。

(2) 参考第 2 章图 2-1，使用两个普通的电磁换向阀，用于改变油缸的运动方向。参照第二章中的回油路被动式背压控制原理，电磁换向阀 2 采用 J 型中位机能，以保证回油路畅通，阻尼较小。

(3) 磁致传感器安装于从动缸一端，检测从动缸位移，模拟注射油缸回退速度。并将信号传递给自制的电子放大器，该信号为标准模拟电压信号。

(4) 在第 2 个电磁换向阀和比例换向阀之间串联入流量传感器和压力传感器，检测回油路的背压力和流量。将传感器与专用的测试台上位机相连，可得到背压力和流量数据。

(5) 自制电子放大器同时接收来自位移传感器的信号和电脑上位机的背压指令信号，计算得到阀芯开度信号，驱动回油路比例换向阀动作，从而控制阻尼。

### 5.3 实验过程及结果分析

该系统主要的观测指标是回油的流量和背压力，因此实验的自变量为电脑设定的背压值，实际背压力和回油流量均为因变量。在实验中，分别设定多组背压指令，观察反馈的背压和流量信号，分析控制系统的指标性能。

实验第一步，是检验放大器的可控性。因此分别将阀芯开度信号设置为斜坡信号，阶跃信号和三角信号，观察反馈的流量是否跟随变化且为线性。

将阀芯开度设置为斜坡信号，坡底为 0%，坡顶为 100%，时间为 10s，则开度信号的函数表达式为：

$$Z(t) = 10t, \quad t \in [0, 10] \quad (5-1)$$

若将阀芯开度信号设置为阶跃信号，则函数表达式为：

$$Z(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 1] \\ 100, & t \in [1, 20] \end{cases} \quad (5-2)$$

将阀芯开度设置为三角信号，表达式为：

$$Z(t) = \begin{cases} 20t, & t \in [0, 5] \\ 200 - 20t, & t \in [5, 10] \end{cases} \quad (5-3)$$

得到的流量反馈曲线如下图：

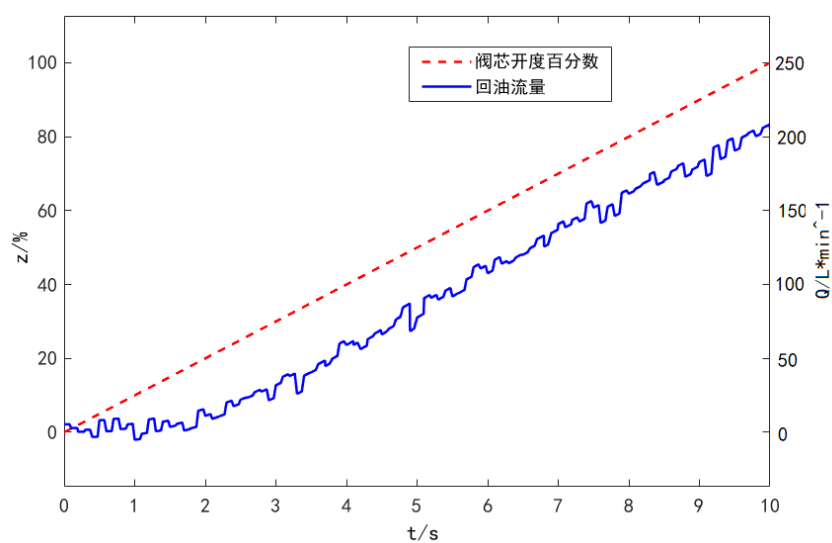


图 5-3. 斜坡信号测试  
Figure 5-3. Slope signal test curve

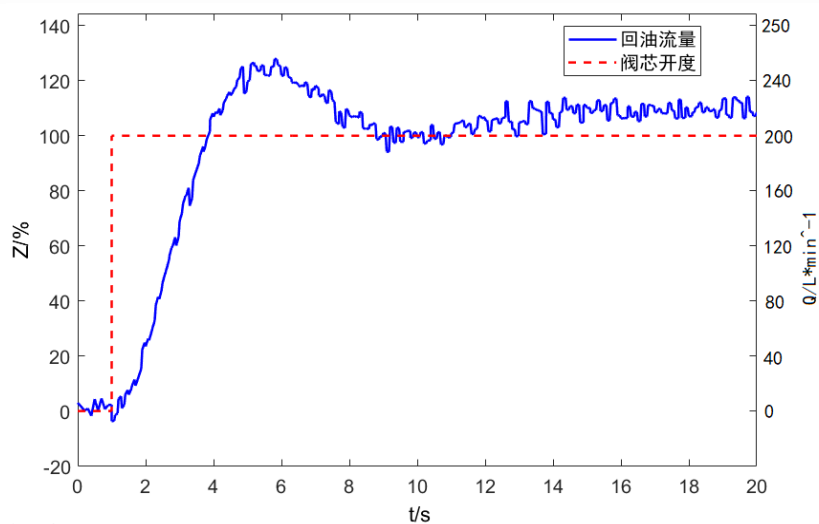


图 5-4. 阶跃信号测试  
Figure 5-4. Step signal test curve



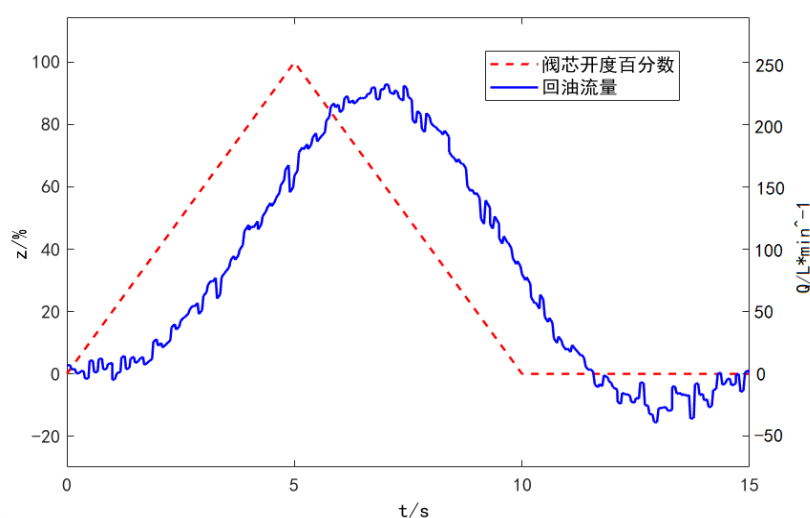


图 5-5. 三角形信号测试  
Figure 5-5. Triangular signal test curve

由以上测试可知，当输入阀芯开度百分数为斜坡信号时，回油流量呈直线上升，线性度较好。当开度信号为阶跃信号时，流量曲线呈现动态调节的过程，有一定的超调和波动，但最终趋于稳定，体现了系统的抗干扰能力和稳定性。当开度信号为三角波信号时，对应开度信号先增大再减小，而流量曲线随之上升和下降，体现了控制系统的跟随性能和反应速度。经过以上三种信号测试，验证了该背压控制系统和电子放大器的可控性。

实验第二步，通过设定目标背压激励函数，观测实际反馈的背压和流量曲线的变化，并与传统的压力闭环控制对比，分析评估系统的控制性能。设定目标背压函数表达式为：

$$p(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, 2] \\ 30t - 60, & t \in [2, 3] \\ 30, & t \in [3, 5] \\ 92.5 - 12.5t, & t \in [5, 7] \\ 5, & t \in [7, 10] \end{cases} \quad (5-4)$$

根据公式 (5-4)，背压指令被设置为包含阶跃信号、斜坡信号和三角波信号的综合指令信号，模拟注塑机注塑油缸回退过程中的启动零背压、加速升压和匀速保压的过程。该公式中，最高背压设置为 30bar，最低背压设置为 5bar，试验时可修改背压上下限值及曲线斜率。

当最高背压设定为 30bar，最低背压为 5bar 时，试验获得的实际压力和流量曲线如下：

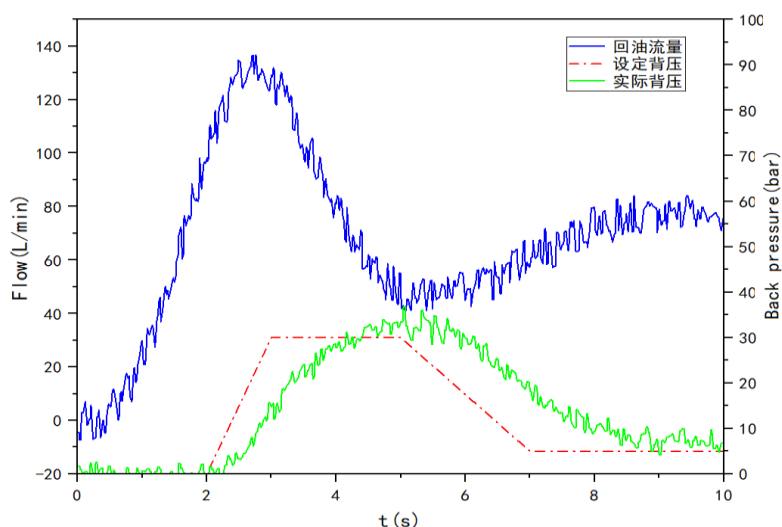


图 5-6. 30bar-5bar 试验测试

Figure 5-6. 30bar-5bar signal test curve

如图 5-6, 0~2s 注塑机注射油缸开始回退, 设置起始背压为零, 阀全开, 流量迅速上升到 130L 左右。2s 后升高背压到 30bar, 产生回油阻尼, 流量迅速下降, 最低处约为 50L。7s 后设置末端背压为 5bar, 流量回升并稳定到 70L 左右。实际背压与设定背压基本接近, 但相比第三章中的算法仿真结果, 存在一定的滞后和变形, 这是由于系统存在较大的惯性, 以及传感器误差等原因所致。

当设定最高背压为 20bar, 末端背压为 2bar 时, 测试结果如下:

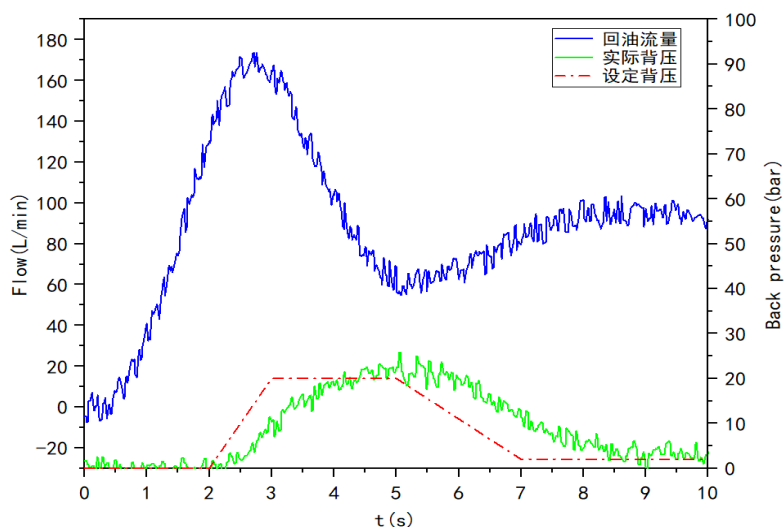


图 5-7. 20bar-2bar 试验测试

Figure 5-7. 20bar-2bar signal test curve

如图 5-7, 设定背压降低到 20bar 时, 最大流量增加到了 170L 左右, 最低流量为

60L左右。当背压稳定在 2bar 左右时,流量回升至 90L 左右。背压稳态精度为 $\pm 0.5\text{bar}$ ,与 30bar~5bar 试验时一致。

进一步降低背压,检验系统的低背压控制性能,设定最高背压为 10bar,最低背压为 1bar,测试结果如下:

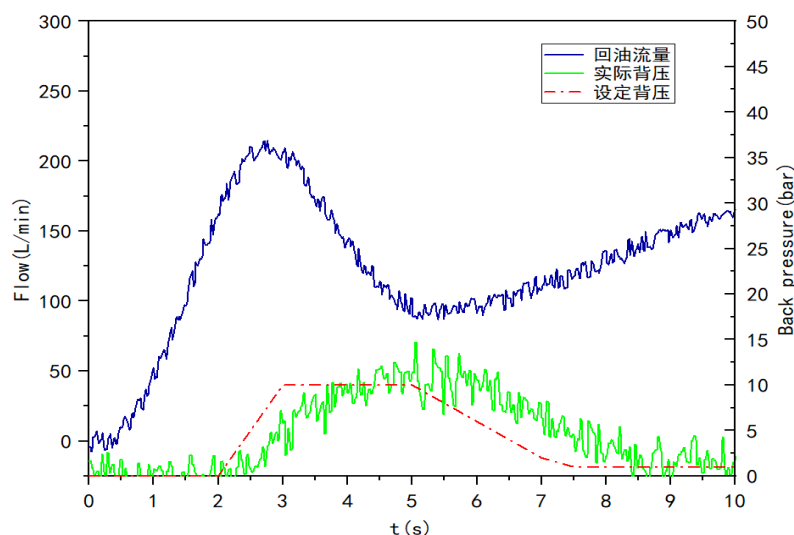


图 5-8. 10bar-1bar 试验测试  
Figure 5-8. 10bar-1bar signal test curve

如图 5-8,最高背压降低至 10bar,末端背压降低至 1bar 后,最大流量增加到了 210L 左右,接近系统最高流量。中间最低流量为 80~90L,末端流量持续上升到超过 150L。背压曲线接近于水平线,稳态误差低于 $\pm 0.03\text{bar}$ ,基本满足精度要求。

同样设置背压为 10bar 和 1bar,采用压力闭环控制,得到的结果如下:

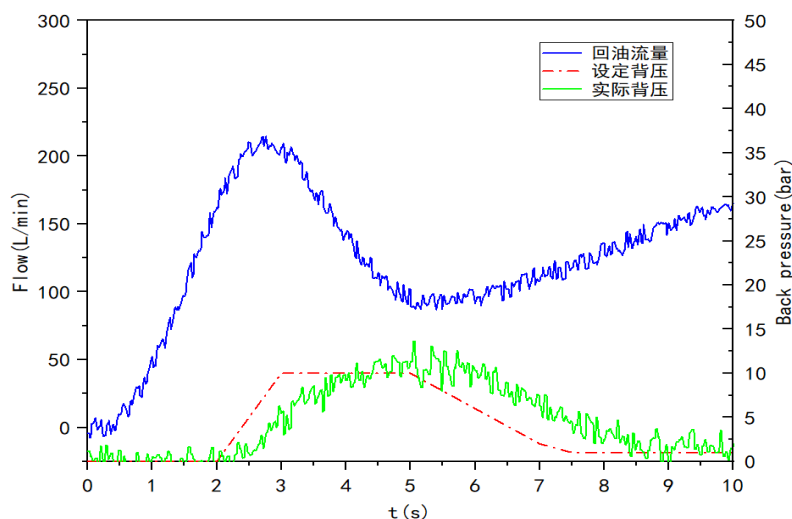


图 5-9. 压力闭环试验曲线  
Figure 5-9. Pressure closed-loop test curve

由图 5-9 可知,采用压力闭环控制,其控制曲线与经拉格朗日插值运算后的模糊决策控制性能基本一致,只是压力波动幅度更小,精度更高。系统最大流量达到了  $210 L \cdot \min^{-1}$ ,最小流量  $100 L \cdot \min^{-1}$ ,末端流量高达 150L。其流量控制精度达  $\pm 2 L \cdot \min^{-1}$ ,背压力控制精度达到了  $\pm 0.3 \text{bar}$ ,均高于拉格朗日插的模糊决策控制。但对于一般产品的生产精度而言,采用模糊决策控制的背压力控制精度只要满足不超过  $\pm 0.5\%$  的要求,可以替代传统的闭环控制,以降低系统成本。

总结以上试验结果如下表 5-1 所示:

表 5-1 实验结果对比  
Table 5-1 Comparison of experimental results

序号	分组	最大压力 bar	末端压力 bar	最大流量 $L \cdot \min^{-1}$	最小流量 $L \cdot \min^{-1}$	背压误差 bar	流量误差 $L \cdot \min^{-1}$
1	模糊	30	5	130	50	$\pm 0.6$	$\pm 5$
2	决策	20	2	170	60	$\pm 0.8$	$\pm 6$
3	控制	10	1	210	85	$\pm 1.5$	$\pm 4$
4	闭环 控制	10	1	210	100	$\pm 0.3$	$\pm 2$

由上表可知,采用基于拉格朗日插值的注塑机背压模糊决策控制系统,控制性能与传统的压力闭环控制基本接近。模糊决策控制的背压误差和流量误差均大于闭环控制,但背压误差随设定背压升高而减小,流量误差较为稳定。由于绝大多数背压值并不为零,因此采取一定提高压力控制精度的措施,可以使得该控制系统的控制性能与闭环控制相接近。在满足注塑机背压控制精度的前提下,有效降低设备成本,提高产品利润。

## 5.4 本章小结

本章设计了注塑机背压的模糊决策控制系统的验证实验。由于设备和条件所限,采取了双液压缸模拟注塑油缸回退过程中背压的控制,并提出了等效的试验方案。首先通过给电子放大器输入斜坡信号、阶梯信号和三角波信号,检验了电子放大器和整个系统的可控性,确保了流量能跟随信号作线性变化。然后模拟注射缸回退过程中由静止启动、加速、背压升高、减速、背压下降和保压的工况,将设定背压设置为包含斜坡、最大值、最小值和阶跃信号的综合指令信号,分别检验模糊决策控制和传统闭环控制的控制效果。试验结果表明,在一般较大的背压值下,模糊决策的控制精度与闭环控制接近,但背压越低,模糊决策控制误差越大,该误差可通过

改进插值算法，优化系统参数等方法不断缩小。但采用模糊决策控制的意义在于简化背压控制结构，不使用压力传感器和流量传感器，降低系统成本，提高经济效益。

## 第六章 结束语

经过为期半年的企业实习和半年的论文撰写，最终完成了毕业论文的写作。在这一年中，存在一些问题，也取得了一些经验。首先，我们缺乏液压方面的基础理论，在理论学习阶段存在一定的困难，走了一点弯路。其次，没有合理安排好实习的时间，前期进度较慢，后期硬件设计和调试花费时间过长。年后由于疫情影响，便将主要精力放在小论文和算法上，取得了明显进步。经过半年努力，完成了很多工作，赶上了一些进度，现将主要收获总结如下。

### 6.1 本课题的创新点及意义

(1) 将三位四通的 PQ 阀或 V9 阀替换为两位双通道的比例换向阀，且不使用阀芯位置检测传感器，且只使用注射油缸自带的位移传感器，降低了比例阀和放大器的设备成本，有利于大批量生产节本增收。

(2) 能够实现接近于零背压的控制，解决了目前市面上成熟的注塑机控制方案最低背压过高的问题，同时在背压为零时仍具有较大的流量，有利于提高注塑机的工艺性能。

(3) 采用间接闭环模糊决策控制的方式，根据设定压力值和反馈速度控制背压，实现压力闭环的控制效果。保证产品效能的同时提高了系统对不同规格注塑机的兼容性。同时研究了将模糊决策控制应用于微控制器的方法，提出了定义二维数组替代模糊规则表，使用插值算法替代反模糊化方法的新思路，并编写了相关代码。降低了控制器的运算量，提高了系统控制的鲁棒性。

(4) 只对回油路进行改造，不需要对整个注塑机进行重新设计，能够方便的应用于对已经投入生产的传统注塑机进行改造升级，从而减轻塑料制品企业设备更新换代的文化压力。

(5) 自主设计带存储和通信功能的电子放大器，通用性好，且支持总线和智能控制，便于工厂技术升级。

### 6.2 课题不足和延伸

该课题在完成过程中，存在诸多不足，总结如下：

- (1) 在电子放大器硬件设计和制作环节耗时过多，驱动电路设计较为困难，MOS 管温升很大，容易烧毁，性能不稳定。软件和算法方面时间仓促，有待完善。
- (2) 解决问题的方案不够清晰，采用了边摸索边尝试的办法。实际上应当利用厂家现有的设备，在软件和先进算法上思考解决方案，实现根本目的，而非将大量精力用于设计放大器硬件。使用更高效的方法，牢记课题的初衷，才能在有限的时间内做出有结果的事情。
- (3) 使用模糊决策和间接闭环查表控制，一方面能够降低成本，另一方面可以节约能耗。但由于时间和工作量太大的问题，本文没有在节约能耗方面做进一步研究。而降低设备成本，提高控制性能，节约能耗，都将给塑胶产品生产企业带来巨大的经济价值。
- (4) 在最后的测试阶段，由于时间、条件不足，所做工作不够充分，未能验证该系统的更多控制性能。

### 6.3 经验总结和反思

该课题结合了实际的行业需求，是由企业导师提出的，具有较大的实用价值和创新性。但题目工作量较大，实物制作及实验难度较高，完成所需的时间很长，这对我们来说是不小的挑战。但经过这一阶段，我的收获如下：

(1) 做项目之前需要评估项目的难度，具体内容和工作量，允许的完成期限，并与导师、公司达成一致意见，以确保能够圆满完成项目，取得较好的结果。

(2) 遇到问题和困难，除了反复尝试，坚持研究，还要灵活放开思路，把握主要矛盾，尽快解决问题，不因局部耽误整体，不因小失大。

(3) 合理安排多项工作的优先级。一段时间内只做一件事，完成了再做下一件事。不要把不重要的事和重要的事一起做，这样不但不能达到高效利用时间的目的，反而造成精力分散。每一件工作，都需要认真评估，全力以赴。

## 参 考 文 献

- [1] 石则满.由注塑机行业窥视国内基础工业的现状与未来之路[J].橡塑技术与装备,2021,47(22):16-18.
- [2] 胡浪. 全电动注塑机控制系统研发[D].华中科技大学,2017.
- [3] 肖旺. 高速注塑机液压驱动系统研究[D].山东理工大学,2014.
- [4] 何英,沈海波,吴敬阳.一种测量全电动注塑机的注射压力的方法[J].橡塑技术与装备,2018,44(02):28-33.DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2018.02.006.
- [5] 刘立柱,高杰林,高世权,王兴天,庄俭.基于 AMESim 预塑背压阀的压力特性研究[J].中国塑料,2017,31(12):101-106.DOI:10.19491/j.issn.1001-9278.2017.12.018.
- [6] 王嘉康. KM 全电动注塑机压力的远程监测与数据分析[D].北京化工大学,2020.DOI:10.26939/d.cnki.gbhgu.2020.000594.
- [7] 黄晓栋. 注射成型均匀性与稳定性研究[D].北京化工大学,2014.
- [8] 林晖,卢华杰.高性能电液比例压力流量复合阀在注塑机中的应用和维护[J].液压与气动,2001(04):28-29.
- [9] Lopez, Claudia Lizette. Analysis of Flash in Injection Molding Using Flow Simulation and Design of Experiments[D].ProQuest Dissertations and Theses Full-text Search Platform,2018.
- [10] McCarthy, Ethan M.. Injection Molding Behavior of Novel Biocompatible Materials for Hard Tissue Engineering and Pharmaceutical Applications[D].ProQuest Dissertations and Theses Full-text Search Platform,2020.
- [11] Soto Ponce, Keishla M.. Guideline Development for Injection Molding in - Process Dimensional Inspection System[D].ProQuest Dissertations and Theses Full-text Search Platform,2020.
- [12] Young, Christian.Design and Validation of Innovative Grid Channel for Injection Mold Cooling[D].ProQuest Dissertations and Theses Full-text Search Platform,2018.
- [13] Ogorodnyk O , Larsen M , Martinsen K , et al. Development of application programming interface prototype for injection molding machines[J]. Procedia CIRP, 2021, 97(1):453-458.
- [14] Y. Zhang et al., Automated vision-based inspection of mould and part quality in soft tooling injection moulding using imaging and deep learning, CIRP Annals - Manufacturing Technology (2022), <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2022.04.022>



- [15] Struchtrup A S , Kvaktun D , Schiffers R . Adaptive quality prediction in injection molding based on ensemble learning[J]. Procedia CIRP, 2021, 99:301-306.
- [16] Farooque R , Asjad M , Rizvi S . A current state of art applied to injection moulding manufacturing process – A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021(5–8).
- [17] Struchtrup A S , Kvaktun D , Schiffers R . Adaptive quality prediction in injection molding based on ensemble learning[J]. Procedia CIRP, 2021, 99:301-306.
- [18] CHEN, JOSEPH C., GUO, GANGJIAN, WANG, WEI-NIAN. Artificial neural network-based online defect detection system with in-mold temperature and pressure sensors for high precision injection molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7/8):2023-2033. DOI:10.1007/s00170-020-06011-4.
- [19] Heinisch J , Lockner Y , Hopmann C . Comparison of design of experiment methods for modeling injection molding experiments using artificial neural networks[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 61(1-4):357-368.
- [20] 郝思琪, 张晓刚, 葛磊, 张红娟, 权龙. 基于转矩控制的变转速定量泵压力控制方法[J]. 液压与气动, 2021, (10): 62-68.
- [21] 徐小平. 注塑机预塑背压阀阻尼配比压力特性研究[D]. 北京化工大学, 2014.
- [22] 刘松良. 全电动注塑机压力控制模块的算法研究与实现[J]. 电子产品世界, 2016, 23(012):71-73.
- [23] 高俊, 韩昌. 电控双泵液压源在注塑机上的节能研究[J]. 液压与气动, 2021, (1): 122-127.
- [24] 高华, 梁荣, 林晖, 等. 注塑机应用动态阻尼技术的新型背压回路[J]. 液压气动与密封, 2015, 000(002):75-77.
- [25] 周会成, 徐英鹏, 吴继春, 等. 一种基于二次曲线的全电动注塑机背压控制方法[J]. 中国机械工程, 2013, 24(019):2588-2596.
- [26] 何英, 沈海波, 吴敬阳. 一种测量全电动注塑机的注射压力的方法[J]. 橡塑技术与装备, 2018, 44(02):28-33. DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2018.02.006.
- [27] 沈艳河, 王璿. 基于神经网络 PID 控制的注塑机压力控制系统[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(05):72-75. DOI:10.19825/j.issn.1002-1396.2020.05.18.
- [28] 徐英鹏. 全电动注塑机注射与推顶单元控制技术研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [29] 徐艳滕. 注塑机塑化过程能耗分析研究[D]. 华南理工大学, 2015.
- [30] 周梅. PID-模糊控制联用法在塑料加工工艺控制方面的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(06):143-147.

- [31] 赵一鸣,王壮,戚嘉辉,胡燕海.基于模糊神经元 PID 算法的注塑机注射速度控制算法研究[J].宁波大学学报(理工版),2021,34(03):13-17.
- [32] 胡亚南,王鹏文,杨娜,李明辉.基于双模糊补偿注塑机料筒多区间温度解耦控制[J].工程塑料应用,2020,48(02):77-81+88.
- [33] 蒋金伟.基于模糊神经网络 PID 的塑料薄膜厚度自适应控制[J].塑料,2019,48(05):71-73.
- [34] 隋鹏昊.基于模糊策略的注塑机非线性高精度保压控制[D].上海交通大学,2019.DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2019.001378.
- [35] 梁德坚,黄力.改进粒子群模糊控制算法在注塑机电液比例控制系统的应用[J].塑料,2016,45(05):22-25+28.
- [36] Yanan H U , Zhang H , Feng H , et al. Temperature Control Strategy of Injection Molding Machine Barrel Based on Fuzzy Neural Network[J]. Plastics, 2019.
- [37] Yao J . Researches On The Robot Obstacle Avoidance Based On Fuzzy Control[J]. 2022(7).
- [38] Na L U , Long M A . Quantum Wolf Pack Evolutionary Algorithm of Weight Decision-Making Based on Fuzzy Control[J]. Chinese Journal of Electronics, 2022, 31(4):635-646.
- [39] Bouyahia O , Betin F , Yazidi A . Fault-Tolerant Fuzzy Logic Control of a 6-Phase Axial Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator[J]. Energies, 2022, 15.
- [40] Wu G , Zhang X , Zhu L , et al. Fuzzy Sliding Mode Variable Structure Control of a High-speed Parallel PnP Robot[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 162:104349.
- [41] 金朝铭. 液压流体力学[M]. 国防工业出版社, 1994.213.
- [42] 张勤, 徐钢涛. 液压与气压传动[M]. 航空工业出版社, 2012: 22-23.
- [43] 刘金琨. 智能控制.第 4 版[M]. 电子工业出版社, 2014: 32-48.
- [44] 曾亿山,张涛,虢锐,高文智.AMESim 仿真软件在电液伺服系统教学中的应用[J].安徽电子信息职业技术学院学报,2022,21(01):17-21.
- [45] 孙衍石,靳宝全,熊晓燕.电液伺服比例阀控缸位置控制系统 AMESim/Matlab 联合仿真研究[J].液压气动与密封,2009,29(04):38-42.
- [46] 文式轩,杨于光.基于 AMESim 和 Matlab/Simulink 的注塑机合模液压伺服系统的仿真研究[J].橡塑技术与装备,2011,37(09):1-4.
- [47] 侯军凯,聂建军,牛继高,等.基于微控制器的模糊控制算法实现[J].中原工

- 学院学报, 2021, 32(5):6.
- [48] 刘丽君,骆婷.插值法在图像处理中的应用[J].硅谷,2009(09):9-10.
- [49] 张晋, 易吉良, 陈松伯,等. 基于逐次最邻近插值的动力电池电压模拟方法[J]. 电子产品世界, 2021.
- [50] 武广臣, 刘艳, 赵琴霞. 格网 DEM 的几种插值方法实践[J]. 辽宁科技学院学报, 2012, 14(1):3.
- [51] 周靖楠,刘振男.关于二次曲线的拉格朗日插值问题研究[J].牡丹江师范学院学报(自然科学版),2017(03):25-26.DOI:10.13815/j.cnki.jmtc(ns).2017.03.006.
- [52] 徐小丽.拉格朗日插值法在工程应用中的算法实现[J].林区教学,2010(01):17-19.
- [53] 华罗庚. 优选法平话及其补充[M]. 国防出版社, 1972.3-4.
- [54] 翁之旦,雷蕾,蔡红旭,王世杰,袁堂波,金波.比例电磁铁特性测试系统研究[J].液压与气动,2019(12):119-124.
- [55] 何露,王贤明,杨靖.C8051F020 单片机在磁致伸缩位移传感器中的应用[J].信息通信,2017(05):6-7.
- [56] 耿圣博,关海静,耿景伯,王萌,王鑫,张波.STM32 的磁致伸缩智能位移传感器研究[J].单片机与嵌入式系统应用,2020,20(04):46-50.
- [57] GAO HUANG, ZHANG YUN, FU YANG, et al. Process parameters optimization using a novel classification model for plastic injection molding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,94(1-4):357-370. DOI:10.1007/s00170-017-0812-1.
- [58] M.YUE, A.K.WOOD. Pressure effects on temperature measurement of polymer melt[J]. Polymer Bulletin,1994,33(1):127-132. DOI:10.1007/BF00313484.
- [59] ZHANG YUN, MAO TING, HUANG ZHIGAO, et al. A statistical quality monitoring method for plastic injection molding using machine built-in sensors[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2015,85(9-12):2483-2494. DOI:10.1007/s00170-015-8013-2.
- [60] PENG ZHAO, HUAMIN ZHOU, YONG HE, et al. A nondestructive online method for monitoring the injection molding process by collecting and analyzing machine running data[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,72(5/8):765-777. DOI:10.1007/s00170-014-5711-0.
- [61] Havlicsek H , Alleyne A . Nonlinear control of an electrohydraulic injection molding machine via iterative adaptive learning[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 4(3):312-323.

- [62] Bensingh R J , Machavaram R , Boopathy S R , et al. Injection Molding Process Optimization of a Bi-Aspheric Lens using Hybrid Artificial Neural Networks (ANNs) and Particle Swarm Optimization (PSO)[J]. Measurement, 2018.
- [63] Kumar S , Hong S P , Chang M L . Data-driven smart control of injection molding process[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 31(9–12).
- [64] Chen J Y , Hung P H , Huang M S . Determination of process parameters based on cavity pressure characteristics to enhance quality uniformity in injection molding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 180:121788.
- [65] Zhou X , Yun Z , Mao T , et al. Feature extraction and physical interpretation of melt pressure during injection molding process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 261:S092401361830222X-.
- [66] Zarges J C , Heim H P , Volke J , et al. Learning quality characteristics for plastic injection molding processes using a combination of simulated and measured data[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60:134-143.