

申请上海交通大学工程硕士专业学位论文

## 基于模糊策略的注塑机非线性高精度保压控制

学    校：上海交通大学

所在单位：电子信息与电气工程学院

学    号：116032210025

工程硕士：隋鹏昊

工程领域：控制工程

导  师 I：杨煜普

导  师 II：陈志平

上海交通大学电子信息与电气工程学院

2019 年 2 月 23 日

A Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for Master  
Degree of Engineering

**NONLINEAR HIGH PRECISION  
PRESSURE HOLDING CONTROL OF AN  
INJECTION MOLDING MACHINE  
BASED ON FUZZY STRATEGY**

**Author:** Sui Penghao

**Speciality:** Control Engineering

**Advisor I:** Prof. Yang Yupu

**Advisor II:** Prof. Chen Zhiping

School of Electronic Information and Electrical  
Engineering Shanghai Jiaotong University  
Feb.23, 2019

## 基于模糊策略的注塑机非线性高精度保压控制

### 摘 要

随着社会的不断发展人们对于塑料的需求逐渐增高，塑料已经成为人类生活中必不可少的一部分了，塑料的制造企业现如今主要使用注射成型的方式来制作塑料，塑料的制作机械注塑机是整个塑料加工制作的典型，这种方式加工能够一次成型出形状复杂的塑料制品，由于这个原因，这个机械的制作研究对于整个塑料发展领域具有巨大的推动作用，它的发展对于整个塑料工业都占有重要的影响。注塑的完成需要合模、预塑等八大工序，这八大工序中保压控制阶段，作为影响最终产品性能的重要的阶段，对它的研究是非常具有意义的。

针对传统注射成型装备中保压压力控制精度不高的问题，为了实现保压压力的精确控制，本文进行了基于模糊策略的非线性模型的注塑机保压控制段的讨论，根据全电动注塑机的特点与性能，通过对执行对象的特性进行研究，利用路径规划的方法将保压控制过程描述成非线性系统模型，设计了一种适用与全电动注塑机保压系统的压力控制方案，满足其控制精度的要求，同时基于模糊策略，对系统模型进行优化，得出新的控制方法，与传统 PID 控制方法相比，该方法具有保压压力更快速的响应、动态性能稳定、稳态精度高等优点。

**关键词：**注塑机，保压控制，非线性系统模型，路径规划，模糊控制

## **NOLINEAR HIGH PRECISION PRESSURE HOLDING CONTROL OF AN INJECTION MOLDING MACHINE BASED ON FUZZY STRATEGY**

### **ABSTRACT**

With the continuous development of society, the proportion of plastics in material structure is rising rapidly year by year, and the demand for plastics products in enterprise production and people's daily life is increasing strongly. Injection molding is one of the main method of processing plastic products, injection molding machine is the main equipment, it is a typical representative of plastic processing machinery, injection molding processing to a forming the complex shape of plastic products, so the injection molding machine processing technology to improve the processing means, improve the quality of plastic products, promote the development of injection molding industry play an important role. A complete injection molding process consists of mold closing, pre-molding, injection molding, packing pressure, cooling, mold opening, ejection and mold adjustment. The pressure maintaining control stage, as an important stage that affects the final product performance, is of great significance to its research.

In view of the traditional injection molding equipment mediator pressure control precision is not high, in order to realize the accurate control of the holding pressure, this article has carried on the nonlinear model based on fuzzy strategy of injection molding machine pressure control section of the discussion, according to the characteristics of the fully electric injection molding machine and performance, through study on characteristics of the implementation of object, using the method of path layout of the described pressure control process nonlinear system model, we design a apply to all electric injection molding machine pressure control scheme of the pressure

system, meet the requirements of its control precision, at the same time, based on the fuzzy strategy, optimize system model, it is concluded that the new control method. Compared with the traditional PID control method, this method has the advantages of more rapid response to pressure stable dynamic performance and high steady-state accuracy.

**KEY WORDS:** Injection Molding Machine, Packing Pressure Control, Nonlinear System Model, Path Layout, Fuzzy Control

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 摘 要                  | I  |
| ABSTRACT             | II |
| 第一章 绪论               | 1  |
| 1.1 课题背景与意义          | 1  |
| 1.2 注塑机的发展历程与技术现状    | 2  |
| 1.3 非线性系统介绍          | 4  |
| 1.4 模糊控制介绍           | 5  |
| 1.5 本文的主要工作          | 6  |
| 第二章 注塑工艺原理           | 7  |
| 2.1 注塑机结构组成          | 7  |
| 2.2 注塑机工作原理          | 9  |
| 2.3 注塑过程控制参数         | 11 |
| 2.3.1 温度             | 11 |
| 2.3.2 压力             | 13 |
| 2.3.3 时间             | 13 |
| 2.4 注塑机控制系统          | 14 |
| 2.4.1 硬件部分           | 14 |
| 2.4.2 软件部分           | 16 |
| 2.5 本章小结             | 20 |
| 第三章 保压过程的非线性系统模型分析   | 21 |
| 3.1 非线性系统模型          | 21 |
| 3.1.1 基于仿射非线性的控制描述   | 21 |
| 3.1.2 非线性系统模型的流形分析   | 22 |
| 3.2 非线性系统模型在保压过程中的应用 | 26 |
| 3.2.1 模型建立           | 26 |
| 3.2.2 注塑保压过程的应用      | 32 |
| 3.2.3 保压过程中的滤波处理     | 36 |
| 3.2.4 保压过程的实验        | 40 |

|                                |           |
|--------------------------------|-----------|
| 3.3 本章小结 .....                 | 43        |
| <b>第四章 保压过程的模糊控制策略设计.....</b>  | <b>44</b> |
| 4.1 模糊控制理论 .....               | 44        |
| 4.1.1 模糊集合.....                | 44        |
| 4.1.2 模糊控制系统的组成.....           | 46        |
| 4.1.3 模糊控制系统的类型.....           | 49        |
| 4.1.4 模糊推理策略.....              | 49        |
| 4.2 保压控制模型的模糊策略 .....          | 51        |
| 4.2.1 选取模糊控制器.....             | 52        |
| 4.2.2 模糊化处理.....               | 52        |
| 4.2.3 建立模糊规则表.....             | 54        |
| 4.2.4 模糊推理.....                | 55        |
| 4.2.5 解模糊化.....                | 56        |
| 4.2.6 仿真应用.....                | 57        |
| 4.3 保压过程的模糊控制实验 .....          | 58        |
| 4.3.1 模糊控制算法设计.....            | 58        |
| 4.3.2 实验结果与分析.....             | 59        |
| 4.4 本章小结 .....                 | 61        |
| <b>第五章 总结与展望.....</b>          | <b>62</b> |
| 5.1 总结 .....                   | 62        |
| 5.2 展望 .....                   | 63        |
| <b>参考文献.....</b>               | <b>64</b> |
| <b>致    谢.....</b>             | <b>68</b> |
| <b>攻读硕士学位期间已发表或录用的论文 .....</b> | <b>69</b> |

## 第一章 绪论

### 1.1 课题背景与意义

社会在发展，时代在进步，人民生活的大幅度上升，使得塑料的需求量也在逐年增加。在当今时代，面对物质经济上升的趋势，塑料、混凝土、钢铁和木材被称为四大工业材料。塑料制品是指由塑料加工的家用和工业用品，是主要的成型产品的之一。塑料制品的制造工艺以注塑、吸塑等形式为主，其具有重量轻、成本低以及良好的可塑性、绝缘性、抗腐蚀性等特点，它已广泛应用于汽车、家用电器、电子零件、通信传输和医疗等众多领域。近年来，“塑化钢材”、“塑化木材”的趋势愈来愈热，塑料加工业迅速发展，原料及添加剂、塑料模具的设计制造、工艺技术和加工装备等多个方面的技术更新变革都显得尤为重要<sup>[1]</sup>。

作为目前已成熟的制造塑料制品的方法，注塑成型这种方法生产高效、速度快而稳定，有着全自动化的操作流程，形状多种多样，尺寸可以自由选定，产品精度准确可靠，制品更新快捷，可制造形状复杂的零件，这些零件构造方式也各有不同，也可以镶嵌金属。这种制作方式具有强大的稳定性和适应性，这在机械制作行业中具有很大的比重。可以看出，注射成型这种技术在塑料制造业中起着重要作用，其主要的生产设备：注塑机，在这个领域属于典型代表。目前，注塑机加工塑料的制品数量大约占塑料制品总产量的 40%，这巨大的比重间接地证明了研究、改造、提高注塑机的构造、生产方式、生产质量对于整个注塑领域具有巨大的推动作用。

注塑机的完整工作流程为：第一步将颗粒状或粉状的塑料通过料斗倒入料筒体，然后通过螺杆的旋转和筒体的外壁将物料加热至熔融状态，为了使喷嘴靠近模具的浇口，通过夹紧模和注射座向前移动达到位置，在螺杆的推动以及快速高压的条件下，熔料被注入低温的封闭模具内。经过一段时间的压力保持、冷却成型后，开模后由顶针顶出制品。这是一个循环的过程，每个循环都包括：定量进料、合模移座、熔胶塑化、射胶保压、开模取件等步骤。取出制品后再合模进入下一个循环。注塑机就是典型的间歇过程生产。

像注塑机这种具有间歇过程生产方式，它有着其独特的生产特点，这些生产特点包括：时变、工作时间不确定、过程繁杂等。此外，由于精密的表达方程式



的缺乏，各种参数之间的耦合作用以及系统具有非线性特点，使得工艺流程优化主要依赖于技术人员的经验和长期的反复试验。因此，线性模型已经无法很好地描述注塑过程，传统的试模方法不仅时间长，准确性低，面对目前国内外市场的激烈竞争，使得传统试模方法的行进变得困难重重。

作为市场竞争中的唯一立足之地——质量和效率，使得传统方法不得不进行改进，注塑机急需一套低成本、高效率、并能产出高品质制品的解决方法，考虑到注塑成型中各控制变量对产品质量的影响，本文的研究就显得很有意义<sup>[3]</sup>。

## 1.2 注塑机的发展历程与技术现状

注塑机作为一种模塑成型设备，它通过成型模具将热塑性或热固性塑料制造成各种形状的塑料制品，利用对熔融塑料的加热并且对其施加高压，将其注入并且充满到模具型腔中。

目前，最早关于注塑机的记录是 1872 年的美国 J.W.Hyatt，他用他的“包装机”解决了硝化纤维和樟脑混合物的塑化和成型问题。世界上第一台可被称作注射成型机的是 1921 年由 H.Buchholz 制造的，这是一台柱塞式机器，结构有点像当时的螺杆式压铸件，在那个年代这台机器是用人力驱动的。1926 年 Eckert 和 Ziehler 制造了第一批系列注塑机。虽然它是手动操作的，但是射胶过程是用气动完成的，这台机器采用的卧式结构，一直沿用至今。第一台往复式螺杆注塑机在 1956 年的时候降临世间，这台机器由 Willert 在诸多思考和不断试验的过程中推出。从那时起，注塑机的性能和技术不断进行改进与完善提高。

机械塑料制作在我国全面建设社会主义时期开始出现。上海出现了我国第一台注塑机，这台注塑机的制作生产，是我国走向塑料机械的里程碑，由于当时科技正处于发展的阶段，注塑机的科技含量较低，只能满足日常科技含量低的产品。随着我国石油化工产业的飞速发展，塑料机械的快速发展，使得我国的注塑机在近些年来也发展迅速，各种自动注塑机从手动转变过来，其驱动方式也变为液压系统驱动和电机驱动。经过多年的技术引进与创新，我国塑机行业在低端注塑机领域的制造水平和发达国家几乎持平，凭借劳动力价格的优势，中国占据了世界低端方面注塑机的出口半数。我国的注塑机现在经过了多年的技术发展、更新，其品种也变得各种各样，针对方向也各有不同，这些也推动了我国在世界注塑机械制作领域的地位。此外，近几年来，我国注塑机行业不仅在中低端领域有了重大进步，同时在高端领域也取得了很大的突破<sup>[4]</sup>。

自从二十世纪八十年代以来,计算机的迅速发展,也极大地影响了塑料机械制造业,这些机械制造通过和计算机技术的结合,使得我国的注塑机的发展变得更加迅速。机构运动仿真、三维参数化建模即为国内高新技术企业通过引进美国计算机技术实现的,这两种技术的实现对整个注塑机械制作进行了应力分布、应力值等的精密计算。这对于在产品的制作过程中,制作、研发、设计人员快速了解产品缺点,克服技术难关,修改研发制作方案具有巨大意义,同时,也增强了产品的可靠性。此外 CIMS 这个项目展示了计算机的集成管理模式,包括生产计划、生产原料、生产成本,IMAN 系统的引入对于产品属性、结构、相关数据的创建跟踪、查询具有重要意义,这个系统的引进实现了计算机的集成管理模式。

现如今在世界的注塑机领域,注塑机的移模速度不断提高,注塑速度也相比过去而言有了巨大的提升。900mm/s 的日本的电动型注塑机已经达到,其注射压力也得到了大量的提升,现在日本所研制的 SN120P 机已经实现了 460Mpa 的注射压力,其生产的相应产品收缩率已经接近 0,很低的值,0.02~0.03mm 的规格误差,0.1~0.2mm 的壁厚。在能源利用方便也得到了大量的提升,通过各种发展的科技融合,变频、定量控制等技术的加入,将能源利用率大大提升,能耗方面有了大量的提升。高效率在原料到成品的生成周期中展现出来,高效率引导产生出高产量,使得产量也得到大量提升。现如今高速注塑机开模、预塑能够在同一时间完成,抽芯、顶出在开模时同一时间完成。对于注塑机的相应的控制技术,是在电器、接触器控制和可编程控制器与专用计算机控制的基础上发展过来的。计算机控制技术在六十年代末的时候美国率先运用,经过二十年的快速发展,将熔体的温度、注射压力、注射速度、保压时间、冷却过程以及液压回路等各项参数都融入在里面的综合控制。

随着塑料制造业的逐步发展和稳定进步,市场对制造塑料的机械设备也有着愈来愈高的要求。注塑机是否节能高效、精确控制已成为用户关注的重中之重。在现有条件下,为了降低成本,通过机械提高精度、降低能耗、减少次品已经引发了业内的追捧,这一想法的提出,对于先进的机械制作技术的引出具有巨大的推动作用。现今的注塑机逐渐趋向自动化,通过改进工艺流程,优化整机设计等方式,来实现高品质、低成本的目的。先进技术的不断引进,使得注塑机的技术含量也突飞猛进,液压系统、性能优良的控制技术使得现今的注塑机逐渐达到低能耗、低成本的要求,朝着高精度、高质量、高效率、高速度、安静度、自动化、节能的方向发展。

面对激烈的市场竞争,对于注塑机的研究要投入到实践当中,本文中使用的

是上海纪威机械工业有限公司生产的 CWI 型注射成型机。该注塑机为电液混合式，射胶段采用伺服电动机，往复螺杆预塑是注塑机的注射方式，这种是现如今最为流行的一种，对此本文的研究方向体现出贴合现实的实际意义。

### 1.3 非线性系统介绍

如果系统的时变形成一种规律，并且这种规律可以通过线性微分方程来表示出来的时候，这个系统就可以称为是线性系统。反之，如果其中含有非线性元素时，此时的系统即为非线性系统。与线性系统相比，非线性系统具有不满足叠加定理、存在平衡状态的稳定性问题、自治系统自激震荡、系统频率响应跳变、系统的解分叉等特点<sup>[7]</sup>。

非线性系统在实际工程应用中无处不在。例如，控制系统中传感器的输出值与其中电机部分的相角差的正弦函数成正比，如果要在传感器中研究大范围的振幅，就必须考虑非线性特性的影响。在工程实践中，所谓线性系统只是实际系统被忽略了非线性因素后的理想模型，而理想模型实际上是不存在的，实际控制系统大多都是非线性系统。

系统的响应取决于输入的幅值大小和表达形式，这是非线性系统最重要的特征之一。另外，对于非线性系统，如果我们使用叠加原理，结果是无效的，这就意味着非线性系统本质上不同于线性系统。与成熟的线性控制系统分析和设计理论方法相比，一般没有统一的和常用的不成线性的处理方式。这种非线性的微分方程的解析解很少出现，只有特殊情况才会显现出来。所以需要我们建立其相关的研究设计方案。

非线性系统经过大量的数据反馈和适当的状态，转换为输入、输出等实现状态的线性化精准实现。这个过程将非线性的系统问题综合地转变为线性的综合问题。这其中的主要理论为通过非线性全局或者部分的构造变化，将其满足一定条件，最终在这一条件下、一定范围内的成线性形式表示，这是其目的，也可以称为其主要思想。这种方式与传统的方式有所不同，这种方法在实现线性化过程中对于特殊的非线性元素都包含在内，因此这个方法不会引入系统误差，线性化前后的系统是拓扑等价的<sup>[7]</sup>。线性的精准体现将所有满足条件的线性特征在特定范围内反映出来，并且这种展现是通过坐标系的辅助来将其特性更为精准地展现出来，其主要特点是精准、完整、试用范围广，只要有定义的范围领域内都可以，这种方式对于其整个领域的发展具有推动作用。

作为在线性控制领域的重要分支。在几何方向来分析，微分方法可以分析非线性系统中的很多性质，包括可控性、可观性、可逆性等。*Isdori*指出了这些年来利用微分方程在几何方向来研究取得的种种硕果，这些硕果包括在 20 世纪中期用拉普拉斯变换及复变函数理论对单输入单输出系统和线性代数对多变量线性系统研究。这些由于非线性系统的模型特点不能够满足线性所需要的条件，所以这些对于非线性系统不管其输入输出的运动状态是什么种类，基本上都无法通过子空间的方式来表示，但是非线性的系统其特点对于描述低维子流形等一些低纬的一些曲面还是具有一定能力的。这对于那些低纬的曲面描述了解、讨论具有相应的能力。所以非线性系统的控制理论领域中，成功地将微分流形的概念将这种方式的核心展现出来，这种微分流形是借助于构造微分同胚变化和反馈变换来精准线性地实现非线性系统。这种方法相比进化的更加优良，优良点为误差在理论上不存在，并且只要是在线性范围领域内不分全局还是局部都是可行的。它的线性化区域往往也是足够大的，工程上可将其作为全局结果来使用。

## 1.4 模糊控制介绍

模糊控制是一种利用模糊数学模拟人的思维的方法，包括以下几部分，分别是模糊集理论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理，模糊控制通过计算机控制的技术实现与操作者相同的控制方法。

通过大量的实验，可以看出被控对象的机理不清楚，缺少检测手段或者被测试区域无法通过测试装置进行测试等等，它们会阻止我们建立被控对象的数学模型。因此，解决这类对象的控制问题，用传统的控制理论来处理往往是艰难的，很难得到可以使用户满意的结果，但是对于不可预料，不能受到寻常方法控制的情况，经验丰富的人工操作对于整个操作结果往往具有意想不到的收获——令人满意的结果。这种人为的操纵核心就是将大量的经验总结融入其中，将计算机实现机械操作的过程充满经验，这也可以成为模糊操作，一般的人为经验都是可以通过文字来模糊描述的。这种操作在一定情况下可以收到令人满意的结果。

融入人为经验的模糊控制，其规则是通过模糊数学来描述的，这也可以称为模糊语句，但是这种语句是具有条件性的。这种描述方式不仅可以描述控制过程中的概念，还可以描述其中的关系、所控制的变量、任意时刻的检测量，这些同时可以推测出当时的控制量。以上这些即为整个模糊控制的中心思想。但是这种模糊的控制器模型是由具有经验的操作人员和这个领域的专家通过经验的积累，

用一组组条件语句构造而成，而不是数学表达式来展示模型。这个过程是经验与知识的大量积累，这也属于智能控制，所以这即为模糊语言控制器。

## 1.5 本文的主要工作

本文以上海纪威机械工业有限公司生产的型号为 CWI 的注塑机作为控制对象，首先针对机器设备保压过程进行非线性模型的建立及线性化处理，同时对保压过程参数进行分析，然后利用模糊策略的优良之处，其新的控制方法的形成是由这两样的融合而成，并且将其应用到注塑机控制系统中，数量巨大的实验数据对比分析，证明了这种模糊控制比传统的 PID 控制具有更好的控制效果。

本论文具体分为如下章节：

第一章绪论。对这个课题的背景，以及相应的研究意义进行简单介绍，分析了精确线性化的微分几何法以及模糊控制的内容，并叙述本文的研究内容。

第二章注塑工艺原理。本文面向对象是整个注塑的保压过程，对整个注塑过程、注塑机的原理、工作流程进行简单的分析、介绍，分析这其中的非线性、时变性、多工序、时滞性等特性，引出保压控制在注塑生产中的重要性，提出保压控制系统模型。

第三章保压过程中的非线性模型分析。详细论述模型的建立及线性化处理方法，分析保压性能指标及实验系统，设计滤波算法对采样信号进行处理，引出参数优化需人为操作的复杂性及模糊控制的可行性。

第四章保压过程的模糊控制策略设计。设计模糊控制器，建立模糊规则，通过制定的方案进行实验，通过与传统 PID 方法的实验对比与数据结果分析，得出结论。

最后进行总结，对所研究的领域分析自己的不足之处，并且对以后的研究方向进行确定。

## 第二章 注塑工艺原理

注塑成型也称之为注塑模塑成型，其过程简单描述如下：粒状塑料经料斗进入料筒，并通过筒体外壁的加热线圈加热和料筒内的剪切热使塑料成为熔融状态下的物料，然后机器进行合模动作和注射座前移的动作，使喷嘴贴紧模具的浇口道，在螺杆的推动下，将熔料注入具有较低温度的封闭模具内，在模具中固化成型，开模后由顶针顶出制品，整个过程循环往复，从而实现大批量制品生产<sup>[9]</sup>。本章将以纪威公司生产的 CWI 型注塑机为研究对象介绍注塑机的结构、工作原理。

### 2.1 注塑机结构组成

注塑机（塑料注塑成型机），其具体组成部分包括注射系统、锁模系统、传动系统、控制系统等几个部分<sup>[10]</sup>。本文所用的注塑机整体外观如图 2-1 所示，内部结构如图 2-2 所示。



图 2-1 注塑机外观图

Fig.2-1 External View of IMM

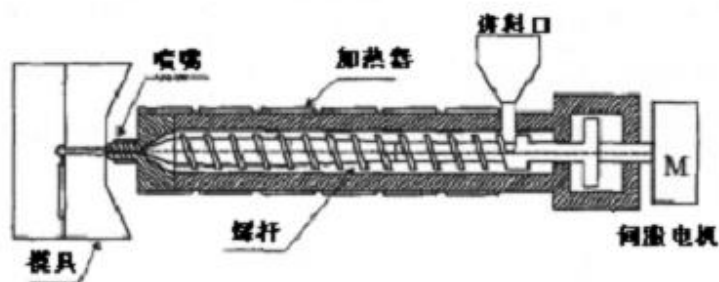


图 2-2 注塑机内部结构图

Fig.2-2 Internal Structure of IMM

### （1）注射系统

注射系统是注塑机的核心，它的工作原理为：原材料通过在料筒中加工、塑化、熔融，然后经螺杆在高速、高压的状态下将原材料注射进模具中，再进行保压，让原材料在模具中的到充分的收缩、冷却，最后成型，在这个过程中原料持续填充因为冷却形成的空腔中。注射装置主要由滚珠丝杠、同步皮带和驱动电机以及喷嘴组成，在射胶过程中，滚珠丝杠产生射胶推力，主轴通过带动螺杆，来对形成的模具头部进行高压操作，目的是将已经在料筒中得到加工，熔融的原材料经过喷嘴源源不断地进入模具的空腔之中；行程限位器和支架共同组成计量装置；射台是一个可以在机身上移动的底座，液压缸推动注射座，来进行方位的移动，在移动过程中操纵着注射座和模具的距离。

### （2）锁模系统

锁模系统拥有以下功能：关闭、开启模具，将已经完成的塑料制品顶出。这个锁模系统有以下几个结构组成：模板、锁模装置、模具装置、合模液压缸、顶针和安全门组成，为了能够减少飞边情况，锁模力度要强于注射时的压力。定模板在开合模具的时候，要对合模液压缸进行固定，动模板在开合模具的时候进通过合模液压缸以拉杆为方向引导和定模板进行合模操作。闭合模具时合模液压缸产生一定的锁模力用于锁紧模具，防止射胶动作注入熔体时模具被顶起。顶针安装在动模板的背面，开模结束后，顶针多点顶出，顶出力平稳，产品从模腔中被顶出。安全门装在锁模装置前，为了保证生产安全，装置会有相关的联锁动作，当安全门关闭时才可执行开合模动作。

### （3）传动系统

注塑机的驱动系统为整个工艺流程动作提供动力支撑，整个驱动分为两个部

分：液压、电机。液压部分又分为：油泵、油泵电机、比例伺服阀、比例换向阀，电机部分主要由伺服电机、滚珠丝杠、同步皮带等元件组成。在合模与锁模的时候，锁模力、合模力、动模板的移动、螺杆的旋转、螺杆的推进、顶针的顶出这些动作都由传动系统提供动力，具体动作可由什么系统驱动可自由设计，本文中使用的注塑机射胶部分采用伺服电机驱动，开合模部分采用液压方式。传动系统可保证注塑机按设定的参数和序列动作，准确无误地进行工作<sup>[16][17]</sup>。

#### (4) 控制系统

控制系统是注塑机的“大脑”，它控制着注塑机的各种程序、序列顺序及其动作，对时间、位置、压力、速度等参数进行控制，以控制器为控制核心，由接口电路、各检测仪表、传感器、加热器等组成，工艺流程一般分为手动、半自动、全自动几种控制方式<sup>[12]</sup>。

## 2.2 注塑机工作原理

通过注射装置将热塑性材料高速注入模具中，最后再模具中经过充分冷却、收缩最终成型，这个过程简称为注塑。注塑成型的基本过程是：模具关闭，塑料原料经料斗进入料筒内，经过料筒内的加热器加热以及螺杆的挤压，成为熔融状态下的熔体；在螺杆的推动下，通过喷嘴进入模具型腔内，冷却后，模具打开，由顶针将制品顶出。整个制作周期由合模、射台前进、射胶、保压、预塑计量、冷却、开模、顶出等序列组成。一个完整的工艺流程如图 2.3 所示<sup>[18]</sup>。

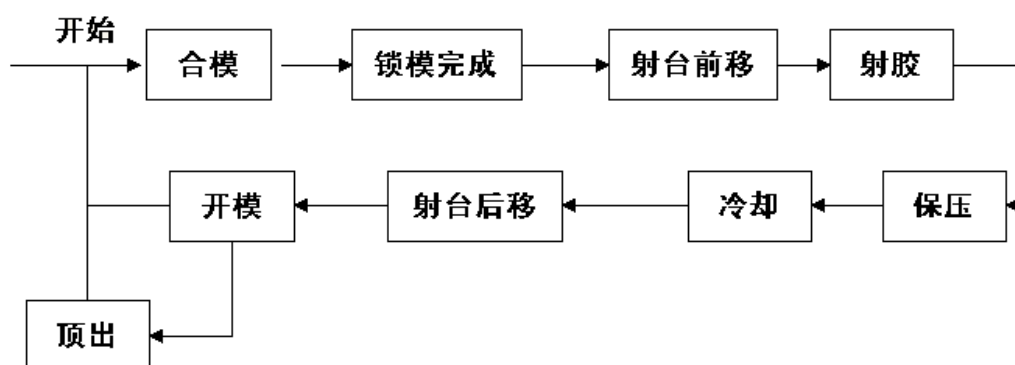


图 2-3 注塑机工艺流程图

Fig.2-3 Production Flow of IMM

尽管注塑机近些年来取得了很大的进步与发展，但是对于大多数通用注塑机



而言，主要的工艺流程还是基本一致的。主要分为以下几个阶段：

### （1）射胶前准备阶段

注塑机工作的起始状态是动模板处于打开位置，即模具的动模与定模处于分开状态，射台在后退的位置，料筒的喷嘴与定模未接触，注塑机的成型周期从模具闭合开始<sup>[19]</sup>。注塑循环开始后，动模板在合模机构的推力下向前移动，合模刚开始时，为了防止动模板的惯性冲击，需要缓慢移动，为了缩短工作周期，系统在运行过程中会快速移动。当动模即将接触到定模板时，系统会自动将合模的动力切换成低速，当达到合模限位开关时，动力系统会切换到高压锁模状态，为模具提供所需的锁模力，使模具完全闭合，从而完成整个合模阶段。动模到位后，射台朝定模方向移动，使筒体上的喷嘴与模具的铸造套筒相接触，此时喷嘴、模具浇道、成型模腔形成连接通道。文中所用的注塑机开合模机构的运动原理如图 2.4 所示。

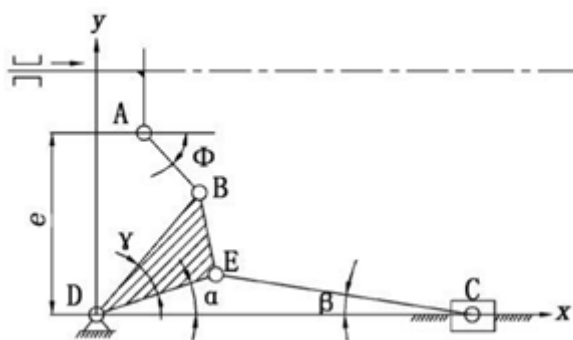


图 2-4 开合模机构运动原理图

Fig.2-4 Mole Part Movement Theory

开合模运动控制的对象是动模 C，并且移动模具通常由油缸通过双曲肘机构进行驱动的，因此，当油缸活塞的位置与动模的位置以及油缸活塞在某一位置的时候，活塞的运动速度（由液压系统的开合模油缸的流量决定）与动模的运动速度之间建立相应的关联关系，即进行开合模机构的线性化工作<sup>[20]</sup>。

### （2）射胶阶段

射台到位后，压下喷嘴与浇套，进入射胶充模阶段，伺服电机通过转动与螺杆连接的滚珠丝杠，将料筒中的熔体注入空的模腔中，此时作用在螺杆顶部的物料上的压力成为射胶压力，又称为一次压力。当射胶过程完成后，整个模腔充满熔体，此时螺杆已到达最前位置，由于低温模具的影响，使得注入模腔内的熔料收缩，同时为了防止模腔中物料倒流，制得材料均匀的制品，螺杆必须保持一

定的压力，直到浇口处熔体冷却封口为止，此时螺杆顶部作用于物料上的压力称之为保压压力，又称为二次压力<sup>[21]</sup>。

### （3）保压阶段

当保压进行到模腔内的物料不会从浇口回流的时候（即浇口封闭），伺服电机提供的保压压力即可卸去，使制品在模内冷却定型，此时螺杆在伺服电机的驱动下旋转，将来自料斗的粒状塑料向前输送<sup>[22]</sup>。

### （4）冷却塑化阶段

保压过程完成后，制品在模腔中进行冷却，与此同时，螺杆在伺服电机的作用下一边旋转一边向后移动，使丝杠回到起始位置，这一过程称为预塑。通常情况下，螺杆的后移量就是螺杆头部积存的物料体积量，当螺杆回到设定位置时，停止转动，计量程序结束，准备下一次射胶，制品冷却时间一般情况下要高于螺杆塑化计量时间<sup>[23]</sup>。

### （5）顶出阶段

在完成螺杆塑化计量之后，为了避免喷嘴与定模长时间接触而产生冷料，需要分离喷嘴与浇套之间的接触，即进行射台后退动作，当然，此动作的进行与否以及先后顺序，用户可以自行进行选择。当射台后退到位后，进行开模动作，动模向后移动回程，到达起始位置后，顶针开始动作，一般顶出装置会选用四根顶针在装置的四周，平稳动作，顶出制品，使其脱落。

## 2.3 注塑过程控制参数

注塑机的机械结构、模具的零件、原材料的选取、工艺变量以及这些变量之间的相互作用是决定注塑产品质量的关键因素。影响制品质量的过程变量主要有机器参数、材料参数、过程参数和扰动参数等<sup>[24]</sup>。其中，机器参数主要包括料筒温度、模具温度、背压、螺杆转速等<sup>[25]</sup>；材料参数主要包括材料的流动性、材料密度、导热系数、分子组成和分子质量等；整个过程中的参数展现出制品在模具中与材料、机械等参数的联系，因此也成为工艺参数。注塑机在生产过程中的主要参数有料筒温度、射胶速度、射胶压力、保压压力、背压等。扰动则分为随机扰动和人为扰动。

### 2.3.1 温度

温度的测量和控制在整个注塑过程中非常重要。绝大部分注塑机均采用热电

偶采集温度数值，一个热电偶由两条不同的电线尾部相接组成，如果一端比另一端热，将产生一个微小的电讯，加热越长，电讯越强<sup>[26]</sup>。模具温度、料筒温度、喷嘴温度和熔体温度是注射过程中的三个主要温度参数。

### （1）模具温度

模具在材料注射过程中，即为成型过程中模具内模腔的表面展现出来的温度成为模具温度，这个温度对于制品的成型具有重要意义，这个温度影响着整个成型过程中模腔内的原材料的流动和冷却速度，也影响着制品的整体品质等。温度的高低决定着制品的粘度，低粘度需低温模具注射，高粘度需要高温模具注射，各有不同，各有特点。高温可以防止制品出现裂纹等不合格现象的出现。对于结晶类型而言，模具温度也就决定着冷却速度和结晶速率。在温度低时冷却过程迅速，原料边流动边结晶，降低了其用户的实用性能，并且低温会是结晶困难，结晶程度低。高温降低冷却速度，提高结晶率，但是使得制品性能变脆，推迟了成型周期。除此之外，低温造成流动速度缓慢，容易结晶的结果是容易形成堵塞，影响原料的继续填充，造成制品缺料、凹陷、熔接缝等缺陷<sup>[29]</sup>。

### （2）料筒温度

选择适当的料筒温度可以确保物料在不发生变质分解的同时还能在料筒内部正常流动。对于具有分子质量较大、排列紧密的原料一般都选择高温度的料筒。例如以玻璃纤维为原料的制品，一般都选择高温料筒。料筒的温度是由前后顺序的，从前到后均匀由高到低均匀分布，还有水分超过需要时，需要将后端的料筒温度提升到能达到目的的程度，以确保所有物料受热均匀。

### （3）喷嘴温度

喷嘴温度一般是仅仅略微低于料筒的温度，喷嘴具有适合的温度对于避免原料在喷嘴部分流淌具有重要作用。最为合适的温度标准是原料在注射过程中产生无气泡的情况，此时的温度为低温对空注射，并且这个时候的物料为流滑的。

### （4）熔体温度

机筒温度与喷嘴温度是决定熔体温度大小的两个主要因素，而熔体温度对于物料熔胶过程以及射胶过程也有着重要作用。如果适当增加熔体温度，可以提升垂直于水平线方向的冲击强度、流动长度、表面粗糙度等性能，同时也会降低产品内应力、后收缩率、水平线方向的拉伸性、挠曲性等机械性能。所以，为了改善物料的注射充模状况以及物料在料筒中的流动速度以及提高制品的综合质量性能，提高熔体温度就有着很大的必要性，但是，如果温度过高，就会造成在操作过程中会产生更多的不必要的气体，并且影响操作，同时物料的流动性也会非常

大，这样会使得制品产生各种不合格的情况，并且它的表面的质量情况会被其损坏、影响，造成不必要的损失。另一方面，温度如果过于高的时候，塑料制品的强度会打折扣，弹性丧失，其使用性能会被破坏。

### 2.3.2 压力

射胶压力、保压压力、背压压力这三个参数是注塑成型过程中最主要的三个压力参数，每个压力之间参数独立运动，但是在整个过程又互相影响。

#### (1) 射胶压力

螺杆顶部对原料在射胶时产生的压力成为射胶压力，其作用为：对物料进行充分的搅拌、混合以及塑化，在这个过程中，固体颗粒和熔融物料会产生一定的流动压力，这个流动压力仅仅只是对料筒和喷嘴的，其主要目的是将原料充满模腔，螺杆必须克服这个阻力，以保证制品形状的精确度。如果射胶压力过高，产品容易产生飞边、溅射等缺陷；如果射胶压力过低，则会增加射胶时间，制品会出现收缩、翘曲的状况。射胶压力与以下因素有关：原料种类、模具温度、所制作的制品厚度等，在这其中所有的因素中浇注系统的结构对其影响最大。

#### (2) 保压压力

当熔体充满模腔时，射胶压力的作用是将熔体在模具中压缩，然后射胶压力成为保压压力。在实际生产中，射胶压力应大于或者等于保压压力。若保压压力数值不准确会造成制品变形、表面划伤、脱模困难等问题，所以，选择保压压力时需多方面考虑，本文的研究才显得更有意义。

#### (3) 背压压力

当螺杆顶部原料在螺杆后退时候产生的压力称为背压压力，背压的大小在物料进行塑化熔胶时起到比较重要的作用。一般情况下，螺杆向后的速度会随着塑化压力的增大而减小，与此同时料筒内的压力与塑化压力成正比，熔胶时的剪切作用与其成正比，同时会增强塑化程度。但是，如果背压过大，螺槽边缘的原料会产生回流，这种情况会使得塑化量降低，最终导致计量不够，同时会增加过量的剪切热，造成剪切应力过大，使得熔融料出现降解的现象，进而产生气泡，影响产品质量，因此，要选择适当的背压，以确保物料进行正确的熔胶过程。

### 2.3.3 时间

注射过程的时间参数主要为：射胶时间、保压时间、冷却时间等。

### （1）射胶时间

射胶时间是指伺服电机所连带的滚珠丝杠开始运动至保压阶段结束为止所持续的时间。这个时间属于注射速度的一种主要控制因素。其注射效率和射胶时间成反比，但是射速的高低会影响着制品的品质，这种影响是巨大的。所以升高其射胶速度会增强制品的强度，减少整个过程中的热量散失，综合性地增强了制品的质量，但是有优也有缺，这会使得固化层变薄，容易使制品产生形变，造成飞边、裂纹等<sup>[32]</sup>。

### （2）保压时间

对于制品的质量品质而言，保压时间起到了至关重要的作用，如果保压时间过长，会造成制品脱模困难，表面容易产生划痕的现象；如果保压时间过短，制品会出现空洞、凹陷的痕迹，对外形精度有很大的影响。

### （3）冷却时间

冷却时间是指从射胶结束到开模所持续的时间，其长短直接影响塑化的质量和制品的性能。冷却时间过长容易产生硬块、银丝等附着物，时间过短则会造成制品翘曲、变形等不良影响<sup>[30]</sup>。

## 2.4 注塑机控制系统

本文使用的注塑机控制系统由贝加莱<sup>[33]</sup>（B&R）研发，包括硬件和软件部分。

### 2.4.1 硬件部分

注塑机控制系统的硬件部分包括按键显示屏、IO板、接线端子、伺服驱动器等。显示屏集成控制系统CPU于一体，IO板包含数字量输入输出、模拟量输入输出、热电偶输入、PWM输出、计数器输入等，可采集注塑过程中的各种信号，模拟信号如温度、电子尺数值、传感器数据等，数字信号如启停电机、开合模动作等。显示屏实时显示并通过按键控制工艺过程。具体配置见表2-1。

表 2-1 贝加莱注塑机控制系统硬件配置表

| 型号                      | 描述   | 外观  |
|-------------------------|--|---|
| PP065.1043-K09          | PP065按键屏, 10.4" VGA TFT。128 MB DRAM, 32 KB SRAM (电池支持掉点保护), 200 KB SRAM (无掉电保护), X86 系列CPU, POWERLINK接口, 移动存储介质 (CF卡), 10/100 MB以太网接口, X2X接口, 2xUSB1.1/2.0。IP65级保护 (前面板) |    |
| X20BC0083<br>及 X20 系列模块 | X20BC0083 与 CPU 通过 POWERLINK 接口相连, 后续可自行配置各类 IO 模块, 如数字量输入、数字量输出、模拟量输入、模拟量输出、各类通讯模块等   |   |
| 8V1320.00-2             | ACOPOS 伺服驱动器, 34 A, 16 KW  |  |
| 0TBXXX.91               | IO 板连接端子   |  |

### 2.4.2 软件部分

注塑机软件部分基于贝加莱公司研发的 Automation Studio，所有控制程序集成在工业级的 CF 卡上，卡插入显示屏的卡槽中即可。参数的设定、工艺流程的顺序编排、简单的逻辑编写都可以在显示屏上完成；详细复杂的逻辑程序需要在 Automation Studio 中修改再烧录进 CF 卡中，本文的实验均通过这个过程完成。控制器的主界面如图 2-5 所示：

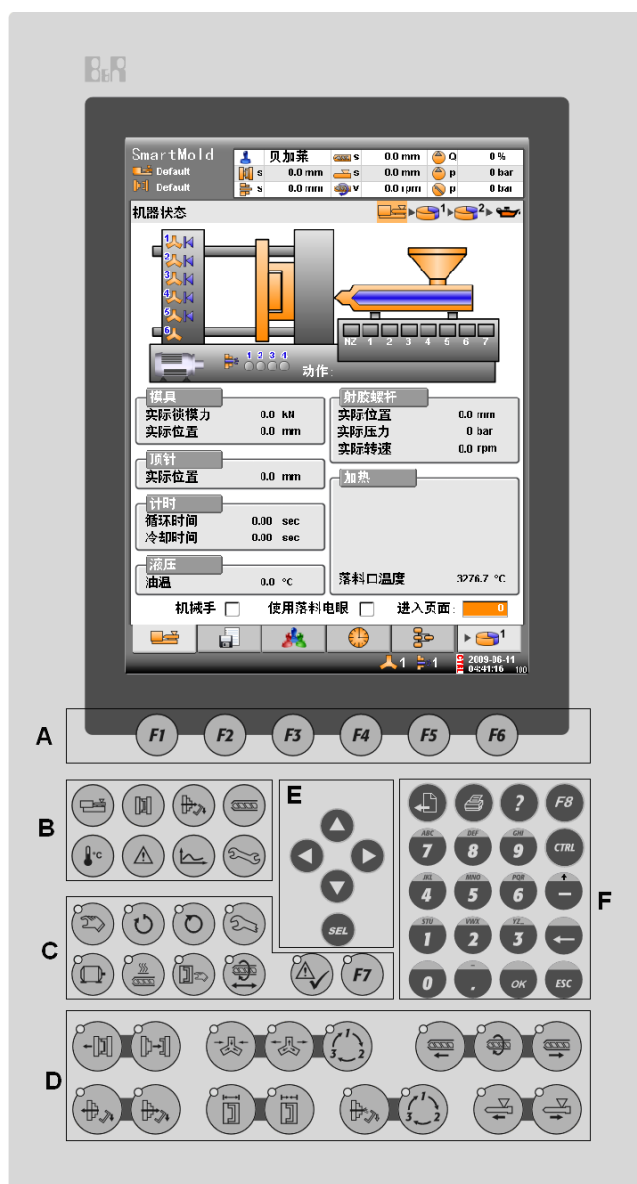


图 2-5 巧塑 88 控制系统显示屏

Fig.2-5 SmartMold Control System Display Screen

A 区为功能按键区，包括 F1-F6 六个按键，主要用于页面的切换及特殊功能键的操作，具体到二级三级页面菜单还会有相应的隐藏的功能。

B 区为画面组切换按键，包括机器总览、合模页面、顶针页面、射胶页面、温度页面、报警页面、曲线跟踪、设置页面，具体标识如表 2-2 所示。

表 2-2 画面组切换按键对应表

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| 机器总览  | 合模页面  | 顶针页面  | 射胶页面  |
|  |  |  |  |
| 温度页面  | 报警页面  | 曲线跟踪  | 设置页面  |

C 区为模式控制按键，包括手动模式、半自动模式、全自动模式、调试模式、电机开关、加热开关、自动调模、自动清料、报警确认、备用按键，具体标识如表 2-3 所示。

















表 2-3 模式控制按键对应表

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| 手动模式  | 半自动模式   | 全自动模式   | 调试模式  |
|  |  |  |  |
| 电机开关  | 加热开关  | 自动调模  | 自动清料  |
|  |  |   |   |
| 报警确认  | 备用按键  |   |   |

D 区为动作控制按键，包括开模、合模、芯进、芯退、被控型芯编号切换、射胶、熔胶、抽胶、顶退、顶进、调模厚、调模薄、吹风、被控吹风编号切换、座进、座退，具体标识如表 2-4 所示。



表 2-4 动作控制按键对应表

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| 开模  | 合模  | 芯进  | 芯退  |
|  |  |  |  |
| 被控型芯编号切换  | 射胶  | 熔胶  | 抽胶  |
|  |  |  |  |
| 顶退  | 顶进  | 调模厚   | 调模薄   |
|  |  |  |  |
| 吹风  | 被控吹风编号切换  | 座进  | 座退  |

E 区为方向按键，包括光标上移、光标下移、光标左移、光标右移、选择键，具体标识如表 2-5 所示。

表 2-5 方向按键对应表

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |
| 光标上移  | 光标下移  | 光标左移  | 光标右移  | 选择键   |

F 区为小键盘区，包括回到上一画面、保存当前屏幕、进入帮助系统、光标顺序移动、abc7、def8、ghi9、F1-F6 功能切换、jkl4、mno5、pqr6、大小写切换、stu1、vwX2、yz\_3、退格键、0、.、确认和取消，具体标识见表 2-6 所示。

表 2-6 动作控制按键对应表

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
|  |  |  |  |
| 回到上一画面  | 保存当前屏幕  | 进入帮助系统  | 光标顺序移动  |
|  |  |  |  |
| abc7  | def8  | ghi9  | F1-F6 功能切换  |
|  |  |  |  |
| jkl4  | mno5  | pqr6  | 大小写切换   |

表 2-6 （ 续 ）

|      |      |      |     |
|------|------|------|-----|
|      |      |      |     |
| stu1 | vwx2 | yz_3 | 退格键 |
|      |      |      |     |
| 0    | .    | 确认   | 取消  |

全局界面主要体现整个工艺动作以及最常用的技术参数，包括用户登录等级、顶针位置、动模位置、螺杆位置、射台位置、射胶压力、报警信息等，具体如图 2-6 所示。

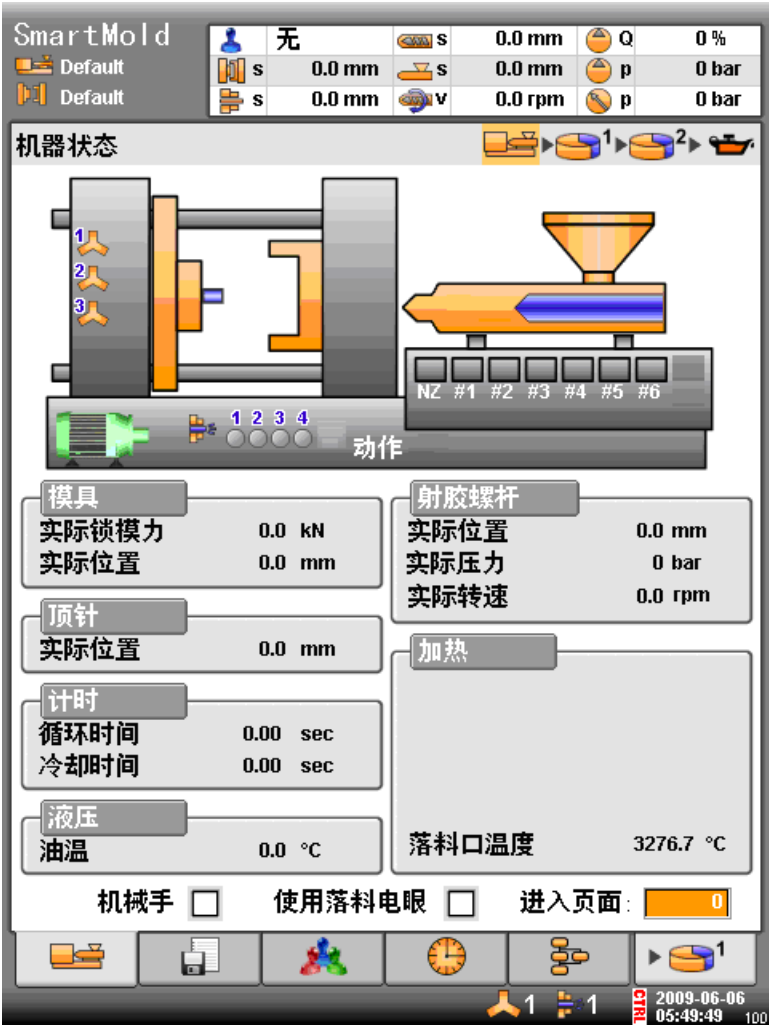


图 2-6 巧塑 88 控制系统主界面

Fig.2-6 SmartMold Control System Main Interface

## 2.5 本章小结

本章主要介绍了注塑机的结构组成以及工作原理，阐述了注塑生产的工作循环工程，描述了注塑工艺过程的非线性、时变性等特点，然后详细分析了整个注塑过程的控制参数，包括温度、压力、时间，分析了整个过程中制品质量的控制难点，最后介绍了本文所用的注塑机的控制系统平台，列举了硬件配置及软件控制部分的操作，为之后的控制方案奠定了比较好的基础。

## 第三章 保压过程的非线性系统模型分析

### 3.1 非线性系统模型

非线性系统，它满足其输出与其输入不成线性关系的特性。非线性系统的特征是叠加原理不再生效，因为它的方程本身是非线性的或者方程虽然是线性的，但是其方程的边界是运动的或者未知的。在非线性的系统中，各种因素的独立性消失，各部分相互影响，导致偏差和耦合，也就是说，整体不等于各部分之和，并且两个解的总和不再是原方程的解。当系统输出的每个阶的倒数等于零同时没有外部作用时，系统处于平衡状态，但是非线性系统可能存在多个平衡状态，这就需要我们找到并分析它的稳定平衡状态。

对保压过程的非线性系统进行建模分析，一方面有助于了解对象的特性，同时可以对注塑机高精度保压压力这个难点控制指标建立仿真系统；另一方面，可以为后续归纳总结模糊规则提供经验，作为提炼规则的主要依据。

#### 3.1.1 基于仿射非线性的控制描述

根据对注塑机保压控制系统的综合观察，本文采用仿射非线性模型作为注塑机高精度保压控制系统的抽象描述。仿射非线性系统是非线性控制系统中研究比较充分的一个领域，仿射非线性模型也是一种广泛用于描述动态系统非线性特征的有效方法。论文后面的仿真及实验测试结果也验证了本文选择仿射非线性模型的合理性与有效性。

设一个仿射非线性系统的状态方程由以下的方式表示：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.1)$$

称为在点 $x^0$ 处有相对阶 $r$ ，其中，式中的 $f(x)$ 和 $g(x)$ 是光滑向量场， $h(x)$ 是定义在 $R^n$ 上的一个光滑函数，若

- i)  $L_g L_f^k h(x) = 0$ ，对 $x^0$ 的一个邻域内的所有 $x$ ，以及所有的 $k < r - 1$ 。
- ii)  $L_g L_f^{r-1} h(x^0) \neq 0$ 。

这里需要注意一点，或许在某些点处定义相对阶是无效的。事实上，当序列

$$L_g h(x), L_g L_f h(x), \dots, L_g L_f^k h(x), \dots \quad (3.2)$$

的第一个函数（在 $x^0$ 的一个邻域内）并不总是等于零，但是在点 $x = x^0$ 处恰好为零时，这种情况将会发生。然而，可以定义相对阶的一个点集显然就是使得系统（式 3.1）有定义的集合  $U$  的一个开的且稠密的子集<sup>[34]</sup>。

静态反馈控制是指在一个  $t$  时刻，外部参考输入的值和同一时刻的状态  $x$  的值作为仅有的两个被控制值依赖的条件的控制。否则，若一组附加的状态变量被该控制使用，即该控制自身的内部状态有一个适当的动态系统输出，这个输出由  $x$  和外部参考输入决定，则称一个动态反馈控制被达到。

在上述系统中，取静态反馈控制的输入变量  $u$  等于

$$u = \alpha(x) + \beta(x)v \quad (3.3)$$

式中， $v$  是外部参考输入（如图 3-1 所示）。其实，此系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$$

的复合将生成一个如下结构的闭环控制系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)\alpha(x) + g(x)\beta(x)v \\ y = h(x) \end{cases} \quad (3.4)$$

式 3.3 中的函数 $\alpha(x)$ 和 $\beta(x)$ 定义在 $R^n$ 这一适当的开集上。

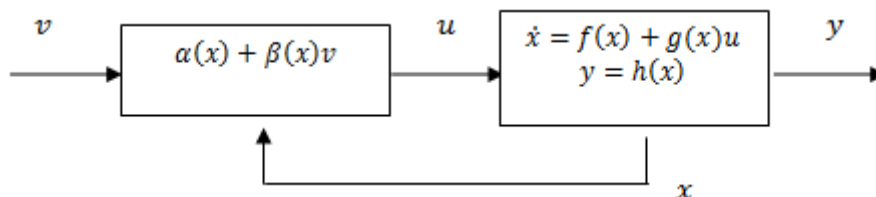


图 3-1 非线性系统简单流程图

Fig.3-1 Nolinear System Simple Flow

### 3.1.2 非线性系统模型的流形分析

为了建立仿真系统，我们对仿射非线性系统进行线性化处理。在非线性系统的线性化过程中，如果不忽略任何高阶非线性项，则该过程是非线性系统的精确化方法。这种线性化不仅精确，而且还涵盖了整个系统，也就是说，它可以在整个系统的定义的区域范围内使用。利用微分几何和微分流形的概念，构造反馈变换和微分同胚变换，实现了非线性系统的精确线性化。它反映了满足局部或全局范围内某些条件的矢量场积分轨迹的线性特征，并通过另一坐标中坐标系的变换来获得。

下面是一些数学知识的定义和定理, 旨在于为后续章节铺平道路。

### (1) 高等微积分中的一些定理知识

假设  $M$  是  $\mathbf{R}^n$  中的一个开的子集, 并将  $f: M \rightarrow \mathbf{R}^n$  定义为在其中一个函数。  $f$  在  $x = (x_1, \dots, x_n)$  的值可表示为  $f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$ 。函数  $f$  是一个  $C^\infty$  类函数 (即  $C^\infty$  是平滑函数), 如果它关于  $x_1, \dots, x_n$  的任意阶偏导数存在且连续, 则称函数  $f$  是可解析的, 如果是且对每个点  $x^0 \in M$ , 存在  $x^0$  的一个邻域  $U$ , 使得  $f$  在点  $x^0$  的泰勒级数展开对所有  $x \in U$  都收敛于  $f(x)$ 。

**定理 3.1:** (秩定理) 设  $A \subset \mathbf{R}^n$  和  $B \subset \mathbf{R}^m$  是开集,  $F: A \rightarrow B$  是一个  $C^\infty$  映射。假设对所有的  $x \in A$ ,  $\left[\frac{\partial F}{\partial x}\right]_x$  有秩  $k$ , 对每个点  $x^0 \in A_0$ , 在  $A$  中存在  $x^0$  的一个邻域  $A_0$ , 且在  $B$  中存在  $F(x^0)$  的一个邻域  $B_0$ , 两个开集  $U \subset \mathbf{R}^n$  和  $V \subset \mathbf{R}^m$ , 以及两个微分同胚  $G: U \rightarrow A_0$  和  $H: B_0 \rightarrow V$ , 使得  $H \circ F \circ G(U) \subset V$ , 以及对所有  $(x_1, \dots, x_n) \in U$ , 使得

$$(H \circ F \circ G)(x_1, \dots, x_n) = (x_1, \dots, x_k, 0, \dots, 0)$$

**定理 3.2:** (隐函数定理) 设  $A \subset \mathbf{R}^n$  和  $B \subset \mathbf{R}^n$  是开集,  $F: A \times B \rightarrow \mathbf{R}^n$  是一个  $C^\infty$  映射,  $(x, y) = (x_1, \dots, x_m, y_1, \dots, y_n)$  表示  $A \times B$  中一个点。假设对某个  $(x^0, y^0) \in A \times B$ ,  $F(x^0), y^0 = 0$ , 且矩阵

$$\frac{\partial F}{\partial y} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial y_n} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

在  $(x^0, y^0)$  是非奇异的情况下, 存在  $A$  中的  $x^0$  的开邻域  $A_0$  和  $B$  中的  $y^0$  的开邻域  $B_0$ , 以及独立且唯一的  $C^\infty$  映射  $G: A_0 \rightarrow B_0$ , 使得  $F(x, G(x)) = 0$  对所有的  $x \in A_0$ 。

**定理 3.3:** (逆函数定理) 设  $A$  是  $\mathbf{R}^n$  的一个  $C^\infty$  开集,  $F: A \rightarrow \mathbf{R}^n$  是一个  $C^\infty$  映射, 若  $\left[\frac{\partial F}{\partial x}\right]_{x^0}$  在某个  $x_0 \in A$  是非奇异的, 那么在  $A$  中存在一个开邻域  $U$ , 使得  $V = F(U)$  在  $\mathbf{R}^n$  中是开的, 并且  $F$  对  $U$  的限制是  $V$  上的一个微分同胚。

### (2) 微分流形

定义: 若一个  $n$  维的局部欧几里得空间  $X$  是一个拓扑空间, 使得对任意的  $p \in X$ , 存在一个同胚映射  $\phi$ , 则映射  $p$  的某个开邻域在  $\mathbf{R}^n$  中的一个开集  $\{M\}$  上,  $(p, h)$  称为一个坐标图,  $(M, h)$  的集合称为  $M$  的一个坐标图册。如果  $M$  的坐标图册中任何两个坐标都是  $N$  相关的 (坐标图册应是极大的, 即若同一坐标图与坐标图册中每一个坐标图都相容则其自身也属于坐标图册), 则  $X$  有  $N$  微分结构, 又称为  $X$  为  $n$  维的  $N$  微分流形。 $n$  维流形  $N$  是一个拓扑空间, 并且这个拓扑空间是  $n$  维局部欧几里得空间, 是 Hausdorff 空间并有的一个可数基。

$N$ 流形常称为光滑流形。若微分流形 $N$ 是一个仿紧或紧致的拓扑空间, 则称 $N$ 为仿紧或紧致微分流形, 如果可选取坐标图册使微分流形 $N$ 中各个坐标邻域之间的坐标变换的雅可比行列式( $n$ 个 $n$ 元函数的偏导数为元素的行列式)都大于零, 则称这个流形是可定向的。

### (3) 弗罗贝尼乌斯(Frobenius)定理

定义在 $\mathbf{R}^n$ 的开集 $U$ 上的非奇异分布 $\Delta$ , 并用 $m$ 表示其维数, 在 $U$ 上的每个点 $x^0$ 的邻域 $U^0$ 内, 存在定义在 $U^0$ 上的 $m$ 个光滑向量场 $f_1, f_2, \dots, f_m$ 线性无关, 它们张成 $\Delta$ , 即在 $U^0$ 中的每个 $x$ 处有

$$\Delta(x) = \text{span}\{f_1(x), \dots, f_m(x)\} \quad (3.6)$$

当且仅当这个集合是对合的, 它是完全可积的。

### (4) 向量场

定义: 设 $N$ 是一个 $n$ 维光滑流形。在 $N$ 上的一个向量场 $f$ 是一个映射,  $f$ 把每个点 $p \in N$ 指定给到在 $T_p N$ 中的一个切向量 $f(p)$ 。向量场 $f$ 是光滑的, 如果对每个 $p \in N$ , 这里存在关于 $p$ 的一个坐标 $(U, \theta)$ 和定义在 $U$ 上的 $n$ 个具有实值且光滑的函数 $f_1, f_2, \dots, f_n$ , 使得对所有 $q \in U$ 有

$$f(q) = \sum_{i=1}^n f_i(q) \left( \frac{\partial}{\partial \theta_i} \right)_q \quad (3.7)$$

因为需要考虑坐标卡之间的 $C^\infty$ 相容性, 给定关于 $p$ 且不同于坐标卡 $(U, \theta)$ 的任意坐标卡 $(V, \varphi)$ , 我们可以找到 $p$ 的一个邻域 $V' \subset V$ 和定义在 $V'$ 上的 $n$ 元实光滑函数 $f'_1, f'_2, \dots, f'_n$ , 使得对所有的 $q \in V'$ , 有

$$f(q) = \sum_{i=1}^n f'_i(q) \left( \frac{\partial}{\partial \varphi_i} \right)_q \quad (3.8)$$

从而, 光滑向量场的概念独立于所使用的坐标。

### (5) 李导数

定义: 设 $k: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ 为一个光滑的具有标量性质的函数,  $f: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ 为 $\mathbf{R}^n$ 上的一个光滑的矢量场, 则 $k$ 对 $f$ 的李导数是一个定义为 $L_f k = \nabla k f$ 的标量函数。李导数实际上就是 $k$ 沿矢量 $f$ 方向导数。并且多重李导数可以递归定义为

$$L_f^0 k = k \quad (3.9)$$

$$L_f^i k = L_f(L_f^{i-1} k) = \nabla(L_f^{i-1} k) f \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.10)$$

若 $g$ 是另一个矢量场, 则标量函数 $L_g L_f k(x)$ 为 $L_g L_f k = \nabla(L_f k) g$ 。

### (6) 李括号

定义: 设 $f$ 与 $g$ 为 $\mathbf{R}^n$ 上的两个矢量场, 而 $f$ 与 $g$ 的李括号是第三个矢量场, 记为 $[f, g] = \nabla g f - \nabla f g$ 。李括号 $[f, g]$ 一般记作 $ad_f g$ , 并且多重李括号可以递归定义

为

$$ad_f^0 g = g \quad (3.11)$$

$$ad_f^i g = [f, ad_f^{i-1} g] \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.12)$$

李括号具有以下性质

i) 雅克比 (Jacobi) 恒等式:

$$L_{ad_f g} h = L_f L_g h - L_g L_f h \quad (3.13)$$

其中,  $h(x)$  是  $x$  的平滑标量函数。

ii) 双线性:

$$[a_1 f_1 + a_2 f_2, g] = a_1 [f_1, g] + a_2 [f_2, g] \quad (3.14)$$

$$[f, a_1 g_1 + a_2 g_2] = a_1 [f, g_1] + a_2 [f, g_2] \quad (3.15)$$

其中,  $f, f_1, g, g_1, g_2$  都是平滑的矢量场, 而  $a_1, a_2$  是常标量。

iii) 斜交换性 (反对称性):

$$[f, g] = -[g, f] \quad (3.16)$$

### (7) 切空间

设  $N$  是一个  $n$  维光滑流形, 函数  $f$  在  $p$  的一个邻域是平滑的, 如果  $f$  的域在包含  $p$  的  $N$  中存在一个开集  $\{M\}$ , 且  $f$  对  $\{M\}$  的限制是一个光滑函数。以  $C^\infty(M)$  表示  $M$  上的所有  $C^\infty$  函数组成的集合,  $C^\infty(p)$  表示在  $x \in \{M\}$  点的所有  $C^\infty$  函数组成的集合, 此时,  $C^\infty(p)$  在域  $\mathbf{R}^n$  上形成一个向量空间。

定义: 在  $p$  处的一个切向量的一个映射  $l: C^\infty(p) \rightarrow \mathbf{R}^n$ , 满足以下性质:

$$i) \quad l(af + bg) = al(f) + bl(g)。$$

$$ii) \quad \forall a, b \in \mathbf{R}^n, f, g \in C^\infty(p)。$$

用  $T_p N$  表示流形  $N$  上的点  $p$  的全体切向量的集合, 在这个集合上通过普遍意义上认知的运算后构成  $\mathbf{R}^n$  上的线性空间, 称为  $p$  点的切空间。

### (8) 状态空间精确线性化可解的充要条件

**定理 3.4:** 假设一系统  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$  被给定, 其中  $f(x)$  和  $g(x)$  为平滑矢量场, 状态空间精确线性化问题在点  $x^0$  附近可解 (即存在一个 “输出” 函数  $\lambda(x)$ , 对该函数, 系统在点  $x^0$  处的相对阶为  $n$ ) 当且仅当满足下列条件:

$$i) \quad \text{矩阵 } (g(x^0) \quad ad_f g(x^0) \cdots ad_f^{n-2} g(x^0) \quad ad_f^{n-1} g(x^0)) \text{ 有秩为 } n。$$

$$ii) \quad \text{分布 } D = \text{span}[g, ad_f g, \cdots, ad_f^{n-2} g] \text{ 在 } x^0 \text{ 附近是对合的。}$$

此处做一个简单的证明:

假设存在一个函数  $\lambda(x)$  满足式  $L_g \lambda(x) = L_{ad_f g} \lambda(x) = \cdots = L_{ad_f^{n-2} g} \lambda(x) = 0$  和式  $L_{ad_f^{n-1} g} \lambda(x^0) \neq 0$ 。再由矩阵



$$\begin{bmatrix} 0 & \cdots & \langle dh(x^0), ad_f^{r-1}g(x^0) \rangle \\ * & \cdots & * \\ \langle dL_f^{r-1}h(x^0), g(x^0) \rangle & * & * \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

的非奇异性, 可以判断  $n$  个向量

$$g(x^0) \quad ad_f g(x^0) \cdots ad_f^{n-2}g(x^0) \quad ad_f^{n-1}g(x^0) \quad (3.18)$$

是线性独立的, 这就证明了上述定理条件 i) 的必要性。如果条件 i) 成立, 则分布  $D$  是非奇异的, 且在  $x^0$  附近的维数是  $n-1$ 。式  $L_g\lambda(x) = L_{ad_f g}\lambda(x) = \cdots = L_{ad_f^{n-2}g}\lambda(x) = 0$  可以改写为

$$d\lambda(x) \begin{pmatrix} g(x) & ad_f g(x) & \cdots & ad_f^{n-2}g(x) \end{pmatrix} = 0 \quad (3.19)$$

由上述被改写的方程可知, 微分  $d\lambda(x)$  在  $x^0$  附近是一维对偶分布  $D^\perp$  的一个基。根据 *Frobenius* 定理可知, 分布  $D$  是对合的, 这就证明了上述定理条件 ii) 的必要性。反之, 假设条件 i) 成立, 则分布  $D$  是非奇异的, 且在  $x^0$  附近的维数为  $n-1$ ; 如果条件 ii) 成立, 根据 *Feobenius* 可知, 存在一个定义在  $x^0$  一邻域  $U$  内的实值函数  $\lambda(x)$ , 它的微分  $d\lambda(x)$  张成  $D^\perp$ , 即可解上述被改写的偏微分方程, 根据假设,  $d\lambda(x)$  还满足式  $L_{ad_f^{n-1}g}\lambda(x^0) \neq 0$ , 因为这与  $d\lambda(x)$  被一组  $n$  个线性独立的向量所零化相矛盾。条件 i) 为  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$  的能控性条件, 矩阵有秩为  $n$  表示它是线性独立的, 这相当于我们所熟悉的线性可控矩阵的可逆性。

## 3.2 非线性系统模型在保压过程中的应用

注塑机的整个工作过程尤其是保压过程, 体现了非线性、时变性、耦合性、多变量等特性, 符合上文描述的非线性系统的性质, 即高精度的保压控制系统本质上是一个非线性系统的控制问题, 为了分析保压过程的特性, 为后续提炼模糊规则, 所以需要建立保压过程的非线性系统模型, 通过上文的方法做线性化处理, 达到一个比较稳定的平衡状态后再进行进一步地分析处理。

### 3.2.1 模型建立

文中所提到的电液混合注塑机的注射系统的传动机构是采用伺服电机, 其机械传动结构如图 3-2 所示。

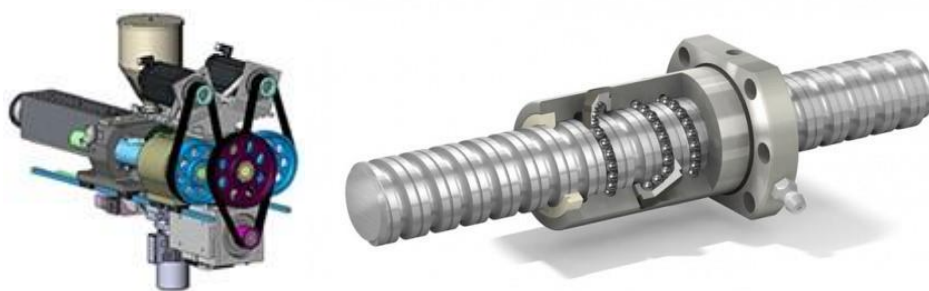


图 3-2 注射单元执行机构

Fig.3-2 Injection Unit Execute Organization

由图 3-2 我们可以看出，伺服电机通过同步带控制同步齿轮运行，在同步齿轮的另一端，由于伺服电机减速后，可以控制滚珠丝杠的前后移动，这样就把电机的旋转运动转化为射胶的直线运动，因此控制射胶运动的过程等价于控制伺服电机点对点运动的过程，而控制保压段的过程就是控制伺服电机扭矩输出的过程，若我们找到电机扭矩在整个非线性系统中的渐近稳定平衡点，即可通过控制扭矩对保压过程进行稳定控制。

如图 3-3 所示，是一个简化的伺服电机示意图，模型将围绕它进行建立，其中，转子（Rotor）电压恒定，选用定子（Stator）电压作为一个控制变量，在工程上的直流电机中，通常把励磁电压称为定子电压，电枢电压成为转子电压。

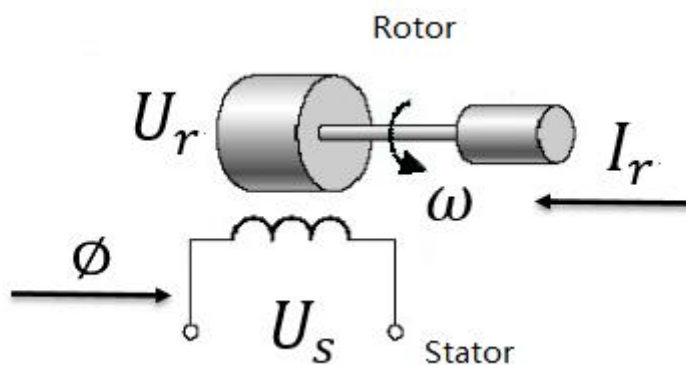


图 3-3 伺服电机示意图

Fig.3-3 Servo Motor Schematic Diagram

上面描述的系统可以通过一组三个一阶微分方程表示（式 3.20、式 3.21、式 3.22）。式 3.20 是描述在定子绕组中的电压平衡。

$$R_s I_s + L_s \frac{dI_s}{dt} = U_s \quad (3.20)$$

式中,  $I_s$  代表定子电流,  $R_s$  代表定子绕组的电阻,  $L_s$  代表定子绕组的电感,  $U_s$  代表定子电压。式 3.21 是描述在转子绕组中的电压平衡。

$$R_r I_r + L_r \frac{dI_r}{dt} = U_r - E \quad (3.21)$$

式中,  $I_r$  代表转子电流,  $R_r$  代表转子绕组的电阻,  $L_r$  代表转子绕组的电感,  $U_r$  代表转子电压 (通过上述的假设, 此值是不变的),  $E$  表示反电动势。简单介绍一下反电动势, 直流电机在刚开始启动的时候, 励磁绕组会建立一个磁场, 电枢电流产生另一个磁场, 通过这两个磁场的相互作用, 电动机开始运行, 电枢绕组产生发电效应, 是因为它在磁场中的旋转运动。而事实上, 旋转电枢会产生一个与电枢电压极性相悖的感应电动势, 这个电动势就是我们说的反电动势。

式 3.22 是描述负载的机械平衡, 假设只有粘滞摩擦力的情况下 (即摩擦扭矩仅与转子角速度有关)。

$$F\omega + J \frac{d\omega}{dt} = T \quad (3.22)$$

式中,  $F$  代表粘滞摩擦系数,  $\omega$  代表电机的角速度,  $J$  代表电机所带负载的转动惯量,  $T$  代表电机扭矩。上述三式可以进行耦合所用, 并由关系式描述:

$$\begin{cases} \phi = L_s I_s \\ E = k\phi\omega \\ T = k\phi I_r \end{cases} \quad (3.23)$$

式 3.23 中,  $\phi$  表示与定子绕组相关的磁通量,  $k$  表示常数, 假设能量转换效率是 100%, 反电动势与扭矩的常数取同一数值。

状态变量选择如下式子:

$$\begin{cases} x_1 = \omega \\ x_2 = I_s \\ x_3 = I_r \end{cases} \quad (3.24)$$

选用定子电压  $U_s$  作为输入变量, 代入式 3.1  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$ , 其中,

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{-F}{J}x_1 + \frac{kL_s}{J}x_2x_3 \\ -\frac{R_s}{L_s}x_2 \\ -\frac{R_r}{L_r}x_3 + \frac{U_r}{L_r} - \frac{kL_s}{L_r}x_1x_2 \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

下面对系统进行验证定理 3.4 的两个条件, 这是因为若此系统想实现精确线性化且通过状态反馈和坐标变换的方法。若

$$[f, g](x) = \begin{bmatrix} \frac{-k}{J} x_2 \\ \frac{R_s}{L_s^2} \\ \frac{k}{L_r} x_3 \end{bmatrix} [g, [f, g]](x) = \frac{\partial [f, g]}{\partial x_1} \frac{1}{L_s} = 0 \quad (3.26)$$

分布

$$D = \text{span}[g, [f, g]] \quad (3.27)$$

每一个点在以下的稠密集上有维数 2:

$$U = \{x \in \mathbf{R}^3: x_2 \neq 0 | x_3 \neq 0\} \quad (3.28)$$

所以在  $U$  上是对合的, 进而可以得出在  $U$  的任意点附近, 定理的条件 ii 也满足。为了将该系统转化为线性可控的系统, 列出了偏微分方程

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} (g(x) \quad [f, g](x)) = 0 \quad (3.29)$$

即

$$\left( \frac{\partial \lambda}{\partial x_1} \quad \frac{\partial \lambda}{\partial x_2} \quad \frac{\partial \lambda}{\partial x_3} \right) \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & \frac{-k}{J} x_2 \\ 0 & \frac{R_s}{L_s^2} \\ 0 & \frac{k}{L_r} x_3 \end{bmatrix} = (0 \quad 0) \quad (3.30)$$

可以得到一个解为

$$\lambda(x) = J x_1^2 + L_r x_3^2 \quad (3.31)$$

根据线性化反馈公式

$$\alpha(x) = \frac{-L_f^n \lambda(x)}{L_g L_f^{n-1} \lambda(x)}, \beta(x) = \frac{1}{L_g L_f^{n-1} \lambda(x)} \quad (3.32)$$

和线性化坐标公式

$$\delta(x) = \text{col}(\lambda(x), L_f \lambda(x), \dots, L_f^{n-1} \lambda(x)) \quad (3.33)$$

可将此系统的状态方程变换成线性形式, 此处不做具体的代入计算。

下面讨论系统的零输出问题, 即系统的零动态。首先定义一个输出映射  $h(x)$ , 在这个系统中, 电机轴的角速度也就是自然的输出变量, 因为我们在建模的时候, 是保持转子电压  $U_r$  不变, 以定子电压  $U_s$  作为输入, 比较适合在一个额定非零值的附近控制角速度, 所以, 取

$$y = h(x) = \omega - \omega_0 = x_1 - \omega_0 \quad (3.34)$$

作为系统的输出, 即电机角速度  $\omega$  与一个恒定参考值  $\omega_0$  之间的偏移量。对于这个系统, 零化输出对应我们寻求的所有初始状态和输入, 而这些初始状态和输入产生恒等于  $\omega_0$  的角速度。所以有

$$L_g h(x) = 0, L_g L_f h(x) = \frac{k}{J} x_3 \quad (3.35)$$

由式 3.35 我们可以看出, 在使得  $x_3 \neq 0$  的每一个点, 此系统的相对阶均为 2, 有零输出意味着有存在于集合

$$\mathbf{Z}^* = \{x \in \mathbf{R}^3: h(x) = L_f h(x) = 0\} \quad (3.36)$$

中的状态, 即存在流形 (如图 3-4 所示)

$$\mathbf{Z}^* = \left\{x \in \mathbf{R}^3: x_1 = \omega_0, x_2 x_3 = \frac{F \omega_0}{k L_s}\right\} \quad (3.37)$$

借助输入

$$u^*(x) = \frac{-L_f^3 h(x)}{L_g L_f h(x)} \quad (3.38)$$

可以达到零输出的目的。

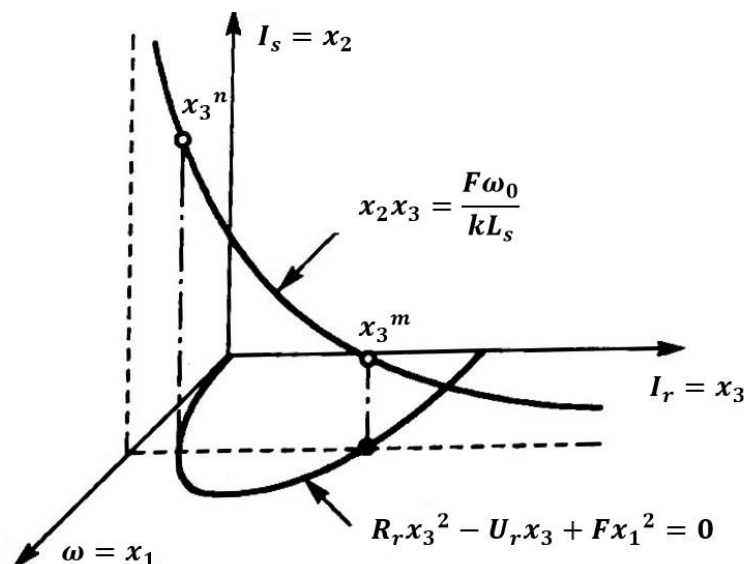


图 3-4 系统流形示意图

Fig.3-4 System Manifold Schematic Diagram

当设置输入为  $u^*(x)$  且在流形  $\mathbf{Z}^*$  上选择初始条件时, 系统的零动态描述了这个系统的内部行为, 此系统的约束条件为

$$x_1 = \omega_0, x_2 = \frac{F \omega}{k L_s x_3} \quad (3.39)$$

利用这两个约束条件定义流形  $\mathbf{Z}^*$ , 施加这些约束条件, 可以得到

$$\dot{x}_3 = -\frac{R_r}{L_r} x_3 - \frac{F \omega_0^2}{L_r x_3} + \frac{U_r}{L_r} \quad (3.40)$$

根据上述解微分方程, 可以得出它描述了在定义零动态的流形  $\mathbf{Z}^*$  上, 系统的运动在  $x_3$  轴上的投影, 此时,  $x_3 = 0$  是式 3.40 的右侧的一个奇异点。

假设  $x_3 > 0$ , 描述这个零动态的微分方程有两个平衡点, 是下面二次方程的根:

$$R_r x_3 - U_r x_3 + F \omega_0^2 = 0 \quad (3.41)$$

这两个根在所在平面上形成一个椭圆, 根据椭圆的特性可以得出:

当

$$4R_r F \omega_0^2 \leq U_r^2 \quad (3.42)$$

时的角速度我们需要的, 且如果满足式 3.42 时, 从两个不同的转子电流值可以得到同一个角速度  $\omega_0$ , 在流形  $\mathbf{Z}^*$  上, 可以找到这个零动态的两个平衡点:

$$x_3^m = \frac{U_r + \sqrt{U_r^2 - 4R_r F \omega_0^2}}{2R_r}, \quad x_3^n = \frac{U_r - \sqrt{U_r^2 - 4R_r F \omega_0^2}}{2R_r} \quad (3.43)$$

为了确定系统的平衡点, 需要定义系统零动态的微分方程右侧的符号, 对于  $0 < x_3 < x_3^n$  为负值, 对于  $x_3^n < x_3 < x_3^m$  为正值, 对于  $x_3^m < x_3 < \infty$  也为负值。综上可得: 点  $x_3^m$  是系统零动态的一个渐近的稳定平衡点, 而  $x_3^n$  是系统零动态的一个不稳定的平衡点。

文中所用注塑机的电机功率  $P_0$  是确定的, 根据电机功率、扭矩、速度的关系式  
可以进行推导:

$$P_0 = \frac{W}{t} = \frac{F \times s}{t} = F \times v \quad (3.44)$$

$P$  表示电机功率,  $F$  表示电机内部的力,  $r$  表示电机的线速度。

$$v = \omega \times r \quad (3.45)$$

$v$  表示电机的线速度,  $\omega$  表示电机轴的角速度,  $r$  表示电机轴的半径, 式 3.45 代入式 3.44 可得

$$P_0 = F \times \omega \times r \quad (3.46)$$

$T$  表示电机的扭矩。

$$T = F \times r \quad (3.47)$$

将式 3.47 代入 3.46 可得

$$T = \frac{P_0}{\omega} \quad (3.48)$$

通过推导出的式 3.48 可知: 在电机功率不变的情况下, 电机扭矩越大, 电机转速越低; 电机扭矩越小, 电机转速越高。根据上文的描述, 我们已经寻找到系统角速度的渐近稳定平衡点, 因而也是系统扭矩的渐近稳定平衡点, 这就意味着通过控制伺服电机扭矩在渐近稳定平衡点附近, 此系统可保持线性稳定。下面将根据注塑机的保压实际过程, 针对伺服电机的转速进行分析处理。

### 3.2.2 注塑保压过程的应用

贝加莱<sup>[33]</sup>注塑机保压控制模型如图 3-5 所示:

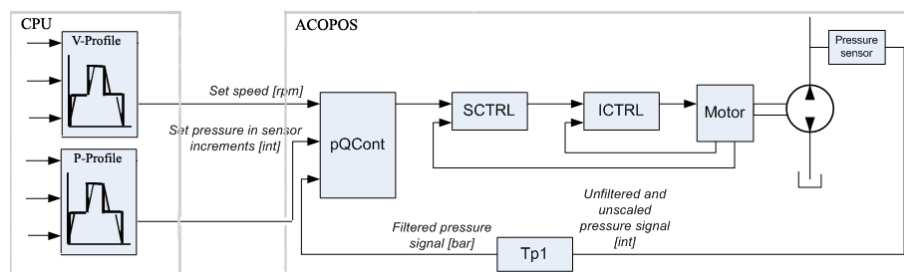


图 3-5 保压控制模型图

Fig.3-5 Packing Pressure Control Model

其中, V-Profile 为速度规划函数, P-Profile 为压力曲线规划函数, pQCont 为压力控制函数, SCTRL 为速度控制函数, ICTRL 为电流控制函数, Tp1 为对实际压力采样信号进行的一阶惯性滤波函数。

注塑机保压控制阶段前段为射胶阶段，控制系统根据射胶的设定参数如图 3-6 所示，计算出速度规划曲线和压力规划曲线；当射胶的目标位置和目标速度被设定后，上位 CPU 通过 POWERLINK<sup>[35]</sup>总线将速度曲线下载到伺服驱动器，伺服驱动器根据该路径规划控制伺服电机运行。



图 3-6 射胶保压参数配置图

Fig.3-6 Inject and Packing Pressure Parameter Configuration

当射胶过程结束进入保压过程时，即当保压切换条件被触发（本文选用时间切换，已在图 3-5 中勾选），压力曲线依旧通过压力规划函数计算，由保压切换条件相对于位置来规划路径的曲线来说具有不确定性，所以，伺服驱动执行由压力控制器输出的设定速度，此时，压力控制器与速度控制器同时工作，上位 CPU 将保压压力设定曲线通过 POWERLINK 曲线下载给伺服驱动器，压力控制器根据该

设定，控制伺服电机设定速度输出，速度控制器接收该设定速度控制伺服电机运行。

根据伺服电机的控制特点，电流控制函数通常由伺服驱动器内部进行完成，因此，速度控制函数便成为整个保压控制阶段最后的执行单元，并且，通过上一节我们已经验证了此系统可以找到伺服电机扭矩的渐近稳定平衡点。在保压过程中，电机需要频繁的增压泄压，为了取得更好的效果，我们使用 S 型加减速的控制方式去达到系统的平衡点。

S 型加减速控制方式通过控制伺服电机启停时的加减速变化率 *Jerk* 和速度突变来控制加速度的变化，以保证速度变化时电机速度的平稳过渡和保持压力的稳定变化。S 型加减速曲线是指控制加减速时，通过对 *Jerk* 的控制尽量减小对电机造成的突变冲击。

曲线分为七个阶段：加加速段  $t_1$ 、匀加速段  $t_2$ 、减加速段  $t_3$ 、匀速段  $t_4$ 、加减速段  $t_5$ 、匀减速段  $t_6$ 、建减速段  $t_7$ 。

其基本的路径规划如图 3-7 所示，本文仅采用较为基本和常用的规划方法，对于不同的工艺流程，将会有复杂的规划方法。

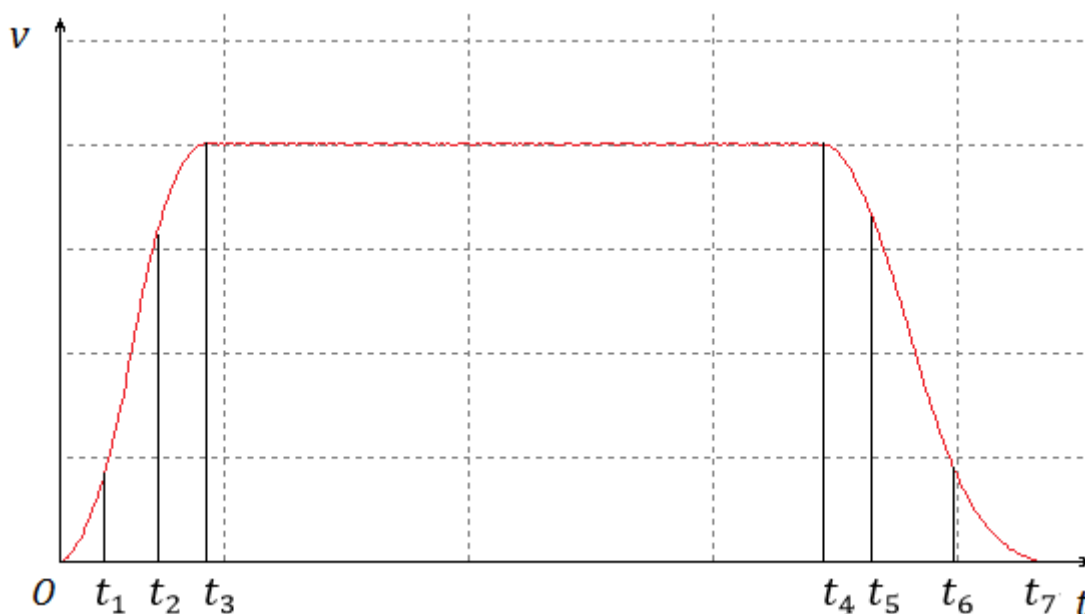


图 3-7 S 型速度曲线规划图

Fig.3-7 S-Shaped Velocity Curve

在此路径规划中，设初始运动速度为 0，加速度的变化率为  $J$ ，加加速段与减减速段时间为  $T_1$ ，匀加速段与匀减速段时间为  $T_2$ ，匀速段时间为  $T_3$ ，加减速段



与减减速段时间为 $T_4$ 。

加速度变化率、加速度、速度、位移之间的关系如式 3.49 所示：

$$\begin{aligned} a &= \int_0^t v dt = Jt \\ v &= \int_0^t Jt dt = \frac{1}{2}Jt^2 \\ s &= \int_0^t vt dt = \frac{1}{6}Jt^3 \end{aligned} \quad (3.49)$$

根据式 3.49 可以推导得出，加速度公式如式 3.50：

$$a(t) = \begin{cases} Jt & t \in [0, t_1) \\ JT_1 & t \in [t_1, t_2) \\ JT_1 - J(t - T_1 - T_2) & t \in [t_2, t_3) \\ 0 & t \in [t_3, t_4) \\ -J[t - (2T_1 + T_2 + T_3)] & t \in [t_4, t_5) \\ -JT_2 & t \in [t_5, t_6) \\ -JT_4 + J[t - (2T_1 + 2T_2 + T_3 + T_4)] & t \in [t_6, t_7] \end{cases} \quad (3.50)$$

速度公式如式 3.51：

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}Jt^2 & t \in [0, t_1) \\ \frac{1}{2}JT_1^2 + JT_1t & t \in [t_1, t_2) \\ JT_1^2 - \frac{1}{2}J[t - (T_1 + T_2)]^2 & t \in [t_2, t_3) \\ JT_1^2 + JT_1T_2 & t \in [t_3, t_4) \\ -\frac{1}{2}J[t - (2T_1 + T_2 + T_3)]^2 & t \in [t_4, t_5) \\ -\frac{1}{2}JT_4^2 + JT_4t & t \in [t_5, t_6) \\ J(T_1^2 - T_4^2) + \frac{1}{2}J[t - (2T_1 + 2T_2 + T_3 + 2T_4)]^2 + JT_1T_2 - JT_4T_2 & t \in [t_6, t_7] \end{cases} \quad (3.51)$$

位移公式如式 3.52：

$$s(t) = \begin{cases} \frac{1}{6}Jt^3 & t \in [0, t_1) \\ \frac{1}{2}JT_1^2T_2 + \frac{1}{2}JT_1T_2^2 & t \in [t_1, t_2) \\ JT_1^2t - \frac{1}{6}J[t - (2T_1 + T_2)]^3 - \frac{1}{2}J(T_1^2T_2 + T_1T_2^2) & t \in [t_2, t_3) \\ (JT_1^2 + JT_1T_2)t & t \in [t_3, t_4) \\ JT_1^2t - \frac{1}{6}J[t - (2T_1 + T_2 + T_3)]^3 - \frac{1}{2}J(T_1^2T_2 + T_1T_2^2) & t \in [t_4, t_5) \\ -\frac{1}{2}JT_4^2T_2 - JT_4T_2^2 + JT_2^3 - \frac{1}{2}J(T_1^2T_2 + T_1T_2^2) & t \in [t_5, t_6) \\ J(T_1^2 - T_4^2)t + \frac{1}{6}J[t - (2T_1 + 2T_2 + T_3 + 2T_4)]^3 + \\ JT_4^2(2T_1 + 2T_2 + T_3 + T_4) - \frac{1}{2}J(T_1^2T_2 + T_1T_2^2) & t \in [t_6, t_7] \end{cases} \quad (3.52)$$

根据该规划函数，便可对注射过程中的运动曲线进行路径规划，在保压过程

的执行环节，如果检测到速度突变，便可以通过 *Jerk* 参数来对其进行限制。

通过对图 3-5 的 pQCont 函数进行划分，并通过 C 语言进行具体的实现，具体可分为 PressureController、SwitchSelector、RateLimiter、PressureComparator 四个执行对象，流程示意图如图 3-8 所示：

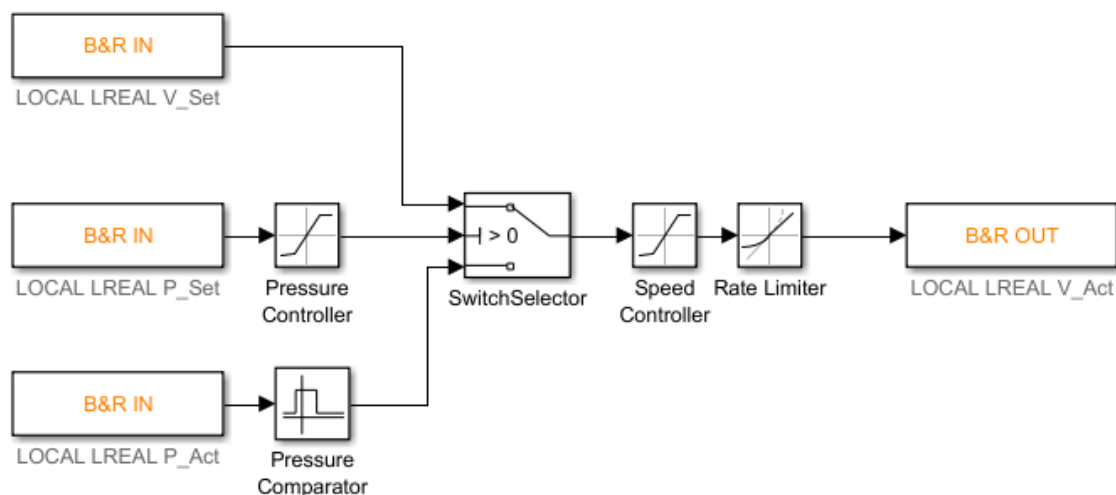


图 3-8 保压控制模型流程图

Fig.3-8 Packing Pressure Control Flow Model

其中，PressureComparator 为压力比较器，用来检测操作中的异常压力，当压力传感器采样的实际压力出现异常时，不管设备处于什么阶段，立即停止注射动作；SwitchSelector 为保压切换条件检测，用于判断设定的保压条件是否达到；射胶阶段只执行速度控制器 SpeedController，当切换到保压阶段，此时先执行压力控制器 PressureController，由 PressureController 输出设定速度给到 SpeedController，然后由 SpeedController 控制伺服电机运行；RateLimiter 是加速度变化率 *Jerk* 的作用，SpeedController 的输出都需要先和 *Jerk* 进行比较，如果超出范围，驱动器会按着上述的限定对其进行限制输出。PressureController、SpeedController 组成的 PID 控制器其表达式如式 3.53 所示：

$$F(t) = F_{init} + K_p * \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \, dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (3.53)$$

$F_{init}$  为回路输出的前馈值， $F(t)$  为时间函数的回路输出， $K_p$  为比例系数， $e$  为系统给定与输出量之间的偏差， $T_i$  为积分时间常数， $T_d$  为微分时间常数。

将上述所有对象写成 C 语言程序，然后封装成函数库 pQCont，在主程序中调用，然后编译并下载到贝加莱控制系统 CPU 中。

### 3.2.3 保压过程中的滤波处理

通过上节我们可以看出根据仿射非线性系统建立起来的保压过程模型在仿真平台上是可行的，在模型中，保压实际压力的反馈单元采用模拟量的方式采集。在实验室或者干扰较为少的环境下，我们采集到的实际压力信号或许还较为清晰，可是在实际生产过程中，设备现场的环境会比较恶劣，干扰也会存在不确定性，所以在这里我们可以对采集到的压力信号做滤波算法处理，来减少干扰对其造成的不准确影响。

下面对几种常见的滤波方法进行介绍：

(1) 滑动均值滤波：对前一段时间内的数据进行多次采样然后取平均值，作为当前时刻数据的一种滤波方法。使用这种方法，首先需要确定一个 Base，即多长时间的数据，或者多少个点，取平均值。计算公式如式 3.54 所示：

$$y_0 = \frac{1}{n}(x_0 + x_1 + \cdots + x_{n-1}) \quad (3.54)$$

其中  $n$  为滤波基数， $y$  为滤波值， $x$  为未处理的采样值，下标 0 表示当前时刻，下标  $1 \cdots n-1$  表示前  $n-1$  个时刻。

使用该方法很重要的一个点就是选取一个合适的 Base 值，如果 Base 值过大，则滤波会造成比较大的信号滞后；如果 Base 值过小，则不能达到一个好的滤波效果。对于周期重复性的干扰，滑动均值滤波因为具有很高的平滑度，所以可以起到很好的抑制作用，比较适合在高频振荡的系统中使用，但是它由于灵敏度低，对于一些出现频率不高的脉冲性干扰就起不到抑制作用，不容易消除这样的干扰带来的采样值偏差。

(2) 程序判断滤波：根据编程经验，确定（设置为）两个最大允许采样偏差值（设为  $A$ ），并将新数值与每次的偏差进行对比。如果此次时间的数值与上次的数值之间的偏差  $A$ ，则本次数值有效；如果此次时间的数值与上次的数值之间的偏差  $A$ ，则需要放弃此值并用上次值代替本次值。示例代码如图 3-9 所示：

```

1  /*****
2  /* Description: Limit Filtering Method
3  /* Author: Suiph
4  /* Date: 2018.1.30
5  /*****
6  /*一阶滞后滤波*/
7  void AveDatFilter(AveDat_typ *pFilter)
8  {
9      /*内部变量定义及初始化*/
10     unsigned char j,i = 0;
11     int tempt;
12     pFilter->sum = 0;
13     if (pFilter->number < 1) pFilter->number = 1;
14     if (pFilter->removeNumber <= 0) pFilter->removeNumber = 0;
15     if(pFilter->enable)
16     {
17         /*pFilter->count ++;*/
18         for(i=pFilter->number-1; i>0; i--)
19         {
20             pFilter->receive[i] = pFilter->receive[i-1];
21             pFilter->array[i] = pFilter->receive[i];
22         }
23         pFilter->receive[0] = pFilter->current;
24         pFilter->array[0] = pFilter->receive[0];
25         for(i=0; i<pFilter->number-1; i++)
26         {
27             for(j=0; j<(pFilter->number-i-1); j++)
28             {
29                 if(pFilter->array[j] > pFilter->array[j+1])
30                 {
31                     tempt = pFilter->array[j];
32                     pFilter->array[j] = pFilter->array[j+1];
33                     pFilter->array[j+1] = tempt;
34                 }
35             }
36         }
37     }
38 }

```

图 3-9 程序判断滤波程序

Fig.3-9 Limit Filtering Procedure

该方法能有效克服一些出现频率不高的脉冲性干扰，但是因为平滑度差，所以没有很好的办法去抑制周期性的干扰。

(3) 一阶滞后滤波：取 $a = 0 \sim 1$ ，本次滤波结果 $= (1 - a) * \text{本次采样值} + a * \text{上次滤波结果}$ 。示例代码如图 3-10 所示：

```

1  /******
2  /* Description: One Order Lag Filtering Method
3  /* Author:Suiph
4  /* Date:2018.1.30
5  /******
6  /*一阶滞后滤波*/
7  void FirstOrderLag(FirstOrderLag_typ *pFWave) /* Y(n)=(1-c0)X(n)+c0Y(n-1) */
8  {
9      int d0;
10
11      if(1 == pFWave->Enable && 0 == pFWave->OldEnable)
12      {
13          pFWave->filter = pFWave->current << 10;
14      }
15
16      pFWave->OldEnable = pFWave->Enable;
17
18      if(1 == pFWave->Enable)
19      {
20          d0 = pFWave->filter + (pFWave->current - (pFWave->filter >> 10)) * (1024 - pFWave->c0);
21          pFWave->filter = d0;
22          pFWave->out = d0 >> 10;
23      }
24      else
25      {
26          pFWave->out = pFWave->current;
27      }
28 }

```

图 3-10 一阶滞后滤波程序

Fig.3-10 One Order Lag Filtering Procedure

该方法可以对周期重复性的干扰起到很好的抑制作用，比较适合在波动频率较高的场合中使用，但是由于其相位滞后且灵敏度低，所以不能消除滤波频率高于采样频率一半的信号。

(4) 中值滤波：连续采样  $N$  ( $N$  取奇数)，把  $N$  次采样值按大小排列，取中间值为本次有效值。示例代码如图 3-11 所示：

```

1  /******
2  /* Description: Median Filtering Method
3  /* Author:Suiph
4  /* Date:2018.1.30
5  /******
6  /*中值滤波*/
7  void AveDatFilter(AveDat_typ *pFilter)
8  {
9      /*内部变量定义及初始化*/
10     unsigned char j,i = 0;
11     int tempt;
12     pFilter->sum = 0;
13     if (pFilter->number < 1) pFilter->number = 1;
14     if (pFilter->removeNumber <= 0) pFilter->removeNumber = 0;
15
16     if(pFilter->enable)
17     {
18         for(i=pFilter->number-1; i>0; i--)
19         {
20             pFilter->receive[i] = pFilter->receive[i-1];
21             pFilter->array[i] = pFilter->receive[i];
22         }
23         pFilter->receive[0] = pFilter->current;
24         pFilter->array[0] = pFilter->receive[0];
25         for(i=0; i<pFilter->number-1; i++)
26         {
27             for(j=0; j<(pFilter->number-i-1); j++)
28             {
29                 if(pFilter->array[j] > pFilter->array[j+1])
30                 {
31                     tempt = pFilter->array[j];
32                     pFilter->array[j] = pFilter->array[j+1];
33                     pFilter->array[j+1] = tempt;
34                 }
35             }
36         }
37         /*去掉最大的和最小的各几个*/
38         for(i=pFilter->removeNumber; i<(pFilter->number - pFilter->removeNumber); i++)
39             pFilter->sum = pFilter->sum + pFilter->array[i];
40         pFilter->out = pFilter->sum/(pFilter->number - pFilter->removeNumber*2);
41     }
42 }

```

图 3-11 中值滤波程序

Fig.3-11 Median Filtering Procedure

该方法可以解决由于偶然因素产生的干扰,对一些变化缓慢的参数,如温度、液位等,有很好的效果,但是对快速变化的参数,如速度、流量等,并不能起到很好的效果。

根据上述介绍的几种常见的滤波方法,本文的模型选用滑动均值滤波较为合适,将输入信号变得更为平滑。下面是一个测试的运动控制例子,对运动轨迹进行整形处理,消除振荡现象。

设存在一个运动控制系统,给系统设定一个往复运动轨迹,由于对象阻尼比较低,在加减速时就会出现微小的振动现象,对象运动的实际速度如图 3-12 所示:

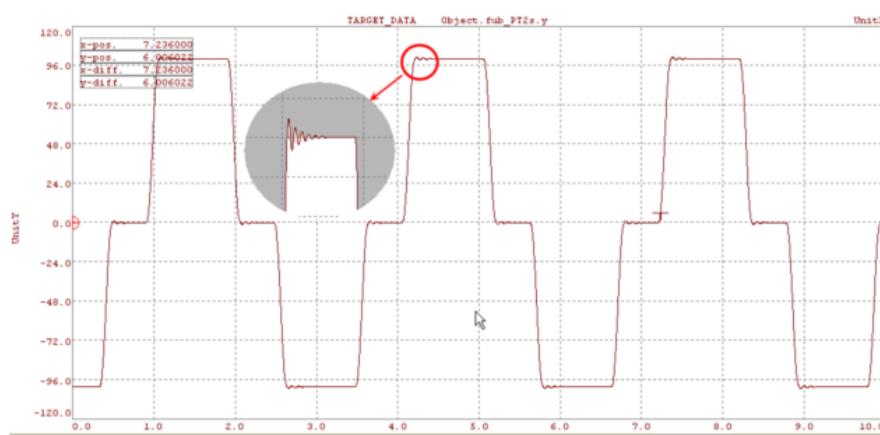


图 3-12 运动控制对象实际速度曲线 (使用滤波算法前)

Fig.3-12 Motion Control Object Actual Speed Curve( Before Filtering algorithm)

为了消除图 3-12 所标记的振荡,我们对系统使用滑动均值滤波算法,使用后对象的实际速度如图 3-13 所示:

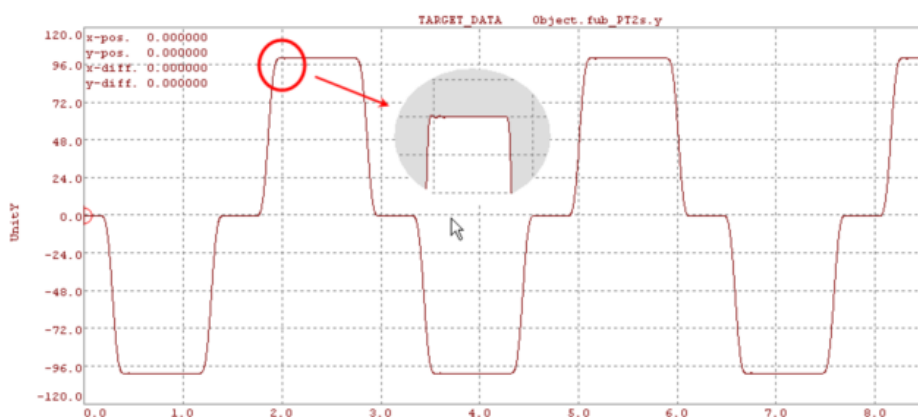


图 3-13 运动控制对象实际速度曲线 (使用滤波算法后)

Fig.3-13 Motion Control Object Actual Speed Curve( After Filtering algorithm)

可以看出使用滤波算法后，曲线更为平滑，效果比较显著。

这里再介绍一下滑动均值滤波 Base 参数选取的问题。Base 的取值和需要消除的振荡频率有关。滑动均值滤波的传递函数如式 3.55 所示：

$$G(z) = \frac{1}{base} \frac{z^{base}-1}{z^{base}-z^{base-1}} \quad (3.55)$$

式 3.55 是离散传递函数，设离散时间为 1ms，在 Base=50 的情况下，其 Bode 图如图 3-14 所示：

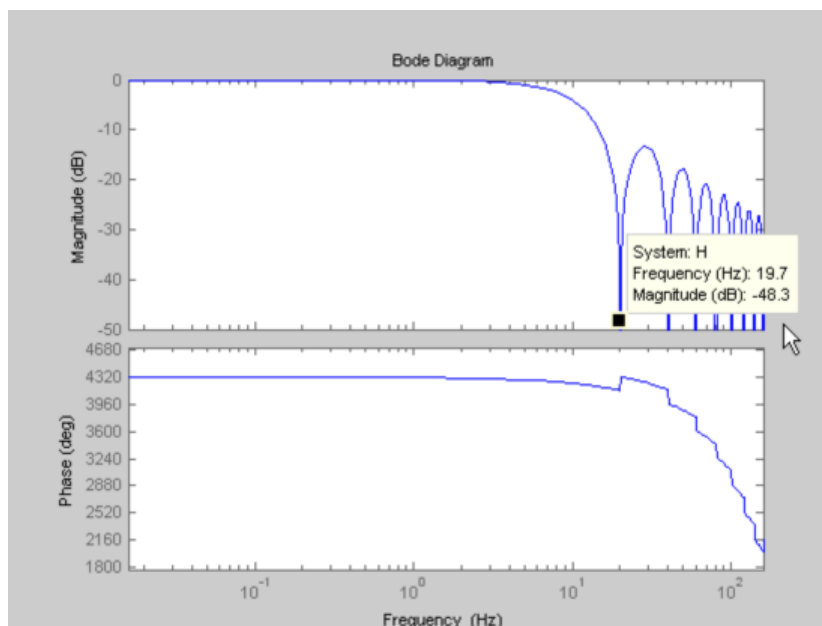


图 3-14 滑动均值滤波传递函数伯德图

Fig.3-14 Sliding Mean Filtering Transfer Function Bode View

由图 3-14 我们可以得到截止频率为 20Hz，正好是 Base 的倒数。所以，我们可以得出 Base 取值的方法：设获取想要消除的振荡频率为  $f(\text{Hz})$ ， $Base \geq \frac{1}{f}$ 。

### 3.2.4 保压过程的实验

根据该注塑机的硬件配置，在 CPU 上位中配置其硬件参数，在实际应用中，贝加莱 PP400 系列控制器可以迅速完成注射速度设定曲线的规划以及保压压力设定曲线的规划。执行对象采用贝加莱 ACOPOS 系列伺服电机驱动器，其强大的运算控制器可以在本地执行上位发送的运动轨迹规划曲线，同时，整个过程采用 POWERLINK 总线进行数据传输，其最小的传输数据周期为  $400\mu\text{s}$ ，可以迅速相应来自上位的保压切换信号。反馈单元包含两个部分：位置反馈信号采用德国海

德汉 HEIDENHAIN512 线的 ENDAT 编码器，此编码器可以保证保压位置切换精度在 0.001mm；压力反馈信号采用意大利杰佛伦 GEFRANKH 压力传感器，此传感器可以保证实际压力精度在 0.1MPa，压力传感器信号采用模拟量接线方式；其硬件拓扑图如图 3-15 所示：

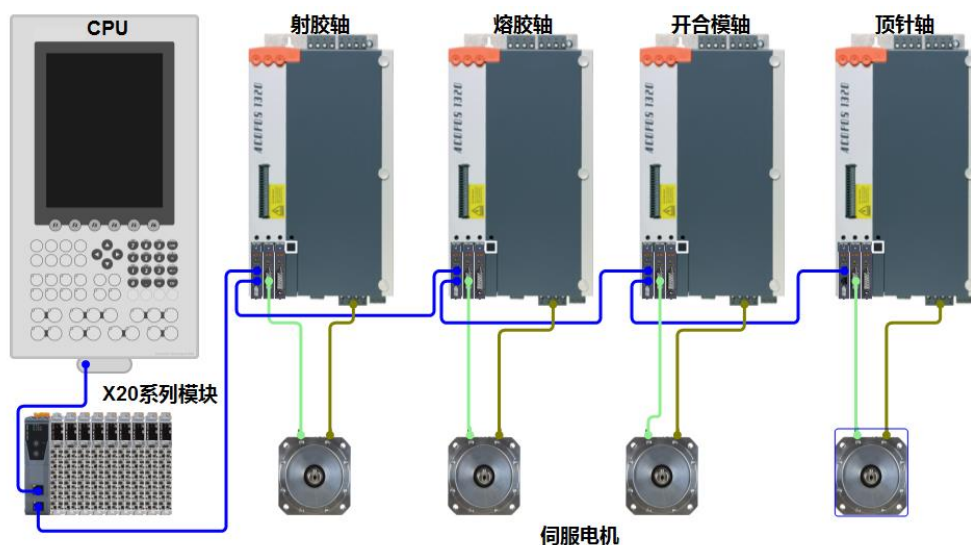


图 3-15 贝加莱控制系统硬件拓扑图

Fig.3-15 B&R Control System Hardware Topolpgical

在实际测试中，参数的设定如图 3-16 所示：

| 射胶                               |   | ◀ 5 | ◀ 4 | ◀ 3 | ◀ 2  | ◀ 1  |     |
|----------------------------------|---|-----|-----|-----|------|------|-----|
| 速度                               | — |     |     | 0.0 | 80.0 | 80.0 | %   |
| 压力                               | — |     |     |     | 90   | 90   | bar |
| 位置                               |   |     |     |     | 20.0 | 60.0 | mm  |
| 射胶由时间控制 <input type="checkbox"/> |   |     |     |     |      |      |     |

| 保压 |   | ◀ 5 | ◀ 4 | ◀ 3 | ◀ 2  | ◀ 1  |     |
|----|---|-----|-----|-----|------|------|-----|
| 速度 | — |     |     | 0.0 | 90.0 | 10.0 | %   |
| 压力 | — |     |     |     | 100  | 10   | bar |
| 时间 |   |     |     |     | 3.00 | 1.00 | sec |

图 3-16 射胶保压参数设定图

Fig.3-16 Inject and Packing Pressure Parameter Setting

实验测得设定压力与实际压力曲线如图 3-17 所示：



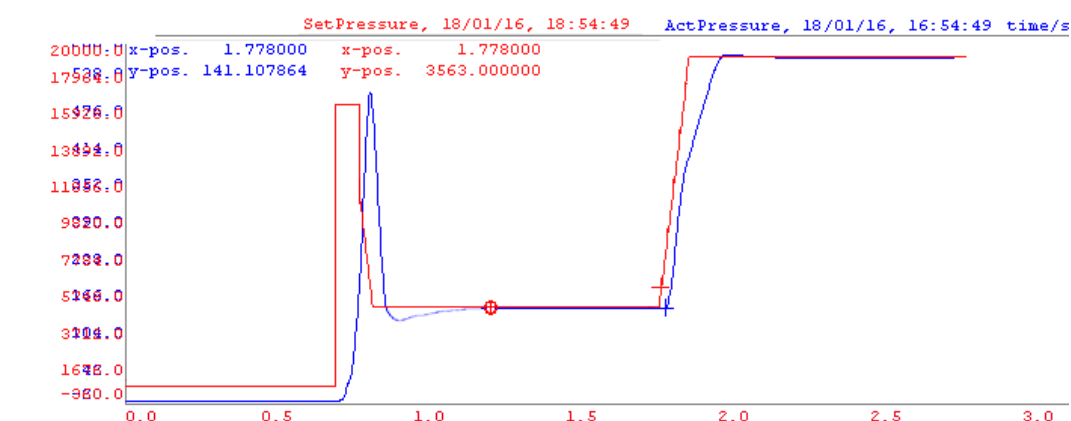


图 3-17 保压过程压力曲线

Fig.3-17 Packing Pressure Process Pressure Curve

就上图曲线而言，射胶阶段转保压阶段时，保压压力经过一点的过冲后才稳定到设定压力，在接下来的时间段，保压压力没有过冲，没有震荡，比较稳定，是较为理想的结果。保压过程的速度曲线如图 3-18 所示：

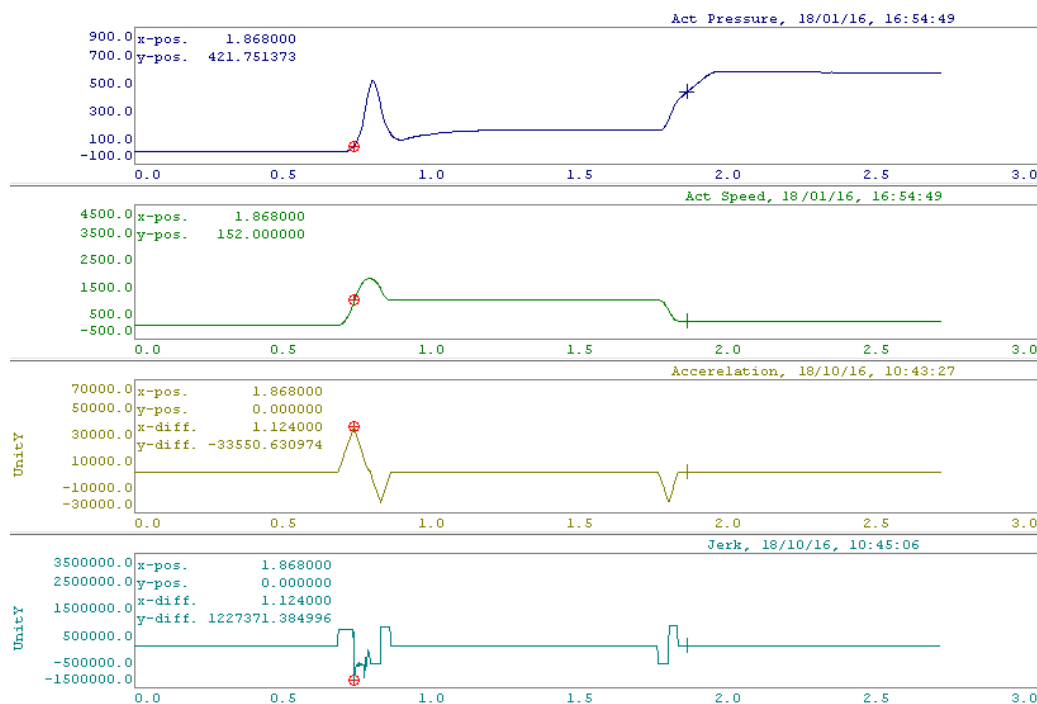


图 3-18 保压过程速度曲线

Fig.3-18 Packing Pressure Process Speed Curve

采用S型曲线后，压力控制效果有了很大的改善。通过对实际速度的微分处理，得到加速度以及加速度变化率的曲线，从加速度曲线可以看出，加速度在整个

个过程中还是相对平稳的，而加速度变化率出现了一定的毛刺，通过 pQCont 功能块中的 Rate Limiter 函数实时监测 Jerk 的数值，如果超出范围对其进行进行削减，可以减少毛刺出现的概率。

通过对上述曲线的分析，我们验证了仿真平台的可行性，这也就印证了高精度保压控制实际就是非线性系统模型这一说法，同时，为我们归纳模糊规则提供了坚实的基础。

根据上述实验的整个过程，我们不难看出，在保压阶段的设定速度都是根据多年总结下来的经验来设定的，通过这个经验值可以达到比较好的实验效果。如果产品原料、设定温度、模具大小发生改变，设定速度又要根据不同的情况进行设定，这个时候就会非常依赖操作经验，而保压段的设定速度又是非常重要的参数，设置的不妥当对产品质量、生产周期有着很大的影响，所以在设定速度在没有经验值参考的情况下，整个系统又该如何去达到理想的效果，这个问题就显得尤其重要，而下面章节讨论的模糊策略将是解决这个问题的重要途径。

### 3.3 本章小结

本章主要介绍了非线性系统的概念、精确线性化、模型的建立等内容，而对于保压过程中存在的“非线性现象”，其本身就是个非线性系统，利用数学公式及数据图表进行数学模型描述，找到它的渐近平衡点这一重要特性，通过对速度进行路径规划的方法，在实际操作系统中进行了实验，对结果的分析说明精确线性化的处理方法在保压系统模型中取得了很好的效果，验证了模型仿真平台的可行性。同时，增加了对反馈采样信号的滤波算法设计，大大降低了干扰对系统稳定性的影响，从而说明了后续章节研究内容的必要性。

## 第四章 保压过程的模糊控制策略设计

上一章节我们提到，注塑机保压阶段的射胶速度是通过操作人员的经验和积累的知识来设定的。倘若没有这个经验值作为参考，而且当注塑机生产不同产品的时候，射胶速度又不相同，这时候我们就需要采用模糊规则对系统进行分析既符合控制系统的特性，可以满足控制过程的需求。

### 4.1 模糊控制理论

这种控制理论是一种通过模糊数学来展现的，这包含的有模糊语言变量、模糊集理论以及模糊逻辑推理，来模拟人的模糊思维方法，模糊控制通过计算机控制技术，实现与操作者相同的控制方法。模糊性质也是一种不确定性，它有着不可具体描述性，但是这又与随机性有所不同，这个词通常在社会生活实践或者一些特定场合中使用，而且还是具有一定的指向性，但是模糊数学并不是模糊的，实际上它的各项计算都是精确的，是借助定量的方法研究模糊现象的工具<sup>[37]</sup>。

#### 4.1.1 模糊集合

设有论域 $X$ ， $A = \{x\}$ 是 $X$ 中的一个模糊集合， $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ 这样的隶属度函数表示其特征的聚集集合。若 $\mu_A(x)$ 靠近一的时候，表示 $x$ 在 $A$ 中的属于比例更高；若 $\mu_A(x)$ 靠近零的时候，则 $x$ 在 $A$ 的属于的比例更低模糊集需要用它所包含的元素和相应的隶属度函数来表示，它们可以用以下两种常用的形式来表示。

i)序偶形式：

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (4.1)$$

ii)紧凑形式：

$$A = \begin{cases} \int_X \frac{\mu_A(x)}{x}, & X \text{连续} \\ \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}, & X \text{离散} \end{cases} \quad (4.2)$$

下面介绍模糊集合的一些符号及运算。

1)模糊集合的直积 (Cartesian product)

如果有集合 $A$ 、 $B$ 都属于模糊集合，其所包含的论域为 $X$ 、 $Y$ 。则定义在积

空间  $X \times Y$  上的模糊集合  $A \times B$  为  $A$  和  $B$  的直积，其隶属度函数为  $\mu_{A \times B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$  或  $\mu_{A \times B}(x, y) = \mu_A(x)\mu_B(y)$ 。

直积的概念不局限于两个集合，可以推广到多个集合。

2) 达·摩根律

$$\overline{(A \cup B)} = \bar{A} \cap \bar{B}, \overline{(A \cap B)} = \bar{A} \cup \bar{B} \quad (4.3)$$

3)  $\alpha$  截集到模糊集合的转换

$$A = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha A_\alpha = \bigcup_{\alpha \in [0,1]} \alpha A_{\bar{\alpha}} \quad (4.4)$$

即

$$\mu_A(x) = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha \wedge \mu_{A_\alpha}(x)] = \sup_{\alpha \in [0,1]} [\alpha \wedge \mu_{A_{\bar{\alpha}}}(x)] \quad (4.5)$$

4) 模糊集合的代数和

若有三个模糊集合  $A$ 、 $B$  和  $C$ ，对于所有的，均有  $\mu_C(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x)$ ，则称  $C$  为  $A$  与  $B$  的代数和，记为  $C = A \hat{+} B$ 。上述描述也可表达为式 4.6。

$$A \hat{+} B \leftrightarrow \mu_{A \hat{+} B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x)\mu_B(x) \quad (4.6)$$

5) 模糊集合的代数积

$$A \cdot B \leftrightarrow \mu_{A \cdot B}(x) = \mu_A(x)\mu_B(x) \quad (4.7)$$

6) 模糊集合的有界和

$$A \oplus B \leftrightarrow \mu_{A \oplus B}(x) = \min\{1, \mu_A(x) + \mu_B(x)\} \quad (4.8)$$

7) 模糊集合的有界差

$$A \ominus B \leftrightarrow \mu_{A \ominus B}(x) = \max\{0, \mu_A(x) - \mu_B(x)\} \quad (4.9)$$

8) 模糊集合的有界积

$$A \odot B \leftrightarrow \mu_{A \odot B}(x) = \max\{0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1\} \quad (4.10)$$

9) 模糊集合的强制和 (Drastic sum)

$$A \uplus B \leftrightarrow \mu_{A \uplus B}(x) = \begin{cases} \mu_A(x), & \mu_B(x) = 0 \\ \mu_B(x), & \mu_A(x) = 0 \\ 1, & \mu_A(x), \mu_B(x) > 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

10) 模糊集合的强制积 (Drastic product)

$$A \cup B \leftrightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \begin{cases} \mu_A(x), & \mu_B(x) = 1 \\ \mu_B(x), & \mu_A(x) = 1 \\ 0, & \mu_A(x), \mu_B(x) < 1 \end{cases} \quad (4.12)$$

### 4.1.2 模糊控制系统的组成

为了实现模糊控制的效果，需要利用语言控制设计模糊控制器。模糊控制器又称为模糊逻辑控制器，其结构如图 4-1 所示。主要由四部分组成：精确量的模糊化、规则库（又称为知识库）、蕴涵推理机（又称为模糊推理机）、清晰化（又称为解模糊化）<sup>[38]</sup>。其中，规则库是一种针对专家语言的模糊逻辑量化，专家语言就是可以获得最优控制的经验总结；模糊推理机效仿规则库中的专家决策，对控制对象的信息做出正确的判断与应用；模糊化的作用是将模糊控制器的输入转为语言信息，方便模糊推理机灵活地对规则进行激活与运用；解模糊化则是将模糊推理机中的决策转化为被控对象的实际控制输出<sup>[39]</sup>。

利用模糊数学理论和模糊语言形式的模糊控制是一种基于模糊规则的控制系统，这些模糊规则是直接从操作者的多年经验和专家的归纳意见进行优化、总结到规则库中。建立系统模糊模型的基本思想就是对收集到的精确量数据进行模糊化，并将其转化为由隶属度和模糊子集表示的模糊量，通过精确量将系统输入和输出之间的内在联系转换为相应的由条件语句 IF（输入语言变量模糊子集）、THEN（输出语言变量模糊子集）来表达的模糊关系<sup>[40]</sup>。

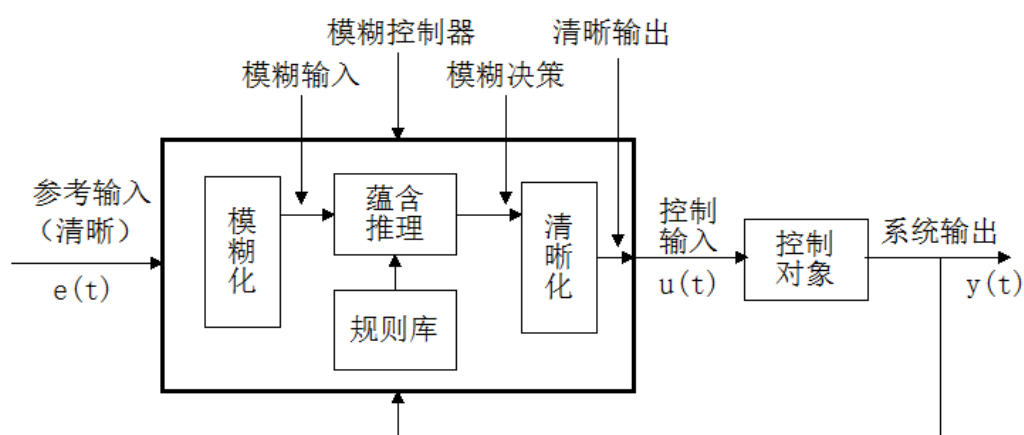


图 4-1 模糊控制系统原理图

Fig.4-1 The Schematic Diagram of Fuzzy Control System

图中黑色实线框是一个模糊控制器，是一个由输入和输出变量模糊化、模糊控制算法、模糊判决等组成的语言控制器，其功能是利用计算机将采集到的精确量转换为模糊形式，并且通过相应的规则进行相应的模糊推理，通过模糊推理得出需要的模糊集，最后再根据模糊集来进行模糊决策得出控制的精确量，作用于被控对象，使得被控过程达到预期的效果<sup>[41]</sup>。下面介绍下图中几个部分。

### 1) 规则库

模糊规则库由模糊“IF-THEN”规则集合组成，它是模糊控制的关键核心<sup>[42]</sup>。通常，模糊系统由存储在规则库里的 $P(P > 1)$ 个“IF-THEN”规则所组成的一个集合来描述，可以表示为式 4.13。

$$\begin{cases} R_1: \text{If}(\tilde{x}_1 \text{ is } \tilde{F}_1^{k_1} \text{ and } \cdots \text{and } \tilde{x}_n \text{ is } \tilde{F}_n^{l_1}) \text{ Then } (\tilde{y} \text{ is } \tilde{G}^{a_1}) \\ \vdots \\ R_p: \text{If}(\tilde{x}_1 \text{ is } \tilde{F}_1^{k_p} \text{ and } \cdots \text{and } \tilde{x}_n \text{ is } \tilde{F}_n^{l_p}) \text{ Then } (\tilde{y} \text{ is } \tilde{G}^{a_p}) \end{cases} \quad (4.13)$$

其中， $\tilde{F}_b^a$ 是第 $a$ 个描述输入 $x_b$ 的语言变量 $\tilde{x}_b$ 的语言值，类似地， $\tilde{G}^a$ 是第 $a$ 个描述输出 $y$ 的语言变量 $\tilde{y}$ 的语言值，数值变量的文字描述就是我们将的语言变量。为了运用语言规则，还需要利用模糊集合和模糊逻辑对规则的意义进行进一步的量化。通常来讲，利用隶属函数描述模糊集 $F_b^a$ 和 $G^a$ ，表达如式 4.14。

$$F_b^a = \{(x_b, \mu_{F_b^a}(x_b): x_b \in R)\}, G^a = \{(y, \mu_{G^a}(y): y \in R)\} \quad (4.14)$$

其中，隶属函数 $\mu_{F_b^a}, \mu_{G^a} \in [0,1]$ 描述的规则程度是属于其中一个特定的语言陈述。例如， $\mu_{F_b^a}$ 量化了描述输入 $x_b$ 的语言变量 $\tilde{x}_b$ 被语言值 $\tilde{F}_b^a$ 描述的程度。

### 2) 模糊推理机

模糊逻辑原理在模糊推理机中将会用来加工模糊 IF-THEN 规则，并将其组合成一个从 $U$ 上的模糊集 $A'$ 到 $V$ 上的模糊集 $B'$ 的映射<sup>[43]</sup>。基于模糊规则库的推理，存在着多种模糊推理机，例如最小推理机、乘积推理机、Zadeh 推理机、Lukasiewicz 推理机等。下面列举两个最常用的模糊推理机的公式。

最小推理机的公式如式 4.15 所示：

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1} \left[ \sup_{x \in U} \min \left( \mu_{A'}(x), \mu_{A_l^l}(x_1), \cdots, \mu_{A_n^l}(x_n), \mu_{B'}(y) \right) \right] \quad (4.15)$$

即给定 $U$ 上的一个模糊集 $A'$ ，最小推理机可由式 4.15 得出 $V$ 上的模糊集 $B'$ 。

乘积推理机的公式如式 4.16 所示：

$$\mu_{B'}(y) = \max_{l=1} \left[ \sup_{x \in U} \left( \mu_{A'}(x) \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \mu_{B'}(y) \right) \right] \quad (4.16)$$

也就是说，在给定 $U$ 上的一个模糊集 $A'$ 的情况下，乘积推理机可以由式 4.16 得出 $V$ 上的模糊集 $B'$ 。

### 3) 模糊化

完成模糊化的过程可以由模糊器进行完成。模糊器可以定义为由一个实数点 $x^* \in U \subset \mathbf{R}^n$ 向 $U$ 上的模糊集 $A'$ 的映射<sup>[44]</sup>。下面介绍三种常见的模糊器。

1、高斯模糊器。这个模糊器将 $x^* \in U$ 映射成 $U$ 上的模糊集 $A'$ ，其高斯隶属度

函数如下：

$$\mu_{A'}(x) = \exp\left(-\left(\frac{x_1 - x_1^*}{a_1}\right)^2\right) \odot \cdots \odot \exp\left(-\left(\frac{x_n - x_n^*}{a_n}\right)^2\right)$$

其中，参数 $a_i$ 是正数， $t$ -范数 $\odot$ 通常选用代数积算子或者最小(min)算子<sup>[45]</sup>。

2、三角形模糊器。这个模糊器和高斯模糊器相比有所不同，它是将 $x^* \in U$ 映射成 $U$ 上的模糊集 $A'$ ，它的三角形隶属度函数如下：

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{|x_1 - x_1^*|}{b_1}\right) \odot \cdots \odot \left(1 - \frac{|x_n - x_n^*|}{b_n}\right), & |x_i - x_i^*| \leq b_i (i = 1, 2, \dots, n) \\ 0, & |x_i - x_i^*| > b_i (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases}$$

其中，参数 $b_i$ 是正数， $t$ -范数 $\odot$ 通常选用代数积算子或者最小(min)算子<sup>[46]</sup>。

3、单点模糊器。这个模糊器与以上两个又有所变化，其将一个实值点 $x^* \in U$ 映射到 $U$ 上的模糊集合 $A'$ 上，在 $x^*$ 点上的隶属度值为 1，在 $U$ 中其他点上的隶属度值为 0，即

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1, & x = x^* \\ 0, & x \neq x^* \end{cases}$$

#### 4)解模糊化（去模糊化）

解模糊器可以定义为由 $V \subset R$ 上模糊集 $B'$ 向清晰点 $y^* \in V$ 的一种映射，也就是说，解模糊器用于确定最能代表模糊集 $B'$ 的 $V$ 上的点，有很多方法可以选择这个代表点，如重心解模糊器、中心平均解模糊器、最大值解模糊器等<sup>[47]</sup>。下面两种为常见的解模糊器：

1、重心解模糊器。系统所确定的 $y^*$ 是 $B'$ 的隶属度函数所包含区域的中心，即

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (4.17)$$

重心解模糊器非常直观合理，但是这个相应的门槛更高一点。

2、中心平均解模糊器。因为模糊集 $B'$ 是 $M$ 个模糊集的模糊，所以式 4.17 的一个比较好的逼近就是 $M$ 个模糊集中心的加权平均值，其权重为相应的模糊集的高度<sup>[48]</sup>。令 $y^l$ 作为第 $l$ 个模糊集合的中心点， $\omega_l$ 为 $y^l$ 的高度，这样通过中心平均解模糊器所解析到的 $y^*$ 为

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l \omega_l}{\sum_{l=1}^M \omega_l} \quad (4.18)$$

因为中心平均解模糊器计算简单，结构直观，所以是模糊系统与模糊控制中最常用的解模糊器。

### 4.1.3 模糊控制系统的类型

由于在模糊控制中的规则行事以及推理机的推理方法都有所不同，模糊控制系统的类型分为很多种，在建模和工程应用中，经常用的就是 Mamdani 型和 Takagi-Sugeno(T-S)型这两种基本型，下面给出这两种模型的简要介绍。

#### 1) Mamdani 模糊模型

Mamdani 模糊模型中，其模糊规则一般具有以下形式：

$R_i$ : 如果  $x_1$  是  $A_1^i$  and  $\cdots$  and  $x_n$  是  $A_n^i$  则  $y$  是  $B^i$ ,  $i = 1, 2, \cdots, m$

其中  $x_1, \cdots, x_n$ ,  $y$  表示模糊系统的输入和输出变量,  $A_1^i, \cdots, A_n^i$ ,  $B^i$  是变量  $x_1, \cdots, x_n$ ,  $y$  的取值, 这些都属于模糊集合。此规则展现出了控制器输入和输出的相应关系, 因为是由 Mamdani 首先提出来的, 所以称其为 Mamdani 模型<sup>[49]</sup>。

下面介绍两种此模型模糊推理运算的方法。

#### i) 模糊蕴含运算采用最小运算 $R_C$

$$\mu_{C'}(z) = a_i \wedge \mu_{C_i}(z), \mu_{C'}(z) = \bigcup_{i=1}^m \mu_{C_i}(z) \quad (4.19)$$

#### ii) 模糊蕴含运算采用积运算 $R_P$

$$\mu_{C'_i}(z) = a_i \mu_{C_i}(z), \mu_{C'}(z) = \bigcup_{i=1}^m \mu_{C'_i}(z) \quad (4.20)$$

#### 2) T-S 模糊模型

在此模型中，它的模糊规则为

$R_i$ : 如果  $x_1$  是  $A_1^i$  and  $\cdots$  and  $x_n$  是  $A_n^i$  则  $y = f_i(x_1, \cdots, x_n)$ ,  $i = 1, 2, \cdots, m$

其中前件中的  $x_1, \cdots, x_n$  是模糊系统的输入和输出变量, 它们是模糊变量。 $A_1^i, \cdots, A_n^i$  均是模糊集合, 它们是  $x_1, \cdots, x_n$  的取值, 它们都是模糊集合。后件中的  $y$  是系统的输出, 它是  $x_1, \cdots, x_n$  的函数, 后件中的  $y$  和  $x_1, \cdots, x_n$  均为清晰量<sup>[50]</sup>。

从上面可以看出, 这两种模糊模型差异之处, 体现在其规则的后件, 模糊量是 Mamdani 模糊模型的规则后件, 其取值为常数值, 其取值也是一个集合, 也可以成为是一个模糊集合, 而 T-S 模糊模型的规则后件则与前者有所不同, 清晰量是其规则后件, 它是前件变量的函数<sup>[51]</sup>。

### 4.1.4 模糊推理策略

#### 1) 模糊化 (Fuzzification)

根据经验总结出来的模糊规则, 模糊控制器的输入变量和输出变量作为它的语言变量, 是以自然语言形式给出的变量, 因此一般情况下误差和误差的变化率



被当做输入的语言变量，输出的语言变量是控制量相应的变化量，这种结构被称为双输入单输出模糊控制器<sup>[52]</sup>。此类型模糊控制器较为常见，本文亦是采用此种模糊控制器。

根据人们对事物的常规习惯，对误差及其变化率以及控制量的相应的变化量有三个等级，分别为大中小，变量具有正负性，一般常用“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正小”、“正中”、“正大”这七个语言值来进行描述，符号分别表示为NB、NM、NS、0、PS、PM、PB。

误差和误差的变化率的实际范围在模糊控制系统中，称为基本论域，论域变换通过量化因子实现，确定它们的隶属度函数，从而确定属于每个模糊集合的隶属度<sup>[53]</sup>。

## 2)应用模糊算子 (Apply Fuzzy Operator)

当输入输出完成了模糊化，就可以清楚每个模糊规则，对于一个规则前提具有不止一个部分，通过模糊算法来得到一个相应的数值，此数值表示前提是相对规则的满足程度。主要的模糊算子是模糊交 (AND) 和模糊或 (OR)。

## 3)应用模糊推理方法 (Apply Fuzzy Implacation Method)

常见的推理方法有 Mamdani 和 Sugeno。Mamdani 是从每个规则的结果中得到的模糊集通过聚类运算后得到结果模糊集，被解模糊化后得到系统的输出；Sugeno 中的输入线性的组合为其每个相对规则的最终结果，其加权的线性组合是其输出。

## 4)解模糊化 (Defuzzify)

解模糊化过程的输入是一个模糊集，即为聚类的输出模糊集，而对于实际控制必须是清晰量，解模糊化的任务就在此<sup>[53]</sup>。下面介绍几种常见的方法：

### i)最大隶属度法

如果输出量模糊集合 $C'$ 的隶属度函数中最大值只含有一个，所以其清晰值为隶属度函数的相应的最大值，即

$$\mu_{C'}(z_0) \geq \mu_{C'}(z), z \in Z \quad (4.21)$$

其中表示清晰值。如果有较多个极值存在于输出量相应的隶属度函数之中，其清晰值则为这些极值得平均取值。

### ii)中位数法

中位数法是取 $\mu_{C'}(z)$ 的中位数作为 $z$ 的清晰量，即 $z_0 = df(z) = \mu_{C'}(z)$ 的中位数，它满足

$$\int_a^{z_0} \mu_{C'}(z) dz = \int_{z_0}^b \mu_{C'}(z) dz \quad (4.22)$$

换句话说，以为分界，与轴之间面积两边相等，具体分布如图 4-2 所示。

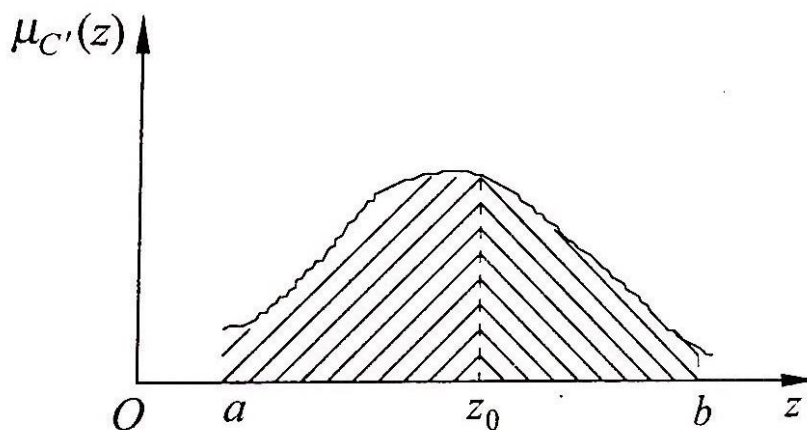


图 4-2 清晰化计算的中位数法

Fig.4-2 The Median Method of Sharpening Calculation

iii)加权平均法

取的加权平均数为清晰的值，即

$$z_0 = df(z) = \frac{\int_a^b z \mu_{C'}(z) dz}{\int_a^b \mu_{C'}(z) dz} \quad (4.23)$$

此方法也称为重心法，当论域为离散的情况时，此方法如式 4.24 所示。

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^m z_i \mu_{C'}(z_i)}{\sum_{i=1}^m \mu_{C'}(z_i)} \quad (4.24)$$

## 4.2 保压控制模型的模糊策略

针对本文讨论的注塑机保压段非线性系统模型，设计一个模糊控制器，以模糊控制为核心的算法来作为模糊控制器调节的主程序。模糊控制注塑机保压阶段系统的工作过程为：上位在保压设定压力 $P_{set}$ 时，若保压压力过高，则保压设定压力 $P_{set}$ 与测量的反馈压力 $P_{act}$ 之间的差值 $e$ 增大，此时就必须降低电机扭矩，即提高伺服电机转速；反之，若保压压力过低，此时就必须增大电机扭矩，即降低伺服电机转速。由于此时压力的偏差 $e$ 是精确值，只有经过相应的处理，才会得到最终想要的模糊量。模糊控制器是按照其相应的推理规则，通过其模糊量，经过计算得出结果，这个结果为控制量即为模糊量，接着通过模糊控制量解模糊化的操作得到精确量。

基于上面保压阶段系统的原理，下面开始设计一个模糊控制器用以实现其压

力的调节。

#### 4.2.1 选取模糊控制器

选定保压设定压力 $P_{set}$ 与保压实际压力 $P_{act}$ 之间的差值 $e$ ，即 $P_{set} - P_{act}$ ， $e \in X_1 = [-8, 8]$ ；再选定压力差值的变化量 $de$ ， $de \in X_2 = [-5, 5]$ ，它们为两个输入量，输出为伺服电机的转速的变化量 $v_a \in U = [-10, 10]$ 。即这是一个双输入单输出的模糊控制器。

#### 4.2.2 模糊化处理

设 $e$ 所对应的模糊论域 $E$ 的取值范围与物理论域 $X_1$ 一致，选取 7 个模糊子集对应的语言值分别为 NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB，它们的隶属度函数都选择三角形函数，其分布如图 4-3 所示。

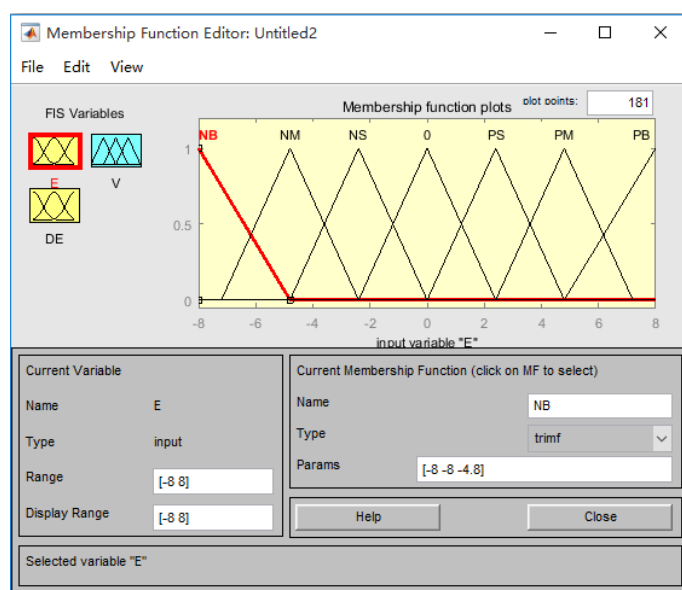
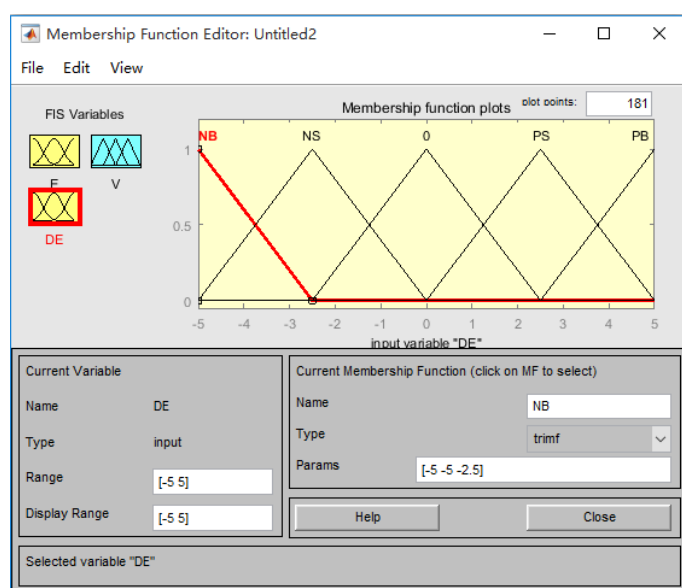


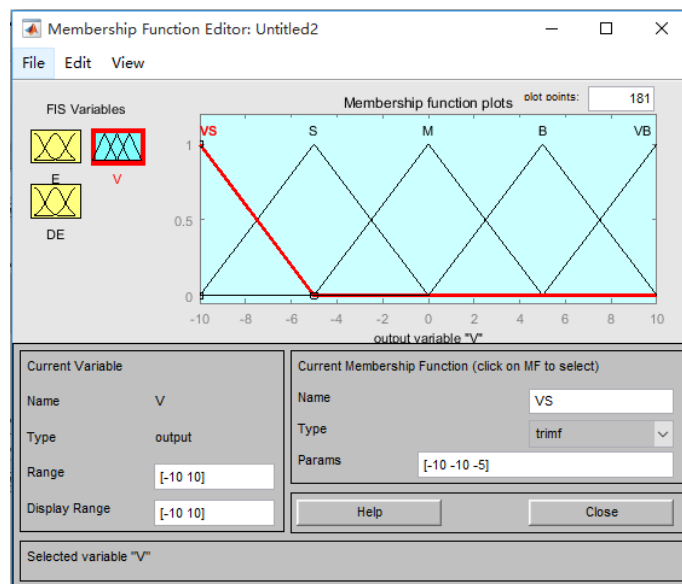
图 4-3 压力差值 $E$ 隶属度函数

Fig.4-3 Pressure Difference  $E$  Membership Function

设 $de$ 所对应的模糊论域 $DE$ 的取值范围与物理论域 $X_2$ 相同，选取 5 个模糊子集对应的语言值分别为 NB, NS, 0, PS, PB，它们的隶属度函数都选择三角形函数，其分布如图 4-4 所示。

图 4-4 压力差值变化量 $DE$ 隶属度函数Fig.4-4 Pressure Difference Variation  $DE$  Membership Function

设 $v_a$ 对应的模糊论域 $V$ 的取值范围与物理论域 $U$ 一致, 选取五个模糊子集, 分别对应语言值 NB, NS, 0, PS, PB, 其隶属度函数都选三角形函数, 其分布如图 4-5 所示。

图 4-5 伺服电机速度值 $V$ 隶属度函数Fig.4-5 Servo Motor Velocity  $V$  Membership Function

4.2.3 建立模糊规则表

根据现场人员的操作经验，建立 35 条模糊规则，如图 4-6 所示。

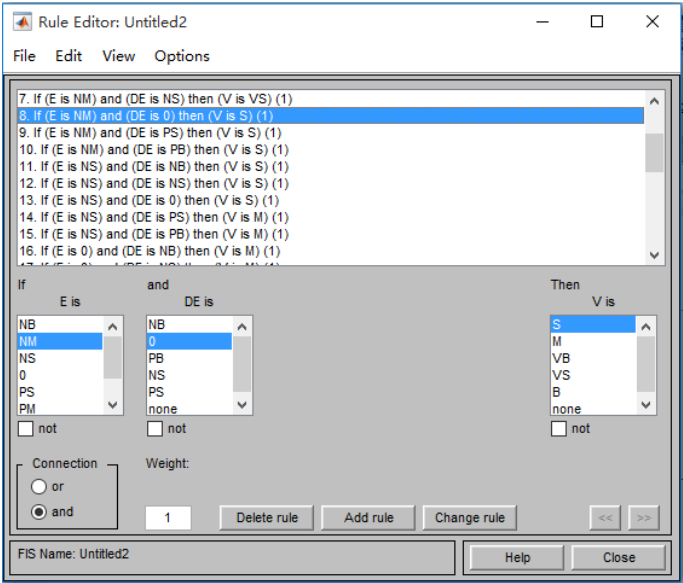


图 4-6 模糊规则示意图

Fig.4-6 The Diagram of Fuzzy Rules

如图 4-7 所示，通过模糊规则观察器，可以观察模糊推理图，并确定模糊推理系统与预期是否一致。

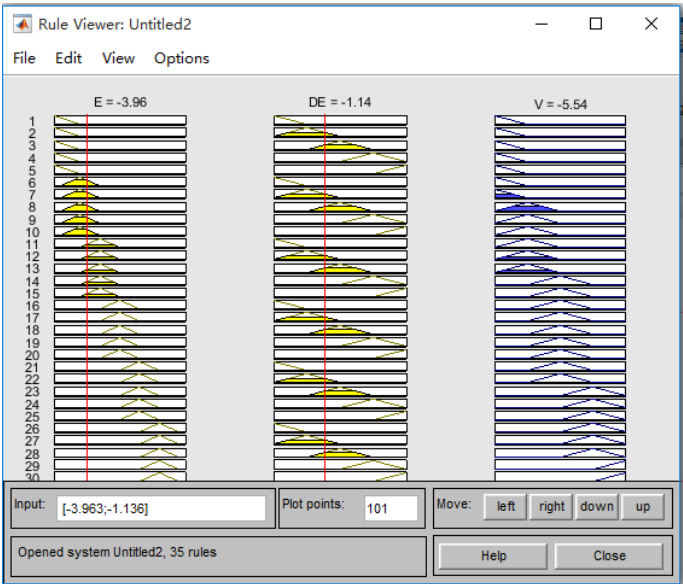


图 4-7 模糊规则观察器

Fig.4-7 The View of Fuzzy Rules

通过图 4-6 和图 4-7，可以整理出模糊规则，可以得到以下模糊规则表：

表 4-2 模糊规则表

| U \ E | NB | NM | NS | 0 | PS | PM | PB |
|-------|----|----|----|---|----|----|----|
| DE    |    |    |    |   |    |    |    |
| NB    | VS | VS | S  | M | M  | B  | VB |
| NS    | VS | VS | S  | M | M  | B  | VB |
| 0     | VS | S  | S  | M | B  | B  | VB |
| PS    | VS | S  | M  | M | B  | VB | VB |
| PB    | VS | S  | M  | M | B  | VB | VB |

#### 4.2.4 模糊推理

本文采用 Mamdani 的极大极小推理法，利用 MATLAB 直接进行编辑，如图 4-8 所示。

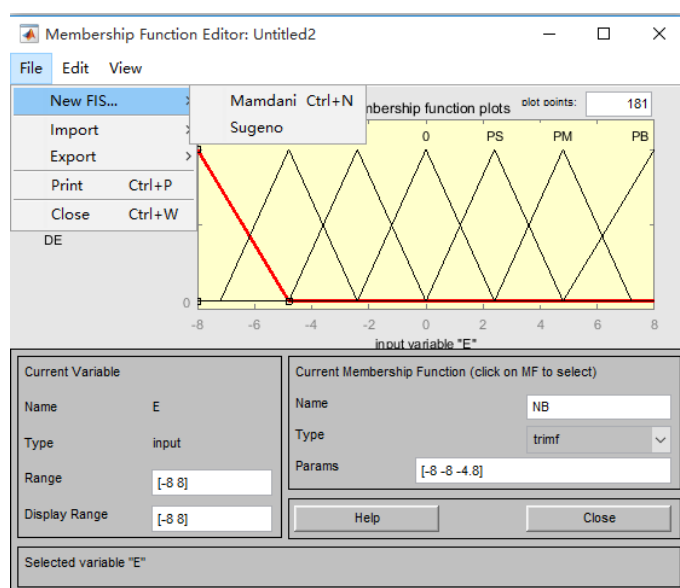


图 4-8 模糊推理极大极小值法

Fig.4-8 Fuzzy Reasoning Minmax Method

本文采用最大隶属度法，以所有规则推理结果的模糊集合中隶属度最大的元素选择为输出值，利用 MATLAB，可以直接选择最大隶属度法，如图 4-9 所示。

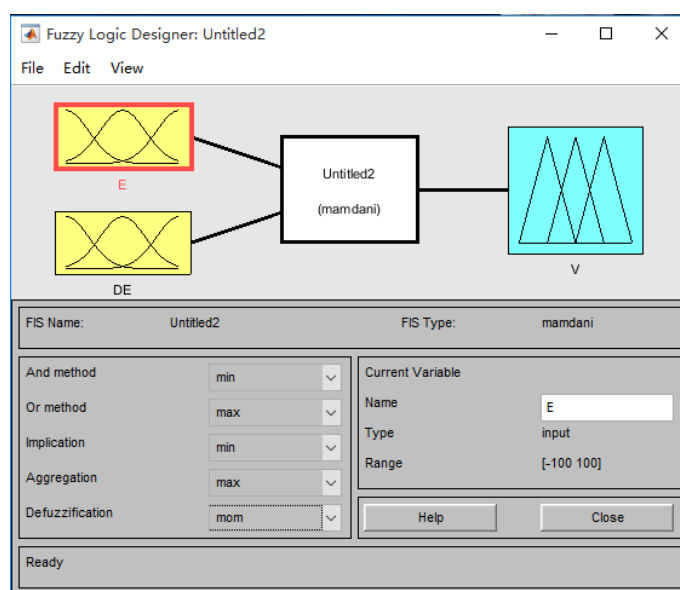


图 4-9 解模糊化最大隶属度法

Fig.4-9 Defuzzification Maximum Membership Method

#### 4.2.5 解模糊化

从图 4-10 所示的输出面观测器中，我们可以看到与整个输入区间相对应的输出区间。

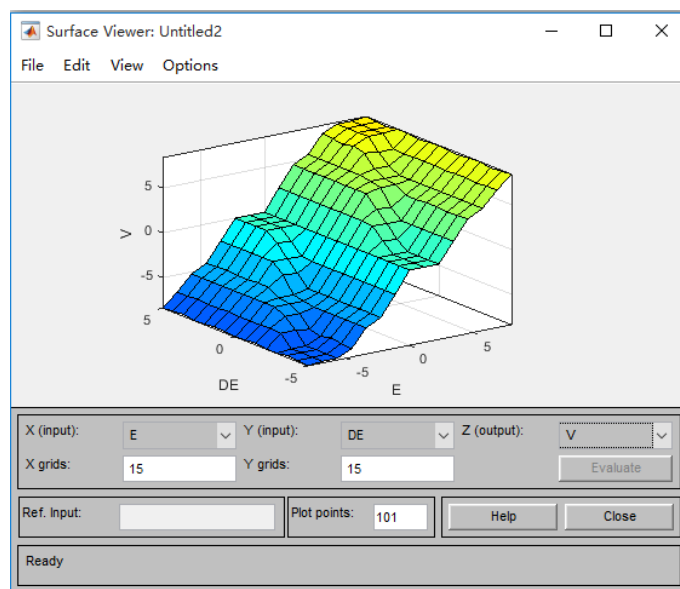


图 4-10 输出曲面观测器

Fig.4-10 Output Surface Observer

根据前面的推导，运用 MATLAB，得到如下的模糊控制表。

表 4-2 模糊控制表

| U \ E | -8  | -4.8 | -2.4 | 0 | 2.4 | 4.8 | 8  |
|-------|-----|------|------|---|-----|-----|----|
| DE    |     |      |      |   |     |     |    |
| -5    | -10 | -10  | -5   | 0 | 0   | 5   | 10 |
| -2.5  | -10 | -10  | -5   | 0 | 0   | 5   | 10 |
| 0     | -10 | -5   | -5   | 0 | 5   | 5   | 10 |
| 2.5   | -10 | -5   | 0    | 0 | 5   | 10  | 10 |
| 5     | -10 | -5   | 0    | 0 | 5   | 10  | 10 |

#### 4.2.6 仿真应用

利用查询表实现模糊决策过程，根据模糊控制系统的误差和误差变化（模糊量），将其转化为控制量（模糊量）。该系统模糊仿真模型示意图如图 4-11 所示。

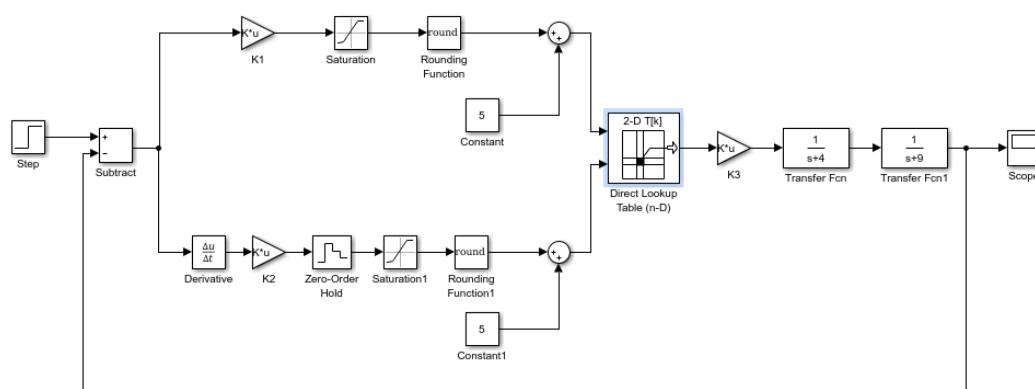


图 4-11 模糊仿真模型示意图

Fig.4-11 The Diagram of Fuzzy Simulation Model

在上述模型中，使用直接查询表模块（Direct Lookup Table），将上文中模糊控制表中的数据填入此模块中即可；考虑到系统输入的变化，可能会超过表中的给定值，所以，选择了两个饱和块 Saturation、Saturation1 作为超限保护；Rounding Function 的作用是将小数转化为整数；填入到查询表模块的数据增加偏移量 5；Scope 是示波器，直接观察系统的输出波形，如图 4-12 所示。



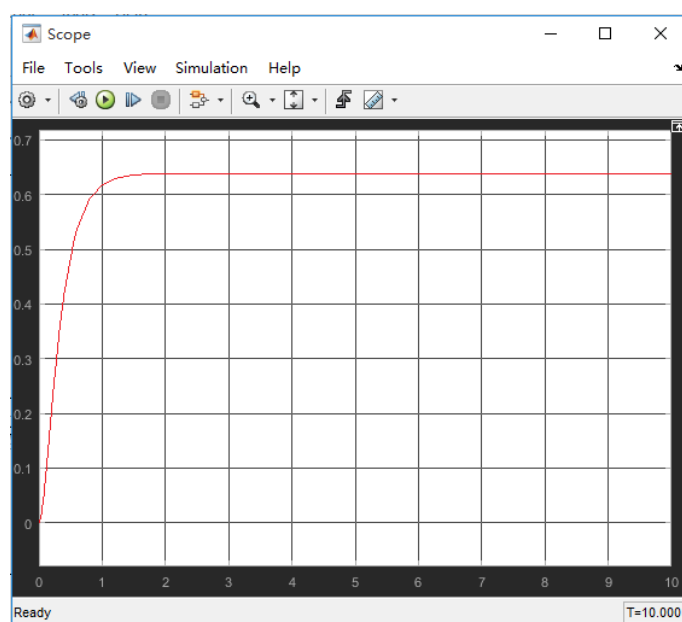


图 4-12 输出波形仿真图

Fig.4-12 The Diagram of Output Waveform Simulation

从上面的输出仿真图可以看出，模糊控制的超调量相对较小，速度很快达到稳定值，从仿真的角度来看，这是我们需要的控制结果，下边将以代码实现到实际机器设备中，再观察控制效果。

### 4.3 保压过程的模糊控制实验

上文将保压过程通过 Matlab 仿真进行了描述与建模，本节将在实际注塑机控制系统中进行实验，同时进行进行传统的 PID 控制进行比较，并对实验结果做出分析。

#### 4.3.1 模糊控制算法设计

通过上文归纳总结出来的模糊控制表，编写 C 语言程序，然后写入到注塑机控制系统的 CPU 中，通过生成的代码，可以对注塑机保压过程进行模糊系统控制，部分代码如图 4-13 所示。

```

1  /*.....*/
2  /* Description: Fuzzy Control Method 此处代码省略了很多变量定义、结构体组成以及指针 */
3  /* Author: Suiph 只显示了一些关于模糊规则的代码供参考 */
4  /* Date: 2018.1.30 */
5  /*.....*/
6  void FuzzyControl()
7  {
8      UINT i,j,k;
9      DINT data_offset;
10     init();
11     while(1) //循环主控和显示函数
12     {
13         i = 1;
14         j = 1;
15         k = 1; //开启外部中断
16
17         if(e >= -8 && e < -6) U = -9;
18         if(e >= -6 && e < -3.6)
19         {
20             if(de >= -5 && de < -1.25) U = -9;
21             else if(de >= -1.25 && de < 5) U = -5;
22         }
23         if(e >= -3.6 && e < -1.2)
24         {
25             if(de >= -5 && de < -1.25) U = -5;
26             else if(de >= -1.25 && de < 5) U = 0;
27         }
28         if(e >= -1.2 && e < 1.2) U = 50;
29         if(e >= 1.2 && e < 3.6)
30         {
31             if(de >= -5 && de < -1.25) U = 0;
32             else if(de >= -1.25 && de < 5) U = 5;
33         }
34         if(e >= 3.6 && e < 6)
35         {
36             if(de >= -5 && de < -1.25) U = 5;
37             else if(de >= -1.25 && de < 5) U = 9;
38         }
39         if(e >= 6 && e <= 8) U = 9;
40         motor(1,U);
41     }
42 }

```

图 4-13 模糊控制算法图

Fig.4-13 The Diagram of Output Waveform Simulation

### 4.3.2 实验结果与分析

为了与此系统之前所用的传统 PID 的方法进行比较，同时在相同工况下进行 PID 控制与模糊控制，保压控制任务周期为 5ms，保压最大设定压力为 100bar，保压时间为 4s，保压压力设定为 3 段，设定参数如图 4-14 所示。

| 保压 |   | ◀5 | ◀4 | ◀3   | ◀2    | ◀1   |     |
|----|---|----|----|------|-------|------|-----|
| 速度 | — |    |    | 0.0  | 0.0   | 0.0  | %   |
| 压力 | — |    |    | 30.0 | 100.0 | 30.0 | bar |
| 时间 |   |    |    | 1.00 | 1.00  | 1.00 | sec |

图 4-14 模糊控制参数设置图

Fig.4-14 The Diagram of Fuzzy Control Parameter Setting

其中速度的设定由模糊控制的输出生成，上位 HMI 就不需要设定了，三段压力分别设置为 30bar、100bar、30bar，时间分别为 1s。第一组实验以传统的 PID 控制作为保压控制的核心算法，经过压力传感器采样上来的实际压力和系统

的设定保压压力的 Automation Studio Trace 曲线图如图 4-15 所示。

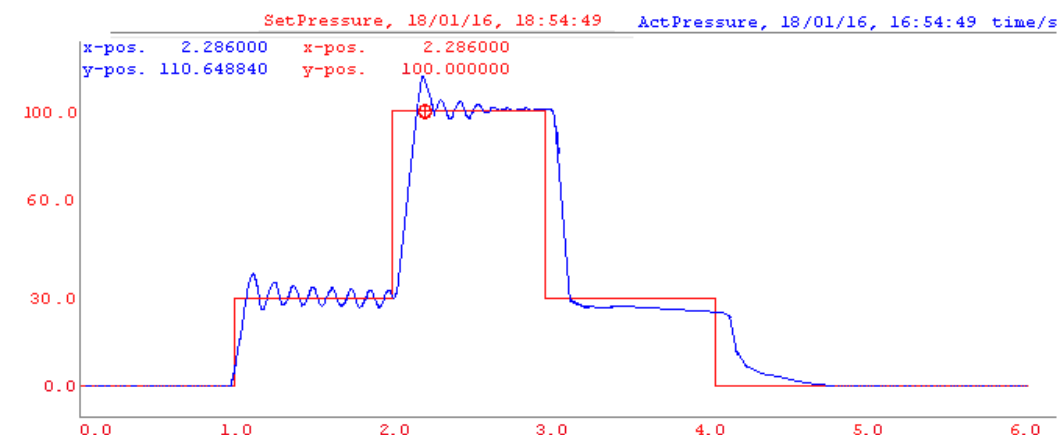


图 4-15 传统 PID 控制保压压力曲线图

Fig.4-15 Traditional PID Control Packing Pressure Curve

通过图 4-15 我们可以看出保压实际压力在上升时超调比较严重, 最大超调值达到 25%左右, 收敛很慢, 存在较大的滞后性, 上升阶段时滞 0.25s, 设定压力与实际压力之间的静差达到 0.9Mpa, 下降阶段最大超调达到 10%左右, 下降阶段时滞 0.3s。传统 PID 算法作为一种通用的控制算法广泛应用于各种工业对象, 但对非线性系统的保压问题显然无法获得更高的精度。

第二组实验以模糊控制作为保压控制的核心算法, 经过压力传感器采样上来的实际压力和系统的设定保压压力的 Automation Studio Trace 曲线图如图 4-16 所示。

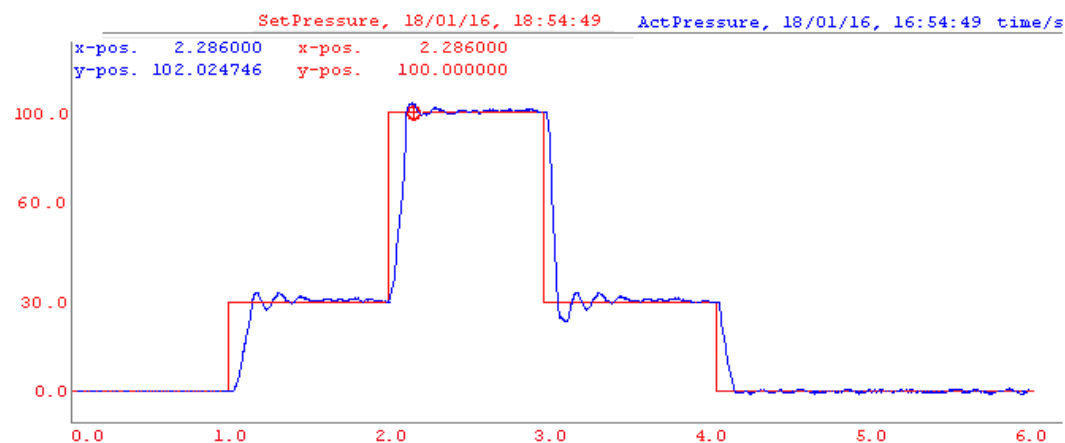


图 4-16 模糊控制保压压力曲线图

Fig.4-16 Fuzzy Control Packing Pressure Curve

通过图 4-16 我们可以看出保压实际压力的超调基本被解除，收敛速率很快，上升阶段时滞 0.15s，设定压力与实际压力的静差 0.3Mpa，下降阶段最大超调 8%左右，下降阶段时滞 0.2s，结束段的实际压力陡降是正常的工艺过程，原因是在注射结束过程中，塑料熔体充满模腔时会有暂时的压力下降。与常规的 PID 保压控制方法对比，本文提出的模糊策略保压控制算法获得了更高的保压精度，达到了预期的目标。

#### 4.4 本章小结

本章首先介绍了模糊集合、模糊控制的概念，对模糊控制的模型有了一定的了解，然后根据注塑机保压阶段的特点，对其建立了相应的模糊控制模型，利用 Matlab 进行模型的仿真，最后编写代码写入到实际的注塑机控制器系统中，在相同工况条件下，并在同一台注塑机设备上对传统的 PID 控制算法和模糊控制算法进行了实验研究，通过对曲线图和数据的分析，验证了模糊策略对非线性系统保压控制能获得更高精度的想法，达到了预期的效果。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

本文首先通过对塑料行业的分析,介绍了注塑机在行业里有着举足轻重的地位,对注塑机的发展历史以及技术进展作了情况描述;其次,本文详细介绍了注塑机的工艺流程,分析出其具有非线性、时变性、非稳态操作等特性。在得出注塑过程中的保压控制是制品是否合格的重要一步,经过针对非线性系统模型的分析,然后把保压段这一重要阶段做了数学建模,同时进行精确线性化处理,并通过路径规划,应用在注塑机控制系统中,根据实验数据作出分析处理,同时提出保压段速度设定这一人为经验操作麻烦的问题,在后续章节提出模糊控制来解决这一问题。

(1) 本文首先描述了注塑机工艺流程及其结构组成、工作原理等,说明了其具有非线性、时变性、不确定性等特性,然后分析了生产过程中各变量对其的影响,同时介绍了该注塑机控制系统——贝加莱控制系统,包括硬件、软件部分。

(2) 根据非线性系统模型的特点,建立了保压过程这一非线性系统模型,详细介绍了此模型的建立过程,同时对其进行精确化线性处理,验证了其可以转化为线性可控的系统,根据电动注塑机的特性,利用路径规划的方法将保压段的速度曲线设定出来,然后再做 PID 控制,通过实验结果可以验证了非线性系统线性化后的可靠性,但是存在的问题就是对人为操作经验有较大的依赖性,这也为后续的模糊控制作了铺垫。

(3) 在查阅大量文献资料的基础上,介绍了模糊控制理论,模糊控制策略作为一种智能控制方法,可以充分利用专家规则知识,是一种解决非线性高精度保压问题的有效方法,其关键是模糊规则的获取与优化,所以,利用 Matlab 对保压段进行仿真建模,得出模糊控制规则表,然后编写 C 语言代码,下载到贝加莱控制系统中,在相同工况条件下,同时对传统 PID 控制和模糊控制进行对比实验,通过对实验数据曲线的分析可以得出结论,本文提出的模糊策略保压控制算法可以获得更高的保压压力精度,达到了预期的目标,提高产品质量性能,有利于实际生产。

## 5.2 展望

由于本人的个人能力和研究时间的限制，文章还有一些内容没有涉及，有待于进一步深入研究和改进，主要有以下几点：

（1）在实现非线性系统线性化的过程中，利用的精确线性化方法，该方法因为使用几何方法，所以会给系统带来较大鲁棒性的问题，这方面还有待进一步分析。

（2）使用路径规划方法时，采用最基础常用的七段规划法，而当注塑生产流程工艺变复杂的时候，应当采取更为复杂的规划方法，这个问题也需要进一步去推导验证。

（3）针对保压过程进行模糊建模时，采取 Mamdani 模型，而更为复杂的 T-S 模型是否也适用，二者有没有对提高模型精度的区别，这个问题也有待进一步验证。

（4）所有实验都是基于贝加莱的控制系统，在中国的市场，贝加莱的系统属于高端的硬件，成本也比较高，这套算法是否也适用于成本低廉的控制系统，如三菱、西门子控制系统，考虑到设备制造商采购问题，这个也有待实验。

## 参考文献

- [1] 王志新,张华,葛宜远. 现代注塑机控制—微机及电液控制技术与工程应用[M], 北京:中国轻工业出版社,2001,20-22.
- [2] A.R.Agrawal, I.O.Pandelidis, M.Pecht. Injection-molding process control-A review [J], Polymer Engineering & Science, 2007, 27(18): 1345-1357.
- [3] 胡志鹏. 我国塑料机械市场发展现状与趋势[J], 工程塑料应用, 2007,32(4):5-9
- [4] 王志新. 我国注塑机的特点及发展方向[J], 上海塑料, 2004(1):4-8.
- [5] 廖正品.中国塑料制品行业发展趋势与市场分析[J].国外塑料,2008,26(4):22-30.
- [6] 郭晨. 非线性系统自适应控制理论及应用[M], 北京:科学出版社,2012.
- [7] Selvakarhi D, Prasad S J S, Meenakumari R, et al. Optimized temperature controller for plastic injection molding system[C]// International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering. IEEE,2014:1-5.
- [8] 旺纳姆. 线性系统几何理论[M], 科学出版社,2008.
- [9] 申长雨. 注塑成型模拟及模具优化设计理论与方法 [M]. 科学出版社,2009.
- [10] 钟汉如. 注塑机控制系统 [M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [11] Y.Yang. Injection Molding Control:From Process to Quality [D], The Hong Kong University of Science and Technology.2004.
- [12] 张坤涛. 注塑机控制系统设计[D]. 北京交通大学,2008.
- [13] Lu C H, Tsai C C, Liu C M, et al. Neural-network-based predictive controller design: An application to temperature control of a plastic injection molding process[J]. Asian Journal of Control, 2010,12 (6):680-691.
- [14] Mo S, Wang L, Yao Y, et al. Two-time dimensional dynamic matrix control for batch processes with convergence analysis against the 2D interval uncertainty[J]. Journal of Process Control,2012,22(5):899-914.
- [15] 管成,彭华. 基于非线性函数的注塑机注射压力模糊控制[J]. 浙江大学学报(工学版),2011(8):1382-1386.
- [16] 陈娟. 迭代学习控制方法在注塑机注射保压全过程中的应用[D]. 东北大学,2008.
- [17] 黄湘云,朱学峰.预测控制的研究现状与展望[J].石油化工自动化,2005(2):27-31.
- [18] Xu Z, Zhao J, Yang Y, et al. Optimal Iterative Learning Control Based on a Time-

- Parametrized Linear Time-Varying Model for Batch Processes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013,52(18):6182-6192.
- [19] 单岩,王蓓,王刚. 模具分析技术基础[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [20] 刘来英. 注塑成型工艺[M]. 机械工业出版社,2004.
- [21] 金波, 宁德胜, 许明, 等. 注塑机控制系统的现状及发展趋势[J]. 液压气动与密封,2006(1):7-10.
- [22] 吕常智, 范迪. 基于时间最优的注塑机料筒温度控制方法[J]. 仪器仪表学报,2008,29(3):633-637.
- [23] H.HChiang, Hieber C A, Wang K K. A unified simulation of the filling and postfilling stages in injection molding. Part I:Formulation[J]. Polymer Engineering & Science,2010,31(2):116-124.
- [24] 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,2013,19:007.
- [25] 吴海宏, 赵振峰, 申长雨. 聚合物注塑内应力计算的蠕变模型[J]. 机械工程学报,2008,44(12)221-225.
- [26] Shi J, Gao F, Wu T J. Single-cycle and multi-cycle generalized 2D model predictive iterative learning control(2D-GPILC) schemes for batch processes[J]. Journal of Process Control,2007,17(9):715-727.
- [27] Rahmani R, Shirvani A, Shirvani H. Analytical analysis and optimization of the Rayleigh step slider bearing[J]. Tribology International,2009,42(5):666-674.
- [28] Montaseri G, Yazdabpanah M J. Predictive control of uncertain nonlinear parabolic PDE systems using a Galerkin/neural-network-based model[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2012,17(1):388-404.
- [29] Tiao W C. Practical approach to investigate the statistics of nonlinear pressure on a high-speed ship by using the Volterra model[J]. Ocean Engineering,2010,37(8):847-857.
- [30] Bouilloc T, Favier G. Nonlinear channel modeling and identification using baseband Volterra-Parafav models[J]. Signal Processing,2012,92(6):1492-1498.
- [31] Shardt Y A W, Huang B. Closed-loop identification condition for ARMAX models using routine operating data[J]. Automatica,2011,47(7):1534-1537.
- [32] Ahmadi M, Mojallali H. Identification of multiple-input single-output Hammerstein models using Bezier curves and Bernstein polynomials[J]. Applied Mathematical Modelling,2011,35(4):1969-1982.
- [33] 肖维荣,齐蓉. 装备自动化工程设计与实践[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [34] 王奔,庄圣贤. 非线性控制系统[M]. 北京:电子工业出版社,2012.



- [35] 肖维荣,王瑾秋,宋华振. 开源实时以太网 POWERLINK 详解[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [36] 孙增圻,邓志东,张再兴. 智能控制理论与技术[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [37] 米阳,韩云昊. 复杂系统的模糊变结构控制及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [38] Li S Y, Tam L M, Tsai S E, et al. Novel Fuzzy Modeling and Synchronization of Chaotic Systems With Multinonlinear Terms by Advanced Ge-Li Fuzzy Model[J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2015,46(10):2228-2237.
- [39] 吴乐彬, 王宣银, 李强. 对接模拟并联六自由度平台的模糊免疫 PID 控制[J]. 浙江大学学报:工学版,2008,42(3):387-391.
- [40] 张恩勤, 施颂椒. 一类基于 PID 控制的新型模糊控制方法[J]. 上海交通大学学报,2000,24(5):630-634.
- [41] 赵志成, 文新宇. 内模控制及其应用[M]. 电子工业出版社,2012.
- [42] Liu Yang, Ban Xiaojun, Wu Fen, et al. A gain-scheduling control approach for t-s fuzzy systems based on linear parameter-varying control theory[J]. 2016,138(1): 81-89.
- [43] Xie Wei. Improved  $L_2$  gain performance controller synthesis for Takagi-Sugeno fuzzy system[J]. IEEE Transacton onFuzzy Systems,2008,16(5):1142-1150.
- [44] Zhang Zhuo, Zhang Zexu, Zhang Hui, et al. Finite-time  $H_1$  filtering for t-s fuzzy discrete-time systems with time-varying delay and norm-bounded uncertainties[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2015,23(6):2427-2434.
- [45] Huang Jin, Chen Yehua, Cheng A. Robust Control for fuzzy dynamical systems: uniform ultimate boundedness and optimality[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems,2012,20(6):1022-1031.
- [46] Liu Huangping, Sun Fuchun, Hu Yanan.  $H_\infty$  control for fuzzy singularly perturbed system[J]. Fuzzy Sets and Systems,2005,155(2):272-291.
- [47] Ding Baocang. Homogeneous polynomially nonquadratic stabilization of discrete-time takagi-sugeno systems via nonparallel distributed compensation law[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems,2010,18(5):994-1000.
- [48] Dong Jiuxiang, Yang Guanghong. Control synthesis of T-S fuzzy systems based on a new control scheme[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems,2011,19(2):323-338.
- [49] Chen Yingjen, OHTAKE H, TANAKA K, et al. Relaxed stabilization criterion for t-s fuzzy systems by minimum-type piecewiselyapunov-function-based switch fuzzy

- controller[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems,2012,20(6):1166-1173.
- [50] Xiu Zhihong, Ren Guang. Stability analysis and systematic design of Takagi-Sugeno fuzzy control systems[J].Fuzzy Sets and Systems,2005,151(1):119-138.
- [51] Zhang Huaguang, Xie Xiangpeng. Relaxed stability conditions for continuous-time t-s fuzzy-control systems via augmented multiindexed matrix approach[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems, 2011,19(2):478-492.
- [52] Li Hongyi, Liu Honghai, Gao Huijun, et al. Reliable fuzzy control for active suspension systems with actuator delay and fault[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems,2012,20(2):342-357.
- [53] Feng Gang. Analysis and synthesis of fuzzy control systems: a model-based approach[M]. London: Taylor and Francis Group,2010.
- [54] Chen Jun, Xu Shengyuan, Zhang Baoyong, et al. Novel stability conditions for discrete-time T-S fuzzy systems: a kroneckerproduct approach[J]. Information Sciences, 2016,337-338:72-81.
- [55] Zhang Yanjun, Tao Gang, Chen Mou. Relatice degrees and adaptive feddback linearization control of T-S fuzzy systems[J]. IEEE Transaction on Fuzzy Systems,2015,23(6):2215-2230.
- [56] Zhao Xudong, Yin Yunfei, Zhan Lixian G, et al.  $L_p$  control of switched nonlinear systems via T-S fuzzy modeling[J]. IEEE Transaction on FuzzySystems,2016, 24(1):235-241.

## 致 谢

在论文完成之际，向我的第一导师杨煜普教授和企业导师陈志平老师表示衷心的感谢！杨煜普老师在论文架构、学术模型上给予了我很大的帮助和支持，陈志平老师则在实际模型应用、软件算法的编写上给了我很大的指导。杨老师广播的知识、热情的鼓励、严谨的学术态度为我树立了很好的榜样，陈老师丰富的调试经验、一丝不苟的职业态度对我在工作中也有很深的影响。再次向两位老师致以崇高的敬意和至深的感谢！

衷心感谢上海交通大学电子信息与电气工程学院自动化系的范启富、张卫东等老师，通过他们的课程为论文打下了良好的理论基础，并对整个研究生课程有了很多框架上的了解，谢谢你们！

衷心感谢贝加莱工业自动化（中国）有限公司的肖维荣博士、樊惠芳老师、王义帅老师，给予我现场调试之余还可以在客户现场进行额外实验的机会，同时，公司也给我很大的平台去做论文撰写，感谢市场部的周晓霞女士在小论文发表时在自动化博览杂志社处做的沟通。感谢大家的深情厚意！

衷心感谢我的父母和女友，你们的支持与理解是我的动力，感谢你们在生活上对我的照顾！

论文的完成，离不开大家的关心与帮助，凝聚了大家的爱，这是我生命中一段非常宝贵的经历和财富。再次对所有关心和帮助过我的老师、同事、亲人、同学、朋友道一声——谢谢！

## 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 隋鹏昊,杨煜普,陈志平,王义帅. 注塑机保压控制非线性系统模型的建立与应用. 自动化博览 (已录用).

## 上海交通大学

### 学位论文原创性声明

本人郑重声明：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。除文中已经注明引用的内容外，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成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：肖鹏昊

日期：2019 年 12 月 13 日

