

注塑机控制系统改造设计及料筒温度控制算法的研究

摘要

注塑成型是目前应用较广泛的塑料加工方法，注塑机是注塑成型的主要加工设备。自本世纪三十年代问世以来，注塑机的组成结构和传动原理变化不大，但其控制技术却在不断的更新和发展。研究注塑机的控制问题对提高塑料制品质量，推动塑料工业的发展有重要意义。

本文是以宁波海天公司生产的型号为 HTF58X2 的注塑机为背景，来进行注塑机控制系统的设计改造和料筒温度控制算法的研究的。

注塑机控制系统设计分为硬件系统改造和控制软件设计两部分。在硬件系统改造中，分析了注塑机系统的 I/O 信号特性和数据采集卡对采集信号的要求，从而设计出系统接线原理图。在控制软件设计中，首先利用 QNX 系统的实时多任务特点，对软件所实现的功能进行任务划分，并设计出下位机软件流程图；然后通过 QNX 的 phAB 编程软件，按照注塑机监测和控制的需求，完成了系统监控画面的设计实现。实际运行表明，开发出的控制系统运行可靠，满足了实验和研究需求。

在料筒温度控制算法方面，首先对料筒加热段采用基于最小二乘的经典阶跃响应辨识方法，测出了料筒各加热段的数学模型，然后分别进行积分分离 PID 和模糊变系数 PID 控制策略的研究，并将其应用于注塑机料筒的温度控制实验。实验结果表明，与普通 PID 控制器相比，模糊变系数 PID 控制算法有较好的控制性能和较强的鲁棒性。

最后，总结了所做的研究工作，并对现行方法中的不足提出可行的改进措施，还进一步对未来的研究方向进行了阐述。

关键词：注塑机；系统改造；QNX；多任务；温度控制；PID 控制；模糊控制

Reformation and Design of Control System for Injection Mold and Research on Barrel Temperature Control

Abstract

Injection Molding Machine (IMM) is one of the most important equipment in plastic industry. It has developed rapidly in the control technology rather than in the structure and transmission, since it appeared in the 3rd decade of last century. So research on the control method of IMM is significant for improvement of plastic product and progress of plastic industry.

This dissertation is concerned with the injection-molding machine (IMM) named HTF58X2-A made in Ningbo Haitian company.

Reformation and Design of Control System for IMM consist of two parts, rebuilding of the hardware system and design of the software for control system. In the former, the character of the input and output signals and demand of acquisition cards for signals are analyzed, and the wiring diagrams are designed. In the latter, firstly tasks are divided according to functions software implements and flowchart of subordinate computer program is planned, availing of the real-time multitask character of QNX operating system. Secondly, monitoring system is accomplished using phAB software of QNX, to satisfy the supervisory control needs of IMM. The developed control system is reliable and fulfills the research needs of lab by test.

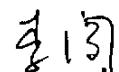
In the way of barrel temperature control, barrel temperature model is established with the method of step response identification method based on least square regression. Then, the implementation of PID and fuzzy variable-coefficient PID are studied in detail and the results of the experiment are presented. The experimental results show that fuzzy variable-coefficient PID controller has good performance in both dynamic and static state, and is more robust than normal PID controller.

In the end, the research work in this thesis is concluded, and the improved method is proposed to the deficiencies in the fuzzy method and the interested directions in the future are described.

Key words: injection molding machine, reformation of the system, QNX, multitask, temperature control, PID control, Fuzzy control

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

日期：2006.1.15

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

(如作者和导师不同意网上交流，请在下方签名；否则视为同意。)

学位论文作者签名：

导师签名：

签字日期：

签字日期：

第一章 绪 论

1.1 塑料工业的发展

随着社会的不断发展，塑料逐渐成为与混凝土、钢铁、木材一样最重要的工业材料之一。塑料作为新型合成材料，具有诸多优良特性，如质地轻巧、耐水、耐化学腐蚀等；塑料制品外形美观、便于加工安装、具有优异的电气特性及化学稳定性、优良的吸震和消声隔离作用、能很好地与金属、玻璃、木材及其它材料相胶结等。

正是由于塑料具有诸多优点，因此被广泛应用到国民经济各部门和日常生活中。塑料在材料结构中所占的比例正在逐年上升。预计到 2010 年，以重量计算的塑料产量将超过钢的产量。多年的实践也证明，增加塑料在整个材料结构中的比重，广泛采用高分子合成材料，可节省资源，降低能耗，社会总体经济效益也可大为提高，使得社会资金和自然资源可以得到更合理的利用。正是由于企业生产和人们日常生活对塑料制品的需求越来越强烈，并且塑料制品及其原材料的来源也很丰富、廉价，因而极大地促进了塑料工业特别是塑料机械工业的发展与进步，以及塑料加工技术和工艺的不断完善^[1]。

注塑成型是热塑性或热固性塑料制件的主要成型方法之一：就世界范围来说，注塑机加工的塑料量是塑料产量的 30%，注塑机的产量是塑料机械产量的 50%，因此注塑机成为塑料成型机械制造业中增长最快，产量最多的机种之一。因为注塑机具有生产效率高，产品一次成型的优点，所以在家用电器、日用品和儿童玩具等领域已得到广泛应用。目前我国的大中型注塑产业已经基本进入自动化控制生产的时代，但是在一些中小型的注塑厂家，仍然在采用原始的单体式的温度、压力控制仪表和手动开关控制，不仅自动化程度无法与国外同类产品相比，而且严重影响产品的加工质量和生产效率。随着自动化和计算机技术的发展，西方工业国家已成功推出新一代自动控制塑料机械，不仅自动化程度高、易操作，而且生产效率和产品质量也大大提高。目前世界上大多数的工程塑料制品采用注射成型加工技术进行生产。由此可见，注塑成型这种加工方法在塑料工业中占有其特殊的地位^[2]。

基于塑料成型技术的机械是塑料工业发展的重要支柱，它为塑料行业提供了先进的技术装备，它的发展是塑料工业发展的基础，也受塑料工业发展的影响。从世界范围看，塑料机械的三大类品种依次是注塑机、挤出机/挤出生产线和吹塑机，它们占了塑料机械总产值的 80%以上，其中注塑机占这三类机械总和的一半以上^[3]。本文的研究背景正是基于塑料注射成型机，简称注塑机。

1.2 注塑机的发展及技术现状

注塑机是一种对热塑性（或热固性）塑料进行加工熔融后，以高压、高速注射入模腔，进而固化成型，生产出塑料制品的机械设备。

注塑机的发展起源于上世纪三十年代，自从上世纪 50 年代第一台往复螺杆式注塑机问世以来，注塑机的性能和效率得到不断的改善，这种改善涉及到注塑机的几个主要组成部分，即合模装置、注射装置、液压系统及电气控制系统。其中机械结构于上世纪 50 年代末已基本定型。在液压系统方面，液压系统随着电液比例技术的日益发展成熟，正由原来的开关阀控制向电液比例阀控制发展。在控制系统方面，先后研制出了不同的控制器来保证塑料制品的质量，减少废品，提高注射成型加工的生产效率^[4]。

原始的注塑机主要采用硬接线连接控制即继电器控制方式，这种方式易于实现，但控制范围有限，控制精度低。到上世纪 60 年代末，随着电子工业的发展，这种控制系统逐渐被新型控制系统取代，加工精度也有相对的提高，但对注塑机精密程度的要求也随之提高了，开环控制已不能满足需求。上世纪 70 年代中期，欧美一些厂家提出了对注塑机参数进行闭环控制的设想。但是，由于研制初期尚未弄清哪些过程参数应该加以控制。控制参数很多，研制费用昂贵。上世纪 80 年代初期，由研究才得出结论：对注射过程中的一些重要参数，如注射速度、充模压力、保压压力、熔料温度等参数进行闭环控制，可以大大改善注塑制品的质量。当时一些制造厂家开发了一系列相应的装置，如 Negri-Bossi 公司的 ECI 和 Syntrolzh 系统，通过对模腔压力（充模压力、保压压力）的闭环控制，产品的质量有了很大的提高。

同时，随着微电子技术的飞跃发展，计算机和微处理器介入了注塑机的控制系统，使闭环系统的研制费用得以减少，推动了注塑机控制系统的更新换代。上世纪 70 年代末，欧洲一些厂家开发了专用于注塑机的可编程序逻辑控制器 PLC(Programmable Logic Controller)，该装置编程方便、结构紧凑、可靠性高、抗干扰能力强、改变工艺条件方便，但是由于带有模拟量输入/输出控制的可编程序逻辑控制器 PLC 价格较高，在实际控制中应用不多。

电液比例技术和微机控制技术的结合，使注塑机的控制系统进入一个崭新的领域。因微处理器具有逻辑运算功能，适用于开环控制、闭环控制和检测控制。微处理器除了能完成所有的工业逻辑控制外，对料筒温度、注射速度、充模压力、保压压力等过程参数可以采用闭环控制，还配有 CRT 在线显示，具有参数记忆等功能，如 Vickers 公司的 SYSTEM230 系统，日本三菱公司的 MAG 系统等^[7]。

由大型计算机与微处理机结合组成监控系统，也是注塑机发展的一个方向。上世纪

80 年代中期，日本三菱公司研制了最多可以控制八台注塑机的集中监控系统。由单个注塑机的控制向整个生产车间的自动化管理发展。该系统具有多功能人机接口，可以存取，并以各种画面显示构成参数，控制变量及其它参数。对模具的使用，不同类型制品的成型条件，异常情况等进行集中监督和管理。西德 Battenfeld 公司研制的计算机可以管理 15 台注塑机，这种方式可以保证产品精度，并能将最优工艺条件存储在计算机中，从而保证每一批产品的质量稳定。在注塑制品的生产中，制品的质量与原材料及成型设备的选择、成型工艺、模具条件，环境状况等密切相关。就国际塑料机械的发展而言，正朝着快速、高效、节能、精密、占地面积小、环保以及低成本的方向发展。

随着自动化和计算机技术的发展，西方工业国家已成功推出新一代自动塑料机械，不仅自动化程度高，易操作，而且生产效率和产品质量也大大提高。

在国际上注塑机工业不断进步的推动下，国内的注塑机工业也在快速发展。注塑机自上世纪 30 年代问世以来，主机结构及传动原理变化不大，但其控制却在不断更新和发展，国外已由手动操作的第一代产品发展成为基于微机闭环控制的第五代产品，自动化程度不断提高，国内直到 20 世纪 50 年代末才开始生产注塑机，由于采取了引进消化、吸收和逐步提高、国产化的方针，再加上钢材价格上涨，石化工业能够提供原料（包括工程塑料），便形成了“以塑代钢”，“以注塑代压缩成型”的趋势。国内注塑机的发展速度异常快，但控制水平较低，档次不高，绝大多数仍基于继电器和可编程控制器，自动化程度较低，产品竞争能力不强^[5]。

随着注塑机在行业中的比重不断加大，其出口量已超过纸机，成为我国轻工系统最大宗的出口设备。注塑机的节能高效、自动化程度高的性能已为用户所追求；同时，对于大中规模注塑工厂（车间），甚至批量少、品种多的小规模注塑车间，在保证制品质量的前提下，如何利用成熟的自动化设备，提高产品精度，降低废品、次品率，节约原材料和能源，来降低成本，增强市场竞争已引起人们的高度重视，采用先进的控制技术和管理手段已成为必然的趋势^[6]。

现代注塑机的发展重点在于提高控制水平和整机自动化程度，以及整机优化设计和加工工艺的改进等方面，满足对于注塑制品质量及节能的要求。通过不断完善液压系统，采用先进的控制手段，性能优良的设备、质量可靠的电气系统及液压系统，以确保注塑机动作灵敏、运行稳定和可靠，最终达到改善劳动条件、减轻维修工作量、降低能耗、节省原料的目的，最终朝着高速、高效、高精度、高质量、低噪声、自动化、节能，以及降低生产成本的方向发展^[7]。

在这样的时代背景下，对于注塑机的各种研究项目已经投入到实际操作当中。为了

给研究该课题的使用者提供更好的科研环境，学校购进了宁波海天集团职业股份有限公司出产的 HTF58X2 型塑料注射成型机。该厂生产的 HTF58X2 型注塑机控制精度较高，整体性能良好。该注塑机的注射装置为往复螺杆预塑式，这是目前应用较普遍的一种类型。因此对该注塑机进行研究具有一定的普遍性和实际意义。

1.3 温度控制算法发展概况

温度控制广泛应用于社会生活的各个领域，如家电、汽车、材料、电力电子等。在塑料的注塑过程中，熔体的温度是一个很重要的参数，它直接影响注塑成型产品的质量。关于温度控制的算法有很多，从简单实用的 PID 控制到近些年来成为研究热点的温度智能控制，下面就对这些控制方案做一个简要介绍。

PID 控制自 19 世纪 40 年代开始以来，广泛应用在工业生产中，长期以来，由于其结构简单、实用、价格低，在广泛的过程领域内可以实现满意的控制。其缺点是现场 PID 参数整定麻烦，被控对象模型参数难以确定，外界干扰会使控制漂离最佳状态。文献[9]提出一种 PID 参数自整定的温度控制算法。采用简化临界比例度整定法，只需整定一个参数，提高了参数的整定效率，用编程的方法实现在线参数自整定。应用这种规则的系统特点是其瞬态响应超调量小，抗干扰能力强，且振荡有足够的阻尼，具有良好的选择性和灵敏度。

人工神经网络是一种采用数理模型的方法模拟生物神经细胞结构及对信息的记忆和处理而构成的信息处理方法。它以其高度的非线性映射，自组织、自学习和联想记忆等功能，可对复杂的非线性系统建模。该方法响应速度快，抗干扰能力强，算法简单，且易于用硬件和软件实现。在温控系统中，将温度的影响因素如气温、外加电压、以及被加热物体性质等作为网络的输入，将其输出作为 PID 控制器的参数，以实验数据作为样本，在微机上反复迭代，随实验与研究的进行与深入，自我完善与修正，直至系统收敛，得到网络权值，达到自整定 PID 控制器参数的目的^{[10][11]}。MNN(memory neuron network)在每个网络节点增加了记忆神经元，在学习动态非线性系统时，不必知道实际系统过多的结构信息，同时当滞后较大时不会造成网络庞大难以训练^[12]。

模糊控制是基于模糊逻辑的描述一个过程的控制算法，主要嵌入操作人员的经验和直觉知识。它适用于控制不易取得精确数学模型和数学模型不确定或经常变化的对象。同传统的 PID 控制比较，模糊控制响应快，超调量小，参数变化不敏感^{[13][14]}。然而，模糊控制的局限性在于对控制系统设计分析和标准缺乏系统的方法步骤，规则库缺乏完整性，没有明确的控制结构。PID 控制器结构简单、明确，能满足大量工业过程的控制

要求，特别是其强鲁棒性能较好适应过程工况的大范围变动。但 PID 本质是线性控制而模糊控制具有智能性，属于非线性领域，因此，将模糊控制与 PID 结合将具备两者的优点。

文献[15]用过程的运行状态(温度偏差及温度变化率)确定 PID 控制器参数，用 PID 控制律确定控制作用。该过程中的主要问题是合理地获得 PID 参数的模糊校正规则，其实质是一种以模糊规则调节 PID 参数的自适应控制，即在一般 PID 控制系统基础上，加上一个模糊控制规则环节。

文献[16]给出不同实时状态下对 PID 参数的推理结果，当温差较大时采用 fuzzy 控制，响应速度快，动态性能好；当温差较小时采用 PID 控制，使其静态性能好，满足系统精度要求。因此 fuzzy-PID 复合控制，比单一的模糊控制或 PID 调节器有更好的控制性能。

文献[17]采用模糊自适应 PID 设计方法，根据人们要求的温度曲线，由计算机系统进行监控，根据模糊推理判断，实现对任何一种模型参数的系统都能自动调节其 PID 参数，使输出与温度曲线趋于一致实现快速响应特性与超调量最优的统一^[18]。

近些年来模糊逻辑控制取得了巨大成功。但是，模糊控制所基于的专家经验不易获得，一成不变的控制规则也很难适应被控制系统的非线性、时变性等问题，严重影响控制效果。因此应使模糊控制向着自适应方向发展，使模糊控制规则隶属函数模糊量化在控制过程自动的调整和完善。

文献[19]提供了一种自适应模糊控制方法，利用神经网络的学习能力来修正偏差和偏差变化的比例系数，达到优化模糊控制器的作用，从而进一步改进实时控制效果，以便应用于温度过程控制中，其优点动态响应快，能达到高精度的快速控制，具有极强的鲁棒性和适应能力。

文献[20]提出三层前向模糊 BP 神经网络，选择温度采样误差值，误差积分和变化值作为网络输入，用模糊控制理论赋予隐层含义，确定神经元个数。用高斯核函数作为节点的激励函数，忽略远离中心的神经元输出，计算隐层输出。通过给定的教师学习，以调整网络权值，以使目标函数达到最小。这种控制算法在稳定性上要优于常规 PID 算法^[21]。

遗传算法（Genetic Algorithms 简称 GA）是模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程的全局优化搜索算法。它将生物进化过程中适者生存规则与群体内部染色体的随机信息交换机制相结合，通过正确的编码机制和适应度函数的选择来操作称为染色体的二进制串 1 或 0。引入了如繁殖交叉和变异等方法，在所求解的问题空间上进行全

局的、并行的、随机的搜索优化，朝全局最优方向收敛。基于遗传算法温控系统的设计就是将传感器得到的温度信号放大，数字化送入单片机，单片机将其与给定温度进行比较，用遗传算法来优化 3 个 PID 参数，然后将控制量输出。

文献[22]将 3 个 PID 参数串接在一起构成一个完整的染色体。从而构成遗传空间中的个体，通过繁殖交叉和变异遗传操作，生成新一代群体，经过多次搜索获得最大适应度值的个体即所求。在硬件上采用单片机控制。具有调试方便温控精度高，抗干扰性强等优点。在软件上采用遗传算法对 PID 参数进行优化控制。具有很高的稳定度，温控精度高。

文献[23]提出基于神经网络的方法，将模式辨识、预测最优控制与神经网络结合，由神经元网络模型预估器辨识系统模型，并实时为控制器提供参考输入，由最优控制器对数据进行处理、决策，选定最优的控制量，达到温度最佳控制的目的。神经网络应用广泛的 BP 网络，由于其收敛慢和存在局部最小点，因此将遗传算法和 BP 算法结合得到的遗传 BP(GA-BP)算法作为网络预估器的学习算法。该系统能使温度随外界干扰条件的变化，实时的调节网络和控制规律，具有良好的温度跟踪性能和抗干扰能力。

综上所述，实现温控系统的参数自调整，将线性控制与非线性相结合，使温度能满足用户的需要是温控系统的最终目的。在实际应用中，应该根据具体的应用场合、不同的加热对象和所要求的控制曲线和控制精度，选择不同的系统方法。

1.4 本文的研究内容

本文是以海天公司生产的型号为 HTF58X2 的注塑机为背景，进行控制系统的改造和温度控制策略的研究的。

本文完成第一项工作是在不破坏原有注塑机控制系统的前提下，将工业生产用注塑机，通过线路改造和软件设计，使其满足实验室研究和教学使用的需求。第三章主要介绍了这部分内容，大体分为两块，硬件系统的设计改造和控制系统的软件设计。线路改造部分分析了 I/O 信号特性和数据采集卡的功能，并分别阐述了具体的线路改造方案。在软件设计部分，划分出软件功能模块，给出了下位机软件主程序流程图和监控画面的设计实例。

本文完成的第二项工作是对料筒温度控制算法的研究。首先建立料筒温度系统的数学模型，这里使用了基于最小二乘法的阶跃响应辨识法。其次，设计了模糊变系数 PID 算法，并应用于料筒温度控制系统。最后，将其实验结果与积分分离 PID 控制算法的结果进行比较，并得出结论。

果进行比较，并得出结论。

第二章 注塑机的组成及生产工艺

注塑机又称之为塑料注射成型机，是一类把塑料原料加热熔化后注射到模具中，经冷却形成塑料制品的机床。它具有高生产效率，产品一次成型的优点，所以在加工制造业的各个领域中得到了广泛应用。本章将以海天公司生产的 HTF58X2 型注塑机为研究对象介绍注塑机的组成和基本工作原理。

2.1 注塑机的结构组成

注塑机的具体组成部分有：注射系统，锁模系统，加热冷却系统，模具系统，液压油路系统，电气控制系统，安全保护、监测系统以及供料等辅助系统^[4]。一个典型的注塑成型机的结构如图 2.1 所示。

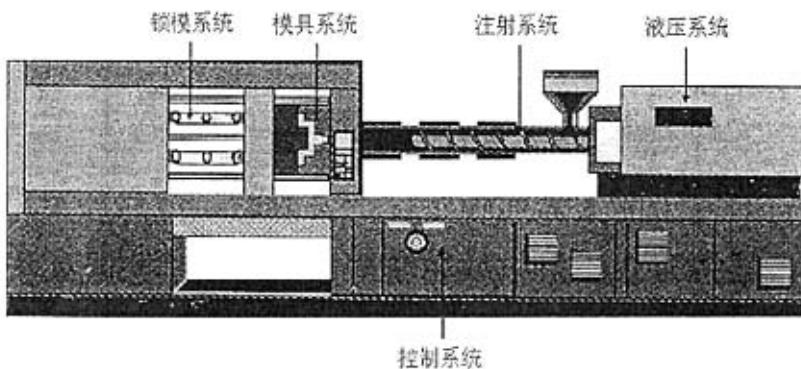


图 2.1 注塑机的基本组成部分

Fig. 2.1 Configuration of IMM

1. 注塑系统

注塑装置的作用是将塑料均匀的塑化，并注射到模具型腔中。注射系统主要由塑化装置、螺杆驱动装置、计量装置、注射动作装置、注射座整体移动装置、行程限位装置以及加料装置等组成。

塑化装置又由螺杆和加热料筒组成，在螺杆头部装有防止熔体倒流的止逆环和各种剪切或混炼元件；螺杆驱动装置主要由减速装置、轴承支架、主轴套和螺杆驱动电机或液压马达组成。预塑化时，动力通过主轴套和轴承支架上的减速装置带动螺杆旋转。注射装置主要由注射液压缸和活塞及喷嘴组成。在注射时，液压缸产生注射推力，通过主

轴推动螺杆向头部熔体施加高压，使熔体通过喷嘴充入模腔。计量装置是由支架和行程挡块组成的装置，它与螺杆预塑后退动作相联系，起塑化和计量作用。注射座是一个可以在机身上移动的基座，塑化装置、注射装置以及计量装置和料斗都固定在注射座上。注射座在液压缸作用下，可以做整体前进或后退，使喷嘴与模具接触或离开^[8]。

2. 锁模系统

锁模系统的作用是推动模具进行开合运动，使动模板作启闭模往返移动，并锁紧模具。锁模力要大于注射压力，使塑料制品没有飞边。锁模系统主要由四根拉杆和螺母把前后模板联结起来形成整体刚性框架。动模板装在前、后模板之间，后模板上固定合模液压缸，动模板在合模液压缸的作用下以四根拉杆为导向柱作启闭模运动。模具的动模装在动模板上而定模则装在前固定模板上。当模具闭合后，在合模液压缸压力作用下，产生额定合模力，锁紧模具，防止模具注入高压熔体时模具的型腔张开。当合模时，模具拉杆和前、后模板形成为封闭系统达到平衡状态。

在动模板的后侧装有液压及机械顶出装置。动模板在开启模具时，可通过模具中的顶出机构，从模腔中顶出制品。在动模板或定模板上还装有调模机构，以便在一定范围内调节模具厚度。在液压机械式合模机构中，还要通过调模机构来调试合模力的大小，控制超载。

3. 模具系统

注塑模具系统包含导柱、固定侧与可动侧安装板，以及模腔、主浇道，分流道系统、顶出销及带冷却管路的模板。注塑模具基本上为一热交换器，熔融的热塑性塑料在模具内固化成所需的形状和尺寸。实验室注塑机采用模温机控制模具温度，其传热介质是传热煤油。

4. 液压系统

注塑机的液压系统为模具的打开和关闭提供动力，同时在锁模时为模具提供动力。此外，螺杆的旋转，螺杆推进，顶出杆以及动模板的移动，都靠液压系统提供动力。液压回路一般由负责控制系统压力与流量的主回路和去各执行机构的分回路组成。液压回路由进出过滤器、液压泵、比例压力阀（控制压力变化）、比例流量阀（控制速度变化）、方向阀、管路、油箱、交换器以及各种压力、温度指示仪表等组成^[24]。

5. 加热、冷却系统

加热系统是用来加热料筒及注射喷嘴的，注塑机料筒一般采用电阻加热圈，套在料筒外部并用热电偶分段检测。热量通过筒壁向内传递，为物料塑化提供热源。

冷却系统用来冷却液压油。它是一个封闭的循环系统，能将冷却水分配到几个独立

的回路上去。

6. 电气控制系统

电气控制系统是注塑机的“中枢神经”系统，它控制着注塑机的工作流程及各部分动作；还可以对温度、位移、压力、速度和转速等参数进行控制。闭环调节系统主要由计算机及其接口电路、各种检测原件及液压驱动放大电路组成。实际上，电气控制系统是与机械液压系统结合起来，对注塑机的工艺程序进行精确稳定的控制。

7. 安全保护与监测系统

注塑机的安全装置主要用于保护人和机器的安全，由安全门、行程开关、限位开关、光电检测元件等组成，实现电气、机械、液压的连锁保护。

监测系统主要对注塑机的油温、料温、系统超载以及工艺和设备故障进行监测，发现异常情况即进行指示或报警。

2.2 注塑机工作循环原理

获得注塑制品的过程，称之为注塑成型或者注射成型，或者简单的称之为注塑。注塑成型的基本过程是：颗粒状的高分子材料（以下简称为塑料）经过注塑机螺杆的挤压和加热，成为熔融状态的可以流动的熔体。在螺杆的推动下，塑料熔体通过注塑机喷嘴、模具的主流道、分流道和浇口进入模具型腔，成型出具有一定形状和尺寸制品的过程。注塑周期主要由闭模、注射座前进、注射、保压、预塑计量、冷却、开模、顶出制品等程序组成。一个完整的注塑工艺流程如图 2.2 所示^[25]。

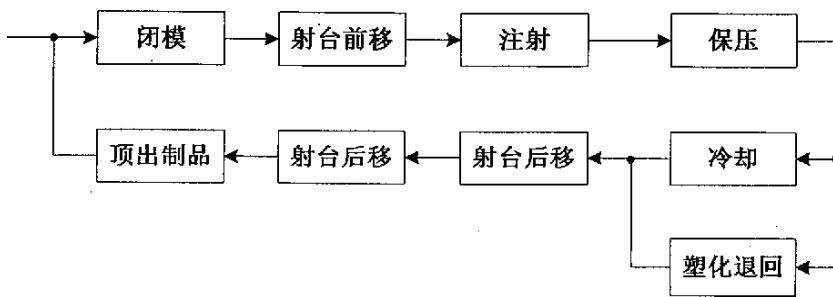


图 2.2 注塑机工艺流程图

Fig. 2.2 Production flow of IMM

近年来虽然注塑工艺和注塑设备有较大的发展，但是就多数通用注塑机而言，主要工艺过程基本是一样的，如图 2.3 所示。

1. 注射前准备阶段

注塑机工作的原始状态是动模板在开启位置，模具的动模和定模分开，注射座在后

退位置，料筒的喷嘴和定模呈非接触状态。注射成型机的成型周期一般从模具闭合开始。参照图 2.3(a)，注塑周期开始后，动模板在合模机构的作用下向前移动，为防止动模板惯性冲击需慢速启动，而在运行期间为缩短工作周期，模具以低压力快速进行移动，当动模与固定在前模板上的模具的定模快要接触时，为防止冲击和安全要减速。为保护模具安全，防止型腔中有异物，合模的动力系统自动切换成低压（即试合模压力）、低速，在模具中无异物时，动模将继续向前移动，当碰至限位开关时，动力系统切换进入高压锁模程序，使模具闭紧，达到所调整的合模力，到此完成整个锁模程序。

当闭模到位后，注射座向定模板方向移动，使料筒上的喷嘴和模具的主浇套相接触。于是接通了喷嘴、模具浇道、成型模腔系统的通道，这一过程为注射座前进程序如图 2.3(a)。

2. 注射阶段

当注射座到位，喷嘴与主浇套压紧后，进入注射充模过程，液压系统向注射液压缸供高压油，推动注射活塞并连同螺杆向前运动将螺杆头部的塑料熔体注入模腔中，并将模腔中的气体从模具分型面驱赶出去，如图 2.3(b)所示。此时螺杆头部作用于熔料上的压力为注射压力，又称一次压力。

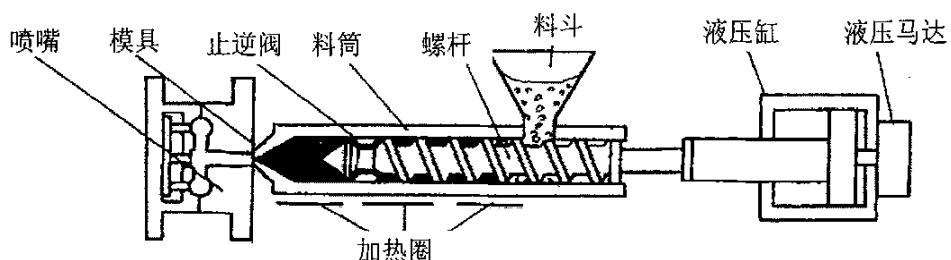
当注射过程完成后，整个模腔被熔体所充满，这时，注射螺杆已行至最前位置，由于低温模具的冷却作用，使注入模腔内的熔料产生收缩，为制得质量致密的制品，防止模腔中的熔体反压倒流和对制品补偿收缩，注射液压缸内必须保持一定的压力，推动螺杆持续向模具中的熔料施加压力一直到浇口处熔体冷却封口为止，如图 2.3(c)所示。此时螺杆作用于熔料上的压力称之为保压压力，又称二次压力。在保压时，螺杆因补缩而会有少量的前移。

3. 保压阶段

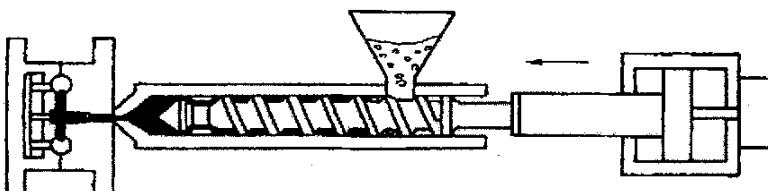
当保压进行到模腔内的熔料失去从浇口回流可能性时（即浇口封闭），注射液压缸内保压压力即可卸去（此时合模液压缸内的高压也可撤除），使制品在模内冷却定型。此时螺杆在液压马达的驱动下旋转，将来自料斗的粒状塑料沿螺槽向前输送。

4. 冷却塑化阶段

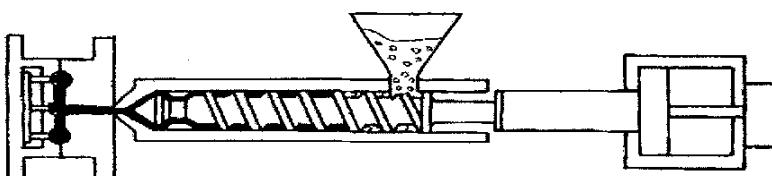
塑料在螺杆剪切热与料筒加热圈的同时供热下很快塑化并熔融，转变成粘流体存贮在螺杆前部的存贮室内；与此同时，由于螺杆头部熔料压力的作用，螺杆在熔体的反作用力推动下，边旋转边向后移动，使注射活塞回程，把注射液压缸进油腔的工作油压回油箱。这一过程为预塑过程，如图 2.3(d)所示；螺杆在塑化时的后移量，即表示了螺杆头部所积存的熔料体积量。当螺杆后退到所设定位置时，螺杆即停止转动，计量程序结



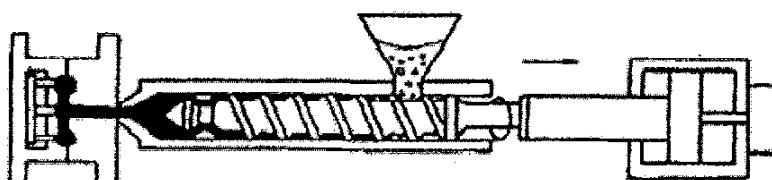
(a) 锁模，模具合上并锁紧
 (a) Mold close, close the mold and lock it tightly



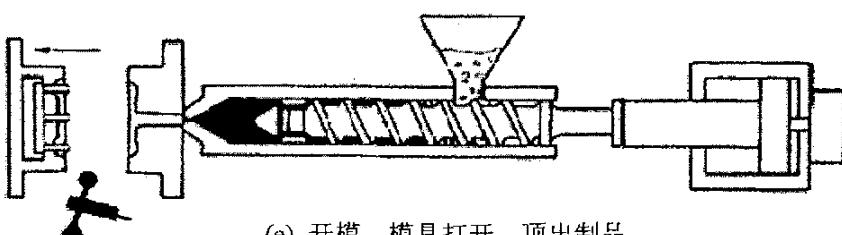
(b) 注射，熔融状态的塑料射入模具
 (b) Injection, inject melted plastic into the mold



(c) 保压，对塑料完全充满的模腔继续施加压力
 (c) Packing, keep on bringing the pressure to bear on the mold cavity full of plastic



(d) 冷却，塑料塑化并计量
 (d) Cooling, plastinate and measure plastic material



(e) 开模，模具打开，顶出制品
 (e) Mold open, open the mold and eject product

图 2.3 螺杆式注塑机的注塑过程

Fig. 2.3 Injection flowchart of shuttle screw IMM

束，准备下一次注射。制品冷却与螺杆塑化在时间上通常是重叠的，在一般情况下，要求螺杆塑化计量时间要少于制品冷却时间。

5. 制品取出阶段

螺杆塑化计量完毕后，为了使喷嘴不至于因长时间和冷模接触而形成冷料等缘故，经常需要将喷嘴撤离模具，即注射装置后退。此动作进行与否和先后的程序，机器均可进行选择。当注射装置后退到位后，合模液压缸回油腔进压力油使动模板回程，开始启模，动模板到终止位置，顶出装置动作使制品脱落，如 2.3(e)所示^[26]。

2.3 实验用注塑机简介

2.3.1 注塑机的基本参数

注塑机是实现塑料注塑加工成型的设备。实验所用注塑机为宁波海天公司生产的往复螺杆式注塑机，机器型号为 HTF58X2（版本：B）机器的锁模力为 580KN，最大注射量为 80 克(PS)。其主要机器指标如表 2.1 所示。

表 2.1 实验用注塑机主要指标

Table 2.1 Primary parameters of IMM for experiment

INJECTION UNIT		
螺杆直径	Screw Diameter	26 mm
螺杆长径比	Screw L/D Ratio	24 L/D
理论容量	Shot Size (Theoretical)	66 cm ²
注射重量	Injection Weight (PS)	80 g
注射压力	Injection Pressure	245 Mpa
螺杆转速	Screw Speed	0-255 rpm
CLAMPING UNIT		
合模力	Clamp Tonnage	580 KN
移模行程	Toggle Stroke	270 mm
最大模厚	Max Mold Height	320 mm
最小模厚	Min Mold Height	120 mm
顶出行程	Ejector Stroke	70 mm
顶出力	Ejector Tonnage	22 KN
OTHERS		
最大油泵压力	Max Pump Pressure	17.5 Mpa
油泵马达	Pump Motor Power	11 kw
电热功率	Heater Power	5.15 kw
外形尺寸	Machine Dimension (L*W*H)	4.04*1.0*1.72 m
重量	Machine Weight	2.5 t
油箱容积	Oil Tank Capacity	180 L

2.3.2 注塑机液压控制系统

注塑机的工作特点以及众多的运动部件使得用液压系统传动及控制显得极为方便。注塑机液压系统除了满足规定的工作程序，并且使其系统压力、流量能精确、连续的按照工艺要求进行变化之外，它还具有良好的稳定性、重复精度，工作可靠，噪音低，密封性好，易于安装调整，维修保养，节能等特点。因此，注塑机液压系统的好坏是决定注塑机性能好坏的关键问题之一。

注塑机上液压控制系统的发展大致经历了三个历程：

一是常规液压控制系统，采用常规液压元件，通过继电器和 PC 可编程序控制器控制电磁阀通断，实现执行机构各种循环。

二是伺服控制系统：采用伺服电机、伺服放大器、伺服阀和其他液压元件组成闭环控制系统，使执行机构能以一定精度自动按输入电信号的变化规律而动作。

三是比例控制系统：采用电液比例控制装置，使被控阀能按照输入电信号连续、按比例的变化，实现压力、位移、流量、速度等连续成比例的切换。并在此基础上，发展了由比例技术与插装阀相结合的插装比例控制技术^[27]。

注塑机驱动的主要特点就是动作过程的参数（压力、速度）随工艺过程的要求而变化，为了保证注塑机按工艺过程预定的要求（压力、速度、温度和时间）和动作程序准确有效地工作，本系统比例压力、流量控制采用日本油研 EFBG-03 电液比例压力流量复合阀。液压系统的压力由负载和同时受压力阀及流量先导阀影响的压力阀主调节阀芯开度决定，并通过比例流量阀和比例压力阀来分别控制速度和压力。压力阀始终接在液压系统中。在实施速度控制时，由于系统的压力低于压力阀预先设定值，因而压力先导级起限压作用，系统压力由负载决定；压力控制时，压力阀基于溢流阀原理工作。

动力系统由液压系统构成，其液压原理如图 2.4 所示，液压油路系统开关阀工作顺序可查阅相关技术文档。两者配合研读即可得注塑机机械动作全程控制阀门的动作情况。

2.4 本章小结

本章首先介绍了螺杆式注塑机的结构组成及工作循环原理，随后介绍了目前实验室使用的注塑的概况，包括机器的基本参数和电液系统的工作原理。这些工作的目的是熟悉注塑机的结构和生产工艺，为实现原注塑机控制系统改造和控制系统软件设计打下基础，因此具有重要的指导意义。

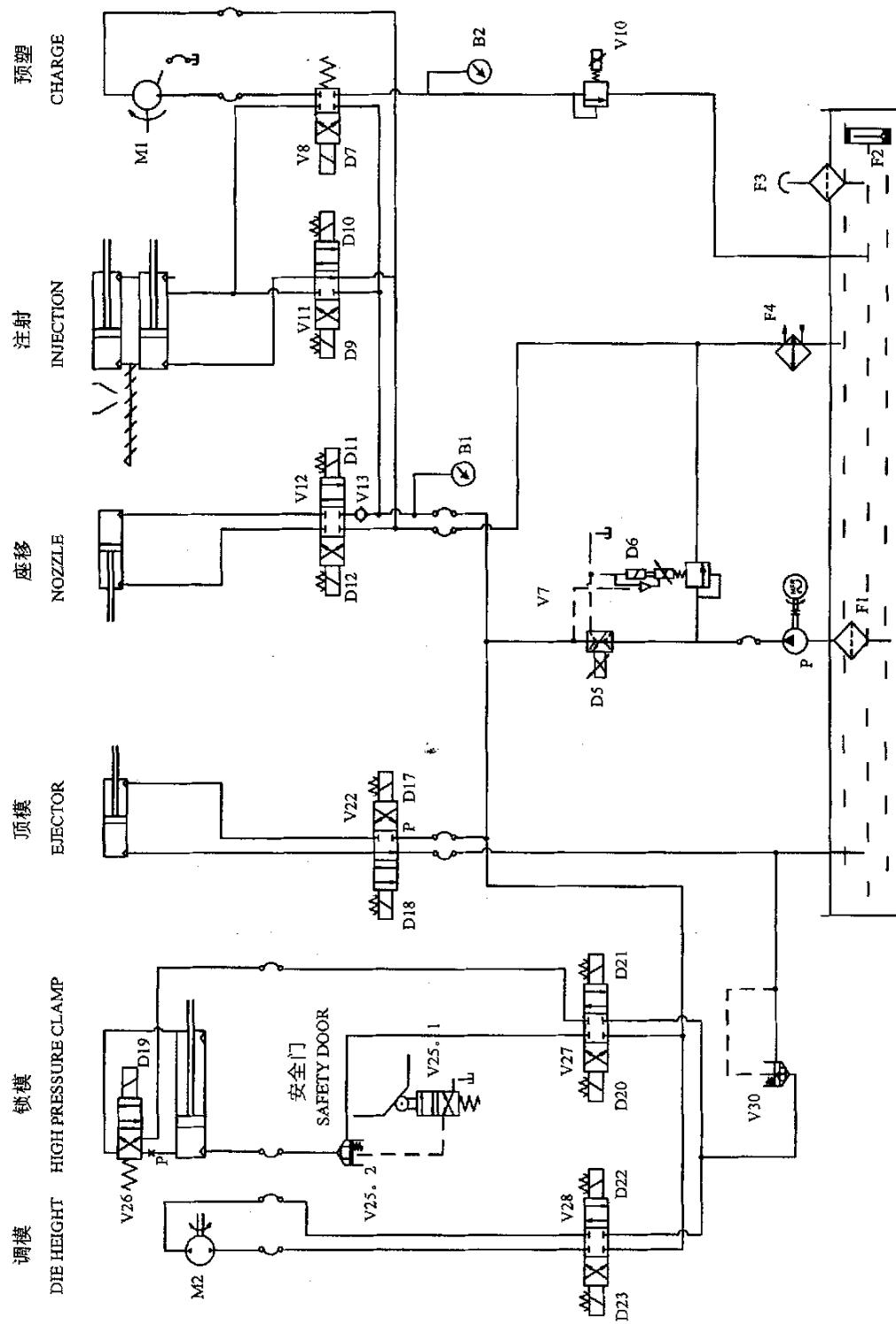


图 2.4 液压系统原理图

Fig. 2.4 The principle of hydraulic system

第三章 注塑机控制系统设计

实验室注塑机自带控制系统可以很好的实现注塑生产需求，它功能齐全，方便操作。但是，其内置的控制算法不能修改，也无法通过外部计算机对注塑生产过程进行监测控制，因此原系统不适合实验、教学和研究使用。为了解决这个问题，实验室对注塑机原有控制系统进行改造。本章将分硬件和软件两部分来详细介绍控制系统改造的设计思想和具体方案。

3.1 注塑机硬件系统设计改造

3.1.1 注塑机硬件改造的总体方案

为满足实验与科研方面的需求，确定了在不破坏原注塑机控制系统的基础上，实现原、新控制系统的信号共享和切换控制的改造目标。信号共享是指传感器采集到的反应注塑机工作状态的部分模拟信号和数字信号，通过线路的并接实现双系统共享；切换控制是指通过转换开关手动选择，由原系统控制还是改造后的新系统控制，二者不能同时发挥控制作用。

出于软件设计方面的考虑，新的计算机控制系统没有采取常规的 PLC 模式，而是采用了研华数据采集卡和工控机的实现方式，由数据采集卡来完成模拟量 I/O 和开关量 I/O 信号的采集和发送，如图 3.1 所示。

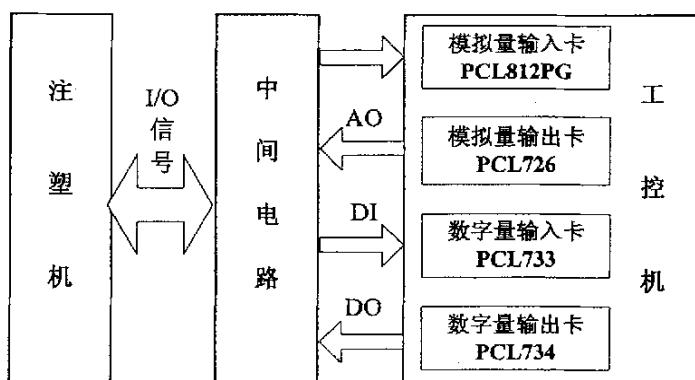


图 3.1 实验用计算机控制系统硬件组成示意图

Fig. 3.1 Configuration of computer control system for experiment

在整个硬件系统的设计中，注塑机 I/O 信号的种类特性和数据采集卡的功能，是决

定整个设计方案的关键。注塑机控制系统共有 10 个模拟量输入，2 个模拟量输出，9 个开关量输入；17 个开关量输出。研华数据采集卡共 4 块，实现功能如图 3.1 所示。中间电路是实现 I/O 信号和采集卡对接的桥梁，同时它也要实现原系统与新系统的信号共享和切换控制。随后的两小节内容将分两个部分对控制系统硬件改造方法进行介绍，第一部分将先对 I/O 信号的种类特性和采集卡功能进行介绍，第二部分具体给出各部分线路改造电路的原理图。

3.1.2 I/O 信号特性与采集卡功能介绍

3.1.2.1 模拟量输入部分

上文中提到，注塑机控制系统的模拟量输入信号共有 10 个。其中，油温信号用于监测液压机的油箱的温度，保证液压机安全工作；喷嘴和三段料桶的温度作为加热部分的反馈，用以保证设备能够准确的将料桶温度控制在设定范围内；模温信号用来监测模具温度，确保其温度达到正常生产的要求。注射位置尺测量的是螺杆位置，通过对其位置的测量，可以计量出预塑的加料多少，以控制每个动作循环的加料量，还可以通过位置折算出螺杆速度，对注射速度进行闭环控制；合模位置尺采集的位置信号用于判断模具位置，在开模、合模等动作中起到确保动作到位的作用；托模位置尺的位移信号与合模位置尺相类似，不过它判断的是顶针的位置，在托进、托退等动作中发挥作用。压力传感器采集到的模腔压力，用于对保压过程中的模腔压力进行精确检测控制，通过检测模腔压力可以实现保压阶段压力控制，同时也为实现注射转保压（V/P 转换）提供了重要依据。

控制系统采用研华 PCL-812PG 增强型数据采集卡采集模拟量。它是一款 ISA 总线的半长卡，能够为 PC/AT 及其兼容系统提供五种最需要的测量与控制功能。这些功能包括：A/D 转换，D/A 转换，数字量输入，数字量输出及计数器/定时器功能。该卡提供 16 路 12 位模拟量输入，2 路 12 位模拟量输出，16 路数字输入，16 路数字输出和一个可编程计数器/定时器。该卡的最大的 A/D 采样速率可以达到 30KHz，变增益的输入范围为：±10V，±5V，±2.5V，±1.25V，±0.625V，±0.3125V；A/D 触发方式分为：软件触发，内部定时器触发，和外部触发。

由于各类模拟量的信号制不同，如温度变送器输出 1~5V 模拟信号，位置尺提供 0~10V 模拟信号，因此需要在编制采集程序时选择不同的增益来满足不同信号制的要求。需要注意的是压力传感器输出 4~20mA 电流信号，需要通过串入 250 欧电阻的方法，将电流信号转换为 1~5V 电压信号，再接入采集卡。表 3.1 给出了各模拟量输入信号详

细说明，以及采集卡中相应的接入通道和增益选择情况，A/D 触发方式为软件触发。

表 3.1 模拟量输入信号表
Table 3.1 Analog input signals

序号	信号名称	信号量程	单位	信号制	采集卡通道号	增益
1	油温	0~450	℃	K型电耦	PCL_812PG_AD3	1
2	喷嘴温度	0~450	℃	K型电耦	PCL_812PG_AD4	1
3	料筒一段温度	0~450	℃	K型电耦	PCL_812PG_AD5	1
4	料筒二段温度	0~450	℃	K型电耦	PCL_812PG_AD6	1
5	料筒三段温度	0~450	℃	K型电耦	PCL_812PG_AD7	1
6	模具温度	0~450	℃	K型电耦	PCL_812PG_AD8	1
7	注射位置尺	0~130	mm	0~10V	PCL_812PG_AD0	0
8	合模位置尺	0~375	mm	0~10V	PCL_812PG_AD1	0
9	托模位置尺	0~75	mm	0~10V	PCL_812PGAD2	0
10	模腔压力	0~200	MPa	4~20mA	PCL_812PG_AD9	1

3.1.2.2 模拟量输出部分

模拟量输出信号包括系统压力和系统流量两个参数，这两个参数的控制是由电液比例溢流调速阀(EFBG-03-60-C)控制的，电液比例溢流调速阀用来控制液压机输出的压力和流量。压力和流量是至关重要的两个参数，它们与电磁阀配合，通过液压回路，实现注塑过程每个动作的控制。

控制系统采用研华 PCL-726 作为模拟量输出卡。PCL-726 为 6 通道 D/A 输出卡，它的主要特点是，6 路独立的 D/A 输出通道，12 位分辨率双缓冲 D/A 转换器；多种电压范围：双极性，±10V、±5V，单极性，0~5V、0~10V，4~20mA 电流环(sink)；16 个数字量输入通道和 16 个数字量输出通道。

比例溢流调速阀的驱动控制信号为 0~0.8A，而 D/A 输出卡的输出范围不能达到要求，因此要在两者之间加入放大板，放大板的输入信号为 0~10V，输出信号为 0~0.8A，这样就实现了 D/A 输出卡对溢流调速阀的驱动。表 3.2 给出了各模拟量输出信号详细说明，以及输出卡中相应的接入通道。

表 3.2 模拟量输出信号表
Table 3.2 Analog output signals

序号	信号名称	信号量程	单位	信号制	采集卡通道号	输出
1	比例流量	1~125	l/min	0~0.8A	PCL_726_DA1	0~10V
2	比例压力	0~1.4	MPa	0~0.8A	PCL_726_DA2	0~10V

3.1.2.3 开关量输入部分

注塑机控制系统的开关量输入信号共有 9 个，它们大多被用来判断各动作是否准确到位，如合模终行程开关，或者用来作为计数器，如螺杆转速近接开关。

控制系统采用研华 PCL-733 数字量输入卡采集开关量。PCL-733 是 32 路隔离数字量输入卡，能够提供隔离数字量输入通道和隔离数字量输出通道，隔离保护电压可达到 2500VDC。它是要求采取高电压隔离工业应用的理想选择。此外，它还具有中断响应能力和用于隔离输入通道的 D 型接头。表 3.3 给出了各开关量输入信号的详细说明，以及采集卡中相应的接入通道。

表 3.3 开关量输入信号表
Table 3.3 Switch input signals

序号	信号名称	信号制	采集卡通道号
1	合模终	常开触点	PCL_733_IDI6
2	注射安全门	常开触点	PCL_733_IDI10
3	托模退止	接近开关	PCL_733_IDI11
4	整前停止	常开触点	PCL_733_IDI13
5	螺杆转速	接近开关	PCL_733_IDI16
6	自动调模电眼	接近开关	PCL_733_IDI17
7	产品检测电眼	接近开关	PCL_733_IDI18
8	锁模安全门	常开触点	PCL_733_IDI20
9	润滑压力继电器	常开触点	PCL_733_IDI29

3.1.2.4 开关量输出部分

注塑机控制系统的开关量输出信号共有 13 个。开关量输出是用来驱动电磁换向阀换向的，它使相应的液压回路导通，再配合系统压力和系统流量来完成注塑机的每一个动作。表 2.2（电磁铁动作图），就是通过开关量输出来实现的，可见开关量输出控制效果的好坏，直接决定了注塑机生产能否安全顺利的进行。

控制系统采用研华 PCL-734 数字量输出卡输出开关量。PCL-734 是 32 路隔离数字量输出卡，它的隔离保护性能与 PCL-733 类似。它的主要特点是，32 路隔离数字量输出通道，高输出驱动能力，输出通道高电压隔离(1000VDC)，隔离输出通道上的高承载电流 (200mA/每通道)，用于电感负载的完整抑制二极管，宽输出范围(5~40VDC)，以及用于隔离输出通道的 D 型接口。

电磁换向阀的工作电流都比较高，一般可以达到 1A 以上，虽然 PCL-734 的单输出通道电流可达 200mA，但还远达不到使用要求，因此这里还需要使用继电器隔离驱动

电磁换向阀。具体的电路接线在下一节中给出，其原理是用开关量输出采集卡来控制继电器吸合，而继电器输出端接电磁阀线圈，这样就达到控制目的。表 3.4 给出了各开关量输出信号详细说明，以及输出卡中相应的接入通道。

表 3.4 开关量输出信号表
Table 3.4 Switch output signals

序号	信号名称	信号制	采集卡通道号
1	关模	24VDC	PCI_734_IDO0
2	差动	24VDC	PCI_734_IDO1
3	开模	24VDC	PCI_734_IDO2
4	射出	24VDC	PCI_734_IDO3
5	射退	24VDC	PCI_734_IDO4
6	储料	24VDC	PCI_734_IDO5
7	座进	24VDC	PCI_734_IDO6
8	座退	24VDC	PCI_734_IDO7
9	脱进	24VDC	PCI_734_IDO8
10	脱退	24VDC	PCI_734_IDO9
11	调模进	24VDC	PCI_734_IDO12
12	调模退	24VDC	PCI_734_IDO13

3.1.3 具体线路改造设计方案

了解了注塑机的 I/O 参数特性和数据采集卡的特性之后，按照既定的原系统和新系统信号共享和切换控制的改造目标，就可以开始设计中间电路的具体实现方案了。本节将按照模拟量输入、模拟量输出、数字量输入和数字量输出的顺序来介绍硬件系统改造实现方案。

3.1.3.1 模拟量输入部分

模拟输入包括温度、位移和压力信号，由于线路各有不同，下面分三部分介绍。

1. 温度信号输入

温度输入部分比较特殊。经实验证明，若热电偶同时为两个系统提供温度信号，则两个线路之间相互干扰，两者都不能得到准确的温度信号，所以温度信号无法通过线路的并联实现信号共享。这样，就只能通过继电器来选择是由原系统还是新系统来检测温度信号了，两者不能同时得到温度参数。

另外，因为 K 型热电偶输出的是毫伏级信号，尽管 PCL-812PG 采集卡的变增益输入量程可以到达几百毫伏，但仍不能与热电偶直接匹配。因此，需要在热电偶和采集

卡中间加入变送器，变送器将原有毫伏级信号转化为 1~5V 的电压信号，然后将 1~5V 的电信号接入采集卡。图 3.2 给出了温度输入切换电路的原理图，其中变送器和采集卡是共地的，温度输入信号的切换与控制信号的切换同步，继电器的常闭端接通原温度采集系统，常开端接通新系统。

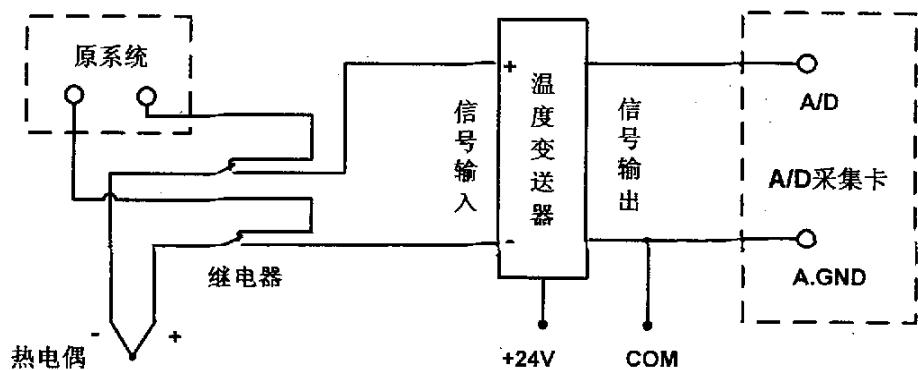


图 3.2 温度信号采集电路图

Fig. 3.2 Collection circuit diagram for temperature

2. 位移信号输入

位移信号的输入是通过位置尺实现的，可以简单的将位置尺看成一个滑动变阻器，其一端接+10V 电压，一端接地，根据其信号端与接地端之间的电压和位置尺的量程，就可计算出当前位置。具体电路实现如图 3.3 所示，通过并联连接实现信号共享。值得注意的是，在实际接线时要使用屏蔽线，因为电压信号易受干扰，而注塑机带有强磁干扰，不使用屏蔽线无法采集正确的位移数据。实际上，为避免或减轻干扰，所有模拟量输入数据都应该使用屏蔽线接线。

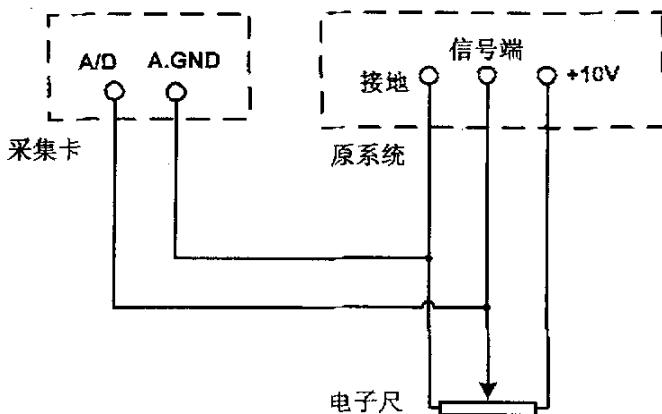


图 3.3 位移信号采集电路原理图

Fig. 3.3 Collection circuit diagram for disposition

3. 压力信号

由于原系统中没有压力检测装置，因此实验室购买了压力传感器(Green Sensor TPT-250)，用于检测模腔压力，其量程为 0~200Mpa，输出信号为 4~20mA 标准电流信号。它为新系统提供压力检测信号，具体电路实现如图 3.4 所示，其中采集卡输入端按照二次仪表的接法接入电阻两侧。

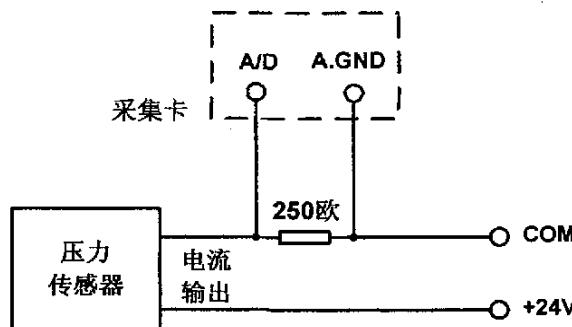


图 3.4 压力信号采集电路原理图

Fig. 3.4 Collection circuit diagram for pressure

3.1.3.2 模拟量输出部分

模拟量输出一共有两个，系统压力和系统流量。图 3.5 给出了压力输出切换电路的原理图，流量和压力的切换电路非常相似；继电器的常闭端接通原温度采集系统，常开端接通新系统，从而实现了控制作用的切换；模拟输出卡的电压信号，经放大板放大驱动比例溢流阀。在原注塑机系统中也有相应的电流表来检测驱动比例压力和比例流量溢流阀的电流的大小，可见两个模拟量是否准确，直接影响到系统控制性能的好坏，因此接线时，一定要对放大板的量程进行校准。

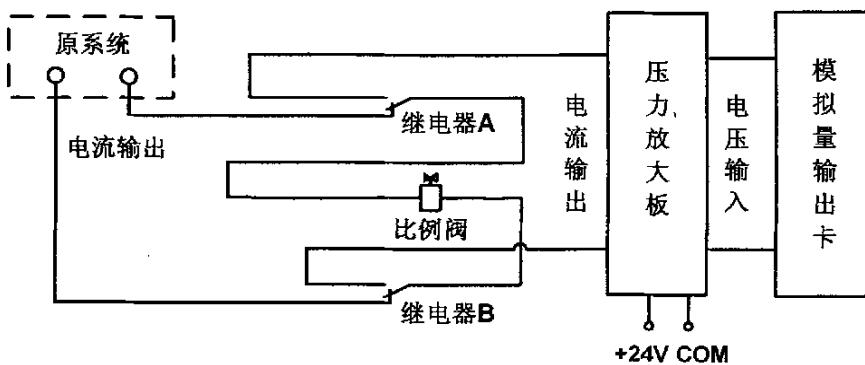


图 3.5 模拟量输出切换电路原理图

Fig. 3.5 Switch circuit diagram for analog output

3.1.3.3 开关量输入部分

开关量输入共有 9 个，他们要实现信号共享，其实现电路如图 3.6 所示。这里将采集卡的信号输入端与注塑机上的行程开关/近接开关相串联，实验证明，这样的连接方式既能保证原系统的稳定工作，也能让新系统准确的采集到开关输入量，而且对于通断频率较高的螺杆转速（近接开关）输入量，新系统也能很好的接收。

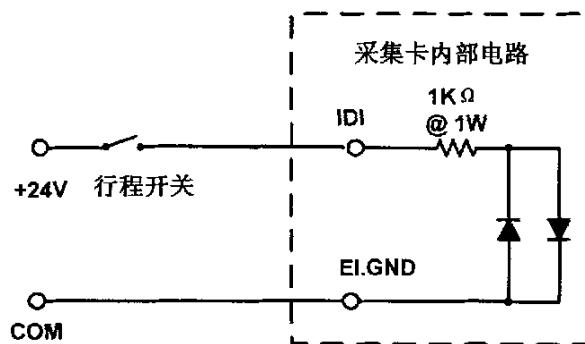


图 3.6 模拟量输入电路原理图

Fig. 3.6 Circuit diagram for analog input

3.1.3.4 开关量输出部分

1. 加热信号输出

加热信号输出共 4 路，是由控制固态继电器(SSR)的通断来实现的，按照切换控制原则，设计出的电路图如图 3.7 所示。由于采集卡本身不提供直流电源，因此新系统要串入 24V 直流电源。实际连接电路时，所有开关量输出都是用 PCL-734 实现的，因此所有的输出信号是共地的，这包括加热信号和动作信号。连接固态继电器时一定要注意它的正负极性，如果连反，将会烧坏开关量输出板。

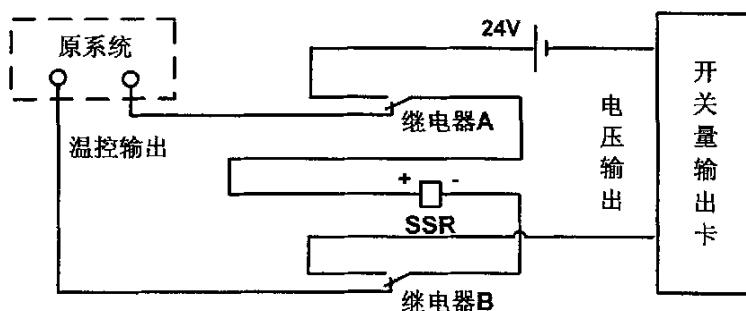


图 3.7 加热信号输出电路原理图

Fig. 3.7 Circuit diagram for heating output

2. 动作信号输出

动作信号输出共有 13 个，其实现电路如图 3.8 所示。之前所有继电器的控制端都没有给出电路图，因为它们都是负责控制作用的切换，但这个电路中，两个继电器的作用不同，继电器 A 负责切换，而继电器 B 负责给出开关控制量，它的通断由开关量输出卡控制，如图 3.8(a)所示。这样设计的原因就是因为电磁阀的驱动电流比较大，开关量输出卡无法承受，继电器 B 的引入解决了这个问题。还有一点要注意的是，为了抗干扰，继电器 B 位于常闭点时，电磁阀两侧都是高电平，而动作信号到达时，继电器 B 位于常开，这个时候因一端接低电平而接通电路，如图 3.8(b)所示。

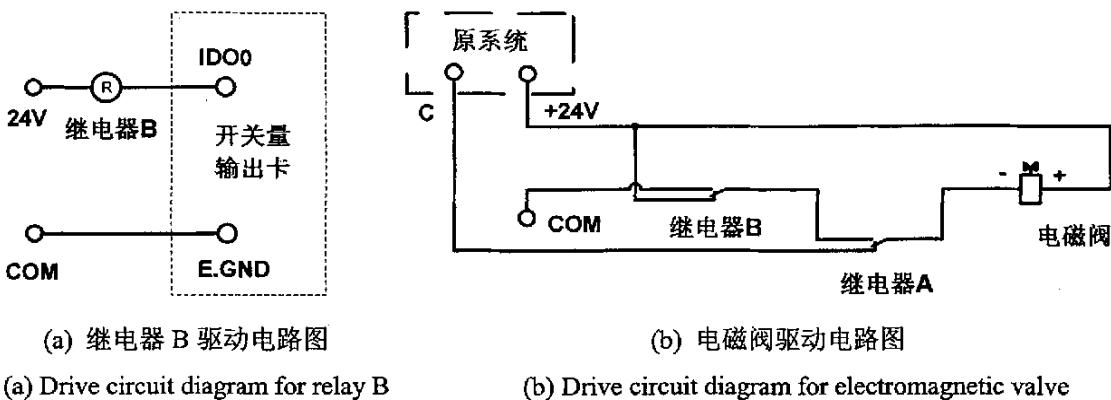


图 3.8 动作信号输出电路原理图

Fig. 3.8 Circuit diagram for motion output

3.2 注塑机控制系统的软件设计

上一节介绍了注塑机控制系统硬件系统的设计思路和方法，完成底层硬件的搭建后，再通过编制控制程序就可以实现注塑的控制了。这一节将分两部分介绍控制系统的软件设计，第一部分是下位机软件程序设计，它是用来实现数据采集，顺序控制，过程变量控制的；第二部分是上位机软件程序设计，它是用于对生产过程的监控，以及对采集数据的分类处理。在具体介绍软件设计之前，先对软件开发平台 QNX 作一个简要的了解。

3.2.1 软件开发平台介绍

3.2.1.1 QNX 的特点

QNX 是由加拿大 QNX 软件有限公司开发的一种多任务、分布式、可嵌入的实时操作系统，诞生于 1981 年，由加拿大人 Gorden Bell 和 Dan Dodge 所发明。从诞生

之日起，QNX 的目标就是要成为 Intel X86 平台最优秀的可嵌入式实时操作系统，成为实时控制系统的首选开发平台。QNX 有着不同于 UNIX 或 LINUX 的模块化设计思想，并不是 UNIX 或 LINUX 的一种演化，而是完全不同的一种全新的实时操作系统。由于其独特的体系结构，QNX 已经广泛应用于航空航天、医疗设备、工业自动化、销售终端、汽车导航、手持设备、网络通信等领域。

正是因为致力于成为实时操作系统的佼佼者，所以 QNX 具备了许多卓越的品质：

(1) 更多的功能，更少的内存：QNX 是唯一支持 POSIX 规范的嵌入式实时操作系统，内核只有十几 K 字节，最小配置只有 60~70K 字节。它提供了一个全窗口化的用户界面，该模块所需的空间不足 1MB，可装入 ROM 或快闪存储器，为用户提供简便、易用的操作界面。

(2) 完整的可扩展性：从只需 256K 内存的深度嵌入式系统到几百个 CPU 构成的容错分布式系统，从消费类电子产品到几百个车间的工厂自动化、从单机到对称多处理服务器，QNX 可伸缩、可剪裁、真正的微核结构加上独创的微核图形用户界面，可用于构造任何想象得到的应用。

(3) 更快的速度：QNX 提供无限制的多任务、优先级驱动的抢先式任务调度、瞬间响应（在奔腾 100 芯片上，上下文切换时间 2.6 微秒，中断延迟 4.4 微秒），最大限度发挥外设的性能而使 CPU 负载最小，这样借助廉价的嵌入式 CPU 就可以开发出性能可与高端产品相匹敌的系统。

(4) 严格遵循工业标准：为了获得最大的可移植性和最小的开发时间，QNX 允许开发者直接调用工业标准的 API，包括 POSIX 接口，支持因特网、电源管理、通信协议等标准。因此，几乎不用修改就可以直接使用 GNU、Linux/BSD、Xfree86、Win32、DOS 的源代码。

(5) 更可靠：QNX 提供了与大核操作系统相似的内存地址保护机制，应用程序、资源管理器、驱动程序等互不干涉，不会由于应用程序的 bug 导致系统崩溃。QNX 的容错特性允许电脑同时有多个网络连接，自动实现各个连接流量负载平衡，如果某个连接出错，还会自动转移数据到其它连接。

(6) 支持最新的 PC 硬件：从 PC/104 到 PCI 总线、QNX 支持的外设有几百种，比任何其它实时操作系统都多，难以尽列。

(7) 功能齐备的图形用户接口：QNX 的图形界面(Photon)实现了将复杂而又高品质的图形嵌入到微型嵌入式系统中的梦想。视窗式的图形界面能够提供 3D 多层的显示，可视化的、可扩的多媒体框架与多语言界面。

QNX 对嵌入式实时应用程序是很理想的。它可以被裁减的很小且能提供多任务处理、线程、驱动优先的抢先进程安排。此外，QNX 是基于 POSIX 标准应用编程接口的，这使得一个熟悉 UNIX 或 Linux 的程序员很容易进行程序的移植。

QNX 也相当的灵活。开发者可以很容易的根据应用程序的需要来用户化操作系统，从只有几个小模块的“空架子”到满载的网络系统都可以提供。

QNX 独特的效率、模块性和简单性，主要通过两个基本原则来实现：微内核结构和基于消息的进程间通信^[28]。

QNX 的这些特点，完全可以适应控制系统软件开发的需求。所以选择它作为的软件开发平台。

3.2.1.2 Photon 及其应用程序开发工具

Photon 管理器在 QNX 系统中作为一个服务器程序，执行一些最基本的功能。它创建一个由区域(REGIONS)和事件组成的三维事件空间。这个管理器既不控制鼠标、键盘，也不能在屏幕上绘图。它只是一个管理 Photon 事件空间的进程，而其它进程如设备驱动程序、窗口和其它管理器都可以通过在 Photon 事件空间中发送事件进行通讯。

Photon 代表一种建立 GUI 的新方法，即使用一个微内核和一组协处理进程，这就不同于其他窗口系统的一体化的结构。所以 Photon 呈现出独一无二的特点：

(1) 低的内存要求使得 Photon 可以为那些对内存有限制的图形库环境提供高层的窗口功能。

(2) Photon 提供了非常灵活，用户可扩展的体系结构。这就使得开发者能根据自己的应用来扩展 GUI^[29]。

Photon micro GUI 包括一个叫 Photon Application Builder 的强有力的开发工具，简称 PhAB。这种可视化开发工具使用户可以使用 C 或 C++语言开发应用用户界面。使用 PhAB，可以大大地降低应用程序的开发量，使用户在写用户界面、调试和测试方面都节省了时间。PhAB 还允许用户使用自己的代码生成 PhAB 模块，同时还提供大量的函数来建立控件库，使用户可以反复使用而不必每次都从头开发。

PhAB 这种可视化开发工具具有如下的特点：

(1) 可立即得到结果

像其他可视化开发工具如 VB、VC 一样，用户要改变控件的外观和行为，只需直接的改变其控件的某些属性，或直接拖动控件。其界面部分的运行效果在设计阶段就能直接看到。

(2) 自定义功能

PhAB 让开发者可以把自己的代码函数和控件连在一起，比如把所编写的代码连在一个按钮上，这样当用户按下按钮时，就可以控制程序完成什么样的动作。另外，如果想把界面的不同部分连起来的，几乎不需要写什么代码，因为 PhAB 允许开发者把控件的回调函数直接和窗口、菜单还有对话框连起来。

(3) 无需编写代码就可建立原型

一旦完成了界面的设计，PhAB 也就完成相应的 C/C++ 代码的编写。然后开发者就可以编译运行，看看效果。这之后就可以编写回调函数，实现其真正的功能。就这样反复这个过程，直到其外观和运行状态都符合要求。

(4) 减少代码量

如果界面程序中需要在不同的部分使用相同的控件。用户不必每次使用的时候都建立一遍，可以通过定义一次控件，然后把它放在控件库中，再通过 PhAB 提供的 C 函数重新使用即可。从而减少了代码的编写。

(5) 建立连续的应用程序

使用 PhAB 可以不需要从头建立程序，如果在一个程序中生成了窗口或对话框，那么你就可以把这些窗口和对话框直接引入新的应用程序。还可以建立统一的构件库，这样就可以把构件库中的构件引入所有应用程序中去，以建立统一的外观特征。

(6) 创建各种应用程序

使用 PhAB，可以开发在 Photon 上几乎所有的应用程序，包括：帮助浏览器、终端程序、桌面管理器、以及游戏。

(7) 调试方便

PhAB 中提供了内嵌的调试器，可以进行单步跟踪调试。QNX 还提供了 gdb 调试工具，给开发者提供了更多的选择^[30]。

3.2.1.3 多任务编程

由于 QNX 实时、多任务特性，在处理大型、复杂的并发多任务问题时，常常将问题分解为多个进程协同执行以降低问题的复杂性。比如，在注塑机的控制中，如果把上位机和下位机程序都运行在一个系统中，那么这两个进程就是“同时”运行的。对于单 CPU 的系统来说同时是不可能的，只是 CPU 将多个任务分不同的时间片来轮换处理，由于处理速度很快，因此看起来像同时运行，这种“同时”被称为并发。

QNX 允许多个进程并发运行，每一个进程各自都有自己的进程地址空间（进程控制块 PCB），各个进程之间有保护。在程序的执行过程中，由系统调度程序统一调度进程，决定获得 CPU 的进程，程序执行完毕，进程终止，系统收回所分配的资源。

这些进程的协同工作通常需要共享数据和相互交换信息。QNX 微内核提供进程之间通信(IPC)的手段有多种，它们是：消息、代理、信号、管道、共享内存和信号灯等。进程之间通信方式的选择依据它们所要完成的任务的性质决定，如在工业过程控制中主要传递控制信息，多选用消息、代理或信号的方式。

线程的出现要比进程晚的多，但是由于线程具上下文较轻、切换较快、在创建多个线程时系统的开销比较小、通讯手段灵活多样、共享资源丰富等优点，在处理大型并发多任务问题时多线程有了明显的优势。

在早期的 QNX 版本如 QNX4 中，对于线程的支持是比较弱的，1999 年以后 QNX 软件公司推出了 QNX/Neutrino 实时操作系统的 Neutrino2.0、Neutrino6.0 增加了对于 POSIX 线程的支持，标准的 API 不但使它易于扩展，而且也使得编写多线程程序变得容易。QNX 是抢先式多任务系统，这种系统决定了多个线程在访问共享资源时线程执行的次序变得不可预期，所以线程间的同步就显得极为重要。QNX 提供了多种同步机制以保证多线程程序的安全、可靠。

QNX 与 LINUX 不同，没有单独的线程库，与线程有关的 API 是作为 C 语言库函数的一部分使用的，头文件是<pthread.h>，同样方便的提供线程的创建、终止和同步等功能。QNX 不仅在 C 语言库函数中提供了符合 POSIX1003.1c 标准的与线程相关的 API，而且还提供了很多 POSIX 标准没有的扩展功能，使得多线程编程变得更加容易。

多线程程序中线程之间的关系是复杂的，为了防止竞争条件和数据被破坏的情况发生，QNX 提供了多种互斥和同步机制，包括互斥体、条件变量、信号灯、屏障、读/写锁、sleepon 锁等，其中最主要的是互斥体和条件变量，其余的同步机制都是由它们构造而成的，当然也可以根据自己的要求构建自己的同步机制^[31]。

注塑机控制系统的软件设计主要是基于这种多任务（多进程/多线程）机制。

3.2.2 下位机软件设计方案

下位机软件程序是用来实现数据采集、顺序控制、过程变量控制的，它是这个注塑机控制系统中最基础、最重要。说它基础，是因为它负责数据采集和发送，相当于人的眼睛和手，控制系统的所有程序都是靠这些数据操纵硬件设备的；说它重要，是因为它负责顺序控制和过程变量的控制，因此下位机程序运行效果的好坏，直接决定产品质量的好坏以及设备能否安全稳定运行。

3.2.2.1 下位机软件功能模块设计

下位机软件的设计思想是来源于 QNX 的多任务特性的，它与以往的 PLC 编程有显

著的不同。由于上位机程序与下位机程序在一台计算机中执行，根据进程相关性和执行速度方面的考虑，将两者划为两个模块，用两个进程来实现。其中下位机进程又分为多个功能模块，它们以多线程的方式实现^[32~34]。这些功能模块包括：

(1) 数据采集模块

负责通过对数据采集卡的编程，实现对所需数据的实时采集和控制信号的发送。

(2) 数据发送/接收模块

负责把采集数据通过 FIFO 发送给上位机程序，同时通过另一个 FIFO 接收上位机传下来的数据，比如温度设定值，PID 参数设定值。这里不包括命令数据。

(3) 命令接收处理模块

命令接受处理模块就是主模块，它也是主循环程序，它负责从管道中接受命令，解析命令，之后产生或者取消相应的执行线程。

(4) 料筒加热模块

负责料筒加温的控制，温度控制算法就在此处编写。

(5) 动作控制模块

负责顺序动作控制，这包括全自动、半自动、手动和调模所有动作，由数十个线程组成，手动调模状态下，每一个动作都是一个线程。

3.2.1.2 主程序流程图

下位机程序总体流程图如图 3.9 所示。

(1) 参数初始化，它将程序需要的一些参数按照上一次的记录（从参数备份文件中读取）进行初始化，比如控制程序的 PID 参数，各动作控制的设置参数。

(2) 初始化定时器，设置数据采集线程对定时器触发信号的接收方式，然后启动定时器，再创建数据采集线程，采样数据就是 AI/DI。编写采集数据线程要查看数据采集卡的说明书，采集 AI 时要设置好对应增益、通道和比例变换值的控制字，并注意采集数据高低位的顺序，采集 DI 时要注意通道与采集数据的对应关系。采集之后的数据写入预先定义全局变量结构体中，以供其它程序使用。

(3) 初始化 FIFO-1，启动数据发送线程，并把数据按照设定的周期写入 FIFO-1 中，一旦数据写入管道中，上位机读取线程就被唤醒，将数据取走，这个同步过程，靠 QNX 操作系统来完成。

(4) 初始化 FIFO-2，创建数据接收线程，还是按照管道的同步机制读取上位机进程写入管道中的参数，在等待参数写入的时候，接收线程是阻塞的。同时，读入的参数存储在参数数据共享区里面，同时还有实时刷新参数备份文件，以备后用。

(5) 初始化 FIFO-3, 按照管道的同步机制读取上位机进程写入管道中的命令, 然后解析命令, 按照图 3.9 执行相应的操作。这里面值得一提的是动作线程, 数十个动作线程是排它的运行的, 除非单独编程否则不能在闭合模具的同时又使座台前进。每一个动作线程都需要按照参数共享区的设定值运行, 对于速度、压力等过程变量的控制也包含在相应动作程序中, 每个动作都带有定时器的跟踪报警。这些都是根据生产的实际需要来制定的, 可以说这部分程序是整个程序的核心部分。温度控制线程与动作控制线程是并行的。

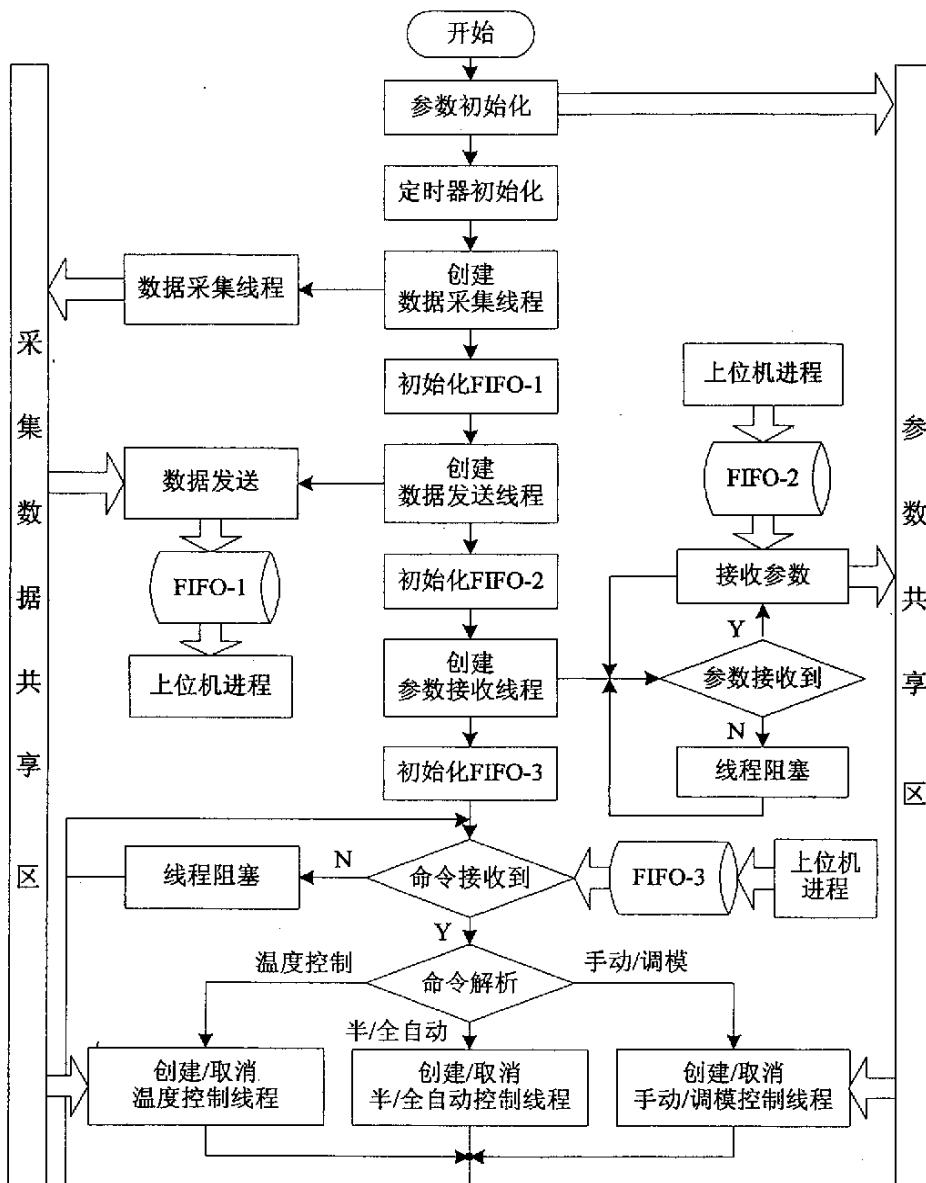


图 3.9 下位机程序的流程图

Fig. 3.9 Flowchart of subordinate computer program

3.2.1.3 全自动控制程序流程图

整个动作控制的程序有几十个，本文只给出全自动流程图（如图 3.10 所示）。

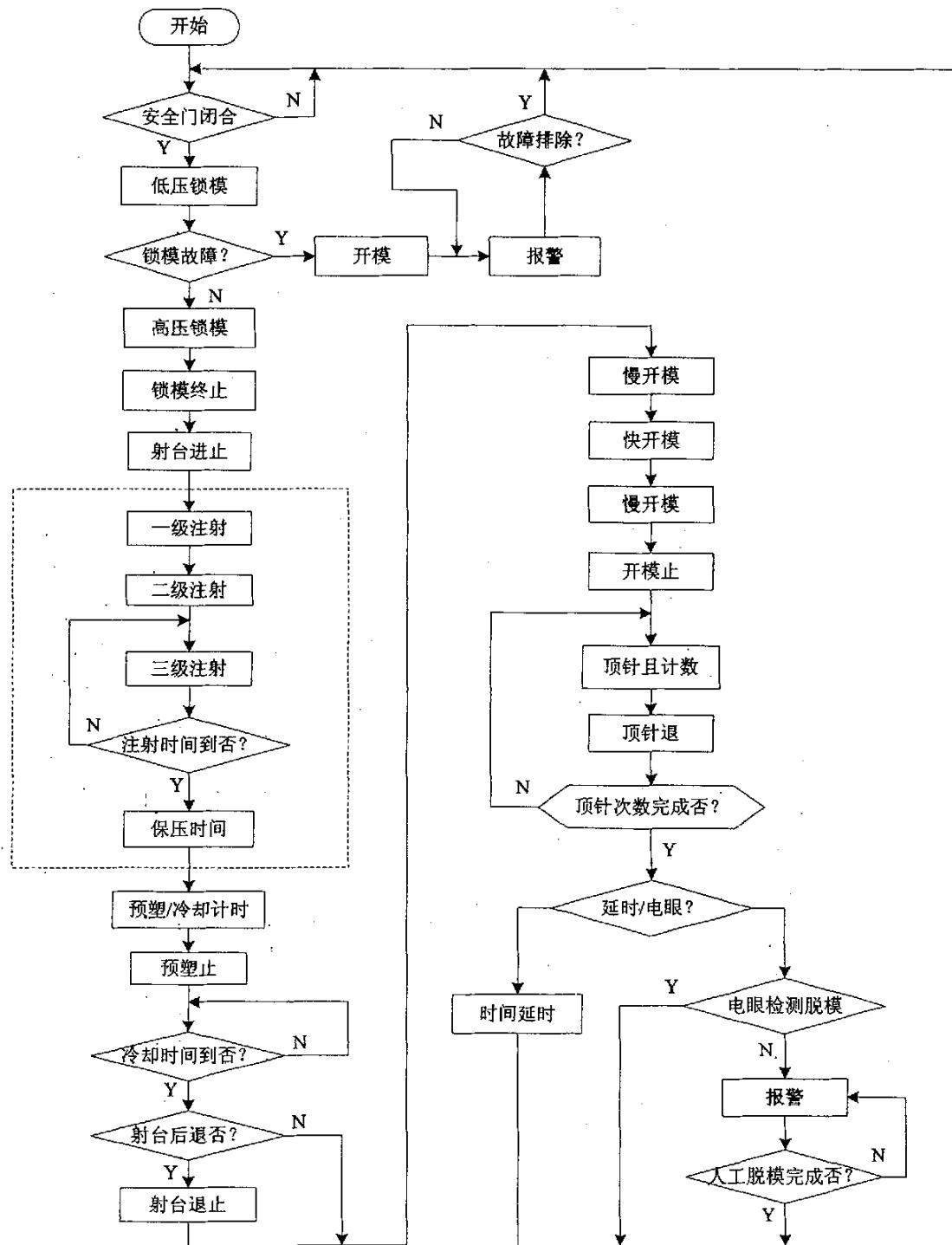


图 3.10 全自动控制流程图

Fig. 3.10 Flowchart of full-automatic control

图中虚线框内部分即为注射、保压过程。注射、保压阶段虽然在注塑过程中所占时间极短，但却是公认的对制品质量影响最大的阶段，也是顺序控制流程中的核心控制部分，实际编程时要按照工艺曲线进行注射速度，保压压力的控制，还要进行 V/P 转换点的判断，图 3.10 中使用时间来判断转换点。为判断产品是否脱落，给出两种选择方式，一是电眼检测，在这种情况下如果规定时间内没有检测到脱落就报警，二是时延，这种方式默认在规定时间内产品一定会脱落，到达时间后自动执行下一次循环。

以上介绍了下位机程序的功能模块和基本流程。由于篇幅的限制，只介绍了最核心的部分。下位机程序虽然是控制系统的中心，但是它在工控机内部运行，中间结果只能在终端中给出，与人的交互性差，监控起来很不方便。上位机软件正好弥补了这方面的不足，下一节将对上位机软件设计做一个大体的介绍。

3.2.3 上位机软件设计方案

上位机是计算机控制系统中能与用户进行信息交换的设备，也就是以屏幕窗口的形式或文件表格的形式提供人机界面，具有显示、操作等功能。上位机通过屏幕向用户提供生产过程的信息，例如主要测量参数的即时值等。用户根据生产的需要进行某些必要的操作，如设定参数、开启阀门等。

上位机作为控制系统的中心部分，主要功能除了过程监控外，还常兼作数据处理，各类报表编制打印以及车间计划，生产管理和质量分析之用。因此，上位机监控软件一般包括过程数据收集和处理，过程动态显示，发送各类控制指令，过程资料历史积累与过程曲线绘制，统计分析与报表编制打印以及人机对话界面等内容，以实现对整个系统进行实时监测和控制。它实时采集注塑机的温度、压力、速度等信号，并将其保存到数据库里。

作为注塑机的上位机，主要完成的任务是对过程参数进行实时显示、分析、存盘、相关报警、人机对话，并向下位机传送控制指令和修改其中控制参数。进行上位机编程时，需要用到组态软件，这里使用 QNX 下的 phAB 来进行编程开发。

3.2.3.1 上位机软件功能模块设计

根据注塑机的工艺生产过程及监控系统的主要任务，仿造原注塑机监控系统绘制出上位机软件系统的结构框图如图 3.11 所示。将操作界面作为进入系统的主界面，其下共设有 12 个链接，按功能划分为四块：

(1) 根据注塑机的循环工作过程有 6 个独立的过程参数设置界面（模具系统参数设置、射出过程参数设置、储料射退过程参数设置、托模过程参数、座台系统参数设置、

加热过程参数设置);

(2) 有两个实时提供生产过程信息的画面(注塑机工作状态显示画面、趋势曲线显示画面); 其中实时曲线显示3种重要参数的趋势(温度、压力和速度)。

(3) 有两个是对整个注塑机进行系统控制的画面(参数快速设置界面、PID参数设置界面);

(4) 还有两个界面是为监控系统, 数据处理, 报表编制打印以及车间计划, 生产管理质量和分析之用(报警监控界面、历史数据报表统计界面)。

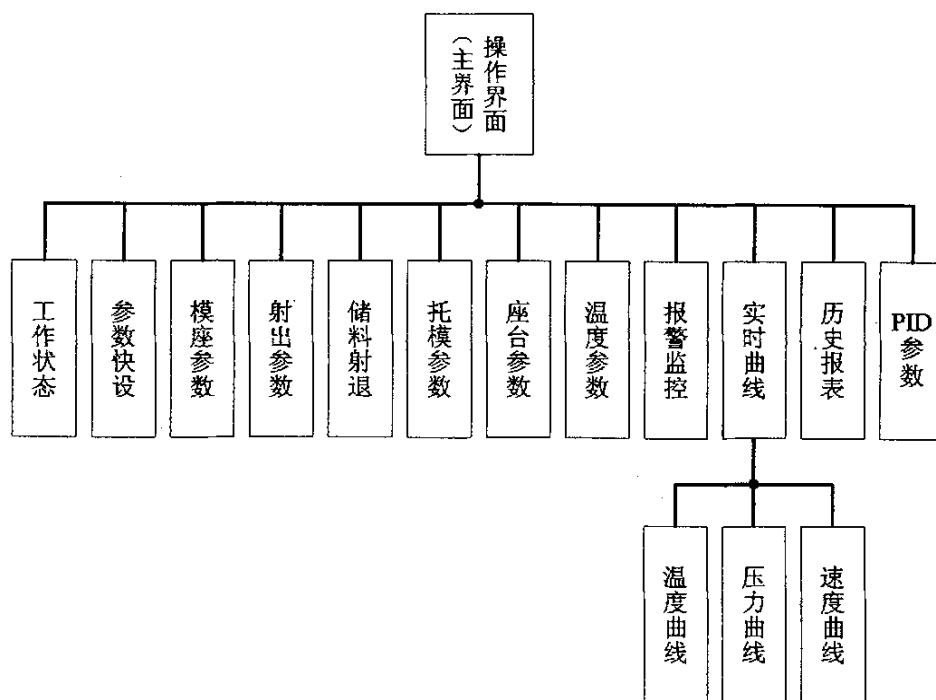


图 3.11 上位机程序结构框图

Fig. 3.11 Structure of superordinate computer program

3.2.3.2 监控界面设计

目前编写的上位机界面共13个, 由于篇幅限制, 本文给出注塑机工作状态界面、注塑机料筒温度设置画面、注塑机实时曲线画面的简要介绍。

1. 注塑机工作状态界面

注塑机的工作状态界面如图3.12所示。

它显示的是注塑机运行过程中的主要参数, 左上方的三个文本框内分别显示了注塑机现在运行的机器状态, 机器动作的压力/速度显示, 以及循环过程进行的时间。在座台的右下方的两个文本框分别显示了油温温度和马达运转状态。中间的三个刻度尺分别

标注的是：托模位置、螺杆位置、座台位置。最下方标注了料筒温度，四段分别是：料筒前段温度、料筒中段温度、料筒后段温度和喷嘴温度，上面一行显示的是实际值，可以与下面一行的设定值进行对照。这些参数反映了注塑机的当前工作状态，便于工作人员实时监控机器运行情况，控制生产流程。

功能按钮一共设置了 12 个按钮，如图 3.12 上方，这些按钮分别连接到相应的画面，只要左键单击按钮，就可以进入相应的画面。并且新画面中也会有相应的连接，这些连接按钮存在于注塑机监控系统的每一个界面中，方便用户从一个界面切换到另一个界面。按钮的连接是靠 Callback 回调函数实现的。在主画面 base（操作界面）下引入 12 个 PhAB 模版 base1~base12。以按钮“控制面板”为例，其连接的子画面是 base1，则在其 Callback 选项中添加 Window 模版，选择 base1，建立连接即可。

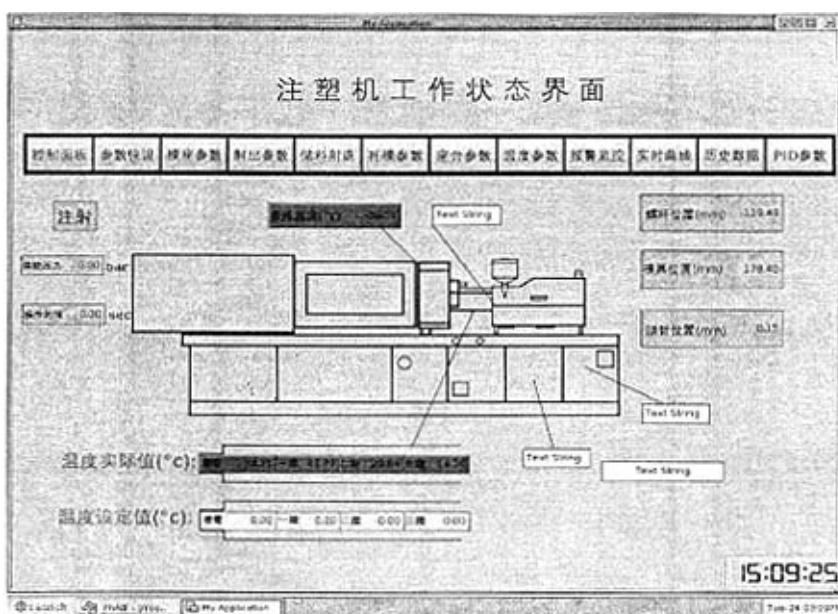


图 3.12 注塑机的工作状态界面

Fig. 3.12 Interface of run status of IMM

2. 注塑机料筒温度设置画面

注塑机料筒温度的控制是沿螺杆方向分段控制的，以便逐段加热。本文所用的海天 HTF58X2 注塑机分四段：第一部分为固体输送段，靠近料口处，温度要低一些，需要冷却水冷却以保证较高的固体输送率；第二部分为塑化熔融段，物料处于压缩状态并逐渐熔融，温度设定比固体输送段高出 5~10°C；第三段为熔体输送段（计量段），物料全

部熔融，温度比第二段高出 5~10℃；第四段是喷嘴温度，也是最高温度段，比第三段温度高出 5~10℃。

注塑机料筒温度设置画面如图 3.13 所示，它是对料桶加热过程进行控制的界面。图上所显示为料桶实际值，最后一行显示的是温度设定值。这些参数都要在系统中设置相应的变量，通过对文本显示框的 Callback 函数编辑，通过调用不同的函数，来实现将后台的变量显示到监控画面上或者将文本框的内容写入后台变量中。为了方便操作者实时掌握温度的变化，界面的右下方有一“温度曲线”连接按钮，能够直接切换到温度曲线界面，观察温度的变化趋势。

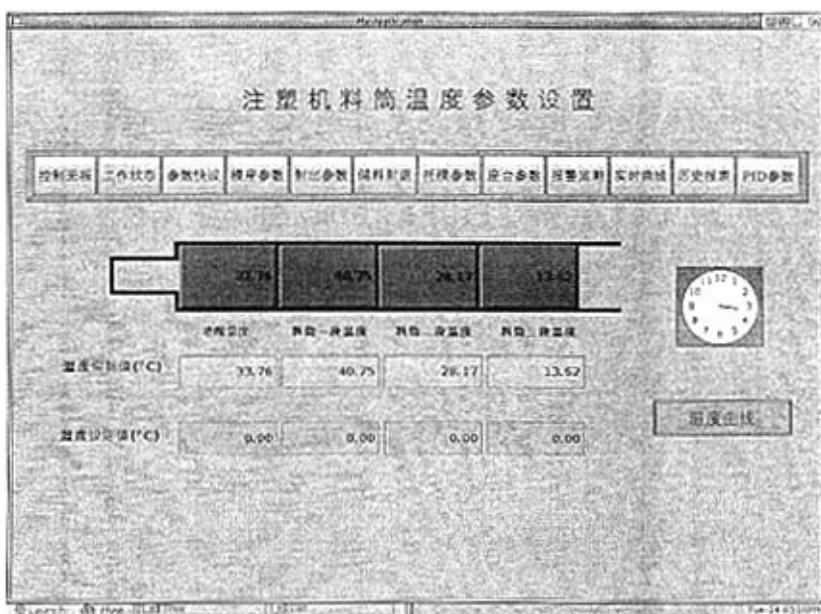


图 3.13 注塑机料筒温度设置画面

Fig. 3.13 Interface of barrel temperature setting of IMM

3. 注塑机料筒温度设置画面

该界面如图 3.14 所示，在界面中显示了温度、压力和速度三种实时曲线，这些值来源于数据采集所读取的数据。它的实现机理也是在系统中产生一个时钟(PtTimer)，通过设置它的参数，使它每隔一定时间间隔产生一个脉冲，从而调用曲线图更新函数。因为这种重复的处理是通过对每一个所发出的事件重新装备(rearm)，处理事件的任何延时都会积累的，并且不能够保证恒定的重复速率。但是由于此数据采集系统对实时性要求不高，采用 PtTimer 的方法是可行的，同时也可以保证数据采集任务以较高优先级抢先

运行，保证了该任务的实时性。

如图所示，三个曲线显示框分别显示温度、压力、速度实时趋势曲线，PtTimer 定义每隔 1000ms 对下位机采集来的数据刷新一次。压力曲线中的蓝色直线表示的是设定值，红色曲线表示的是实际值。

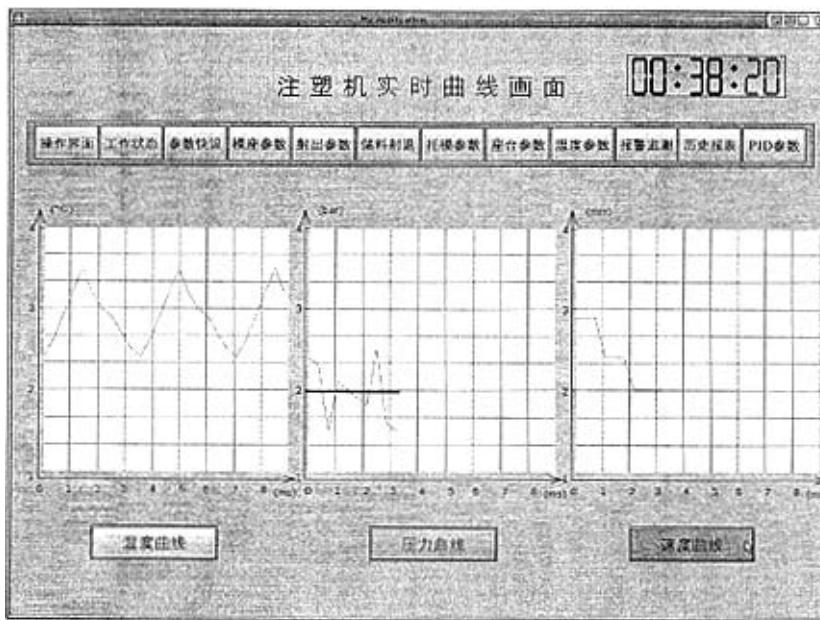


图 3.14 注塑机实时曲线画面

Fig. 3.14 Interface of trends of IMM

3.3 本章小结

本章分硬件系统改造设计和控制软件设计两部分内容，介绍了注塑机控制系统改造设计。

硬件改造部分中，首先提出了原、新控制系统信号共享和切换控制的总体改造目标，其次对系统 I/O 信号特性与采集卡功能进行介绍，这是设计硬件改造接线的基础，最后按照 AI、AO、DI、DO 的顺序给出具体的接线原理图。

软件设计部分又划分为上位机软件和下位机软件两部分，它们都是在实时多任务操作系统 QNX 下开发的，因此这部分首先对 QNX 的开发环境和实时多任务特性作了简要介绍。随后，在下位机软件设计部分中，首先根据实际需求，划分出软件功能模块，然后给出了下位机程序的主程序流程和全自动控制程序流程图。在上位机软件设计部分

中，按照同样的思路，给出了功能模块的划分和部分界面设计的举例。由于篇幅限制本文虽不能给出每一部分的设计方案，但已给出的设计方案是具有代表性的，基本涵盖了设计的核心内容。

现场运行状况表明，控制部分的设计满足工艺要求，实现了产品的正常生产；监控部分信息全面清晰、界面美观、友好、操作方便，实现了最初的设计目标。

第四章 注塑机料筒温度控制策略

在塑料的注塑过程中，熔体的温度是一个很重要的参数，熔体温度决定于料筒的温度和料筒内螺杆与塑料之间的剪切热。一般认为，在中小型机中熔体温度决定于加热的温度，塑料温度的控制表现为对料筒的温度控制。若料筒温度太低，塑料在螺杆间产生不必要的剪切力，并因此产生冷固化，对机器造成损坏。温度过高时塑料分子间发生交联，会使组织疏松，产生发泡现象，尤其在精密注塑中更是不允许的。同时不同的塑料制品采用的塑料原料不同，而不同的塑料原料根据产品的工艺要求其最佳注塑温度各不相同，并且塑料原料在注塑机加热管的不同段根据操作工艺也有不同的温度要求^[35]。因此，需要对加热管的温度进行分段控制。

目前，国产注塑机由于大多采用动圈式温控仪，用继电器开关控制加热圈通断来控制料筒加热温度，加温系统的品质因素不理想。例如，冷态工况下，超调量大（大于8.0℃），响应时间较长（例如由室温升温至100℃需10min加温时间），过程明显出现振荡，稳态误差为±8~10℃；热态工况下，温度波动范围大（略为±10℃），调整速度慢，调整时间通常长达2~3min，且检测及控制精度不高，同时还因可靠性较差、响应速度慢、调整困难而难以满足成型精密制品的要求^[36]。

本章讨论了积分分离PID控制算法和模糊变系数PID控制算法在料筒温度控制中的应用，有效地解决了注塑机料筒温度的控制难题，取得了良好的控制效果。

4.1 料筒温度控制实验装置简介

4.1.1 料筒温度控制系统组成

为了对料筒特性有较深入的了解，实验室开发了一套基于PC机的料筒温度测控系统，并研究不同的控制算法对料筒温度的控制效果，比较其控制性能。与直接利用单片机开发料筒温度控制算法相比，基于微机的料筒温度测控系统可以暂不用考虑计算量和要求的存储量，采用不同的算法以及人机界面更加友好，程序编写和调试方便等优点。

基于工控机的检测及实验装置本文采用图4.1所示。其中，注塑机型号为HTF58X2，料筒由射嘴、前段、中段和后段总计四个加热段加温，加热功率分别

为交流(240V)200W、2200W、1100W、和1600W; K型热电偶(量程0~400℃)测量料筒温度, 测量得到的毫伏信号由带冷端补偿的温度变送器放大为1~5V电压信号; 经过端子板, 温度模拟信号通过研华PCL-812PG数据采集卡A/D转换后, 由CPU读入并进行计算; 对测量温度值还作了数学滤波处理, 抑制了外界干扰的串入, 来提高测量精度。CPU输出通断(开关量)信号经PCL-734隔离型数字量输出卡及其附属端子板输出, 驱动固态继电器(SSR)直流端, 再经光耦作用来控制固态继电器, 达到比例控制加热圈加热功率的目的。

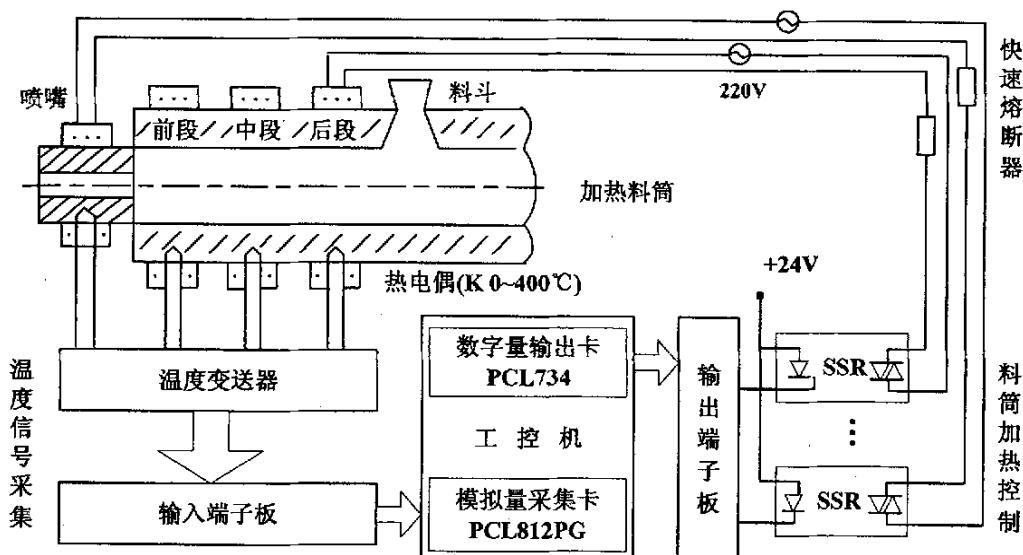


图4.1 料筒温度测控系统硬件结构图

Fig. 4.1 Structure of barrel temperature measure and control system

图4.2为注塑机料筒简单加热段的温度数字控制系统原理图。其中, T_s 为采样周期, T_{set} 为该加热段温度设定值。 $T(t)$ 为温度实测值, 加热段温度设定值与实测值的偏差 $e(t)$ 是时间 t 的函数, $e(k)$ 为采样时刻 k 时的温度偏差离散值, $u(k)$ 为对应于 $e(k)$ 的控制量(一个采样周期 T_s 中SSR导通与截止的比率), $P(t)$ 为一个采样周期 T_s 中对应于 $u(k)$ 时施加在加热线圈上的加热功率。

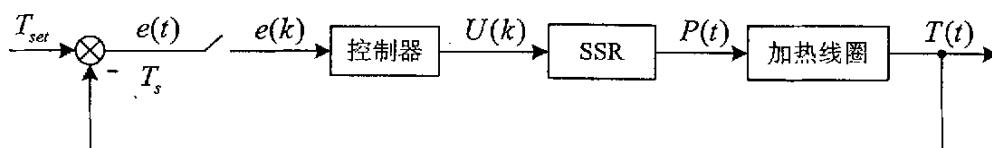


图4.2 温度数字控制系统的原理图

Fig. 4.2 Block of digital temperature control system

4.1.2 继电器 PWM 控制输出方式

本文讨论的料筒温度控制方法是采用普通的固态继电器(SSR)继电器作为控制器件的。控制算法输出的控制量 u 为连续量，而继电器只能作通断控制，因此，这里采用脉宽调制(PWM)技术来将连续量 u 转化为在一定的周期内继电器通断时间比^[37]。具体过程如下：在一个采样周期 T_s 中，根据温度偏差离散值 $e(k)$ 计算得到 SSR 导通与截止的比率，再经 SSR 来控制加热线圈的加热功率。控制输出的具体流程如图 4.3 所示。

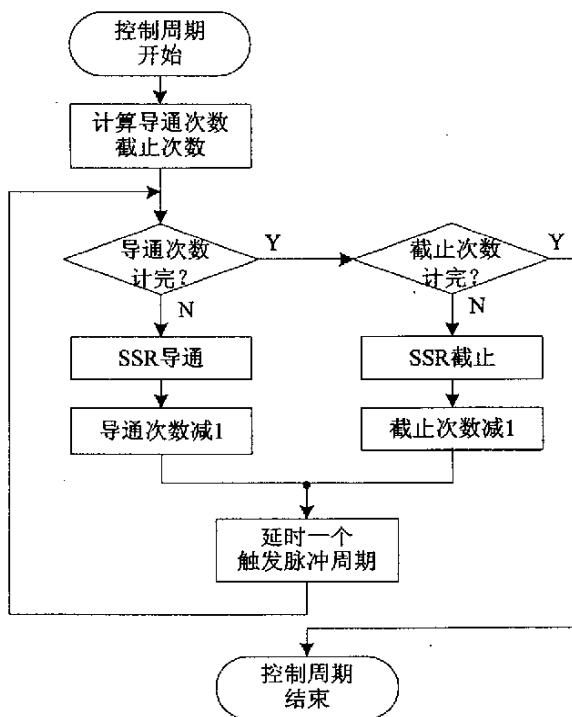


图4.3 PWM控制模块流程图

Fig. 4.3 Flow of PWM control method

PWM 控制输出方式具有如下特点：过零型触发，确保 SSR 输出完整的正弦波形；由于触发脉冲均匀分布，故对电网而言负荷是均匀的，从而可避免负载接通时对电网产生冲击或引起波动；输出功率与控制信号具有线性关系，因此只要改变每个采样周期 T_s 中电源接通与切断的时间比，就能够达到调节输出功率的目的；控制及辅助装置简单，对控制信号要求不高，而且容易实现；SSR 既有微弱控制信号的传递和转换作用，同时又起光电隔离器件作用，避免了强弱信号的串扰，从而使控制装置工作可靠抗干扰能力强。

4.2 料筒温度特性测试

料筒温度特性测试的目的在于全面认识、把握料筒对象，并深入了解该系统的性能，以便能设计一个合理的控制方案，并确定系统的控制参数。可见建立一个合理、准确、适用的模型是至关重要的。

注塑机料筒加热系统属多输入/多输出多变量系统，为讨论简便且不失一般性，本文选取前段、中段和后段三段加热区，即三输入/三输出的多变量系统作为研究模型，采用阶跃响应法建立料筒各加热段的数学模型。为求取各回路的传递函数，实测时在其中一路的输入端加阶跃电压信号，而在其它两端的加热电压为零，同时记录三个回路的温度变化曲线，然后按照相同的方法在另两路上再测。测出的料筒各加热段温度的阶跃响应，经过模型降阶处理且忽略相互耦合影响，即可以用带纯滞后的一阶惯性环节（如式 4.1）来拟合各路传递函数，从而建立各加热段料筒温度数学模型^{[37][44]}。

$$G(s) = \frac{K}{1+Ts} e^{-\theta s} \quad (4.1)$$

其中： K 是放大倍数， T 是时间常数， θ 滞后时间。

1. 辨识方法

对于带纯滞后的一阶惯性环节的阶跃响应曲线，最常用的辨识方法就是面积法。这种方法简单，对高频噪声有一定的抗干扰能力，但是对阶跃响应试验的完整性要求较高。然而对于实际的工业对象，由于种种原因，通常只能得到不十分完整的数据。下面引入一种基于最小二乘法的一阶加滞后传递函数模型的直接辨识方法，它有效的解决了上诉实际问题^[38]。

对式 4.1 所示的系统，假设在 $t = 0$ 时刻对零初始状态加入幅值为 a 阶跃扰动输入 $u(t)$ ，在 t 时刻过程的瞬时输出为

$$y(t) = aK(1 - e^{-\frac{t-\theta}{T}}) + \omega(t), \quad t \geq \theta \quad (4.2)$$

式中， $\omega(t)$ 为量测出 $y(t)$ 中的白噪声。把式(4.2)从 0 到 τ 进行积分，经整理得

$$A(\tau) = aK[\tau - \theta - T \frac{y(\tau)}{aK}] + \delta(\tau) \quad (4.3)$$

其中， $A(\tau) = \int_0^\tau y(t) dt$ ， $\delta(\tau) = T\omega(\tau) - \omega(\theta) + \int_0^\tau \omega(t) dt$

即

$$[a\tau - a - y(\tau)] \cdot \begin{bmatrix} K \\ \theta K \\ T \end{bmatrix} = A(\tau) - \delta(\tau), \quad \tau \geq \theta \quad (4.4)$$

对于 L 组辨识数据，即 $\tau = 1 \cdot T_s, 1 \cdot T_s, \dots, L \cdot T_s$ ，方程(4.4)构成线性方程组，即

$$\Psi\Theta = \Gamma + \Delta \quad (4.5)$$

式中， T_s 为采样时间，

$$\begin{aligned}\Theta &= [K \quad \theta K \quad T]^T, \\ \Gamma &= [A[m \cdot T_s] \quad A[(m+1) \cdot T_s] \quad \cdots \quad A[L \cdot T_s]]^T, \\ \Delta &= [-\delta[m \cdot T_s] \quad -\delta[(m+1) \cdot T_s] \quad \cdots \quad -\delta[L \cdot T_s]]^T, \\ \Psi &= \begin{bmatrix} a \cdot m \cdot T_s & -a & -y[m \cdot T_s] \\ a \cdot (m+1) \cdot T_s & -a & -y[(m+1) \cdot T_s] \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a \cdot L \cdot T_s & -a & -y[L \cdot T_s] \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

其中， m 为大于纯滞后的时间常数($mT_s \geq \theta$)。由方程 4.5 可得参数 Θ 的最小二乘估计为

$$\hat{\Theta} = (\Psi^T \Psi)^{-1} \Psi^T \Gamma \quad (4.6)$$

这样，把阶跃响应实验的结果带入式 4.6 种就可以算出系统的模型参数了。

2. 测试结果

图 4.4(a)、(b)、(c) 分别为第一段 $P=20\%$ 、第二段 $P=40\%$ 、第三段 $P=40\%$ 时，三段温度的阶跃响应。

将料筒模型简化为带纯滞后的一阶惯性环节，一段、二段、三段阶跃输入分别为 20%、40%、40% 全功率时，利用基于最小二乘的直接阶跃响应辨识法辨识出的各加热段料筒温度数学模型如表 4.1 所示。

表 4.1 料筒温度数学模型参数表

Table 4.1 Parameters of model of barrel temperature

加热段	K (°C/%P)	θ (s)	T (s)
第一段	11.0	20	3368
第二段	3.41	46	3240
第三段	2.96	114	2328

由图 4.4 及表 4.1 可见，加热段系统时间常数很大，在 30min 以上，且各段值不一样，纯滞后约 20s~120s 左右；非加热段时间常数和纯滞后要比加热段大的

很多，相邻段的耦合较强，不相邻段耦合较小。

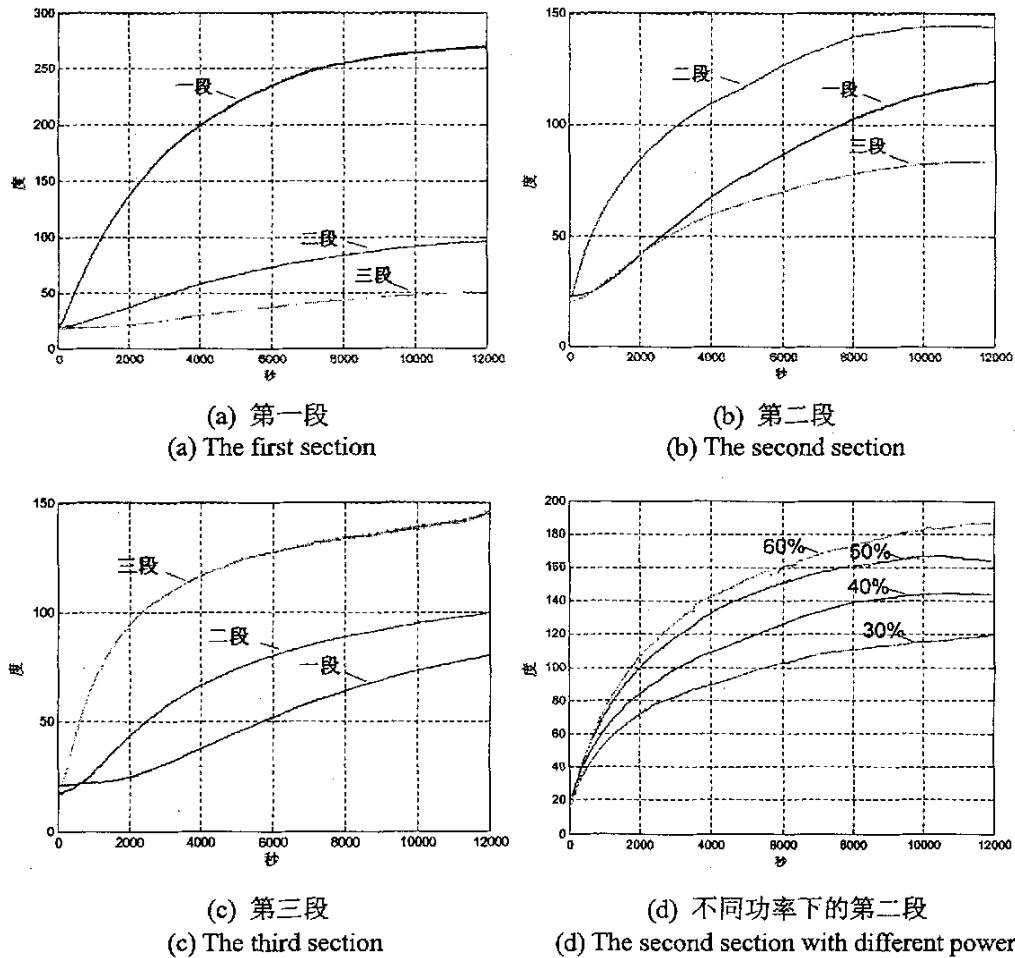


图4.4 加热料筒各段的阶跃响应曲线

Fig. 4.4 Step response curves of heating barrel

图4.4(d)是对料筒第二段分别输入四种不同功率时的温升曲线，利用阶跃响应求出的模型参数都不相同，如表4.2所示。可以看出，随着加热功率的增加，比例参数是逐渐变小的，但是另外两个时间常数的变化则没有什么规律性。

表4.2 料筒温度数学模型参数表

Table 4.2 Parameters of model of barrel temperature

功率	K ($^{\circ}\text{C}/\%P$)	θ (s)	T (s)
30%	3.38	21	3387
40%	3.21	32	3557
50%	2.93	65	2873
60%	2.84	53	3082

由此可见，不同的加热功率，加热段表现出非线性特性。原因有以下三点：

(1) 不对称性。料筒加热和冷却过程的机制不一样，前者由加热器通过电阻丝加热，再经金属导热，金属的导热系数受温度影响很小；后者为对流传热和热辐射，完全依靠自然冷却，随着温度而变化。因而升温与降温过程表现出截然不同的动态特性，这就要求在控制策略上也具有相应的不对称性。

(2) 温度特性。由于热传递与绝对温度有关，因而料筒加热器的特性也随温度变化而变化。如热辐射与绝对温度成平方关系，这使得高温时的料筒加热器热传递变快，从控制特性上表现为料筒加热器的时间常数、纯滞后时间减少；再比如热圈与料筒之间的传热效率，也会随着温度梯度的形成而变化。

(3) 扰动特性。料筒加热器的干扰因素多，而且干扰量大。电阻丝的发热功率与电网电压成平方关系，如果电网电压波动，电阻丝发热功率会发生较大的波动。

因此，料筒温度特性是一个非线性、大惯性、有滞后、相邻段有较强耦合的多变量系统。

4.3 料筒温度常规控制策略

4.3.1 积分分离 PID 控制算法

PID 控制是一种线性控制，将设定值与实际输出值进行比较构成偏差（设定减输出），并按其比例、积分、微分通过线性组合构成控制量。在计算机控制系统中，离散的 PID 表达式为

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T_s}{T_I} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4.7)$$

式中， K_p 为调节器的比例系数； T_I 为调节器的积分时间； T_D 为调节器的微分时间； T_s 为采样周期； $e(k)$ 为第 k 次采样时的偏差值； $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时的偏差值； k 为采样序号； $u(k)$ 为第 k 次采样时调节器的输出。

式(4.7)表示的控制算法称为位置式 PID 控制算法，由式(4.7)还可导出增量式 PID 算法。

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4.8)$$

式中， $K_I = K_p \frac{T_s}{T_I}$ 为积分系数； $K_D = K_p \frac{T_D}{T_s}$ 为微分系数。

可见，增量式算法只需要保持当前及前两个时刻的偏差即可。计算误差或精度不足时对控制量的计算影响较小，易于实现手动到自动的无冲击切换，因此本控制器采用增量式 PID 算法。

采用标准 PID 算法中，在实现控制的过程中，只要系统的偏差没有消除，积分作用就会继续增加或减少。最后使控制量达到上限或者下限，系统进入饱和范围。而对时间常数较大的被控对象，在阶跃作用下，偏差通常不会在几个采样周期内消除掉，积分项的作用就可能使输出值超过正常范围，造成较大的超调。为了克服这种现象，可以采用积分分离 PID 控制方法。

积分分离法的基本思想是：根据系统情况设置积分分离门限值（也称阈值） E_0 。当偏差大于规定的门限值时，删除积分作用，以使 $\sum e(j)$ 不至过大；只有当 $e(k)$ 较小时，方引入积分作用，来消除静差。这样，控制量不易进入饱和区；即使进入了，也能较快退出，所以系统的输出特性得到了改善。积分分离 PID 流程图如图 4.5 所示。 E_1 是大于 E_0 的正数，当 $e(k)$ 大于 E_1 时执行全功率加热。否则当 $|e(k)| \leq |E_0|$ ，即偏差值 $|e(k)|$ 比较小时，采用 PID 控制，可保证系统的控制精度；当 $|e(k)| > |E_0|$ ，即偏差 $|e(k)|$ 比较大时，采用 PD 控制，可使超调量大幅度降低。实验时，取 E_1 为 40 度， E_0 为设定值的 5% 左右。编程时要特别注意，由全功率加热到 PD 时控制量的初始值的选取。因为控制量的实际输出是带限幅的，全功率转为 PD 加热时，初始值选取全功率，会使比例项控制效果变差，建议选择实际的 PID 控制量作为控制量初始值。

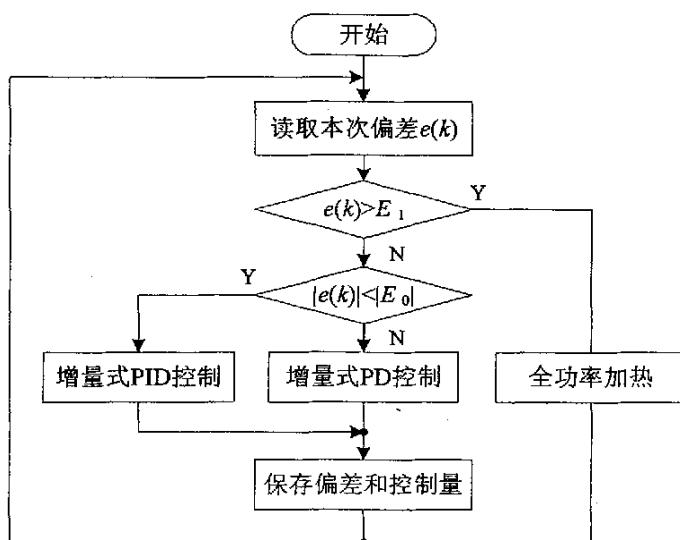


图4.5 积分分离PID算法流程图

Fig. 4.5 Flow of integration separation PID arithmetic

4.3.2 采样周期的选择

数字 PID 控制算法是建立在用计算机对连续 PID 控制进行数字模拟的基础上的控制。采样周期越小，数字模拟越精确，控制的效果就越好，越接近于连续控制。但采样周期的选择是受到多方面的因素影响的。

从对调节的品质的要求来看，似乎应将采样周期取得小些，这样在按连续系统的 PID 调节选择整定参数时，可得到较好的控制效果。从执行元件的要求来看，有时需要输出信号保持一定的宽度。从控制系统随动和抗干扰性的性能要求来看，则要求采样周期短些，这样，给定值的改变可以迅速的通过采样反映，而不致在随动控制中产生大的延时。

从计算机的工作量和每个调节回路的计算成本来看，一般则要求采样周期大些。从计算机的精度来看，过短的采样周期是不合适的，因为，如果过短的话，前后两次采样的数值之差可能因计算机精度不高而反映不出来，使调节作用减弱。此外，在用积分部分消除静差的调节回路中，如果采样周期过短，将使积分部分的增益 T_s/T_I 过低。当偏差小到一定的限度以下时， $(T_s/T_I) \cdot e(k)$ 就有可能受到计算机精度限制而终止为零。积分部分不能继续起消除残差的作用。这部分残差将被保留下来。因此， T 的选择必须大到使计算机精度造成的“积分残差”减小到可以接受程度。

对于料筒温度控制对象，由于料筒时间常数较大，系统响应较慢，因此过低的采样周期是没有必要的，同时输出采用普通的继电器，寿命上也不容许非常频繁的通断。考虑到实际情况，本系统采样周期取为 6 秒。

4.3.3 控制结果及分析

图 4.6(a)是温度设定值为 180℃，采用积分分离 PID 控制算法得到的结果，经过现场反复调整 PID 参数，三段 PID 参数如下表 4.3 所示，当误差小于 10℃时，引入积分。图 4.6(b)温度设定值改为 150℃时，PID 参数不变，系统的响应。

可见，对于积分分离 PID 温度设定点为 180℃时，控制器的性能是令人满意的。取同样的 PID 参数，当设定值为 150℃时超调量、调整时间都较设定值为 180℃时大为增加。以第一段为例，超调由 1.8℃增加到 7.2℃，调整时间反而从 1200 秒增加到 1300 秒，由上面的实验表明：PID 控制器虽然有较强的鲁棒性，但对于非线性较强的料筒加热系统，其控制性能也会有较大的不一致性。即随着工作点

的变化，同一组 PID 参数控制性能会有很大的变化，而且环境温度的变化对其也有较大的影响，夏天与冬天的结果不一样。虽然此时可调整 PID 参数使性能得到提高，但 PID 参数调整起来对于操作者来说比较困难且非常费时，因为一般的现场操作者并不具备这样的技能，所以有必要采用一种算法，能适应这些工况的变化。模糊变系数 PID 控制可以达到这样的效果。

表 4.3 PID 参数表
Table 4.3 PID parameters

功率	K_P	K_I	K_D
第一段	2.5	0.041	2.3
第二段	2.2	0.059	1.2
第三段	2.6	0.032	1.5

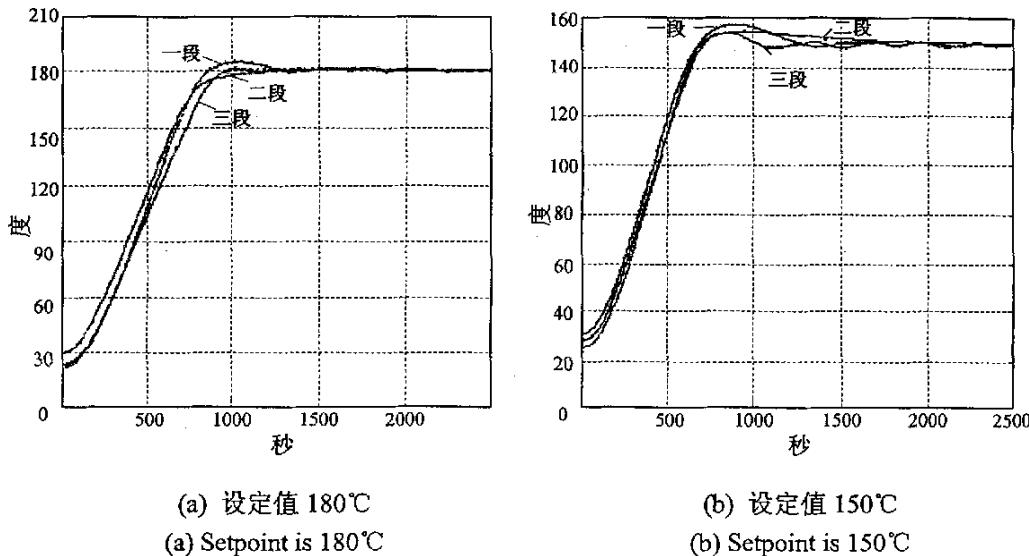


图 4.6 固定系数 PID 控制结果

Fig. 4.6 Results of PID control with constant coefficient

4.4 料筒温度模糊控制算法的研究

4.4.1 模糊控制概述

4.4.1.1 模糊控制发展和特点

自从扎德 1965 发表了首篇有关模糊集理论的论文以来，模糊理论和模糊控制开始了它的艰难历程。在崇尚科学的精确性和严密性的年代，模糊集理论无法得

到广大学者的认同，尤其是权威学者的认可。由于存在众多权威人士的反对，模糊理论在它的发源地美国的发展相当缓慢。在欧洲，对模糊理论的研究着重在模糊控制上。自从 Mamdani 教授 1974 年首先将模糊理论用于锅炉和蒸汽机的控制，开创了模糊控制的先河，模糊控制理论的应用研究在 70 年代的欧洲取得了一些成功。在 80 年代后，模糊控制理论进入了发展期，包括美国在内的世界各国在模糊控制理论研究投入的基金、各大公司投入的开发资金明显增加，从而促使了模糊控制理论和模糊控制产品的不断发展和不断翻新。近十几年来模糊控制发展相当迅速，如今已经成为控制领域一个很时髦的名词，更由于该理论还不完善，还有很多问题尚未解决，因而它具有广阔的发展空间供人们开拓^[39]。

模糊控制是建立在人工经验基础上的。对于一个熟练的操作人员，它并非需要了解被控对象的数学模型，而是凭借其丰富的实践经验，采取适当的对策来巧妙的控制一个复杂的过程。若能把这些熟练操作员的实践经验加以总结和描述并用语言表达出来，它就是一种定性的、不精确的控制规则。如果用模糊数学将其定量化就转化为模糊控制算法，从而形成了模糊控制理论。归结模糊控制器的特点如下：

- (1) 无需知道被控对象的数学模型。模糊控制是以人对被控系统的控制经验为依据而设计的控制器，故无需知道被控系统的数学模型。
- (2) 是一种反映人类智慧思维的智能控制。模糊控制采用人类思维中的模糊量，如“高”、“中”、“低”、“大”、“小”等，控制量由模糊推理导出。这些模糊量和模糊推理是人类通常智能活动的体现。
- (3) 易被人们所接受。模糊控制的核心是控制规则，这些规则是以人类语言表示的，如“衣服较脏，则投入洗涤较多，洗涤时间较长”，很明显这些规则已被一般人所接受和理解。
- (4) 构造容易。用单片机等来构造模糊控制系统，其结构与一般的数字控制系统无异，模糊控制算法用软件实现。
- (5) 鲁棒性好。模糊控制系统无论被控对象是线性的还是非线性的，都能执行有效的控制，具有良好的鲁棒性和适应性。

4.4.1.2 模糊控制系统的结构

模糊控制系统是一种自动控制系统，它是以模糊数学、模糊语言形式的知识表示和模糊逻辑推理为理论基础，采用计算机控制技术构成的一种具有闭环结构的数字控制系统。它的组成核心是具有智能型的模糊控制器。无疑，模糊逻辑控

制系统是一种典型的智能控制系统，在控制原理上它应用模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理的知识，模拟人的模糊思维方法，对复杂过程进行控制。模糊逻辑控制的基础是模糊逻辑。模糊逻辑从含义上比其它的传统逻辑更接近人类的思想和自然语言。它能够对真实世界的近似的、不确切的特征进行刻画。实际上，模糊逻辑控制是利用模糊逻辑建立一种“自由模型”的非线性控制算法，特别是在那些采用传统定量技术分析过于复杂的过程、或者提供的信息是定性、非精确的、非确定的系统中，模糊控制的效果是相当明显的^[40]。

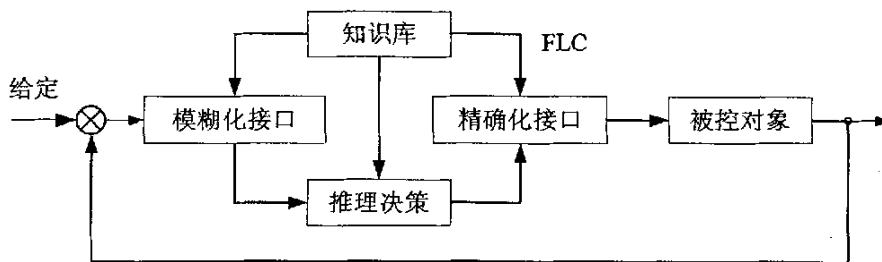


图 4.7 模糊逻辑控制基本结构图

Fig. 4.7 Structure of fuzzy logic control

模糊逻辑控制系统的 basic 结构如图 4.7 所示。从图中可以看出，模糊控制系统的主要部件是模糊化过程，知识库（含数据库和规则库）、推理决策和精确化计算。很显然，模糊控制系统在结构上与传统的控制系统没有太大的差别。主要不同之处在于控制器采用了模糊控制器。由于模糊控制器是采用数字计算机来实现的，所以，它应该具备下列三个重要功能：

- (1) 把系统的偏差从数字量转化为模糊量（模糊化过程、数据库两块完成）。
- (2) 对模糊量由给定的规则进行模糊推理（规则库、推理决策完成）。
- (3) 把推理结果的模糊输出量转化为实际系统能够接受的精确数字量或模拟量（精确化接口）。

因此，模糊控制器的设计问题就是模糊化过程、知识库（含数据库和规则库）、推理决策和精确化计算四部分的设计问题。

4.1.1.3 模糊控制系统的设计方法

模糊控制器的设计一般要遵循以下几个步骤和原则：

1. 模糊控制器结构的选择：所谓模糊控制器结构的选择，就是确定模糊控制器的输入输出变量。模糊控制器的结构对整个系统的性能有较大的影响，必须根据被控对象的具体情况，合理选择。模糊控制器的结构有单输入单输出(SISO)多输入单输出(MISO)，多输入多输出(MIMO)几种。模糊控制器的输入输出维数越

多，模糊控制规则的建立越复杂，控制算法亦趋于复杂。

2. 模糊规则的选取和模糊推理：模糊规则的选择是设计模糊控制器的核心。由于模糊规则一般需要由设计者提取，因而在模糊控制规则的取舍上往往体现了设计本身的主观倾向，应认真分析，反复测试，尽量减少人为影响。在选择模糊规则时，要注意规则的完整性、相容性和干涉性等。模糊规则的选择过程可简单分成三个部分，即选择适当的模糊语言变量，确定各语言变量的隶属函数，最后建立模糊控制规则。

(1) 模糊语言的确定。模糊规则是由若干语言变量构成的模糊条件语句，它们反映了人类的某种思维方式。根据模糊语言的定义，它由语法规则、语言值、语义规则（语法规则）和论域等几部分构成。因此，模糊语言变量的确定，包含了根据语法规则生成适当的模糊语言值，根据语义规则确定语言值的隶属函数以及确定语言变量的论域等。在确定模糊变量时，首先要确定其基本语言值。一般来说，一个语言变量的语言值越多，对事物的描述就越准确，可能得到的控制效果就越好。当然，过细的划分反而有可能使控制规则变得复杂。因此，应根据具体情况而定，但是一定要保证所有语言值形成得模糊子集应构成该模糊变量的一个模糊划分。

(2) 确定语言值的隶属函数。模糊语言值实际上是一个模糊子集，而语言值最终是通过隶属函数来描述的。语言值的隶属函数主要有上述的三种，可以根据需要选择。一般说来，隶属函数的形状越陡，分辨率就越高，控制灵敏度也较高；相反，若隶属函数的变化很缓慢，则控制特性也较平缓，系统的稳定性好。因此，在选择语言值的隶属函数时，一般在误差为零的附近区域，采用分辨率较高的隶属函数，而在误差较大的区域，为使系统具有良好的鲁棒性，常可采用分辨率较低的隶属函数。

(3) 模糊控制规则的建立。模糊规则的建立有经验归纳法和推理合成法两种方法。所谓经验归纳法，就是根据人的控制经验和知觉推理，经整理、加工和提炼后构成模糊规则系统的方法，它实际上是从感性上升认识到理性认识的一个飞跃过程。推理合成法是建立模糊规则的另一种较为常用的方法。其主要思想是根据已有的输入输出数据对，通过模糊推理合成求取被控系统的模糊控制规则。在建立模糊控制时，可根据实际情况选用一种方法或者将两者相结合使用。模糊规则确定后，可以按 Mamdani 极小算法等模糊推理方法进行推理。

(4) 模糊推理，对相应模糊输入得到模糊输出量。

3. 解模糊：解模糊的目的是根据模糊推理的结果，求得最能反映控制量的真实分布，一般有最大隶属度法、中位数法和加权平均法。研究表明，加权平均法比中位数法具有更佳的性能，而中位数法的动态性能要优于加权平均法，静态性能则略逊于加权平均法。一般情况下，这两种方法都优于最大隶属度法，但最大隶属度法的实现最简单。

4. 模糊控制器论域及比例因子的确定：模糊语言变量的论域范围应根据其代表的物理量的信号范围而定。一般说来，论域的量化等级越细，控制精度越高，但过细的量化等级将使算法复杂化，而且也没有必要。各比例因子应根据系统的动、静态性能要求通过实验等确定^[41]。

4.4.2 模糊变系数 PID 控制算法简介

4.4.2.1 模糊变系数 PID 控制器原理

注塑机料筒模糊变系数 PID 控制器的原理框图见图 4.8。

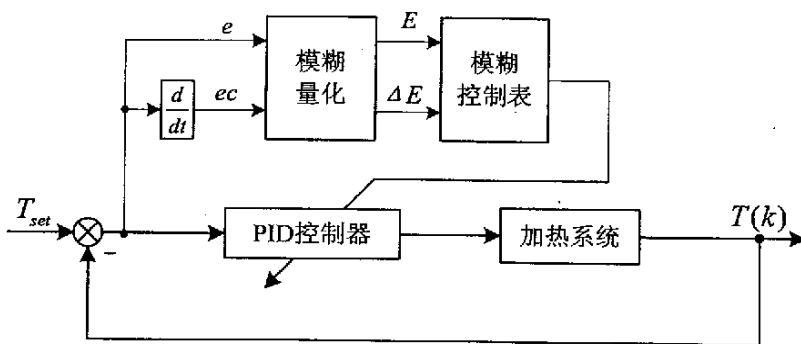


图 4.8 模糊变系数 PID 控制系统结构图

Fig. 4.8 Structure of fuzzy variable coefficient parameters PID arithmetic

模糊变系数 PID 控制器实际上是将模糊控制与 PID 控制相结合，利用模糊控制的原理在线地调整 PID 控制器的参数，从而获得模糊控制器鲁棒性强的优点，同时又保持了 PID 控制器的算法简单、实时性强且没有静差的优点。

从图 4.8 中可以看出，将温度误差及其变化率经过模糊量化后，根据模糊控制规则在线地调整 PID 控制器的参数，从而达到 PID 控制器参数适应温度设定及环境变化的目的。

令

$$e(k) = T_{set} - T(k)$$

$$\dot{e}(k) = e(k) - e(k-1)$$

式中, T_{set} 为温度的给定值, $T(k)$ 代表反馈的实测温度值, 单位均为℃。

同时, 设 $E(k)$ 、 $\Delta E(k)$ 分别为 $e(k)$ 、 $\dot{e}(k)$ 经模糊量化后的值, 则模糊变系数 PID 控制算法的 PID 参数整定规则如下:

$$\left. \begin{aligned} K_p(k) &= K_p(0) + T_{K_p}[E(k), \Delta E(k)]Q_p \\ K_I(k) &= K_I(0) + T_{K_I}[E(k), \Delta E(k)]Q_I \\ K_D(k) &= K_D(0) + T_{K_D}[E(k), \Delta E(k)]Q_D \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

式中, $T_{K_p}[E(k), \Delta E(k)]$ 、 $T_{K_I}[E(k), \Delta E(k)]$ 、 $T_{K_D}[E(k), \Delta E(k)]$ 分别为 K_p 、 K_I 、 K_D 的模糊控制表中对应 $E(k)$ 、 $\Delta E(k)$ 的值; Q_p 、 Q_I 、 Q_D 为比例因子。

这样, 就可以依据模糊规则在线地调整 PID 控制器的参数值, 从而提高 PID 控制器的鲁棒性, 并且参数调整以查表方式获得, 算法简单实时性强, 关键在于通过实验来获得 PID 参数的调整规则, 获得有效的控制^[43]。

4.4.2.2 PID 参数整定思想

PID 参数自整定的实现思想是先找出 PID 三个参数与偏差 e 和偏差 \dot{e} 之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测 e 和 \dot{e} , 再根据模糊控制原理来对 3 个参数进行在线修改, 以满足不同 e 和 \dot{e} 时对控制器的不同要求, 从而使被控对象有良好的动、静态性能, 而且计算量小, 易于单片机实现; 从系统的稳定性, 响应速度、超调量和稳态精度等各方面特性来考虑, K_p 、 K_I 和 K_D 参数的作用如下:

比例系数 K_p 的作用在于加快系统的响应速度, 提高系统调节精度。 K_p 越大, 系统的响应速度越快, 系统的调节精度越高, 也就是对偏差的分辨率(重视程度)越高, 但将产生超调, 甚至导致系统不稳定, K_p 取值过小, 则会降低调节精度, 尤其是使响应速度缓慢, 从而延长调节时间, 使系统静态, 动态特性变坏。

积分作用系数 K_I 的作用在于消除系统的稳态误差。 K_I 越大, 系统静态误差消除越快, 但 K_I 过大, 在响应的初期会产生积分饱和现象, 从而引起响应过程的较大超调。若 K_I 过小, 将使系统静差难以消除, 影响系统的调节精度。

微分作用系数 K_D 的作用在于改善系统的动态特性。因为 PID 控制器的微分作用环节是响应系统偏差变化率 \dot{e} 的, 其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化, 对偏差变化进行提前预报。但 K_D 过大, 则会使响应过程过分提前制动, 从而延长调节时间, 而且系统的抗干扰性能较差。

PID 参数的整定必须考虑到在不同时刻三个参数的作用以及相互之间的互联关系。根据参数 K_p 、 K_I 和 K_D 对系统输出特性的影响情况, 可归纳出在一般情况下, 在不同的 $|e|$ 和 $|\dot{e}|$ 时, 被控对象对参数 K_p 、 K_I 和 K_D 的自整定要求为:

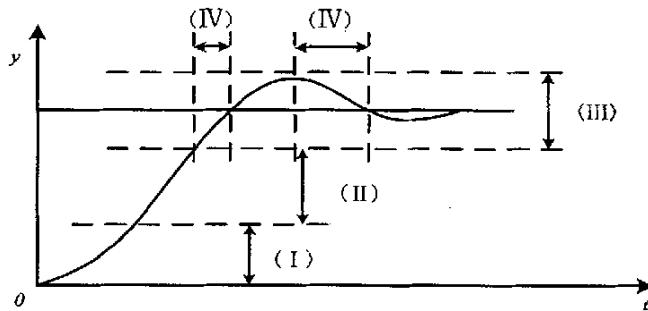


图 4.9 响应曲线

Fig. 4.9 Response curve

(1) 当 $|e|$ 较大时, 即系统响应处于图 4.9 所示输出响应曲线的第 I 段时, 为了加快系统的响应速度, 并避免因开始时偏差 e 的瞬间变大, 可能引起微分过大, 而使控制作用超出许可范围, 应取较大的 K_p 和较小的 K_D ; 同时为了防止积分饱和, 避免系统较大的超调, 此时应取消积分作用, 取 $K_I = 0$ 。

(2) 当 $|e|$ 和 $|\dot{e}|$ 为中等大小, 即处于图 4.9 曲线的第 II 段, 为使系统的超调减小, 取较小的 K_I , 取适中的 K_p 和 K_D , 以保证系统的响应速度。

(3) 当 $|e|$ 较小时, 即系统响应处于图 4.9 所示输出响应曲线的第 III 段时, 为使系统具有良好的稳态精度, 应取较小的 K_p 和较大的 K_I , 同时为避免系统在设定值附近出现振荡, 并考虑系统的抗干扰性能, 应适当地选取 K_D , 原则是: 当 $|\dot{e}|$ 较小时, K_D 可取大一些, 通常取为中等大小; 当 $|\dot{e}|$ 较大时, K_D 应取小值。

(4) 当 $|e|$ 和 $|\dot{e}|$ 符号相同时, 即系统响应处于图 4.9 所示输出响应曲线的第 IV 段时, 表示向设定值靠近。此时比例项将阻碍积分项, 减慢动态响应速度, 因此这时要使 K_p 值尽可能的小^{[42][44]}。

4.4.3 模糊变系数 PID 控制器的实现

模糊变系数 PID 控制算法的设计, 是将 K_p 、 K_I 和 K_D 调整量作为控制输出, 并依照一般模糊控制器的设计来进行^[40]。

1. 确定各量的模糊集合

$E(k)$ 、 $\Delta E(k)$ 、 K_p 、 K_I 、 K_D 的模糊集合均取为以下 7 种, 即 NB (负大)、NM (负中)、NS (负小)、ZO (零)、PS (正小)、PM (正中)、PB (正大)。

2. 确定各量的模糊量化的方法

将 $E(k)$ 、 $\Delta E(k)$ 的论域分为 -4~4 共 9 档, 为了提高控制精度, 对它进行非线性分档如下:

$$E(k) = \begin{cases} 4\text{sign}(e(k)) & 20 \leq |e(k)| < 40 \\ 3\text{sign}(e(k)) & 10 \leq |e(k)| < 20 \\ 2\text{sign}(e(k)) & 5 \leq |e(k)| < 10 \\ \text{sign}(e(k)) & 2 \leq |e(k)| < 5 \\ 0 & |e(k)| < 2 \end{cases}$$

$$\Delta E(k) = \begin{cases} 4\text{sign}(\Delta e(k)) & |\Delta e(k)| \geq 1 \\ 3\text{sign}(\Delta e(k)) & 0.5 \leq |\Delta e(k)| < 1 \\ 2\text{sign}(\Delta e(k)) & 0.3 \leq |\Delta e(k)| < 0.5 \\ \text{sign}(\Delta e(k)) & 0.15 \leq |\Delta e(k)| < 0.3 \\ 0 & |\Delta e(k)| < 0.15 \end{cases}$$

K_p 、 K_I 和 K_D 的论域分为-4~4共9档，它们是线性分档的。

3. 确定语言值的隶属度表

$E(k)$ 、 $\Delta E(k)$ 的隶属度表见表 4.4， K_p 、 K_I 和 K_D 的隶属度表见表 4.5。

表 4.4 $E(k)$ 、 $\Delta E(k)$ 的隶属度表

Table 4.4 Membership degree of $E(k)$ and $\Delta E(k)$

EC	等级								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PB	0	0	0	0	0	0	0.1	0.7	1
PM	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0
ZO	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NS	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0
NB	1	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0

表 4.5 K_p 、 K_I 和 K_D 的隶属度表

Table 4.5 Membership degree of K_p ， K_I and K_D

EC	等级								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
PB	0	0	0	0	0	0	0.1	0.7	1
PM	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0
ZO	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NS	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.5	0.1	0	0	0	0
NB	1	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0

4. 确定控制规则

根据调整 PID 控制器的经验，并在现场进行 K_p 、 K_I 和 K_D 的控制规则，分别见表 4.6 到表 4.8。

表 4.6 K_p 的参数调整规则Table 4.6 Rules for adjustment of parameter K_p

$E(k)$	$\Delta E(k)$						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
PM	PB	PB	PM	PM	NM	NB	NB
PS	PS	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
ZO	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
NS	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NM	NB	NB	NM	PM	PM	PB	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

表 4.7 K_I 的参数调整规则Table 4.7 Rules for adjustment of parameter K_I

$E(k)$	$\Delta E(k)$						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
PM	PB	PB	PB	ZO	NB	NB	NB
PS	PB	PB	PM	PM	NS	NB	NB
ZO	PB	PM	PM	PB	PM	NM	NB
NS	NB	NB	NS	PM	PM	PB	PB
NM	NB	NB	NB	ZO	PB	PB	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

表 4.8 K_D 的参数调整规则Table 4.8 Rules for adjustment of parameter K_D

$E(k)$	$\Delta E(k)$						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB
PM	NB	NB	NB	NM	NB	NB	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	ZO	PS	PM
ZO	PM	NM	NS	ZO	NS	NM	PM
NS	PM	PS	ZO	NS	ZO	PS	PM
NM	NB	NB	NB	NM	NB	NB	NB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

5. 求取控制表

依照 Min-Max 推理规则，每一条控制规则均可得到一个模糊关系，在对各关

系进行合成，经加权模糊判决法，可获得各参数的调整表如表 4.9 到表 4.10 所示。

表 4.9 K_p 的调整表 $T_{K_p}[E(k), \Delta E(k)]$ Table 4.9 Adjustment table of parameter K_p

$E(k)$	$\Delta E(k)$								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.9	3.8	3.9	3.9
-3	3.9	3.9	3.9	3.1	2.2	1.5	0.5	0.4	0.1
-2	3.9	3.9	3.8	2.0	1.9	-2.1	-3.8	-3.9	-3.9
-1	1.1	0.5	0	-1.1	-2.0	-2.1	-3.8	-3.9	-3.9
0	2.0	2.0	1.9	1.1	1.0	1.1	2.0	2.0	1.9
1	-3.9	-3.9	-3.8	-2.1	-2.0	-1.1	0	0.5	1.1
2	-3.9	-3.9	-3.8	-2.1	1.9	2.0	3.8	3.9	3.9
3	0.1	0.4	0.5	1.5	2.2	3.1	3.9	3.9	3.9
4	3.9	3.9	3.8	3.9	3.8	3.9	3.9	3.9	3.9

表 4.10 K_I 的调整表 $T_{K_I}[E(k), \Delta E(k)]$ Table 4.10 Adjustment table of parameter K_I

$E(k)$	$\Delta E(k)$								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	-3.9	-3.8	-3.9	-3.9	-3.8	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9
-3	-0.3	-0.6	-0.7	-1.0	-2.0	-3.8	-3.9	-3.9	-3.9
-2	3.9	3.9	3.9	3.8	0	-3.7	-3.8	-3.9	-3.9
-1	3.9	3.9	3.8	2.0	1.9	-1.0	-3.8	-3.9	-3.9
0	-3.9	-3.2	-2.1	1.9	3.9	2.1	2.0	3.2	3.9
1	-3.9	-3.9	-3.8	-1.0	1.9	2.0	3.8	3.9	3.9
2	-3.9	-3.9	-3.8	-3.7	0	3.8	3.9	3.9	3.9
3	-3.9	-3.9	-3.9	-3.8	-2.0	-1.0	-0.7	-0.6	-0.3
4	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9	-3.8	-3.9	-3.9	-3.8	-3.9

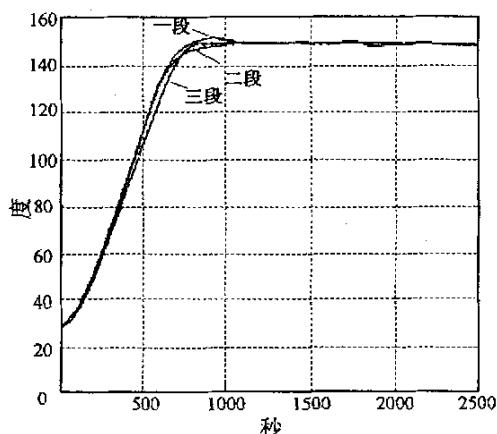
表 4.11 K_D 的调整表 $T_{K_D}[E(k), \Delta E(k)]$ Table 4.11 Adjustment table of parameter K_D

$E(k)$	$\Delta E(k)$								
	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
-4	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9	-3.8	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9
-3	-1.0	-1.5	-2.1	-3.0	-3.1	-3.0	-2.1	-1.5	-1.0
-2	1.1	0.7	0	-1.1	-2.0	-1.1	0	0.7	1.1
-1	2.0	1.6	1.1	0.1	-0.9	0.1	1.1	1.6	2.0
0	2.1	-0.5	-1.9	-1.0	-0.1	-1.0	-1.9	-0.5	2.1
1	2.0	1.6	1.1	0.1	-0.9	0.1	1.1	1.6	-2.0
2	1.1	0.7	0	-1.1	-2.0	-1.1	0	0.7	1.1
3	-1.0	-1.5	-2.1	-3.0	-3.1	-3.0	-2.1	-1.5	-1.0
4	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9	-3.8	-3.9	-3.9	-3.9	-3.9

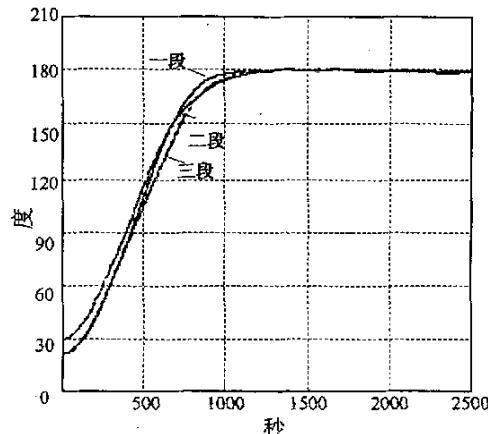
4.4.4 控制结果及分析

对于三段温控区，根据公式(4.9)，分别取初值和调整因子为：第一段， $K_p(0)=6$, $K_I(0)=0.2$, $K_D(0)=8$, $Q_p=1.5$, $Q_I=0.05$, $Q_D=2$ ；第二段， $K_p(0)=5$, $K_I(0)=0.5$, $K_D(0)=6$, $Q_p=1.25$, $Q_I=0.125$, $Q_D=1.5$ ；第三段， $K_p(0)=4$, $K_I(0)=0.4$, $K_D(0)=4$, $Q_p=1$, $Q_I=0.1$, $Q_D=1$ 。再根据 4.8 到 4.10 查出 $E(k)$, $\Delta E(k)$ 对应的 PID 调整值，代入公式就可以计算出 PID 系数了。

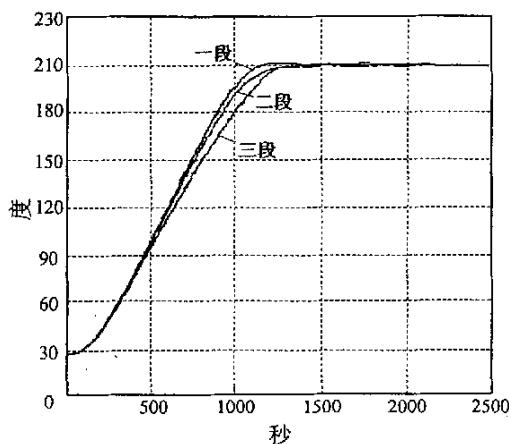
经过反复调整模糊规则表，利用模糊变系数 PID 方法对注塑机料筒三段进行加热控制，设定值分别为 150°C, 180°C, 210°C 的输出结果分别如图 4.10(a), 4.10(b), 4.10(c) 所示。



(a) 设定值 150°C
(a) Setpoint is 150°C



(b) 设定值 180°C
(b) Setpoint is 180°C



(c) 设定值 210°C
(c) Setpoint is 210°C

图 4.10 模糊变系数固定系数 PID 控制结果

Fig. 4.10 Results of fuzzy variable coefficient PID control

由以上三图可知，在工作点 80℃范围变化，模糊变系数 PID 控制都能做到无超调或超调很小(2℃)，稳态精度 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ，230℃时调整时间约为 20min，调整时间也是比较快的，其结果令人满意。在一般的模糊控制系统中，通常采用二维模糊控制器结构，以系统误差和误差变化率为输入语言变量，因此它具有类似于常规 PID 控制器的作用，动态性能较好，但静态性能不能令人满意，而 PID 控制器具有结构简单，稳定性好，可靠性高等优点，且没有静差，因此这里采用模糊变系数 PID 本质上是一个 PID 控制器，只是 PID 参数根据误差和误差变化率做相应调整，综合了一般模糊控制与 PID 控制的优点，因此本模糊 PID 控制的动态性能比固定 PID 控制强，稳态性能比常规模糊控制器好。

综上所述，模糊变系数 PID 控制算法具有以下三个特点：

- (1) 算法简单，运算量小，实时性强。算法的核心（PID 参数调整表）是离线生成的，实时控制时只需查表得出调整量，按式(4.9)求出 PID 参数，再用 PID 算法求出控制输出。
- (2) 与普通 PID 控制器相比，鲁棒性强，不需要根据环境温度及设定温度调整 PID 控制器参数，降低了对操作者的要求。
- (3) 与普通模糊控制器相比，稳态精度高，没有静差。
- (4) 需要大量的先验知识来制订 PID 参数调整规则，而且这些规则还要经过实验反复测试校正，没有成型依据可寻。

4.5 本章小结

本章首先设计了基于微机的料筒温度测控系统，采用 PWM 技术使得普通继电器能够实现准连续控制。

然后对料筒特性进行了测试研究，所采用的方法是基于最小二乘的阶跃响应辨识法，并做了四组实验，实验结果说明料筒温度控制对象，是一个非线性、大惯性、有滞后、相邻段有较强耦合的多变量系统。

最后对料筒温度控制算法进行了研究。首先将的积分分离 PID 控制算法应用于料筒温度控制，通过两组实验对比可知，随着工作点的变化，同一组 PID 参数控制性能会有很大的变化，这是由于料筒温度对象的非线性特性引起的。为解决这个问题，引入了模糊变系数 PID 控制算法，该方法本质上还是 PID 控制算法，只不过加入了模糊控制器来在线调整 PID 算法的参数。通过四组实验数据对比表明，该方法控制效果良好，能很好的适应注塑机工况的改变。最终得出结论，模

糊变系数 PID 控制算法较固定 PID 控制算法鲁棒性更强，较一般的模糊控制器静态精度更高，没有静差。

第五章 结束语

注塑成型是目前应用较广泛的塑料加工方法，注塑机作为注射成型的主要设备，在塑料工业迅猛发展的今天，其自动化程度越来越受到人们的重视。本文是以宁波海天公司生产的型号为 HTF58X2 的注塑机为研究背景，进行注塑机控制系统的设计改造和温度控制算法的研究的。

论文首先介绍了螺杆式注塑机的结构组成、工作循环原理及注塑机发展研究现状，并在此基础上给出了注塑控制系统改造设计思想和具体方案。具体说来，在线路改造部分，根据注塑机线路中所用到的各种信号类型，将其分为数字量和模拟量两大类，分别阐述了具体的线路改造方案。在软件设计部分，划分出软件功能模块，给出了下位机软件主程序流程图和监控画面的设计实例。经实际系统接线和软件运行测试，开发出的控制系统是运行可靠和实用的。

论文还对注塑机控制的难点之一料筒温度控制算法展开了研究。首先通过基于最小二乘法的阶跃响应辨识法建立了料筒温度系统的数学模型，然后应用积分分离PID算法和模糊变系数PID算法对料筒进行了加热实验。实验表明，模糊变系数PID算法较积分分离PID算法有更强的鲁棒性，它们共同的优点是算法简单，实时性强，缺点是积分分离PID算法参数需要人工整定，并且其控制效果随工况的变化，而发生很大的改变，模糊变系数PID算法规则表的制定需要很多经验，而且制定好的控制规则还需要根据实验结果反复调整修正。

本文虽然在注塑控制系统改造设计和料筒温度控制算法方面开展了一些有意义的研究工作，但是由于时间和实验条件的限制，本文的研究工作还不够深入和系统。

目前控制器注射、保压是开环控制的，进一步研究可根据塑料的 P-V-T 特性来探索采用 PID 算法、迭代学习算法以及模型参考自适应算法(AMAC)等方法，来进行闭环控制，以提高注塑质量。

在温度控制方面，目前的模糊变系数 PID 算法，制定规则还需要大量人工经验，模糊神经综合方法可以自学习模糊规则，可使模糊控制规则的选取更加智能化。此外，在广义最小方差基础上引入多步预测思想而形成的广义预测控制，理论上分析较适于非线性、慢时变的料筒温度对象，因此该方法是个很有研究价值的方向。

根据本文的测试结果,料筒温度模型是个相邻段具有较强耦合的多变量系统,因此可以将多变量解耦控制方法运用于该系统,从而进一步提高料筒温度的控制效果。

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, 2004, 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, 2004, 32(4): 56-59.
4. 王志新. 现代注塑机控制[M], 北京: 中国轻工业出版社, 2001, 27-33.
5. 张友根. 我国注塑机的特点及发展方向[J], 上海塑料, 2004(1): 4-8.
6. Zhongbao Chen, Lih-Sheng Turng. A review of current developments in process and quality control for injection molding [J], Advances in Polymer Technology, 2005, 24(3): 165-182.
7. 钱泓. 注塑机液压控制系统的发展—电液比例控制技术在注塑机中的应用[J], 轻工机械, 1999(1): 56-59.
8. 钟汉如. 注塑机控制系统[M], 北京: 化学工业出版社, 2004, 1-14.
9. 鲍可进. PID 参数自整定的温度控制[J], 江苏理工学院学报, 1995, 16(6): 74-78.
10. 胡泽新, 周金荣, 黄道. 多变量非线自整定 PID 控制器[J], 控制理论与应用, 1996, 13(2): 268-172.
11. Wray, Michelle Lynn. A fuzzy logic controller for temperature control of a six-zone tube furnace (D), UNIVERSITY OF NOTRE DAME, 2000.
12. 孙巍, 何洪, 周恩涛. 基于 MNN 神经网络的液压系统油温的 PWM 自学习控制[J], 机械工程, 1998, 9(7): 44-47.
13. 王文杰. 模糊控制理论在温度控制中的应用[J], 西北纺织工学院学报, 1995, 9(2): 151-155.
14. Diaz, Gerardo Cristian. Simulation and control of heat exchangers using artificial neural networks (D), UNIVERSITY OF LOUISVILLE, 2001.
15. 吕剑虹, 陈来九. 模糊 PID 控制器及在汽温控制系统中的应用研究[J], 中国电机工程学报, 1995, 15(1): 16-22.
16. 刘飞, 须文波. FUZZY-PID 双模温控仪[J], 电子与自动化, 1996 (4): 10-13.
17. 胡社教, 徐晓冰, 杨柳. 温度控制仪表的模糊 PID 控制[J], 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998, 21(5): 151-154.
18. Honda Hiroyuki, Kobayashi Takeshi: Fuzzy control of bioprocess [C], Journal of Bioscience and Bioengineering, 2000, 401-408.
19. 王耀南. 神经网络自适应模糊控制在温度控制系统中的应用[J], 信息与控制, 1996, 25(4): 245-251.

20. 向文国, 蔡宁生. 基于 BP 神经网络的蒸汽温度控制[J], 自动化仪表, 2000, 21(12): 4-6.
21. Roger Jang J. S. ANFIS: Adaptive Network Fuzzy Inference System[J], IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(3): 665-685.
22. 郑明方. 一种用于机电设备的高精度温控系统[J], 制造业自动化, 1999, 21(5): 44-46.
23. 余勇, 万德钧. 管式裂解炉温度神经网络优化控制[J], 江苏石油化工学院学报, 1999, 11(3): 40-43.
24. 刘成峰. 注塑机电液控制系统的建模与仿真研究 (D), 太原: 太原理工大学论文集, 2003.
25. 彭勇刚. 节能环保注塑机控制系统设计 (D), 杭州: 浙江大学论文集, 2004.
26. 刘来英. 注塑成型工艺[M], 北京: 机械工业出版社, 2004, 121-137.
27. 路甬祥, 胡大弘. 电液比例控制技术[M], 北京: 机械工业出版社, 1998, 106-133.
28. 叶蕴瑶, 王锡山. QNX——一种 PC 机实时操作系统[J], 通信世界, 1998(4): 32-34.
29. 曹冰冰. 基于 QNX 实时操作系统的测试系统的开发 (D), 西安: 西北工业大学, 2002.
30. Carl Y. W. Ma. A design approach to a computer-controlled injection-molding machine [J], Polymer Engineering & Science, 2004, 44(11): 768-772.
31. 邹海, 边信黔, 王二西. QNX 环境下多线程编程[J], 微计算机信息, 2004, 20(6): 77-78.
32. 张寅; 许维胜. 基于 QNX 的嵌入式液位监控系统设计[J], 微计算机信息, 2003, 19(3): 45-47.
33. 董晓霞. 某实时控制系统在 QNX 上的具体实现[J], 现代雷达, 2002, 24(6): 26-28.
34. David R. Butenhof. Programming With POSIX Threads[M], Addison-Wesley, 1997, 1-161.
35. 李挥, 陈仲球, 叶永集. 过程多种控制方法的比较研究[J], 塑料科技, 1995(5): 34-38.
36. 王志新, 张华. 注塑机料筒温度检测及实验研究[J], 塑料科技, 1995(2): 39-42.
37. Rickey Dubay, Rodney Lakharm. A temperature-dependent adaptive controller. Part I: Controller Methodology and open-loop testing [J], POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, 2004, 44(10): 1925-1933.
38. 高东杰, 谭杰, 林红权. 应用先进控制技术[M], 北京: 国防工业出版社, 3-21.
39. 韦巍. 智能控制技术[M], 北京: 机械工业出版社, 1999, 4-7.
40. 章正斌, 吴汝善, 于健. 模糊控制工程[M], 重庆: 重庆大学出版社, 1995, 132-154.
41. 诸静. 模糊控制原理与应用[M], 北京: 机械工业出版社, 1996, 240-242.
42. 郭庆祝, 孟维明, 宋扬, 任光. 模糊控制技术发展现状及研究热点[J], 自动化博览, 2005(4): 68-70.
43. 金波, 沈海阔, 汤进举, 陈鹰. 注塑机料筒温度模糊变系数 PID 控制研究[J], 中国机械工程, 2005, 16(5): 395-398.
44. Rickey Dubay, Chris Diduch, Wan Gui Li. Temperature control in injection molding. Part II: Controller design, simulation and Implementation [J], POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE, 2004, 44(12): 2318-2326.

致 谢

首先感谢王福利教授，是王老师把我引入科学的研究的大门，是他的谆谆善诱和不断的鼓励才使我找到正确的研究方向，是他的渊博学识和耐心指导才使我能够深入研究并于枯燥的理论中获得了科研的乐趣。王老师对知识孜孜以求的探索精神及对学术前沿敏锐的洞察力使我受益良多；他广博的知识、敏锐的洞察力和热情的鼓励，帮助我逾越了许多障碍；他严谨的学术态度、一丝不苟的工作作风，为我树立了学习的楷模。在此，谨向恩师王福利教授致以崇高的敬意和衷心的感谢！

衷心感谢东北大学自动化研究所，毛志忠教授对我学术和生活上的指导和帮助。同样感谢贾明星老师和常玉清老师对我生活上的指导和学术上的帮助。感谢所里每一位曾给予我帮助的老师。

硕士学习的时光虽然转瞬即逝，却使我收获颇丰。我非常感谢东北大学自动化研究所提供的良好的学术氛围。在每两周一次的学术活动上，老师和同学们有见地的讨论使我开阔了眼界，并给了我许多有益的启迪。同时要感谢实验室里拍挡赵春晖同学，她忘我的学习态度和惜时高效的工作作风，同样为我树立了榜样。

此外，感谢两年多来与我朝夕相处、并肩学习的同学们：吕哲、王昱、王丹、王国亮、于灏、王坤、李勇、肖丽、郭丽、陈翔、董晟、张从容以及我的同学们。正是他们营造了一个温暖的集体和优越的学习环境，使我能够始终保持轻松愉快的心情，笑对困难，无论何时都充满信心。

最后，我要深深感谢一直在我身后默默支持我的父母，没有他们无私的资助和关爱，我不可能取得今天的成绩。