

上海交通大学

---

硕士学位论文

---

基于模糊自适应PID控制的可控波形压力交变系统研究与设计

---

姓名：王海峰

---

申请学位级别：硕士

---

专业：控制理论与控制工程

---

指导教师：陈坚

---

20071201

# 基于模糊自适应 PID 控制的可控波形 压力交变系统研究与设计

## 摘要

作为一种典型的环境模拟设备,压力波动试验台广泛用于军工、汽车、航天等行业产品的可靠性与耐久性测试。压力控制系统的强非线性使得控制精度与稳定性难以达到要求,限制其进一步的应用与发展,因此,如何应用过程控制理论实现系统的最佳控制效果,一直是此类项目研究的难点与重点之一。

本论文是以上海大众汽车有限公司压力试验台项目为背景,研究基于模糊自适应 PID 控制的压力交变系统的设计与实现。具体的内容为:

1. 分析了系统的工艺要求,提出系统设计方案,并在此基础上详细讨论了系统硬件总体结构与分系统设计,同时对系统的关键构成部件如数据采集设备、比例阀、PLC 等的原理与选型也进行了深入细致的探讨。
2. 研究了几种常用的过程控制策略,包括 PID 控制、自适应控制和模糊控制等,并且重点探讨了模糊自适应 PID 控制策略原理与其在该系统

中的实现。

3. 对系统控制软件的总体设计方案进行了较为全面的描述 ,并具体介绍了数据采集模块、串口通信模块、控制算法模块等软件功能模块的设计与实现。
4. 详细介绍了系统的调试内容与过程 ,包括软硬件单独测试与协同测试 ,并给出了波形生成调试的基本方法。

## 关键词

模糊自适应 PID , 压力试验台 , 数据采集 , 电 - 气比例控制

**THE RESEARCH AND DESIGN OF WAVE CONTROLLABLE  
PRESSURE ALTERNATING SYSTEM BASED ON FUZZY  
ADAPTIVE PID CONTROL**

**ABSTRACT**

Pressure fluctuation test-bed is a typical kind of environment simulation equipment, which is widely used in the test of reliability and durability for the product of military, motors and aviation. The nonlinearity of pressure system is too strong to make the precision and stability meet the request and this problem prevents its further application. Thus, how to use process control theory to get the best performance has become one of the most difficulty issues.

Based on the project of pressure test-bed for Shanghai Volkswagen Automotive., LTD, this thesis investigates the design and realization of pressure alternating system with fuzz adaptive PID control. The main contributions are listed as follows:

1. We analyze the technical request of the system, propose the design scheme and discuss the details of the hardware design. The principle and

type of key elements such as data collecting equipment, proportional valve, as well as PLC are also included.

2. Several common strategies of process control are introduced, including PID control, adaptive control and fuzz control. We focus on how to realize the fuzz adaptive PID control in this system.
3. The detail description of general design for software is given and the realization of the modules for data collecting, serial port communication as well as control algorithm is also proposed.
4. We analyze the testing content and process of the system, including separate test of software and hardware and cooperation test. Further more, we introduce the wave generation test method.

## **KEY WORDS**

Fuzz Adaptive PID, Pressure Test-bed, Data Collecting, Pneumatic Proportional Control.

## 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： 王海峰

日期： 2006 年 12 月 20 日

## 上海交通大学 学位论文版权使用授权书

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

**保密**，在\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

**不保密**。

(请在以上方框内打“ ”)

学位论文作者签名：王海峰

指导教师签名：陈坚

日期：2006年12月20日

日期：2006年12月20日

## 第一章 绪论

### 1.1 工程背景

2005年11月,上海增达环境试验设备有限公司与上海大众汽车有限公司签订压力波动试验台项目合同。该设备用于汽车散热器、冷却水管、平衡箱、热交换器等内部循环介质脉冲压力的疲劳试验和静态压力保持试验。对于上海增达的工程要求在于:该设备应能够进行频率和幅度可调的正弦压力脉冲试验、能够进行数值可调的恒值压力试验,试验介质流量和温度可控制,试验环境温度可控制,上位机监控程序应具备基本的数据采集与显示、参数输入、曲线显示、数据存储与查询、报警等功能。

该项目需提供包括加热系统、排气系统、冲液系统、脉冲压力比例控制系统等在内的试验台工作间以及包括数据采集设备和 PLC、工控机等在内的电控柜。试验台通过温控计、PLC、变频器、比例阀等设备实现试验台的压力、温度和流量的模拟生成,利用数据采集模块和工控机实现现场数据采集、分析和设备监控。在完成基本功能的同时,上海增达还需提供包括仿真测试、系统培训、现场安装调试等工程技术服务。

本人于2006年1月参与该项目,负责上位机控制程序设计编写与算法设计。主要职责有:(1)利用美国 National Instrument (NI)公司的 PCI6229 型数据采集模块实现压力数据的高速采集、显示与存储。(2)实现上位机与现场设备如温控计、PLC、变频器等通信。(3)压力脉冲生成控制算法的设计与实现。(4)利用 VC 实现上位机人机界面编写。目前,该项目已经通过上海大众验收并进入售后服务阶段。



## 1.2 关键技术概述 [1][2][3]

### 1.2.1 环境模拟技术

环境模拟是一门新的边缘性和综合性技术,主要研究各种自然环境的人工再现技术和在模拟环境下产品的试验技术。环境模拟通常包括温湿度环境模拟、盐雾环境模拟、雨淋环境模拟、振动模拟、压力模拟等等,广泛应用于航空航天、汽车、电子等行业的产品可靠性测试和环境适应性测试。图 1.1 所示为环境模拟的基本分类。

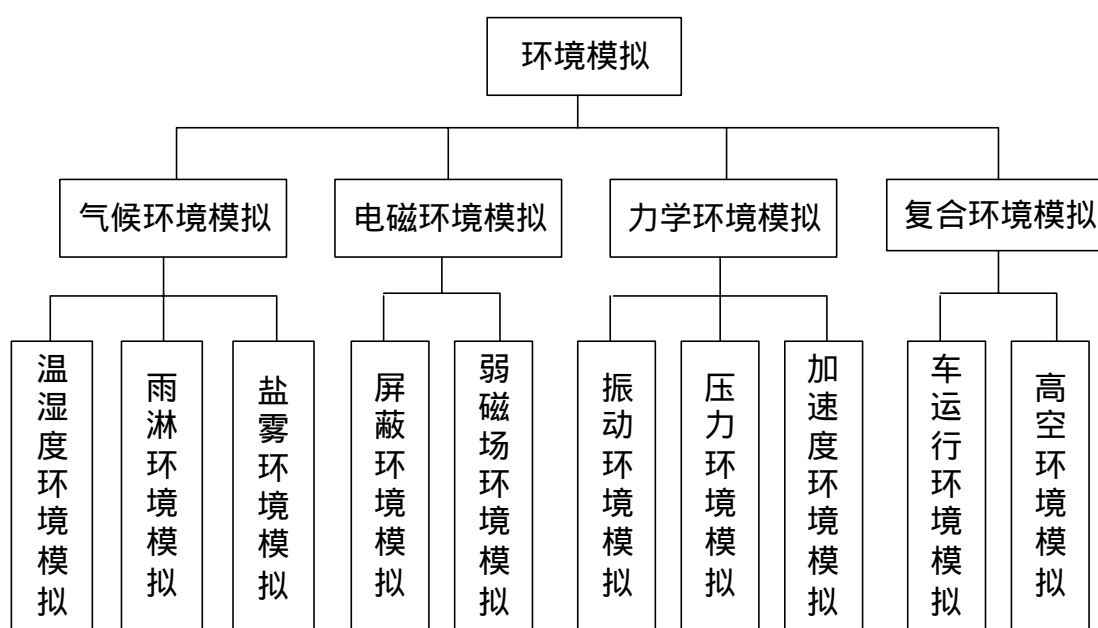


图 1.1 环境模拟基本分类

在国外,从四十年代,尤其是五十年代以来,为适应航空航天、兵器及其他产品的发展,先后建立了各种类型和不同规模的环境设备,如英国皇家陆军科学研究所车辆环境实验室、美国波音公司的高空试验舱、维也纳国际车辆研究试验中心的机车和车厢静动态环境试验设备等等。自六十年代以来,为适应航空、汽车和军事工业等行业的发展,我国也开始了环境模拟设备的研究与研制。经过几十年的稳步发展,环境试验设备研制行业逐渐涌现出一批民族企业,并且建成了相当数量的拥有国际先进水平的环境试验设备产品。

作为一种环境模拟设备，压力波动试验台同样广泛应用于汽车、航空、航天、兵器等领域。它通过生成一定的压力脉冲或提供一定的恒值压力，为试验对象提供仿真压力模拟环境。压力波动试验台是一个涉及到机械结构设计与分析、电液伺服、气动技术、自动控制理论与应用、计算机控制技术、软件设计、信号处理等多学科领域的理论和技术，是一项复杂的系统工程。关键技术包括：(1) 系统集成设计理论与技术。(2) 先进实时通信网络。(3) 现代控制理论与应用。(4) 电液伺服控制系统理论与应用。

### 1.2.2 数据采集技术

数据采集技术是信息科学的一个重要分支，它研究信息数据的采集、存储、处理以及控制等作业。将外部世界存在的温度、压力、流量、位移以及角度等物理量转换成电信号模拟量，然后再转换为数字信号，同时收集到计算机并做进一步处理、传输、显示与记录，称为“数据采集”。数据采集技术已在雷达、通信、水声、遥感、地质勘探、振动工程、无损检测、语音处理、智能仪器、工业自动控制以及生物医学工程等领域有着广泛的应用。图 1.2 为一种常见的基于 PC 机的数据采集系统结构。

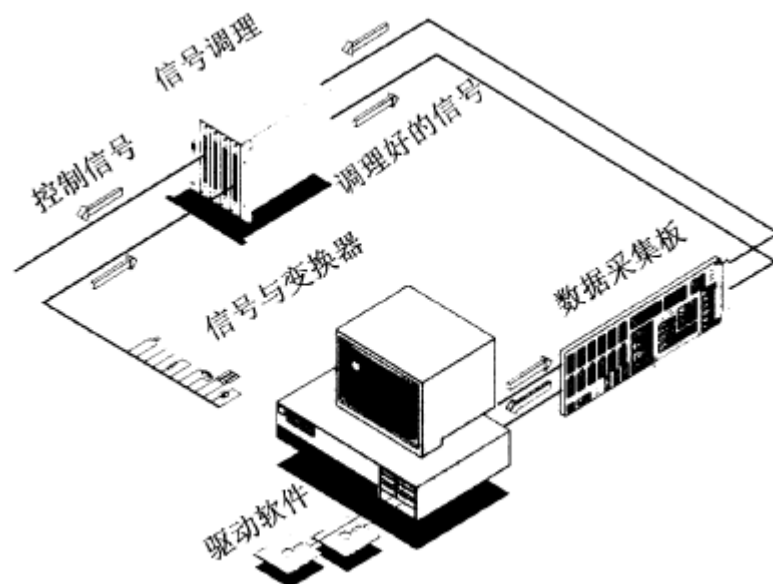


图 1.2 一种基于 PC 机的数据采集系统结构

常用基于 PC 机的数据采集架构一般可分为下面两种形式：

### 1. 基于板卡的集中式

基本方式是采用数据采集卡进行数据采集。主要做法是将一块基于 ISA 或 PCI 的板卡插入计算机或商业机上，将外部信号通过导线引至计算机的端子上然后介入数据采集卡，通过定制的软件就可以进行采集。常见的板卡供应商有美国 National Instrument 公司和台湾的 Advantech 公司等。

### 2. 基于分布式的数据采集系统

通过智能采集模块记录信号，再通过一些通用总线如 RS232, RS485 进行传送至 PC 机。或者采用基于现场总线的数据采集模块，基本做法是通过现场总线将智能模块引入计算机，上位机通过定制的软件和智能模块通讯。

科学技术和现代工业技术的发展，已在速度、分辨率、精度、接口能力、软件设计以及抗干扰能力等方面向现代数据采集技术提出了越来越高的要求。随着微电子技术及计算机科学技术的发展，数据采集技术的应用领域也会更为广阔。

## 1.2.3 电 - 气比例/伺服技术

比例控制技术在液压控制系统中已得到广泛应用，并取得了显著的经济效益，为适应工程领域要求，80 年代开始，日本，西德等国家相继对结构简单、成本低、维护方便的电磁比例气动阀进行研究，并成功的应用于工业自动机械、机械手和生产流水线中。电气比例/伺服系统是按照输入的电气信号(模拟信号)连续的、按比例的对气体的压力、流量、或方向进行控制。这类控制系统具有响应速度快、控制精度高的特点，但比例阀、伺服阀造价昂贵，且一对工作环境要求高，使得系统成本高。

比较早期的气动比例/伺服系统，大都采用机械控制方式。通过将最终输出量转换为机械弹簧位移或气压信号，然后反馈至无级调节气阀，从而实现对输出量的连续控制。随着高性能的电一气控制元件和执行元件的迅速发展，近年来在气动伺服定位控制方法的研究探索上也取得了很大的进展，曾经比较广泛应用的纯气动、纯机械控制系统逐渐减少，而由数字电路、模拟电路实现控制，利用气动执行元件输

出驱动物理量的电气一体化设备，因为占有更大的优势被越来越广泛地采用。

在电气比例/伺服控制系统中，其核心元件是电气比例阀。在应用中电气比例阀的主要作用是用于连接系统的电气 - 机械部分，将输入的小功率电信号通过放大转换为控制阀运动的电压或电流信号，而通过阀的运动又可以控制流向气压执行机构的流量与压力，最终实现对执行机构的控制。因此，以比例/伺服控制阀为核心组成的气动比例/伺服控制系统可实现压力、流量连续变化的高精度控制，满足自动化设备的柔性生产要求。因此开发各种形式的比例控制阀成为气动技术发展的一个重大课题。近年 FESTO 公司推出的 MPYE 系列的比例流量方向阀，频宽最高已达 155HZ。

根据相关文献介绍，一些现代控制方法和智能控制方法，如模糊控制、神经网络控制、最优控制、自适应控制、变结构控制等，已经应用到电 - 气比例/伺服气压位置控制中，并取得了较好的控制效果。

#### 1.2.4 智能控制技术与发展

什么是智能控制?简单来讲，智能控制就是能驱动智能机器自主地实现其目标的过程，是一“无需人的干预就能够独立驱动智能机器实现其目标的自动控制系统”，智能控制系统的结构是随着控制对象与环境复杂性和不确定行动程度不同而有不同的变化。

智能控制是人工智能和自动控制的重要部分和研究领域。人工智能的发展促进了自动控制向智能控制的发展。但是在相当长的时间内，很少有人提到控制理论与人工智能的关系。不过，这也不足为奇，因为传统控制理论(包括古典的和近代的)主要是涉及对与伺服机构有关的系统或装置进行操作和数学运算，而人工智能所关心的则是与符号运算、逻辑推理及计算智能有关。

智能控制作为一门新兴的理论和技術，在控制系统的研究和设计方面已经取得了显著的效果，20 世纪 60 年代自动控制与人工智能开始交接。1965 年，著名的美籍华裔科学家傅京孙(K. S. FU)首先把人工智能的启发式推理规则用于学习控制系统:然后，他又于 1971 年论述了人工智能与自动控制的交接关系。

近十年来，随着人工智能和机器人技术的急速发展，对智能控制的研究又出现了一股新的热潮。各种智能决策系统、专家控制系统、学习控制系统、模糊控制、神经控制、主动视觉控制、智能规划和故障诊断系统已经被应用于工业过程控制系统、智能机器人系统和智能化生产制造系统。最近一些年，以计算机智能为基础的一些新的智能控制方法和技术先后被提出来。这些新的智能控制系统有仿人控制系统系统、进化控制系统和免疫控制系统等等。

### 1.3 本文主要工作与安排

本文以压力波动试验台设计项目为背景，研究了基于电 - 气比例阀控制的压力控制策略以及系统的软硬件设计。

第一章主要介绍项目的工程背景以及相关的基础技术，包括环境模拟技术、数据采集技术和电 - 气比例压力控制技术。

第二章主要详细介绍了系统的硬件设计，包括试验台的总体结构设计、关键元器件的选型和参数核算等。

第三章主要介绍比例压力控制系统的数学建模以及常用的压力控制策略，并重点讨论了系统采用的模糊自适应 PID 控制方法。

第四章详细分析了系统控制软件的设计，包括数据采集模块、算法控制模块、串口通信模块等的软件设计。

第五章介绍了设备软硬件调试的主要过程，并对调试内容进行了较为详细的描述。

第六章对项目设计进行了总结与展望。

## 第二章 系统硬件结构设计

压力波动试验台硬件结构设计大体步骤为：根据协议技术要求，明确整体设计方案；根据设计方案初步拟定系统结构图，进行分系统设计；根据具体技术要求决定主要部件参数和选型；现场加工与跟踪；手动调试以及与上位机软件协同测试。

### 2.1 系统总体结构设计 [4][5]

#### 2.1.1 试验台工艺要求

该试验台是模拟实验工件工作工况，先建立一个特定的恒温场，将该恒温场的温度控制在 30 ~ 100 之间。在该恒温场中，将试验工件串接于一个具有脉冲交变压力与温度的封闭式液压循环回路中。该循环回路中介质的压力交变的发生与控制是该设备的技术核心。

根据协议要求，成型试验台应具备图 2.1 所示的工作流程。

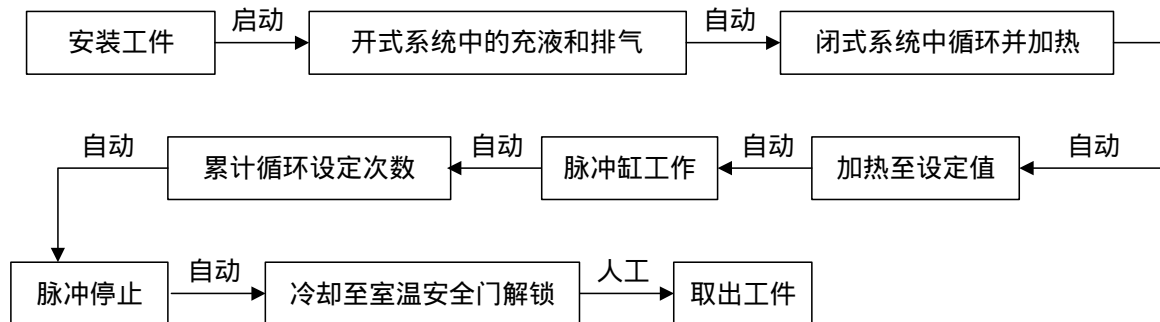


图 2.1 试验台工作流程

**安装工件：**试验台应能容纳最多为 10 只工件同时进行测试。

**开式系统充液与排气：**该工序完成整个循环系统中所有容积的介质充注、补充以及容积内气体的排放。试验介质包括 100%乙二醇和 60%乙二醇与 40%水混合液。

**闭式系统循环与加热：**该工序包括工件试验间的加热和试验介质的循环加热，使整个系统处于一个设定的热平衡中。温度可调范围为环境温度至 150 。

**脉冲缸工作：**波动压力或恒值压力通过脉冲缸活塞的位置变动生成，实现试验

台的压力控制功能。压力脉冲幅值可调范围为 0 ~ 6bar，频率可调范围为 0.1 ~ 2HZ，波形为正弦波。恒值压力可调范围为 0 ~ 6bar。

试验累计与脉冲停止：接受上位机软件控制命令，实现过程控制部件自动停机。可设定累计运行次数或累计运行时间。

### 2.1.2 试验台结构规划

由基本工艺要求分析，该试验台结构应包括充液系统、排气系统、加热系统、脉冲比例控制系统、检测与控制系统等部分。系统总体结构如图 2.2 所示。

充液与排气系统：在循环试验之前，应先在系统中充满试验的介质，包括试验的工件容腔，充液后的封闭系统中应无空气存在。否则，将会直接影响到压力波形的产生。在充液之前，系统内所有阀体均处于导通状态，它是一个大气相通的开式回路。充液与排气回路图 2.3 所示。循环中阀门、泵均处于全开状态，循环 3 分钟后，排除系统中的空气，然后关闭气控阀 28。

经此过程后，系统管路中充满试验介质。为建立一个符合要求的循环恒压值，通过调整循环泵电机的转速来达到调整循环系统流量，满足基本的流量要求，并配置调整节流阀或分流阀即满足流量要求，也保证压力精度的恒压循环回路。

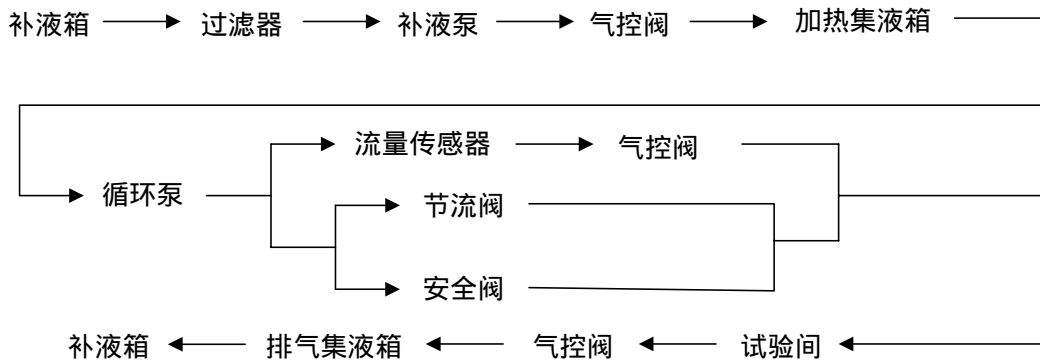


图 2.3 系统充液排气回路

介质加热系统：循环系统中介质温度要求控制在室温 ~ 150 温度内，其控制精度为  $\pm 2$ 。压力耐久试验的循环加热是由循环加热箱中两个加热器工作使介质温度上升，系统保证加热器芯必须完全浸入介质中，才能进入工作状态，加热温

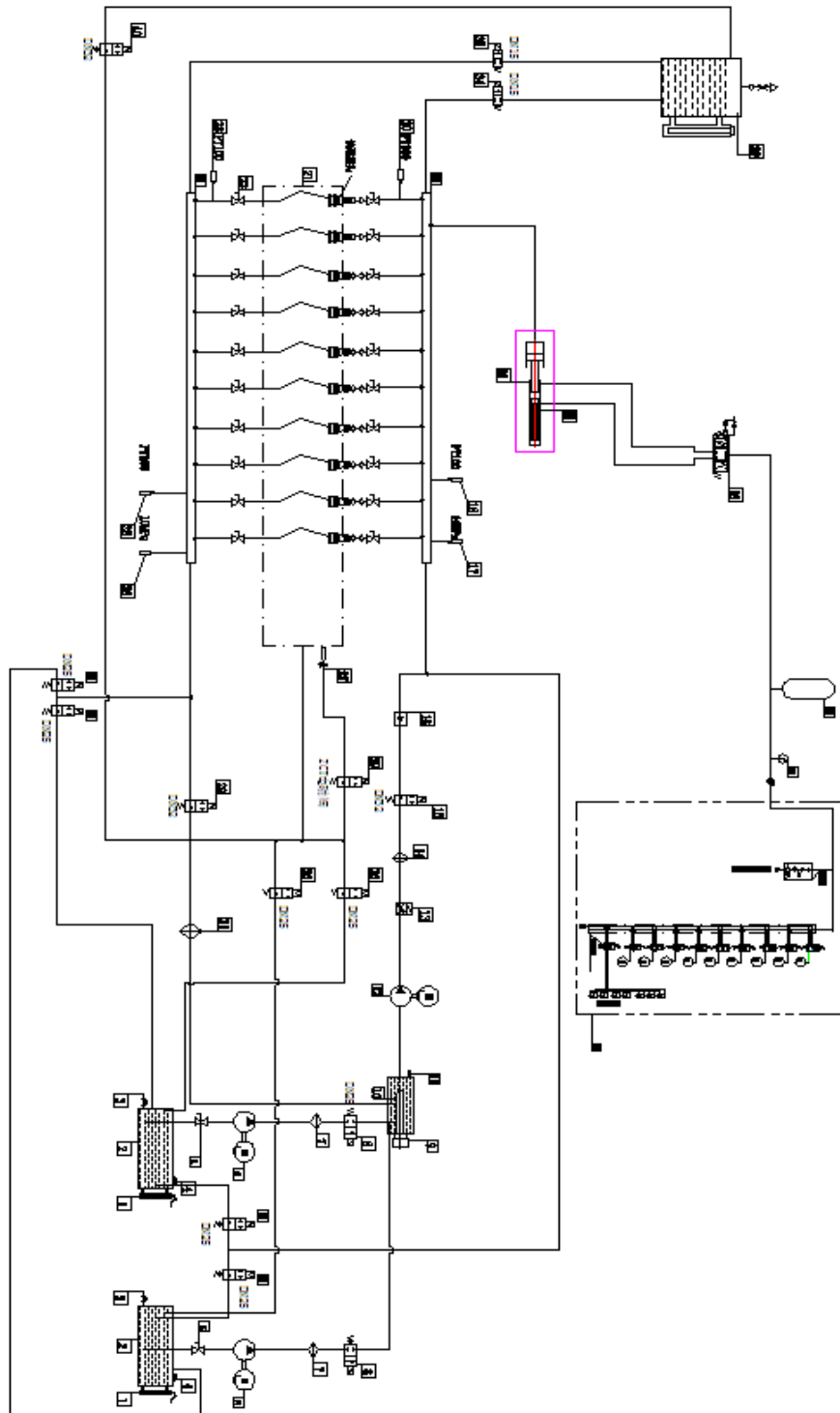


图 2.2 系统总体结构图



度的控制是温度感测头及温度控制器进行 PID 调节运算实现的。上位机可通过人机交互界面实现对温控计参数设定和相关报警指示。

试验间温度调节系统：试验间的温度调节范围为室温 ~ 100℃，其控制精度为  $\pm 2$ ℃，其温升来源：其一来源于循环介质通过实验工件的热传递，其二来源于机体右侧的红外线加热器，该加热器对试验间空气的循环加热，还配有与机体外部相通的空气交换的冷却系统。其温控原理也是温控器进行 1 个 PID 调节运算进行控制的，同样也可以通过上位机实现温控计的控制。

脉冲比例控制系统：试验台通过比例阀控制气缸活塞位置摆动以对试验介质施加一定的交变压力。该控制系统是设备的核心，决定设备基本功能能否实现。系统由比例阀、压力转换缸、位移传感器、压力传感器、储气罐组成。比例阀采用德国 FESTO 公司产品，压力转换缸采用日本 SMC 产品。与介质接触的油缸活塞密封建采用欧洲品牌的聚四氟乙烯材质耐高温高压密封件，保证可靠耐用。比例控制原理如图 2.4 所示。脉冲发生电信号通过 PCI 6229 数据采集卡的模拟输出端口给出。

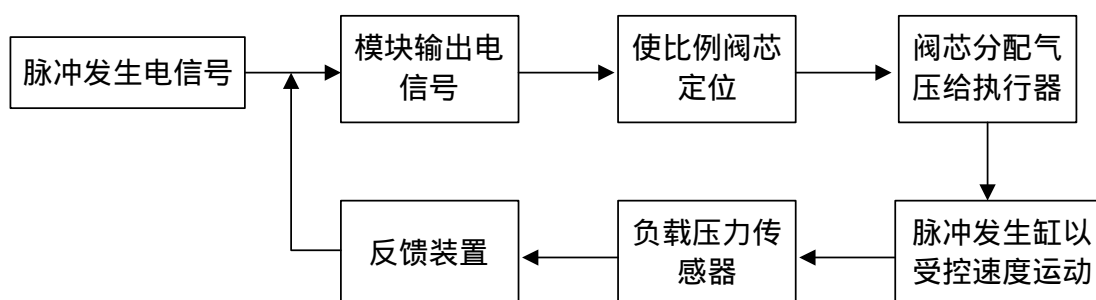


图 2.4 比例控制原理

数据采集与控制系统：数据采集的核心控制设备采用台湾研华公司的 IPC 系列工控机。工控机通过 RS232 串口实现与日本松下 AFP2SH 型 PLC 实现直接通信，并经 ADAM4000 型 RS232 - 485 串口转换器实现与 2 台富士 PXR 系列温控计、一台日本三菱 VFD055M43A 型变频器、台湾研华 ADAM4015 数据采集模块通信。除温度外的其他现场数据，包括压力、流量、位移等均采用 PCI 6229 型数据采集卡采集。图 2.5 为试验台基本控制结构。

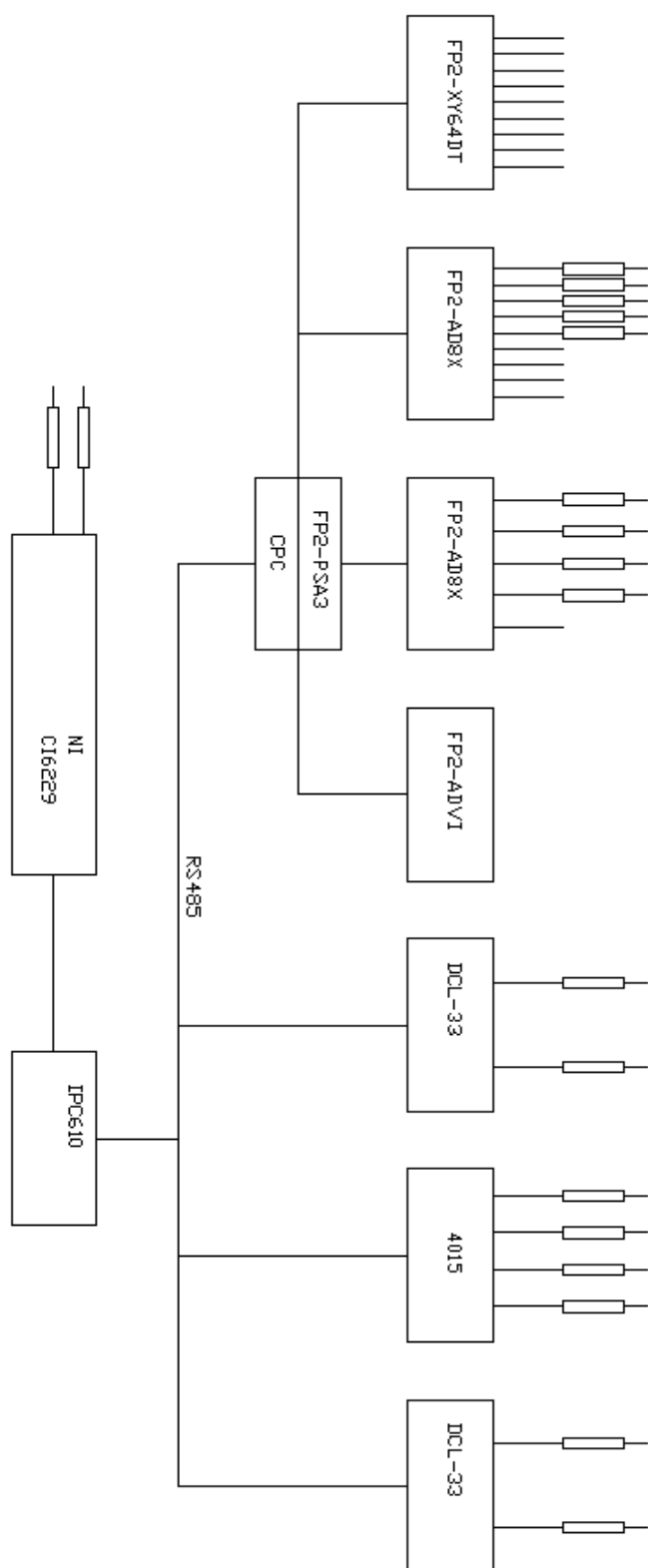


图 2.5 数据采集与控制系统

系统的泄漏检测：该系统的介质无论是内泄漏还是外泄漏均可通过位移传感器 38 来进行检测。内泄漏是指控制阀关闭不严流回油箱的泄漏，外泄漏是指试验间管道、工件、机体下部的系统管道的外部泄漏。系统泄漏可以设定报警点，根据位移传感器全行程的百分量来设置泄漏报警的临界点。此设定可尽快提醒操作者判定系统的泄漏状况并尽早处理（此状况不停机）。当脉冲缸活塞的极限位置到达位移传感器的极限位置时，设备将自动停止运行。

## 2.2 关键部件参数设计与选型 [6][7][8][9][10][11][12]

试验台除了传统的机械结构管路、阀门、紧固件之外，还包括如比例阀、温控计、PLC、数据采集卡等直接关系到试验台能否正常运行和完成功能的组成部件，对于这些部件的选择，需进行仔细全面的参数核算和设备选型。

### 2.2.1 比例阀工作原理与选型

- 传统比例流量阀

比例流量阀从功能上可分为流量比例阀和流量比例方向阀。前者只有 1 个控制输出口，后者则有 2 个输出控制口。图 2.6 是一种二位三通型流量比例阀，它的结构、工作原理是目前比较常见的，主要有 2 方面特点：其一是其电-机械转换器采用输出力较大的动铁式比例电磁铁，其二是由弹簧实现被控量(阀芯位移)的机械反馈。

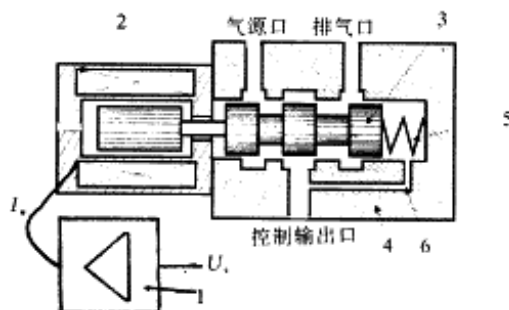


图 2.6 传统的流量比例阀

该阀主要由比例放大器 1 ,动铁式比例电磁铁 2 ,阀芯 3 等组成。输入电压信号  $U_e$  经过比例放大器 1 转换为与  $U_e$  成比例的驱动电流  $I_e$  , 该驱动电流作用于比例电磁铁的电磁线圈, 使永久磁铁产生与  $I_e$  成比例的推力  $F_e$  并推动阀芯右移, 而阀芯的移动又通过反馈弹簧产生与永久磁铁推力相抗衡的反馈力  $F_f$  , 当这两作用力相平衡时阀芯不再移动。这时满足以下的近似方程:

$$F_f + X_0 g K_{XF} = F_e \pm \Delta F \quad (2.1)$$

式中  $\Delta F$  —摩擦力、气体流动力等干扰力

$K_{XF}$  —为反馈弹簧的刚性系数

$X_0$  —为反馈弹簧的预压缩量

反馈弹簧力  $F_f$  可表示为弹簧刚性系数与阀芯位移的乘积:

$$F_f = K_{XF} g X \quad (2.2)$$

同时由于电磁力  $F_e$  与驱动电流  $I_e$  成比例关系, 进而同输入电压信号  $U_e$  成比例关系, 因此电磁力可用下式表示:

$$F_e = K_{IF} g I_e = K_{IF} g K_{UI} g U_e \quad (2.3)$$

式中  $K_{IF}$  —比例电磁铁的电流 - 力增益

$K_{UI}$  —比例放大器的电压 - 电流增益

将式(2.2)、(2.3)代入式(2.1)可得到比例阀的阀芯位移输出  $X$  与控制输入信号  $U_e$  的关系:

$$X = \begin{cases} 0 & U_e < \frac{X_0}{K} \\ K g U_e - X_0 - \frac{\Delta F}{K_{XF}} & U_e > \frac{X_0}{K} \pm \frac{\Delta F}{K_{XF}} \end{cases} \quad (2.4)$$

式中  $K$ —比例阀的增益(或比例系数),  $K = \frac{K_{IF} + K_{UI}}{K_{XF}}$ 。

由式(2.4)可见, 阀芯位移  $X$  与输入电压信号  $U_e$  基本成比例关系。

这类比例阀出现的历史较长, 但由于当时微电子和测量工业技术发展水平的限制, 位移和压力传感器很昂贵, 因此元件的反馈采用机械方式。这在原理上存在如下的缺点:

首先阀芯与阀套之间的摩擦力、比例电磁铁的力 - 位移特性(即电磁铁的输出力受到其位移的影响)以及气体流过阀口时产生的液动力均直接作用于反馈力偶上, 而气动元件的工作介质是气体, 其润滑性能远不及液压元件, 因此这类阀的非线性度、滞环等静态特性均比较差。

另一方面该类阀靠弹簧复位, 为了保证可靠复位必须设计一定的弹簧预压缩量  $X_0$ , 这使阀在工作时存在一定的零位死区。

除此之外, 为了抑制摩擦力的影响, 往往在比例放大器发出的控制电流信号中叠加颤振信号, 这不仅引起高噪声, 而且会降低阀的寿命。

同时分析证明为了改善阀的静态特性应该增大反馈弹簧的刚性系数, 而比例电磁铁工作中必须克服反馈弹簧力, 因此需要比例电磁铁有较大的输出力, 这无疑一方面增大了比例放大器的功耗和体积, 使之不易在阀内集成, 另一方面还不利于阀动态的快速性提高。

### ● 新型比例流量控制元件

为了克服以上的缺点, 同时鉴于近年来微电子技术的飞速发展, 传感器和电子元件的成本大为降低, 新一代的比例阀普遍采用了阀芯位移或压力的电反馈方式。图 2.7 是一种带电反馈的 MPYE 型比例流量方向阀。

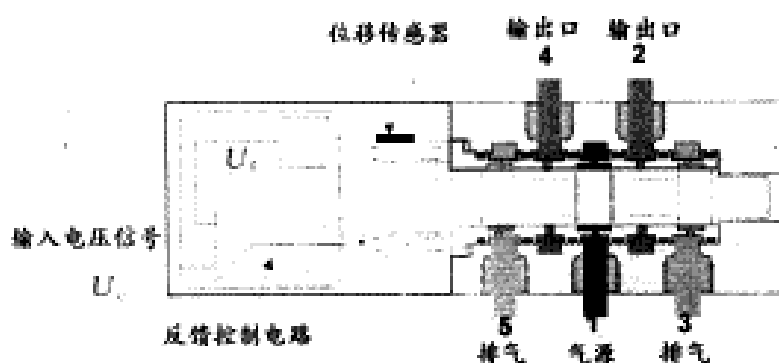


图 2.7 带电反馈的比例流量方向阀

动铁式双向电磁铁与阀芯固定。阀芯的位移经集成在阀内的位移传感器转换为电信号  $U_f$ ，反馈控制电路根据该电信号和输入电压信号  $U_e$  之差以及阀芯的速度等信号计算出最佳的控制信号，并作用于双向电磁铁，使之产生推力或拉力，带动阀芯移动到与输入电压信号相应的位置。从而实现了阀芯输出位移与输入电压之间的比例关系。该元件采用的双向电磁铁具有优越的动态特性，因此该比例阀的动态响应频率极高。由于阀芯的复位是靠双向电磁铁的磁路实现的，因此在阀中不装弹簧。电磁铁不受弹簧力负载，因此其功耗小，使整套电控部分能集成于阀上。使用时不再需要外加比例放大器。同时由于阀芯与阀套之间的摩擦力和液动力均在阀的控制单元的大闭环之内，因此对阀的控制性能几乎不产生影响。

#### ● MPYE-5-3/8 型比例方向控制阀

试验台采用德国 FESTO 公司 MPYE-5-3/8 型比例方向控制阀，该类型比例阀具有如下特点：

1. 具有一个位置控制阀芯，可以将模拟输入信号转换成阀输出口相应的开口大小。
2. 与外部位置控制器和位移传感器相结合，可以形成一个精确的气动定位系统。
3. 具有流量控制功能，用于改变气缸运动速度。
4. 三位五通阀功能，用于改变运动方向。

基本电气参数和气动参数分别如表 2.1 和表 2.2 所示。

电源电压	17 - 30V DC
残余脉动复合 DIN41 775 标准	在供电电源范围内直流元件的 5%
设定输入值	电压：0 - 10V DC
	电流：4 - 20mA
功耗	最大：20W，在 30V DC 和 100% 通电持续率时
	最小：2W，在阀芯处于中位时
迟滞	，电磁线圈最大位移的 0.4%
防护等级符合 EN60 529 标准	与连接插座一起 IP65
最大频率	65HZ
保护措施	工作电压接口，设定值接口：极性容错保护

表 2.1 电气参数

工作介质	未润滑压缩空气，过滤精度 5 $\mu$ m
介质温度	0 - +60C，未冷凝
环境温度	0 - +50C
工作压力	额定：6 bar
	最大：10 bar
	最小：0 bar
连接尺寸	G3/8
流量	2000 L/min
公称通径	10mm

表 2.2 气动参数

比例阀流量 - 电压曲线如图 2.8 所示

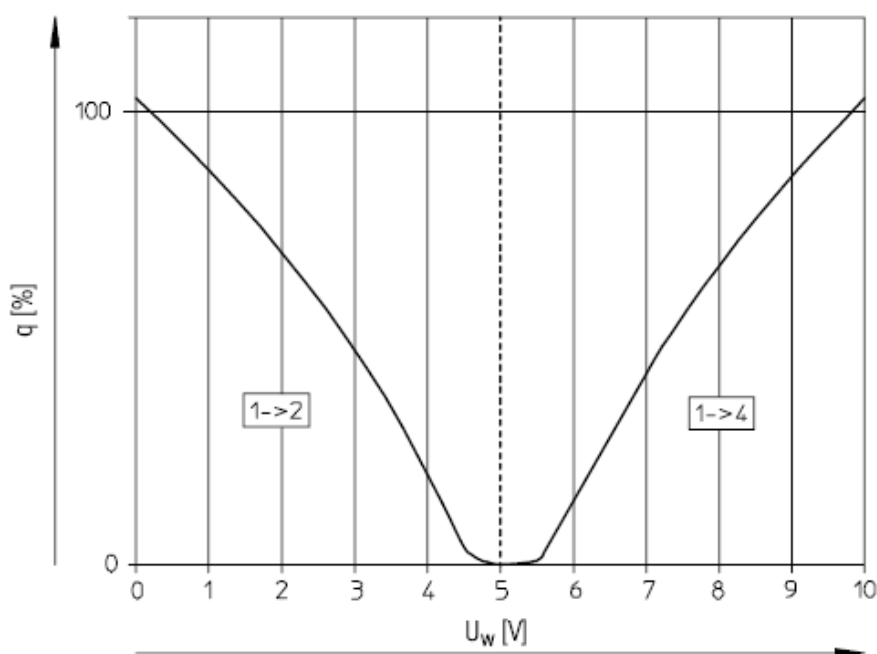


图 2.8 比例阀流量 - 电压曲线

### 2.2.2 脉冲缸原理与选型

摩擦小、密封好的执行元件有利于获得好的控制性能，国内外许多科研院所和企业都进行了这方面的工作。

浙江大学研制出了低摩擦气缸，由 U 形铰和球铰将气缸所受的侧向力全部作用于线性轴承上，而线性轴承的摩擦很小，从而降低了摩擦。另一方面，由于气缸只受轴向力，基本无偏心，活塞和活塞杆处的密封圈与压缩量可以减小，也减小了摩擦。在活塞上装有永久磁铁，故当活塞运动到接近开关的预设位置时，活塞上的磁铁使触点闭合，发出电信号，指示行程位置或控制某一元件动作。省去了机械定位档块和附加的位置传感器等部件。

将普通气缸动作快，液压缸负载刚性高，速度稳定性好的特点恰当地组合起来，发挥各自的优点，即成为目前气动(或液压)控制系统中普遍采用的气 - 液压阻尼缸。SMC 的 CC 系列的气缸是一种包括控制阀在内的气液变换执行元件单元，利用气源作动力，可以实现精确的定速、低速进给、点动及中间停止等，可满足特殊用户的需求。



SMC 的带有位移传感器的气缸—CEI 系列、CL 系列、ML2B 系列等气缸利用磁栅尺原理在活塞移动过程中能实时测量位移，其分辨率为 0.1 mm，它集驱动、测量功能于一体，并且带有锁紧装置，可以作为精确定位的位置伺服执行元件使用。

本系统采用 SMC 公司 MB1 系列双杆双作用气缸，行程为 200mm，缸径为 100mm，缸体为正方形，具体参数如表 2.3 所示。

使用流体	空气
动作方式	双作用
使用压力范围 (MPa)	0.05 ~ 10
给油	不需要
活塞速度 (mm/s)	50 ~ 1000
缓冲	两侧气缓冲或垫缓冲

表 2.3 MB1 系列气缸技术参数

### 2.2.3 数据采集卡选型

#### ● 基于 PCI 数据总线的采集卡

PCI (Peripheral Component Interconnect) 总线，即外围部件互连总线，是一种先进的高性能 32/64 位地址数据复用局部总线，总线与处理器和时钟频率无关，可以提供高达 132MB / s 的数据传送速率；它具有严格的规范，只要符合 PCI 规范的扩展卡插入任何 PCI 系统就能可靠地工作。但由于 PCI 总线协议的复杂性，其接口的实现比 VESA, ISA 和 MCA 等总线要困难得多。

随着科学技术的日益发展，工业生产自动化的普及，计算机在工业制造、自动控制领域的使用日趋广泛，基于计算机 PCI 总线的数据采集卡，作为计算机控制的中介设备，其应用也越来越广泛。

基于 PCI 总线接口的数据采集系统基本上由 3 部分构成：数据采集卡、数据采集卡驱动程序和 Win32 应用程序，图 2.9 为数据采集系统体系结构。数据采集卡是整个数据采集系统的基础，它通过传感器实时采集外部数据，经过 A/D 变换后转成数

字信号，经过 PCI 接口控制芯片 (PCI 专用接口芯片或者 FPGA 芯片)，最后由 PCI 总线接口作为数据传输总线传入计算机。数据采集卡的模拟输出、数字输入和数字输出等功能也与 A/D 输入过程类似。

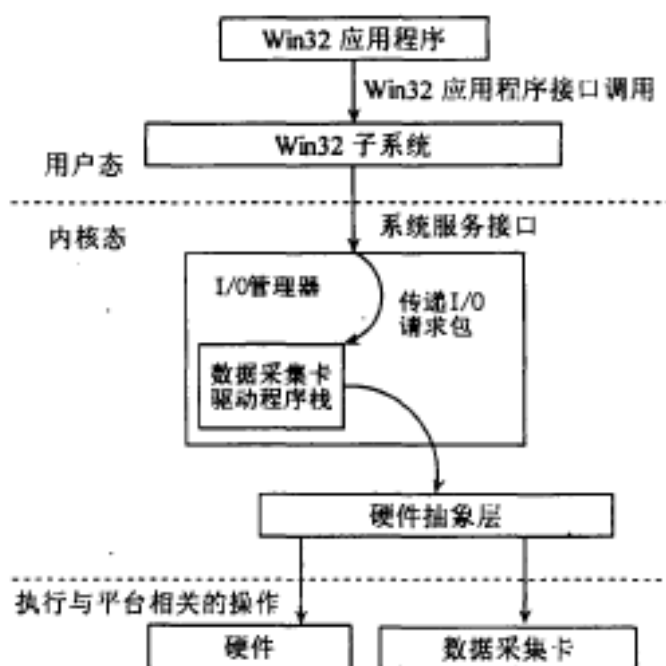


图 2.9 数据采集系统体系结构

- NI PCI6229 型数据采集卡

在试验台工作过程中，需要高频实时的采集压力数据，因此采用美国 NI 公司 M 系列多功能 DAQ 卡，其型号为 PCI6229，其外观如图 2.10 所示。

NI 公司 M 系列多功能 DAQ 卡在 OEM 产品中具有广泛的应用市场，同时也适合应用在实验室自动化、研发、设计验证/测试或工厂生产测试中。NI 公司的 M 系列多功能 DAQ 设备支持模拟输出，静态数字 I/O，和计数器/定时器的 I/O 操作。这些低价位的 16 位精度 DAQ 卡提供了高品质测量和 NI 出色的软件集成性能。PCI6014 是一种高速、高精度的能完成 A/D，D/A、数字 I/O，定时和计数在 IBM PC XT/AT 机或具有 PCI 总线插槽的系统上使用。通过在计算机上编程，此数据采集卡可以完成模数(A/D)转换、数模(D/A)转换、数字输入输出(DIO)，定时和计数控制。

PCI6014 数据采集卡有以下特点：

1. 16 路单端/8 路差分模拟输入;
2. 16 位 A/D 转换精度;
3. 250KS/s 采样率;
4. 250KS/s 磁盘写入速度;
5. 士 0.05 到士 10V 输入范围;
6. 最多两路 12 位模拟输出;
7. 8 条数字 I/O 线;
8. 两路 24 位计数器/定时器;
9. 带校准认证书;
10. 支持 Windows 2000/NT/Me/9x 和 Mac OS 的 NI-DAQ 驱动软件;

其硬件组成主要有:

1. 温度漂移保护电路,采用定制的电网络以及高精度板上信号源,以保证温度在 0 到 550C 之间时的精确测量。
2. 抑制噪声的运算放大器,以得到高分辨率技术。
3. 采用高阻抗输入电阻的测量放大器,可以在最大转换速率下以任何顺序对各个通道进行采样。
4. 板上自行校准电路,板上 EEPROM 用于存储校准信息,可以通过软件对硬件设备进行校准,这样可以避免设备运行中因时间和温漂引起的误差。

#### 2.2.4 PLC 原理与选型

##### ● PLC 基本原理

可编程控制器是计算机家族中的一员。于上个世纪中后叶被发明后,在机床、各种流水线的输送机械、发电、化工、电子等行业工艺设备的电气控制方面得到了广泛的应用,早期的可编程控制器被称作可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller),既简称为 PLC。PLC 一般硬件结构如图 2.11 所示。

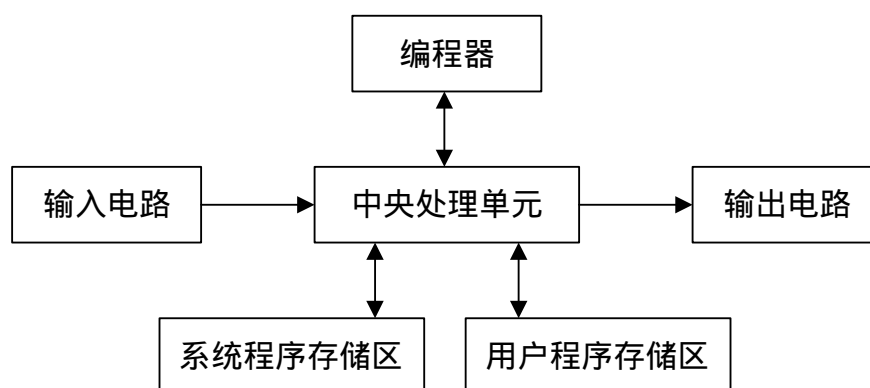


图 2.11 PLC 硬件结构

PLC 的 CPU 采用顺序逻辑扫描用户程序的运行方式，即如果一个输出线圈或逻辑线圈被接通或断开，该线圈的所有触点（包括其常开或常闭触点）不会立即动作，必须等扫描到该触点时才会动作。PLC 采用了这种不同于一般微型计算机的运行方式——扫描技术，既输入采样，用户程序执行和输出刷新三个阶段。完成上述三个阶段称作为一个扫描周期。不过严格地来说扫描周期还包括自诊断、通信等，如图 2.12 所示。

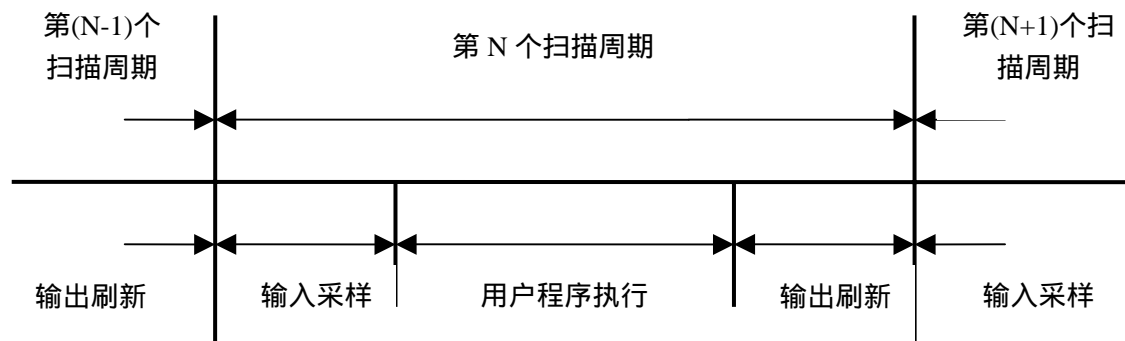


图 2.12 PLC 扫描周期

- DVP32ES01R2 型 PLC

试验台采用台达公司 DVP32ES01R2 型 PLC，该型 PLC 具备如表 2.4 所示的功能规格。

演算控制方式	内存程序，往返式来回扫描方式
演算处理速度	基本命令（几个 us）
输入输出控制方式	结束再生方式
输入输出点数	16 点输入 + 16 点输
程序语言	梯形图 + 指令
程序容量	最大 1808 步
命令种类	基本命令 29 个，应用命令 47 种
串联通信口	程序写入/读出通讯口：RS232，一般功能通讯口：RS485
自我诊断保护	输入/输出检查，超时检查，语法检查，密码设定
监测/除错	程序执行时间显示，位/字符，组建设定

表 2.4 DVP32ES01R2 型 PLC 功能规格

电气规格如表 2.5 所示

电源电压	24V DC (-15% ~ 10%)
动作规格	电源瞬间断电 5ms 以内继续运转
电源保险丝容量	2A/250VAC
绝缘阻抗	5M 欧以上
消耗电力	8W
接地	接地配线线径不小于电源端 L, N 线径
操作/储存环境	操作：0 ~ 55（温度），50 ~ 95%（湿度），污染等级 2 储存：- 25 ~ 70（温度），0 ~ 95%（湿度）
耐振动/冲击	国际标准 IEC1131 - 2，IEC68 - 2 - 6
重量	430g

表 2.5 DVP32ES01R2 型 PLC 电气规格

试验台还配备 24 点的输出模块 DVP24XN11R 和 8 点的输入模块 DVP08XM11N。

## 2.3 本章小结

本章首先较为详细的介绍了系统的工艺要求和整体设计方案,并在此基础上对设备所用的关键元器件,包括比例阀、脉冲缸、数据采集卡、PLC 等的工作原理和选型进行了深入阐述。

## 第三章 比例压力系统模型与控制策略

### 3.1 系统概述

该系统的基本原理是通过计算机控制软件、比例阀和气缸的调节作用，使得试验介质压力波形趋向于用户设定压力波形，实现对试验对象实时压力工况的模拟。工作原理如图 3.1 所示

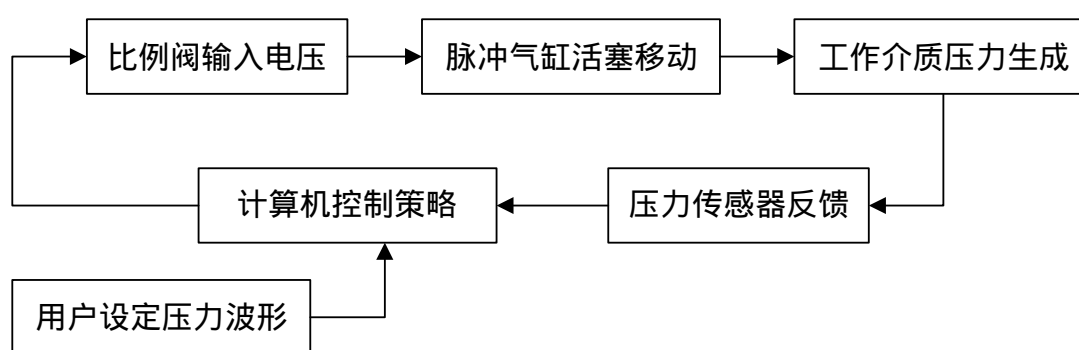


图 3.1 比例压力控制系统原理

具体调节过程为：控制程序接受用户输入的压力设定参数，包括压力控制方式（恒值或波动），恒值压力控制值或波动压力频率与幅值，同时通过数据采集卡采样压力传感器数据，经过一定的控制策略，生成比例阀控制电压值。比例阀在获得控制电压后，通过阀内自我调节最后控制脉冲缸活塞运动，生成压力并经工作介质传递至试验对象。

### 3.2 系统数学模型的建立<sup>[13][14]</sup>

由于气体的流动状态很复杂，为了简化计算、更好地分析和研究气动系统的特性，在求取流量方程及以后的分析中作如下假设：

1. 使用的工作介质（空气）视为理想气体，各参数满足理想气体的状态方程

$$p = \rho RT ;$$

2. 可动密封处的泄漏忽略不计；
3. 在同一容腔内的温度场和压力场是均匀的, 任意时刻腔中的各点状态参数相等, 动态过程为准平衡方程；
4. 阀出口压力与气罐内压力相等；
5. 气体经阀口至气罐腔中的流动为绝热流动；
6. 气源压力、大气压力和环境温度稳定, 气源温度  $T$  为环境温度；
7. 气体进出气罐流过节流口的流动是稳定一维流动, 相当于气体经过收缩喷管的流动。

### 3.2.1 流量连续性方程

根据质量守恒定律流入负载容腔的气体质量流量应该等于容腔的质量变化率, 则有:

$$G = \frac{d}{dt}(\rho V) \quad (3.1)$$

式中:  $G$ —气罐的气体质量流量;

$\rho$ —气罐的气体密度;

$V$ —气罐的体积。

根据理想气体状态方程  $p = \rho RT$ , 可得气罐中气体密度  $\rho$ 、气体温度  $T$  和气体压力  $P$  之间的关系为:

$$\rho = p/RT \quad (3.2)$$

此外, 由热力学第一定律知, 对气罐而言, 描述其能量守恒的方程为:

$$c_p GT - p \frac{dV}{dt} + \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(c_v \rho VT) \quad (3.3)$$

式中:  $c_p GT$ —进入气罐的质量流量的内能;

$p \frac{dV}{dt}$ —单位时间内气体体积变化所作的功;

$c_p$ —比压系数;

$c_v$ —比容系数。



假设气体进入气罐后立即充满全腔，故此处  $p \frac{dV}{dt}$  为零； $\frac{dQ}{dt}$  为单位时间内气体通过罐壁与外界进行的热交换，根据系统热力学过程是绝热过程的假设，有  $\frac{dQ}{dt} = 0$ ， $\frac{d}{dt}(c_v \rho VT)$  为气罐气体内能的总变化量。由气体比热比  $r = \frac{c_p}{c_v}$ ，气体常数

$R = c_p - c_v$ ，把式(3.2)代入(3.3)，并考虑  $r = \frac{c_p}{c_v}$ ，有：

$$rc_v GT = \frac{d}{dt} \left( \frac{c_v pV}{R} \right) \quad (3.4)$$

因此得气缸得热力学过程得数学描述为：

$$G = \frac{V}{rRT} \frac{dp}{dt} \quad (3.5)$$

### 3.2.2 比例阀阀口流量方程

由假设条件，将通过阀口的气体流动近似为理想气体通过收缩喷管的一维等熵流动，即电气比例阀流入或流出的质量流量是由阀的有效开口面积及上下游压力比来决定的。故采用Sanville 流量公式可得由比例压力阀流入到气罐的质量流量G为：

$$G = c_q A_q p_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi \left[ \frac{p}{p_s} \right] = c_q \omega x_v p_s \sqrt{\frac{2}{RT}} \phi \left[ \frac{p}{p_s} \right] \quad (3.6)$$

式中：

$$\phi(z) = \begin{cases} \sqrt{\frac{r}{r-1} \left[ \left[ \frac{p}{p_s} \right]^2 r - \left[ \frac{p}{p_s} \right]^{\frac{r+1}{r}} \right]} & 0.528 \leq \left[ \frac{p}{p_s} \right] \leq 1 \\ \left[ \frac{2}{r+1} \right]^{\frac{r}{r-1}} \sqrt{\frac{r}{r+1}} & 0 \leq \left[ \frac{p}{p_s} \right] \leq 0.528 \end{cases} \quad (3.7)$$

$c_q$  — 流量系数；

$A_q$ —比例阀的有效开口面积;

$\omega$ —比例阀的开口面积梯度;

$x_v$ —阀芯的位移;

$p_s$ —气源压力;

$p$ —气罐内的压力。

### 3.2.3 阀芯的力平衡方程

滑阀式电—气比例阀的阀芯位置是由比例电磁铁的电磁力与阀出口压力反馈到阀芯上的作用力决定的, 由牛顿第二定律得到比例压力阀阀芯的力平衡方程为:

$$m\ddot{x}_v = kU - A_f p - k_s(x_v + x_0) - b\dot{x}_v - F_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_v) \quad (3.8)$$

式中:  $A_f$ —比例阀阀芯端部的有效截面积;

$k$ —比例阀的电压-力系数增益;

$k_s$ —比例阀液动力与反馈弹簧等效刚度;

$U$ —比例阀输入控制电压;

$p$ —比例阀输出压力;

$x_0$ —弹簧的预压缩量;

$x_v$ —弹簧压缩量;

$b$ —阀芯与阀套间的粘滞阻尼系数;

$F_c$ —库仑摩擦力。

### 3.3 过程控制策略研究 [15][16][17][18][19][20][21][22][23][24][25]

几十年来，过程控制策略与算法出现了三种类型：简单控制、复杂控制和先进控制。

通常将单回路 PID 控制称为简单控制。它一直是过程控制的主要手段。PID 控制仍以经典控制理论为基础，主要用频率方法对控制系统进行分析设计与综合。目前，PID 控制仍然得到广泛应用。在许多 DCS 和 PLC 系统中，均设有 PID 控制算法软件，或 PID 控制模块。

从 20 世纪 50 年代开始，过程控制界逐渐发展了串级控制、比值控制、前馈控制、均匀控制和 Smith 预估控制等控制策略与算法，称之为复杂控制。它们在很大程度上满足了复杂过程工业的一些特殊控制要求。它们仍然以经典控制理论为基础，但是在结构和应用上各有特色，而且目前仍在继续改进和发展。

从 20 世纪 80 年代开始，在现代控制理论和人工智能发展的理论基础上，针对工业过程的非线性、时变性、耦合性和不确定性等特性，提出了许多行之有效的解决方法，如解耦控制、推断控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、人工神经网络控制等，统称为先进过程控制。近十年来，以专家系统、模糊控制，神经网络、遗传算法为主要方法的基于知识的智能处理方法已经成为过程控制的一种重要技术。先进过程控制方法可以有效的解决那些采用常规控制效果差，甚至无法控制的复杂工业过程的控制问题。实践证明，先进过程控制方法能取得更高的控制品质和更大的经济效益，具有广阔的发展前景。

在本文接下来的部分，将就 PID 控制算法、模糊控制原理、自适应控制原理进行具体的讨论。

#### 3.3.1 PID 控制

在工程实际中，应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制，简称 PID 控制，又称 PID 调节。PID 控制器问世至今已有近 70 年历史，它以其结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而成为工业控制的主要技术之一。当被控对象

的结构和参数不能完全掌握、或得不到精确的数学模型时、控制理论的其它技术难以采用时，系统控制器的结构和参数必须依靠经验和现场调试来确定，这时应用 PID 控制技术最为方便。即当我们不完全了解一个系统和被控对象，或不能通过有效的测量手段来获得系统参数时，最适合用 PID 控制技术。PID 控制，实际中也有 PI 和 PD 控制。PID 控制器就是根据系统的误差，利用比例、积分、微分计算出控制量进行控制的。

常见得 PID 控制表示形式为：

$$u = K_c \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + \frac{1}{T_d} \frac{de}{dt} \right) \quad (3.9)$$

式中的  $K_c$  是控制器比例增益， $T_i$  和  $T_d$  都具有时间量纲，分别称为积分时间和微分时间。

当上述控制算法公式只包含第一项时，称为比例（P）作用；只包含第二项时，称为积分（I）作用；但只包含第三项的单纯微分（D）作用是不采用的，因为它不能起到使被控变量接近设定值的效果；只包含第一、二项的是 PI 作用，只包含第一、三项的是 PD 作用，同时包含这三项的是 PID 作用。

- 比例（P）控制

比例控制是一种最简单的控制方式。其控制器的输出与输入误差信号成比例关系。当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差（Steady-state error）。

- 积分（I）控制

在积分控制中，控制器的输出与输入误差信号的积分成正比关系。对一个自动控制系统，如果在进入稳态后存在稳态误差，则称这个控制系统是有稳态误差的或简称有差系统（System with Steady-state Error）。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入“积分项”。积分项对误差取决于时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。这样，即便误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大，它推动控制器的输出增大使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例+积分（PI）控制器，可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

### ● 微分 (D) 控制

在微分控制中，控制器的输出与输入误差信号的微分（即误差的变化率）成正比关系。自动控制系统在克服误差的调节过程中可能会出现振荡甚至失稳。其原因是由于存在有较大惯性组件（环节）或有滞后 (delay) 组件，具有抑制误差的作用，其变化总是落后于误差的变化。解决的办法是使抑制误差的作用的变化“超前”，即在误差接近零时，抑制误差的作用就应该是零。这就是说，在控制器中仅引入“比例”项往往是不够的，比例项的作用仅是放大误差的幅值，而目前需要增加的是“微分项”，它能预测误差变化的趋势，这样，具有比例+微分的控制器，就能够提前使抑制误差的控制作用等于零，甚至为负值，从而避免了被控量的严重超调。所以对有较大惯性或滞后的被控对象，比例+微分(PD)控制器能改善系统在调节过程中的动态特性。

### 3.3.2 自适应控制

自适应控制系统 (Adaptive Control Systems) 是现代控制理论的一个重要分支。“大百科”：能在系统和环境的新息不完备的情况下改变自身特性来保持良好工作品质的控制系统，又称适应控制系统。

一个典型的比较完善的自适应控制系统包含：辨识—决策—调整三个部分组成。如图 3.2 所示

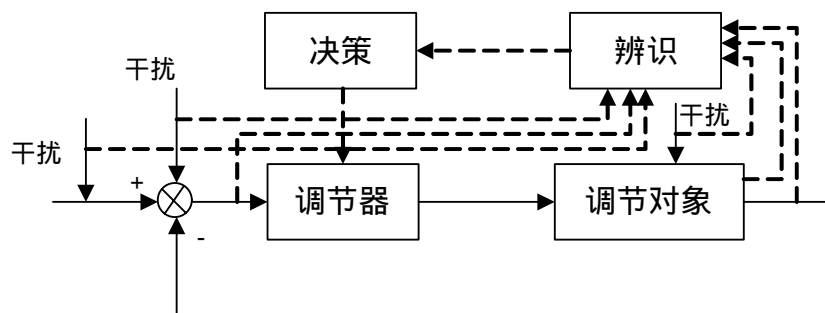


图 3.2 自适应系统组成

自适应控制是本质非线性系统，即：不可能通过线性化把它近似为线性系统。自适应控制有两类最基本的类型，即“模型参考自适应控制”和“自校正调节器”，以

及在这两类基本类型的基础之上，结合人工智能、人工生命等发展出的新型复杂自适应控制。

- 模型参考自适应控制 (Model Reference Adaptive Control)

这类系统的难点在于系统稳定性分析,用到李雅普诺夫稳定性和波波夫超稳定性理论。结构如图 3.3 所示。

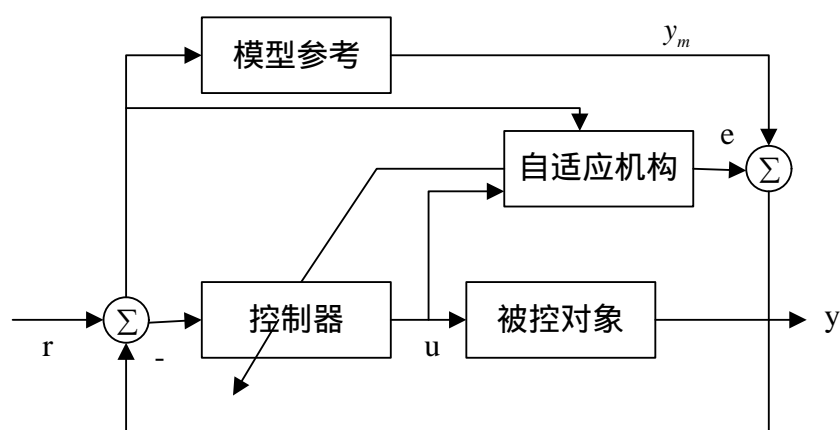


图 3.3 模型参考自适应控制系统

- 自校正调节器 (Self-tuning Regulator)

70 年代发展起来的一种随机自适应控制，产生背景是：工业过程控制由于强随机干扰、模型未知、参数时变、大时滞等因素，导致常规的控制方法效果差。它是参数在线估计与随机最小方差控制的结合，已有广泛的应用成果，其难点在于收敛性。结构如图 3.4 所示。

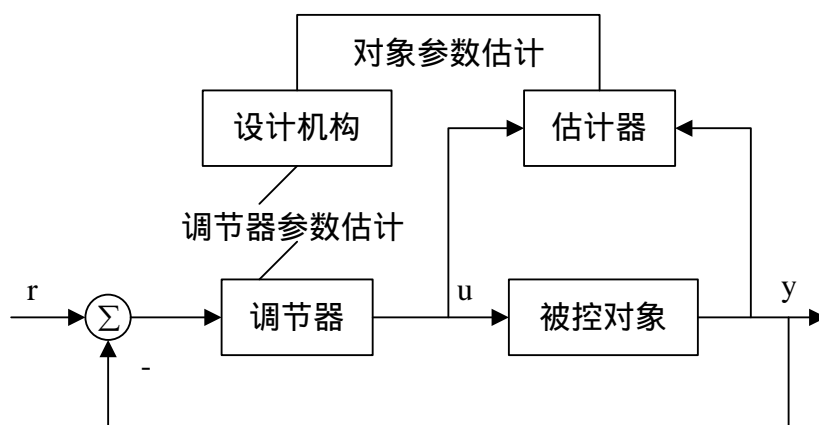


图 3.4 自校正调节器结构图

### 3.3.3 模糊控制

现代控制理论已经在工业、国防、航天等许多领域获得了成功。一般情况下，传统的闭环控制其原理是建立在精确的数学模型上，但对于一些强耦合、多参数、非线性、时变性、大惯性、纯滞后的复杂系统，建立它们的精确数学模型是很困难的，有些甚至是不可能的。

然而，在实际工作当中，一些有经验的操作人员却可以通过观察、推理和决策，用人工控制的方法较好地控制那些复杂的对象。模糊控制系统就是将人的经验总结成语言控制规则，运用模糊理论模拟人的推理与决策，从而实现自动控制的控制系统。

模糊控制器本质上就是一个采用了模糊控制算法的计算机或芯片，其一般结构如图 3.5 所示。

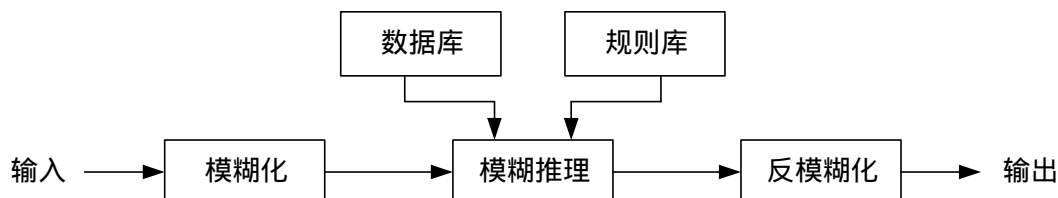


图 3.5 模糊控制器一般结构

它由三个基本部分构成：(1) 将输入的确切值“模糊化”，成为可用模糊集合描述的变量；(2) 应用语言规则进行模糊推理；(3) 对推理结果进行决策并反模糊化（也

称为清晰化、解模糊),使之转化为确切的控制量。

有  $m$  个输入一个输出的模糊控制器称为  $m$  维模糊控制器。由于一维模糊控制器所能获得的系统动态性能往往不能令人满意,三维及三维以上的模糊控制器结构复杂,推理运算时间长,因此典型的模糊控制器是二维模糊控制器。一般地,设计一个二维的模糊控制器,通常需要五个步骤:

- (1) 确定输入变量与输出变量及其模糊状态;
- (2) 输入变量的模糊化;
- (3) 建立模糊控制规则;
- (4) 进行模糊推理;
- (5) 输出变量的反模糊化;

下面对这 5 个步骤进行阐述。

#### 1) 确定输入变量与输出变量及其模糊状态

根据问题的背景,确定出输入变量  $E_1$ 、 $E_2$  和输出变量  $u_0$ 。输入、输出变量的模糊状态例如,变量的模糊状态可取为:

负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)

在实际情况中,模糊状态的取法不尽相同,要根据具体的情况选择合适的取法。

#### 2) 输入变量的模糊化

输入变量的模糊化就是将输入的确切值变量转化为可用模糊集合描述的模糊变量,一般分为两步。

第一步,确定输入变量的论域及输入变量实际确切值对应的论域确切值。

将输入变量的实际变化范围  $[a, b]$  划分成若干等级,把这些等级的上下界作为端点构成输入变量的论域  $U$ 。例如,划分成 13 个等级时,表示为:

$$\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

相应的论域分别为  $U = [-6, 6]$

设输入变量  $x$  的实际变化范围为  $[a, b]$ ,分为  $m$  级,则相应的论域为  $U = [-(m-1)/2, (m-1)/2]$ ;如果  $x$  的实际确切值为  $x_0$ ,则相应的论域确切值为



$$x'_0 = -\frac{m-1}{2} + \frac{m-1}{b-a}(x-a) \quad (3.10)$$

第二步，定义各模糊状态的隶属函数。

各模糊状态的隶属函数一般选择对称三角形、对称梯形、正态型隶属函数。如图 3.6 所示为三角形隶属函数。

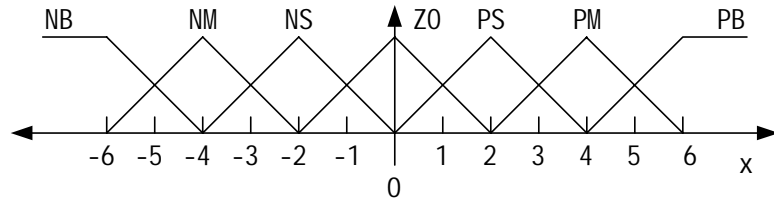


图 3.6 三角形隶属函数

第三步，根据已知的论域值和隶属函数进行模糊化

根据已经计算得到的论域值  $x'_0$ ，将其模糊化常用如下两种方法：

#### (1) 独点模糊集法

设模糊论域为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ，将  $x'_0$  四舍五入的整数在论域中对应的元素隶属度取为 1，其他元素隶属度为 0，得到模糊化的结果。

#### (2) 最大隶属度法

根据  $x'_0$  四舍五入的整数在论域中对应的元素在哪个模糊集中的隶属度最大，则该集合就是模糊化的结果。

### 3) 建立模糊控制规则

控制规则是模糊控制器的核心。根据经验和知觉推理，将人的大量成功的控制策略经整理、加工和提炼后，用输入、输出变量的模糊状态给以描述，就得到了控制规则。对于二维模糊控制器，控制规则通常用如下形式的语句描述：

$$R_k : \text{if } A_k \text{ and } B_k \text{ then } C_k \quad k = 1, 2, \dots, n_0$$

下面针对有如图 3.7 所示响应的系统，讨论模糊控制规则的确定方法。

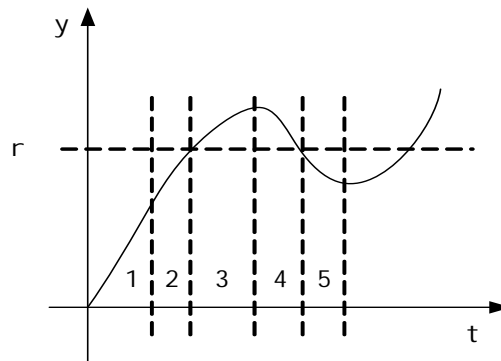


图 3.7 系统响应曲线

设被控偏差  $e = y - r$ ，偏差变化率  $\dot{e} = \frac{de}{dt}$ 。

第一区：由于  $e < 0$ ，且绝对值很大，说明  $y$  远小于给定值  $r$ ，若偏差变化率  $\dot{e}$  为负或零，此时控制量应为最大。若偏差变化率  $\dot{e}$  为正，根据  $\dot{e}$  的大小，减少控制量。

第二区： $e \leq 0$ ，但绝对值较小，若偏差变化率  $\dot{e}$  为负或零，此时控制量为正，但绝对值减小。若偏差变化率  $\dot{e}$  为正。则根据  $\dot{e}$  的大小，减少控制量，防止超调。

第三区： $e \geq 0$ ，若偏差变化率  $\dot{e}$  为正或零，此时控制量应为负，其绝对值大小应由  $e$  和  $\dot{e}$  的绝对值大小而定。

第四区： $e \geq 0$ ，同时偏差变化率为负或零，此时控制量应为较小正值，具体应由  $e$  和  $\dot{e}$  的绝对值大小而定。

第五区： $e \leq 0$ ，同时偏差变化率为负或零，此时控制量应为正值，具体应由  $e$  和  $\dot{e}$  的绝对值大小而定。

将所有控制规则汇总成控制状态表。表 3.1 是某一模糊控制器的控制状态表。

#### 4) 进行模糊推理

对于有两个输入的控制器，最常用的控制规则是“若  $A_i$  且  $B_j$  则  $C_k$ ”，或表示成：

$$\text{IF } A_i \text{ AND } B_j, \text{ THEN } C_k$$

其中  $A_i$  是偏差模糊集， $B_j$  是偏差变化率模糊集，而  $C_k$  是控制量模糊集。

例如：若  $A_i = \text{NS}$ ，且  $B_j = \text{NB}$ ，则  $C_k = \text{PM}$ 。

这种控制规则是一个模糊推理语句，它对应一个模糊关系：

$$R_i = A_i \times B_j \times C_k \quad (3.11)$$

$E_1$ $u$ $E_2$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 3.1 模糊控制规则

其隶属函数为： $R_i = (a_i, b_j, c_k) = A(a_i) \cap B(b_j) \cap C(c_k)$

用模糊矩阵表示式 (3-2) 所示的关系，则可得：

$$R = D_{\%}^T \times C_{\%} \quad (3.12)$$

其中  $D = A_{\%} \times B_{\%}$ ， $D_{\%}^T$  表示将  $D$  “拉直”运算后再转置。“拉直”的具体算法为将  $D$  中的元素按行顺序列出，后续行中的第一个元素，紧接着前一行的最后一个元素，依次类推，可见  $D_{\%}^T$  是一个单列向量，这样运算的目的是可以将多输入等效转化为单输入。

算出  $R$  后，再利用推理合成原理算出控制量： $C = D_{\%} \times R$ 。

按照以上算法得到的模糊控制器，也可称为极大极小模糊控制器。

## 5) 输出变量的反模糊化

上述的模糊推理结果,即模糊控制器的输出变量,一般情况下是一个模糊集(如马丹尼法和拉森法得到的都是模糊集),不能直接用于控制被控对象,需要先转化成执行器可以执行的精确量。此过程一般称为反模糊化,或称为清晰化,也称为解模糊。反模糊化目前尚无系统的方法。目前常用的方法有三种。

### 1. 最大隶属度法

这种方法非常简单,直接选择模糊子集中隶属度最大的元素作为模糊控制器输出的精确值。如果有两个以上的元素均为最大(一般依此相邻),则可取它们的平均值。

最大隶属度法能够突出主要信息,而且计算简单,但很多次要信息都被丢失了,因此显得比较粗糙,只能用于控制品质要求较低的系统。

### 2. 中位数法

论域  $U$  上把隶属函数曲线与横坐标围成的面积平分为两部分的元素  $z^*$  称为模糊集的中位数。中位数法就是把模糊集的中位数作为模糊控制器输出。

假设  $U \subseteq R$ , 则  $z^*$  可用下列公式求取:

$$\int_a^{z^*} C(x)dz = \int_{z^*}^b C(x)dz, \text{ 当 } U = [a, b]; \quad (3.13)$$

与第一种方法比较,中位数法概括了更多的信息,但没有突出主要信息,且需求解积分方程,计算比较复杂,因此应用场合要比下面的加权平均法来的少。

### 3. 加权平均法(重心法)

这是模糊控制系统中应用比较广泛的一种非模糊化方法。其计算公式如下:

$$z^* = \frac{\int_a^b zW(z)dz}{\int_a^b W(z)dz}, \quad U = [a, b], \quad (3.14)$$

其中  $W(x)$  为选定的权函数,  $w_i$  为选定的权系数。

经常的,我们就将模糊集  $C$  在点  $z$  处的隶属度值作为权函数或权系数,则上述公式表示的加权平均法就转换为如下的重心法:

$$z^* = \frac{\int_a^b zC(z)dz}{\int_a^b C(z)dz}, U = [a,b]. \quad (3.15)$$

这种方法既突出了主要信息，也兼顾了其它信息。已有的研究表明，加权平均法比中位数法具有更佳的性能。一般情况下，后两种方法都优于最大隶属度法。

在实际应用中，究竟采用何种方法不能一概而论，应视具体情况而定。

应当注意的是，经过反模糊化求得的模糊控制器的输出变量的确切值，只是其论域确切值。还需要根据输出变量的论域和模糊状态，按照输入变量“实际确切值转化为论域确切值”的逆过程，将输出变量的论域确切值转化为对应的实际确切值。这样得到的输出变量的实际确切值，才能作为模糊控制器传给执行器的可以执行的精确量，从而用于控制被控对象。

### 3.3.4 模糊自适应 PID 控制

如果在压力波动控制系统中采用单纯的经典 PID 控制方法，控制参数  $K_p$ ， $K_i$ ， $K_d$  在整个控制过程中是固定不变的。即使通过软件设计使控制参数能够在一定范围内变化，也不能满足根据任意时刻的  $e$  和  $de$  值对 PID 参数进行适时自整定的要求，反而在相当大程度上增加了程序员的工作量，控制结果却没有得到明显的提高，得不偿失。

诚然，作为经验相当丰富的工程师，根据其长期摸索调整积累下来的 PID 参数调节经验，可以针对实际情况得到相对优化的 PID 控制参数。但是试验台在生产厂家的参数都调好之后，到了应用现场时，因为环境因素的变化等原因，系统的性能会改变，原来的相对优化的 PID 控制参数将大打折扣，没有自我调节能力。最重要的是，工程师丰富的参数调节经验是一个相对模糊的概念，不能精确地用公式或数学模型来描述。

我们考虑将常规 PID 控制和模糊控制两种控制策略结合起来，构成兼有两者优点的新的控制器，即模糊自适应 PID 控制。运用模糊数学的基本理论和方法，

把规则的条件、操作用模糊集表示，并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始 PID 参数等)作为知识存入计算机知识库中，然后计算机根据控制系统的实际响应情况，运用模糊推理，即可自动实现对 PID 参数的  $K_p$  ,  $K_i$  ,  $K_d$  的最佳调整，最后输出仍然采用常规 PID 计算方法，这就是模糊自适应 PID 控制。控制原理结构框图如图 3.8 所示

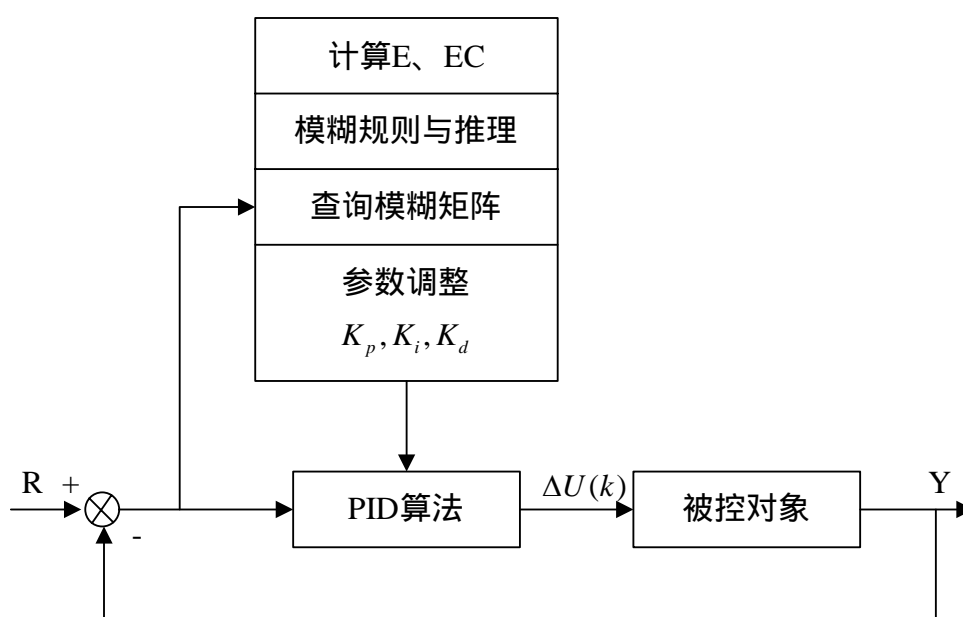


图 3.8 模糊自适应 PID 控制原理框图

模糊自适应 PID 控制是在 PID 算法的基础上增加了 E 与 EC 的计算，并将在工艺分析和操作经验基础上总结的专家知识，以产生式语句 if(条件)then(结果)的形式组成知识库，经模糊合成推理形成模糊查询矩阵。如果在某一采样时刻观察到响应曲线模式与所期望的模式不同，则可根据模式状态变量 E 和 EC，通过实时调整机构在知识库中搜索相应的模糊推理矩阵，并进行参数调整，直到其输出达到期望的响应模式为止。PID 参数的模糊自动调整思想是依据被控对象的响应在采样时刻的误差 E 和误差变化率 EC 两个因素来确定参数调整的极性和大小的。本质上同时兼顾了被控对象响应的“静态性能”(是高于还是低于给定位)和响应的“动态性能”(是靠拢还是偏离给定位)两个因素，既看现状、也看动向。其算法过程是利用对应的规则集将

控制指标(条件)模糊化,然后将它与知识库中的模糊规则进行匹配(即判断控制指标与规则集的条件部分是否相同),如有规则被匹配,则执行该规则的结果部分,就可得到相应的参数调整量。因此有实际控制系统的响应值(精确值)到模糊规则集的条件(模糊量)的转化过程(即模糊化)和其规则的操作值(模糊量)到实际的调整系数(精确量)的转化(判决)过程。

经过人们大量的实验与应用,已总结出 PID 参数的各种整定方法。其中对于非线性、时变和时延以及难以用  $G(s)$  描述的系统,控制专家也经过大量仿真研究和实验,得出一些整定经验和知识,由此可看出 PID 控制器参数的变化如何影响过渡过程特性。这些知识归纳如下:

1.  $K_p$  增加振荡周期减小;反之亦然;
2.  $K_p$  增加则超调增加;反之亦然;
3.  $K_p$  增加则上升时间减小;反之亦然;
4.  $K_i$  增加则超调/回调比增加;反之亦然;
5.  $K_i$  增加则稳定性下降;反之亦然;
6.  $K_i$  减小则超调下降;反之亦然;
7.  $K_D$  增大则稳定性增加;反之亦然;
8. 当系统输出超出设定值时,减小  $K_i$ ;
9. 当系统上升时间大于要求的上升时间时,增加  $K_i$ ;
10. 在稳态时,系统输出产生波动现象,适当增加  $K_D$ ;
11. 系统输出对于干扰信号反应灵敏,适当减小  $K_D$ ;
12. 上升时间过长,增加  $K_p$ ;
13. 系统输出发生震荡现象,减小  $K_p$ ;

根据上述专家经验知识结合模糊控制规则可总结出 PID 参数模糊自适应调整模型，  
进而出 PID 参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  模糊调整控制表如表 3.2，3.3，3.4 所示

EC E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	+6	+6	+6	+5	+4	+4	+4	+3	+2	+1	0	0	0
-5	+6	+6	+6	+5	+4	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1	-1
-4	+6	+6	+6	+5	+4	+3	+2	+2	+2	+1	0	-1	-2
-3	+5	+5	+5	+5	+4	+3	+2	+1	+1	0	-1	-1	-2
-2	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-2	-2
-1	+4	+4	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-3	-3
0	+4	+4	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4
+1	+3	+3	+3	+2	+1	0	-1	-1	-2	-3	-4	-4	-4
+2	+2	+2	+2	+1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4
+3	+2	+1	+1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-5	-5
+4	+2	+1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-6
+5	+1	+1	0	-2	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-6
+6	0	0	0	-2	-4	-4	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-6

表 3.2  $K_p$  参数模糊调节控制表



EC E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	0
-5	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	0	0
-4	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	0	0
-3	-6	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-1	-1	0	+1	+1	+1
-2	-6	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	+1	+2	+2	+2
-1	-5	-5	-4	-3	-2	-1	-1	0	+1	+2	+3	+3	+3
0	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+4	+4
+1	-4	-3	-3	-2	-1	0	+1	+1	+2	+3	+4	+5	+5
+2	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+2	+2	+3	+4	+5	+6
+3	-2	-2	-1	0	+1	+1	+2	+3	+3	+4	+5	+5	+6
+4	0	0	0	+1	+2	+2	+2	+3	+4	+5	+6	+6	+6
+5	0	0	0	+1	+2	+3	+3	+3	+4	+5	+6	+6	+6
+6	0	0	0	+1	+2	+3	+4	+4	+4	+5	+6	+6	+6

表 3.3  $K_i$  参数模糊调节控制表

EC E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
-6	+2	0	-2	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-5	-4	-1	+2
-5	+2	0	-2	-3	-6	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-1	+1
-4	+2	0	-2	-3	-6	-5	-4	-4	-4	-3	-2	-1	0
-3	+1	0	-2	-4	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0
-2	0	-1	-2	-3	-4	-4	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0
-1	0	-1	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-1	0
0	0	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0
+1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0
+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
+3	+2	+2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+2	+2
+4	+6	+3	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+2	+3	+6
+5	+6	+4	+3	+3	+3	+3	+3	+3	+2	+2	+2	+3	+6
+6	+6	+5	+4	+4	+4	+4	+4	+3	+2	+2	+2	+3	+6

表 3.4  $K_D$  参数模糊调节控制表

根据各 PID 参数的模糊调节表，可在程序中实现  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  的动态调节，以达到最佳的控制效果。

### 3.4 本章小结

本章首先对系统数学模型的建立进行了较为深入的探讨与分析，然后对常用的压力控制策略，包括 PID 控制、自适应控制和模糊控制等进行了详细的论述，最后对本系统所采用的控制策略即模糊自适应 PID 控制进行了分析和说明。下面一章将会包含控制算法的具体软件实现。

## 第四章 试验台控制程序与软件设计

### 4.1 软件设计概述

控制程序软件设计是试验台实现自动操作的基础。本试验台上位机程序采用 Visual Studio 7 编写，主要包括高速数据采集程序、串口通信程序、上位机界面程序等。总体程序运行流程如图 4.1 所示。

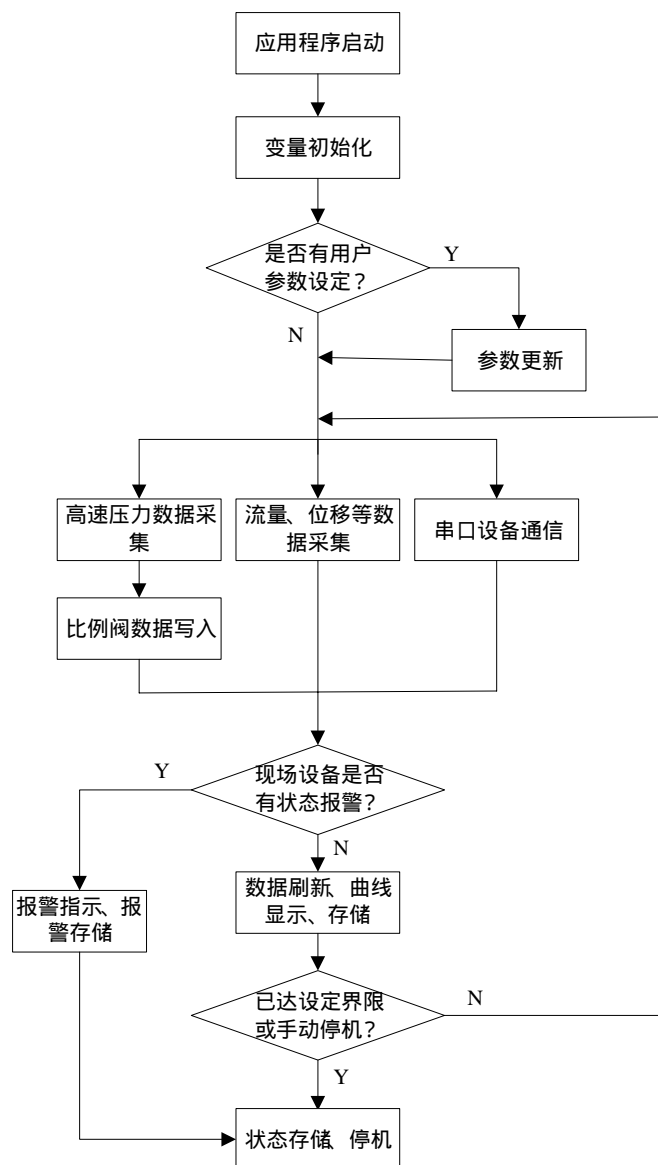


图 4.1 软件主流程图

程序功能模块图如图 4.2 所示

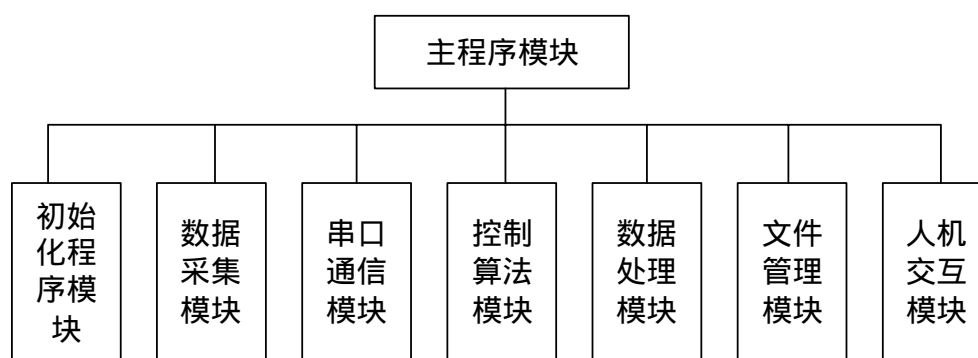


图 4.2 程序功能模块

数据采集模块采用了 NI 公司提供的 Measurement Studio 集成套件辅助开发。串口通信通过编写基于 Modbus 协议的串口通信线程类来实现，并实现了良好的封装。控制算法模块软件实现了前一章介绍的模糊自适应 PID 控制算法。为实现数据曲线回放功能，系统采样速率较高，导致大容量的数据存储，进行合适的数据文件分割与管理由文件管理模块来实现。

## 4.2 数据采集模块设计 [26][27][28]

为使试验台能够实现模拟用户自由设定需要的压力波形，采样模块的功能应能够实时高速采样压力数据并进行曲线显示，提供用户进行采样曲线与设定曲线的对比，并能进行数据存储，以进行数据曲线回放和数据打印。Measurement Studio 提供的类库和一些界面控件对数据采集程序 VC 设计提供了很好的支持。

### 4.2.1 Measurement Studio 介绍

Measurement Studio 是 NI 公司为 Visual Studio .NET 和 Visual Studio 6.0 环境提供的一个集成式套件，包括各种常用的测量和自动化控件、工具和类库。NI Measurement Studio 带有的 ActiveX 和 .NET 控件、面向对象的测量硬件接口、高级的分析库、科学的用户界面控件、测量数据网络化、向导、交互式代码设计器和高扩展性类库等功能，极大的减少了应用程序的开发时间。

NI 公司以专业测量编程经验为背景，开发出了 Measurement Studio 这一编程平台，已带有专门为微软 Visual Basic, Visual C# .NET 和 Visual C++ 语言而设计的各种测量工具，简化了与数据采集和仪器控制接口的结合，从而更加方便的实现硬件集成。利用 Measurement Studio，可以在已有的 Visual Studio 编程知识基础上，快速启动测量并创建一个完整的测量解决方案——从采集到分析直到显示。

Measurement Studio 提供了一系列与 Visual Studio .NET 2003 环境紧密结合的 .NET 控件，专门为科学家和工程师建立虚拟仪器系统而设计。利用 Measurement Studio，可以从交互式向导里配置插入式数据采集设备、GPIB 仪器和串口设备，也可以从中生成 Visual Basic .NET 或 Visual C# .NET 源代码。利用科学用户界面控件，可以在属性页面或收藏编辑器里交互地配置图表、旋钮、仪表、标尺、表盘、容器、温度计、二位开关和 LED 灯等。此外，Measurement Studio 还提供了强大的网络组件，这样就可以轻松地通过互联网在应用程序之间共享实时测量数据了。

Measurement Studio 为在 Visual C++ 中开发测量和自动化系统提供了一个交互式设计方式。由于这些工具被集成到 Visual C++ 开发环境中，因此可以像使用微软工具一样直接调用它们。也可以利用 Measurement Studio 应用向导 (App Wizard) 以及控件和类库，轻松创建 C++ 测量系统。应用向导根据特定要求创建一个项目，包含一个代码模板和设计应用程序时所需要的测量工具。这些工具包含了用于仪器控制、数据采集、数据分析和通过因特网实时传输数据所需要的 C++ 类库。此外，自定义控件可创建自己的测量用户界面。数据对象类库实现了数据从采集到分析再到显示的无缝封装和传输，将测量类库和界面控件连接到了一起。

Measurement Studio 企业版和专业版继续提供在 Visual C++ 6.0 和 Visual Basic 6.0 环境下开发所需的 ActiveX 控件和类库。利用交互式 ActiveX 属性页面，可以为模拟输入和输出、数字 I/O, GPIB, VISA 以及更多的设备图形化配置数据采集和仪器控制应用程序。科学分析库包括了很多常用函数，如快速傅立叶变换 (Fast Fourier Transforms)、频谱测量和数组操作等。此外，包含在 Measurement Studio 里的 ActiveX 用户界面控件专为创建一个功能完备的数据采集系统而设计。图 4.3 为 Measurement Studio 用户界面。

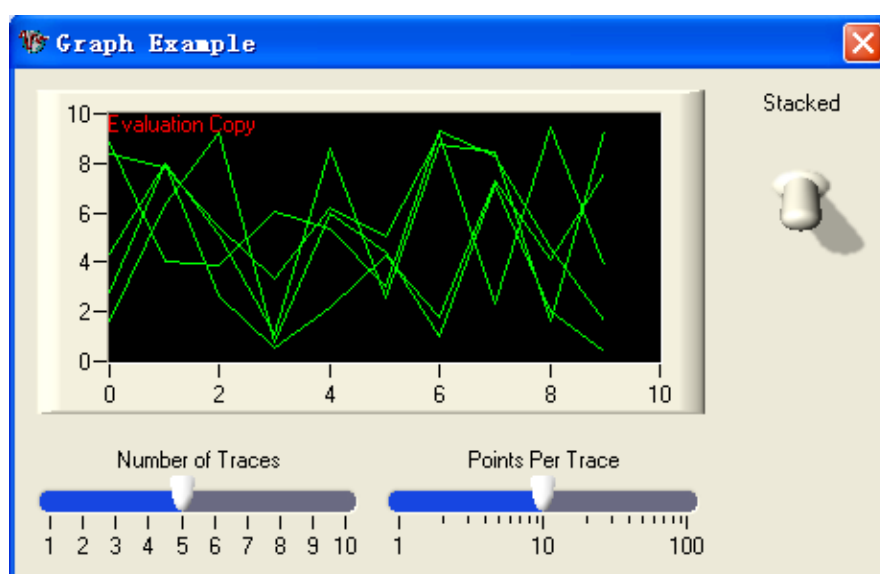


图 4.3 Measurement Studio 用户界面

此外 Measurement Studio 能够确保数据的精确测量。

Measurement Studio 数据采集界面具有一个类似向导的交互式界面—DAQ 助手，  
用来选择采样速率、触发、计时、时钟选择、缩放、信号类型和其他稳定性配置，  
同时也提供了最佳单点采集和多线程性能。与以前的数据采集界面相比，这些新的  
优化将性能提高了 10 到 20 倍。Measurement Studio 和 I/O 硬件驱动之间的紧密结  
合为工程师提供了最有效的方式来完成进行测量所需的采集，极大地减少了开发时  
间。

数据采集功能包括：

1. 包含标度的原始数据的内置通道配置。
2. 单次和连续模式的高速波形采集和生成。
3. 精确和快速的单点模拟和数字 I/O。
4. 用于脉冲生成、事件计数和时间测量的计数器/定时器 I/O。

图 4.4 为交互式配置界面。

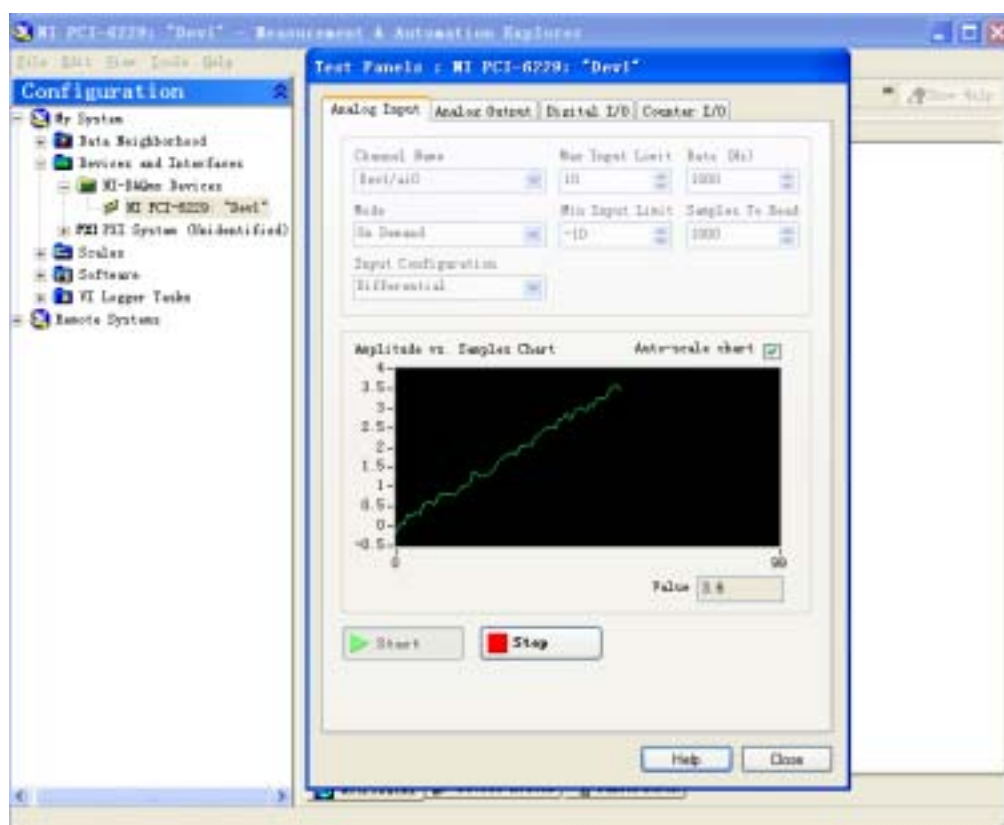


图 4.4 交互式配置界面

以上这些 I/O 能力与特定数据类型和测量分析类库一起是专门为快速且轻松地  
从物理传感器得到您所需要的数据和测量而设计的。Measurement Studio 使用交互  
式测量工具来简化数据采集和仪器连接的操作。DAQ 助手和仪器 I/O 助手都是常用  
的 .NET 设计器，包括对测量任务配置、测试和编程的逐步引导，它们自动生成自定  
义的底层代码。利用 DAQ 助手，可以快速的配置数据采集任务，包括自定义计时、  
标度和触发等而无需编程。利用仪器 I/O 助手，可以直接与 GPIB、以太网、USB、串  
行总线和 VXI 仪器通信。可以使用这个交互式向导来对仪器控制系统设计原型、快  
速进行测量、自动解释数据、生成代码，甚至开发简单的仪器驱动。

无论使用何种设备采集数据—GPIB、以太网、串口仪器、插入 DAQ 设备、PXI 测  
量模块、嵌入式自动化设备、模块化仪器或图像采集设备，Measurement Studio 都  
提供了与使用的开发语言匹配的高层界面。可以选择 Visual Basic, Visual C#或  
Visual C++来建立高速、设备无关的测量和自动化应用，而且 Measurement Studio

提供了 ActiveX 和 .NET 控件工具和面向对象的类库来帮助更高效的实现测量和自动化应用。

#### 4.2.2 基于 Measurement studio 的数据采集程序模块

程序中为数据采集建立 CNI\_YL 类，应用了 Measurement Studio 提供的类库设计该类，并利用模拟设备对类功能进行了测试。

数据采集程序流程（以模拟量输入为例）如图 4.5 所示。

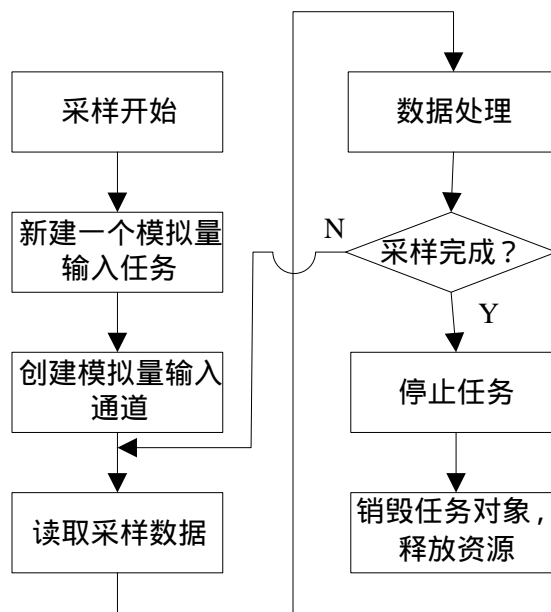


图 4.5 模拟量采样程序流程

##### 1. 新建一个模拟量任务

新建一个 CNI DAQmxTask 对象。CNI DAQmxTask 类是 Measurement Studio 自带的基础类，它表征了一个 NI-DAQmx 任务的通道、计时器、触发器、输出信号等一些信息。对大多数 NI-DAQmx 任务而言，必须新建一个读取者或写入者实例才可进行数据读取。

##### 1) 声明与定义模拟量输入任务对象：

```
std::auto_ptr<CNI DAQmxTask> myTaskAI
```

##### 2) 声明与定义多通道 Reader:



```
std::auto_ptr<CNiDAQmxAnalogMultiChannelReader> m_reader_AI
```

## 2. 创建模拟量输入通道

为模拟物理输入通道建立一个虚拟通道,创建虚拟通道时,需同时指定通道名称,通道采样最大值与最小值,通道采样数值单位。NI-DAQmx 驱动并不检测参数设定是否合适,计时参数设置与硬件参数设置不匹配,函数也不会抛出异常错误。可以通过启动任务来检测任务设置是否合适,包括任务读写或调用 CNiDAQmxTask: Start 函数或 CNiDAQmxTask: Control 函数等方式。

创建电流型输入通道:

```
myTaskAI->AIChannels.CreateCurrentChannel(_T("dev1/ai0"),_T("Press1"),
static_cast<DAQmxAITerminalConfiguration>(DAQmxAITerminalConfigurationDifferential),m_Min, m_Max, ShuntResistor, "Press1")
```

## 3. 读取采样值

读取采样值之前,需要新建 CNiDAQmxAnalogSingleChannelReader 或 CNiDAQmxAnalogMultiChannelReader 对象,每个 CNiDAQmxTask 均有一个 CNiDAQmxStream 属性,通过该属性实现 Reader 对象从任务采样点中获取数据。通过调用 ReadSingleSample 函数或 ReadMultiSample 函数实现数据的读取。

1) 创建多通道 Reader:

```
m_reader_AI =std::auto_ptr<CNiDAQmxAnalogMultiChannelReader>(new
CNiDAQmxAnalogMultiChannelReader(myTaskAI->Stream))
```

2) 设置采样速率:

```
void SetSampleRate(double newRate = 100.0)
```

3) 安装事件处理器:

```
m_reader_AI->InstallEventHandler(*this, OnEvent)
```

4) 读取采样值:

```
m_reader_AI->ReadMultiSampleAsync(int(sampleRate+0.5), m_data, NULL)
```

## 4. 数据处理

数据处理包括数据获取后的显示、曲线显示、存储等操作。数据的曲线显示采用

CNI Graph 控件，该控件具有强大的数据刷新显示、曲线缩放拖动、数据回放等功能。由于数据量很大，所以提供了用户选择是否存储功能。数据处理步骤在采样完成之后通过调用 OnEvent 函数实现。

1) 给主对话框发送消息：

```
if(m_pOwner != NULL)m_pOwner->SendMessage(PWM_READDATA, 0, 0 )
```

2) 刷新实时曲线显示：

```
m_RTCurve.m_Graph.ChartY(r_data)
```

3) 刷新实时数据网格显示：

```
DataGridRefresh(r_data)
```

4) 刷新界面显示：

```
DlgRefresh(r_data)
```

5) 数据存储：

```
DataSave(r_data)
```

#### 5. 任务销毁

首先调用 release 函数释放资源，然后调用 delete 操作符删除对象。

1) 多通道 Reader 释放与销毁：

```
delete m_reader_AI.release()
```

2) 模拟量任务释放与销毁：

```
delete myTaskAI.release()
```

### 4.3 串口通信模块 [29][30][31][32][33]

系统采用的 PLC、温控计、ADAM 数据采集模块、变频器均支持 Modbus 协议，因此，串口通信模块的设计实际上是编写一个基于 Modbus 协议的串口通信线程类。完成后的类较好的实现了封装和全面的接口设计。

### 4.3.1 串行通信与 Modbus 协议

串行通信在工业控制中非常重要，已广泛用于微机之间的通信、工业控制系统中的数据采集、控制、遥控、遥测中的远程数据的传送等方面，有着广泛的应用价值和较高的研究价值，仍吸引着不少学者在这方而继续做研究。

RS-232、RS-422 与 RS-485 都是串行数据接口标准，最初都是由电子工业协会（EIA）制订并发布的，RS-232 在 1962 年发布，命名为 EIA-232-E，作为工业标准，以保证不同厂家产品之间的兼容。RS-422 由 RS-232 发展而来，它是为弥补 RS-232 之不足而提出的。为改进 RS-232 通信距离短、速率低的缺点，RS-422 定义了一种平衡通信接口，将传输速率提高到 10Mb/s，传输距离延长到 4000 英尺（速率低于 100kb/s 时），并允许在一条平衡总线上连接最多 10 个接收器。RS-422 是一种单机发送、多机接收的单向、平衡传输规范，被命名为 TIA/EIA-422-A 标准。为扩展应用范围，EIA 又于 1983 年在 RS-422 基础上制定了 RS-485 标准，增加了多点、双向通信能力，即允许多个发送器连接到同一条总线上，同时增加了发送器的驱动能力和冲突保护特性，扩展了总线共模范围，后命名为 TIA/EIA-485-A 标准。由于 EIA 提出的建议标准都是以“RS”作为前缀，所以在通讯工业领域，仍然习惯将上述标准以 RS 作前缀称谓。

所谓通信协议是指通信双方的一种约定。约定包括对数据格式、同步方式、传送速度、传送步骤、检纠错方式以及控制字符定义等问题做出统一规定，通信双方必须共同遵守。因此，也叫做通信控制规程，或称传输控制规程。

Modbus 协议是应用于电子控制器上的一种通用语言。通过此协议，控制器相互之间、控制器经由网络（例如以太网）和其它设备之间可以通信。它已经成为一通用工业标准。有了它，不同厂商生产的控制设备可以连成工业网络，进行集中监控。

此协议定义了一个控制器能认识使用的消息结构，而不管它们是经过何种网络进行通信的。它描述了一控制器请求访问其它设备的过程，如果回应来自其它设备的请求，以及怎样侦测错误并记录。它制定了消息域格局和内容的公共格式。

当在一 Modbus 网络上通信时，此协议决定了每个控制器须要知道它们的设备地

址，识别按地址发来的消息，决定要产生何种行动。如果需要回应，控制器将生成反馈信息并用Modbus协议发出。在其它网络上，包含了Modbus协议的消息转换为在此网络上使用的帧或包结构。这种转换也扩展了根据具体的网络解决节地址、路由路径及错误检测的方法。查询 - 回应模式如图4.6所示

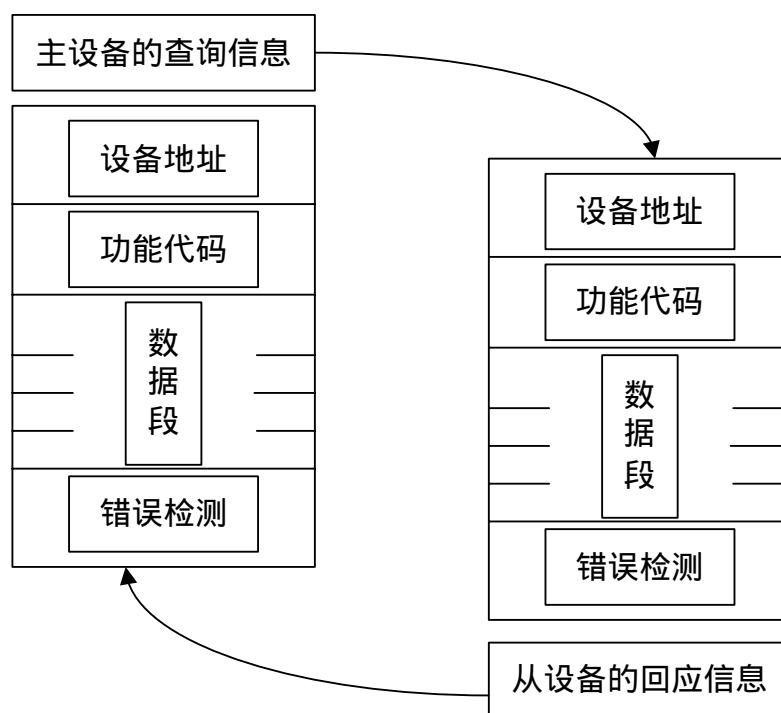


图 4.6 主 - 从 查询 - 回应周期表

**查询：**查询消息中的功能代码告之被选中的从设备要执行何种功能。数据段包含了从设备要执行功能的任何附加信息。例如功能代码03是要求从设备读保持寄存器并返回它们的内容。数据段必须包含要告之从设备的信息：从何寄存器开始读及要读的寄存器数量。错误检测域为从设备提供了一种验证消息内容是否正确的方法。

**回应：**如果从设备产生一正常的回应，在回应消息中的功能代码是在查询消息中的功能代码的回应。数据段包括了从设备收集的数据：象寄存器值或状态。如果有错误发生，功能代码将被修改以用于指出回应消息是错误的，同时数据段包含了描述此错误信息的代码。错误检测域允许主设备确认消息内容是否可用。

控制器能设置为两种传输模式（ASCII 或RTU）中的任何一种在标准的Modbus网

络通信。用户选择想要的模式，包括串口通信参数（波特率、校验方式等），在配置每个控制器的时候，在一个Modbus网络上的所有设备都必须选择相同的传输模式和串口参数。

ASCII 模式：

地址	功能代码	数据数量	数据1	..	数据n	LRC高字节	LRC低字节	回车	换行
----	------	------	-----	----	-----	--------	--------	----	----

RTU 模式：

地址	功能代码	数据数量	数据1	..	数据n	CRC高字节	CRC低字节
----	------	------	-----	----	-----	--------	--------

#### 4.3.2 串口通信程序实现

串口通信一般包括下面几步：

(1) 打开串口

```
hSerial = CreateFile("COM1:", GENERIC_READ | GENERIC_WRITE,
0, NULL, OPEN_EXISTING, 0, NULL);
if(m_hSerial == NULL)
{
    return;
}
```

(2) 配置串口

```
DCB PortDCB;
PortDCB.DCBlength = sizeof(DCB);
GetCommState(hSerial, &PortDCB);
PortDCB.BaudRate = 115200; // baud
PortDCB.ByteSize = 8; // Number of bits/byte, 4-8
```

```
PortDCB.Parity = NOPARITY;
PortDCB.StopBits = ONESTOPBIT;
if (! SetCommState(hSerial, &PortDCB))
{
    return;
}
//配置超时值
COMMTIMEOUTS CommTimeouts;
GetCommTimeouts(m_hSerial, &CommTimeouts);
CommTimeouts.ReadIntervalTimeout = MAXDWORD;
CommTimeouts.ReadTotalTimeoutMultiplier = 10;
CommTimeouts.ReadTotalTimeoutConstant = 10;
CommTimeouts.WriteTotalTimeoutMultiplier = 50;
CommTimeouts.WriteTotalTimeoutConstant = 100;
if (!SetCommTimeouts(hSerial, &CommTimeouts))
{
    return;
}
```

串口的配置不需要设置很多参数，默认的配置大部分是不需要修改的。一般改动就是波特率、位数、奇偶校验等几项。超时值是需要改动的。ReadIntervalTimeout 是指两个字符传送之间的超时时间。一次写操作的超时时间等于 WriteTotalTimeoutMultiplier 乘以要发送的字符数加上 WriteTotalTimeoutConstant。单位是毫秒。读操作的超时和写类似。所以设置超时是一个关键。设置太小可能丢失数据。

### (3) 发送数据

```
WriteFile (hSerial, &Byte, nByte, &dwNumBytes, NULL );
```

向串口发送数据一般都会成功。需要注意的是如果终端设备需要一定处理时间或

者称反应时间的话，那么两个写操作之间一定要注意时间间隔不能太小。具体的时间由终端设备的反应时间和缓冲区大小有关。

#### (4) 读取数据

串口麻烦就麻烦在读取数据上。除了考虑及时的读取数据外，还要解决接收到的数据的处理工作。如果在读取串口数据的线程中安置数据处理工作，那么可能会丢失数据（终端设备发送数据但是没收到），也有可能不会丢失（终端设备发送的数据的时间、大小都是确定的）。如果肯定接收的数据在处理工作结束后终端设备才发送数据，那么完全可以将数据处理工作放在读取串口的线程中。

#### (5) 关闭串口

```
if(hSerial != NULL)
{
    CloseHandle(hSerial);
    hSerial = NULL;
}
```

程序中设计了一个基于 Modbus 协议的串口通信类，该类继承自基本线程类，功能函数如下所示：

#### 1. 打开串口，关闭串口

```
BOOL StartComm()
```

```
BOOL CloseComm()
```

#### 2. 设置串口

```
void SetCommPort(char* m_CommPort)
```

#### 3. 生成指令字符（1~10分别对应不同的功能码）

```
WORD MakeReadCmd1(char stationNo, WORD address, WORD length)
```

```
WORD MakeReadCmd2(char stationNo, WORD address, WORD length)
```

```
WORD MakeReadCmd3(char stationNo, WORD address, WORD length)
```

```
WORD MakeReadCmd4(char stationNo, WORD address, WORD length)
```

```
WORD MakeWriteCmd5(char stationNo, WORD address, WORD data)
```

WORD MakeWriteCmd6(char stationNo, WORD address, WORD data)

WORD MakeWriteCmd10(char stationNo, WORD address, WORD\* data, WORD num)

#### 4. 生成校验字符

void MakeCheckCmd(LPSTR lpSend, DWORD dwLength, DWORD begin = 1)

#### 5. 读取多字

int ReadWords(WORD\* pData, char stationNo, WORD address, WORD words)

#### 6. 写入多字

int WriteWords(WORD\* pData, char stationNo, WORD address, WORD words)

#### 7. 读取单字

BOOL ReadWord(char stationNo, WORD address, WORD data)

#### 8. 写入单字

BOOL WriteWord(char stationNo, WORD address, WORD data)

#### 9. 读取单字节

char ReadOneBit(char stationNo, WORD address)

#### 10. 写入单字节

BOOL WriteOneBit(char stationNo, WORD address, WORD data)

#### 11. 校验

CheckCmd(unsigned char \* lpRead, WORD dwLength)

### 4.4 控制算法模块 <sup>[34][35]</sup>

压力波动试验台的核心功能是按用户需求模拟生成不同的压力环境，要实现这样的功能，控制算法的设计显得至关重要。控制算法主要包括主控线程设计和压力波形控制算法两部分，接下来将对这两部分进行分析。

#### 4.4.1 主控线程设计

程序执行时需要对较慢速设备如串口进行读写，也需要进行高速的数据采集卡读



写，因此主控程序应用多线程技术，以期提高程序执行效率。

- 多线程技术

多线程是这样一种机制，它允许在程序中并发执行多个指令流，每个指令流都称为一个线程，彼此间相互独立。

线程又称为轻量级进程，它和进程一样拥有独立的进程控制，由操作系统负责调度，区别在于线程没有独立的存储空间，而是和所属进程的其他线程共享一个存储空间，这使得线程间通信远较进程间简单。

多个线程的执行是并发的，也就是逻辑上的“同时”，而不管是否在物理上同时。如果系统只有一个 CPU，那真正的同时是不可能的，但是由于 CPU 的速度非常快，用户感觉不到其中的区别，因此我们也不用关心它，只需要设想各个线程同时执行即可。

用户可以根据实际需要创建多个线程来完成系统功能。在支持多线程机制的操作系统中，多线程一般分为两种来实现，一是工作线程，一是用户界面线程。工作线程只具备相应的线程数据结构，对外表现为函数调用；而用户界面线程是线程执行的实体，是系统内核调用的单位，拥有独立的消息循环，两者有着明显的区别。在本课题实际编程中，必须应用工作线程来实现实时通信的功能。多线程应用系统的设计包含创建线程、线程间同步、终止线程三个部分，其中关键是要处理好线程之间的同步问题，以避免线程之间出现资源竞争而引起几个线程甚至整个系统的死锁。通常线程中会有访问共享数据区的需求，由于线程运行的时间是不确定的，变量就会出现随机性。

- 线程设计

图 4.7 为控制程序主要工作线程结构。

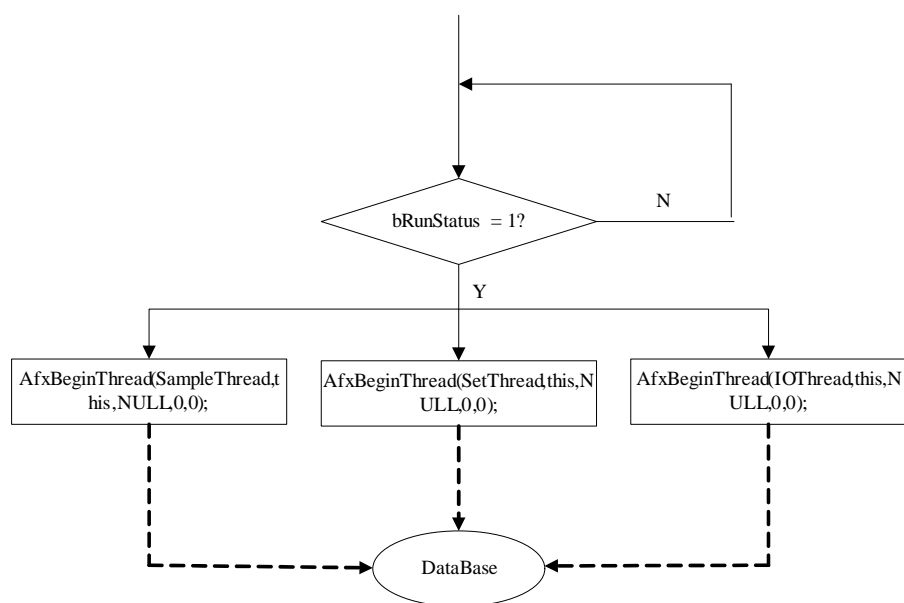


图 4.7 线程结构

其中：

SampleThread：采样线程，主要进行高速压力数据采集和流量、位移数据采集。

SetThread：比例阀控制线程，通过模糊自适应 PID 控制算法生成的比例阀控制量高速写入。

IOThread：串口通信线程，包括串口读写与相关的数据处理。

#### 4.4.2 压力波形控制算法

按照上一章的分析，采用的是模糊自适应 PID 控制算法。程序工作流程如下所图 4.8 所示

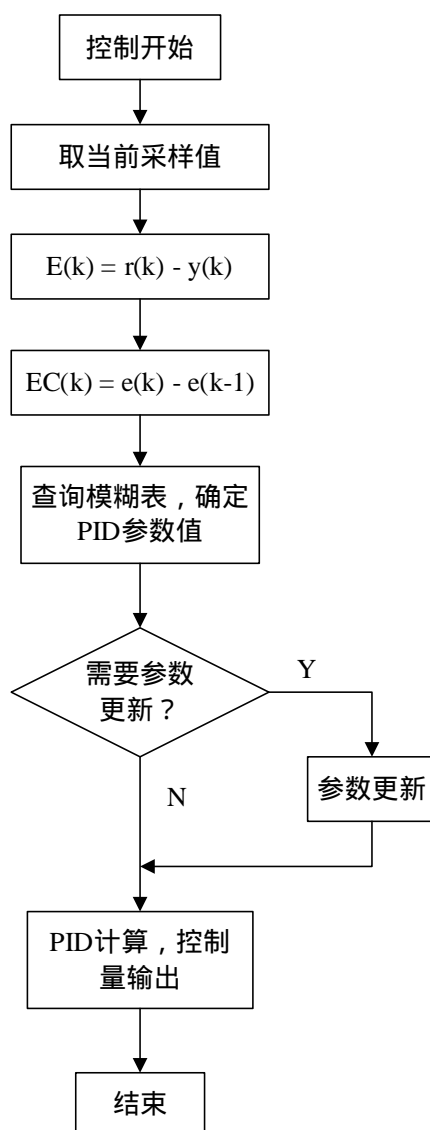


图 4.8 模糊自适应算法流程

模糊 PID 控制类名为 CFuzzyPID, 该类具有 3 个  $13 \times 13$  数组成员, 分别对应  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_D$  参数的模糊调节表, 通过定时查询数组, 实现 PID 参数的模糊控制, 从而最终实现模糊自适应 PID 控制。主要功能函数如下所示:

1. 参数初始化  
`void ParaInit()`
2. 参数模糊调节

`void ParaInquire()`

### 3. PID 控制

`void PIDSet(float p, float i, float d)`

## 4.5 人机界面模块

根据试验台工艺要求，上位机人机界面应满足如下的功能：

1. 实时压力数据曲线显示；
2. 设定压力数据显示，并提供与采样曲线的对比；
3. 其他数据包括流量、温度、位移、运行时间、波动的实时显示；
4. 历史压力数据曲线回放功能；
5. 实时报警消息显示；
6. 历史报警数据查询；
7. 参数设置功能，包括试验参数和传感器参数设置；

程序中使用 VC 作为界面设计工具，并采用了部分 Measurement Studio 提供的控件，界面基于基本对话框设计，主要界面功能类如下所示：

1. 主对话框类：CYLDLG
2. 主监控子对话框类：CMai nControl
3. 实时曲线子对话框类：CRTCurve
4. 实时数据网格子对话框类：CRTData
5. 动态图示子对话框类：CRTImag
6. 历史曲线回放界面：CHTCurve
7. 报警数据回放界面：CAI armData
8. 试验参数设置界面：CTestPara
9. 传感器参数设置界面：CSensorPara

部分界面效果如图 4.8、图 4.9 所示。

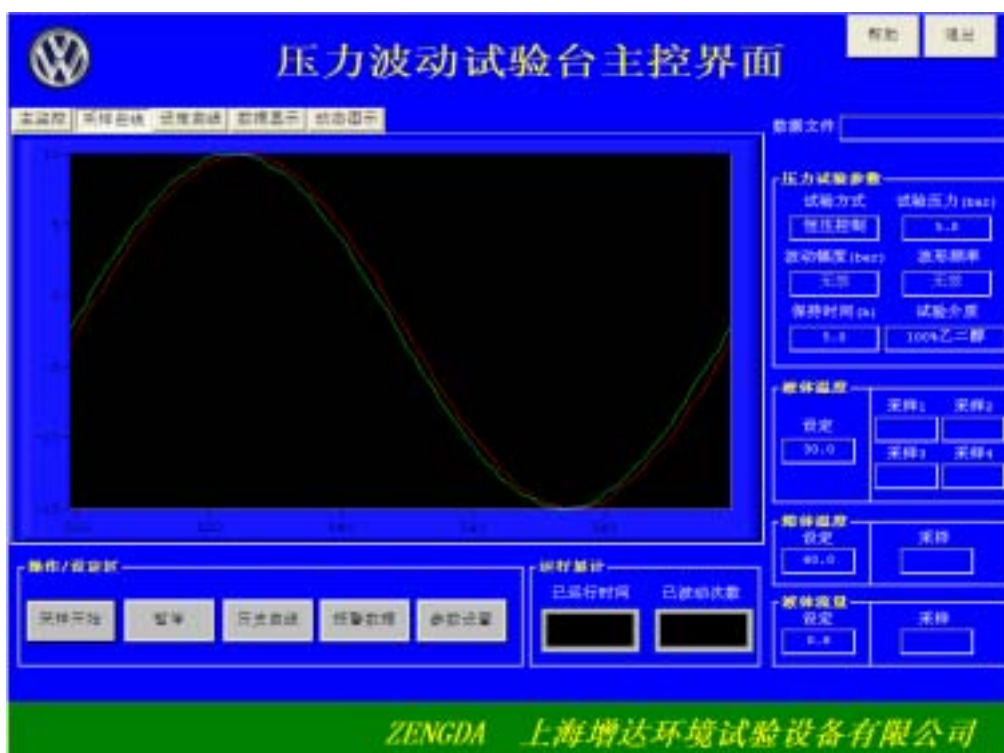


图 4.8 主界面



图 4.9 工艺设置界面

## 4.6 本章小结

本章首先对系统软件设计进行概述，分析了程序控制流程和模块组成，接着针对不同的模块如数据采集模块、串口通信模块等进行了较为详细的阐述。

## 第五章 系统测试与试运行

系统调试是项目设计中重要的一环，它直接关系到系统能否正常运行，关系到系统的稳定性与可靠性。

系统硬件与软件设计完成之后，需对系统进行软硬件单独测试与协同测试，为实现协同测试功能，粗略设计了一个调试界面，如图 5.1 所示。



图 5.1 调试界面

### 5.1 软硬件独立测试

软硬件设计完成之后，在协同测试之前，需先进行单独测试，确保稍后的软硬件协同测试能够顺利进行。

硬件测试主要工作有：

1. 电气线路检查与控制线路检查；
2. 设备元件手动测试，包括温控计、变频器等的手动调试；
3. 设备各分系统测试，包括充液与排气系统，温控系统等测试；
4. 硬件系统总体测试与运行逻辑测试。

软件测试主要工作有：

1. 软件模块测试，如文件模块测试、采样模块测试，控制算法模块测试等；
2. 主控逻辑测试与模拟运行。

## 5.2 软硬件协同测试

软硬件协同测试是系统测试的主要部分，也是工作量最大的部分，主要包括下面几个部分：

### 5.2.1 点动调试

为测试系统的控制接线与设备状况，需对 PLC 个输入输出接线端进行点动测试，主要工作包括：

1. 充液、回液电磁阀组的点动测试；
2. 循环泵与供液泵电磁阀组点动测试；
3. 排气电磁阀组点动测试；
4. 放空电磁阀组点动测试；
5. 报警输出端口测试；
6. 报警输出端口测试。

### 5.2.2 执行与控制机构测试

系统集成有很多执行与控制机构，包括执行泵、温控计、变频器、数据采集模块等，为了确保此类设备的正常运作，需对每台设备进行测试，包括：

1. 设备参数输入；
2. 设备参数读取；
3. 设备状态异常控制；
4. 设备控制逻辑测试。



### 5.2.3 波形生成调试

尽管在程序中采用了模糊 PID 自动控制，但是为了实现控制效果的比对参考和分析，在调试时需对 PID 参数进行手动写入或禁用 PID 调节。主要工作包括：

1. 控制量波形的选择与效果比较；
2. PID 参数的手动输入与控制记录，并与模糊 PID 控制的效果对比，调整控制算法；
3. PID 调节禁用与受控输入波形测试，并进行效果分析。

波形生成是设计与调试中的难点之一，为获得理想的波形，大致需要进行如图 5.2 所示的调试步骤：

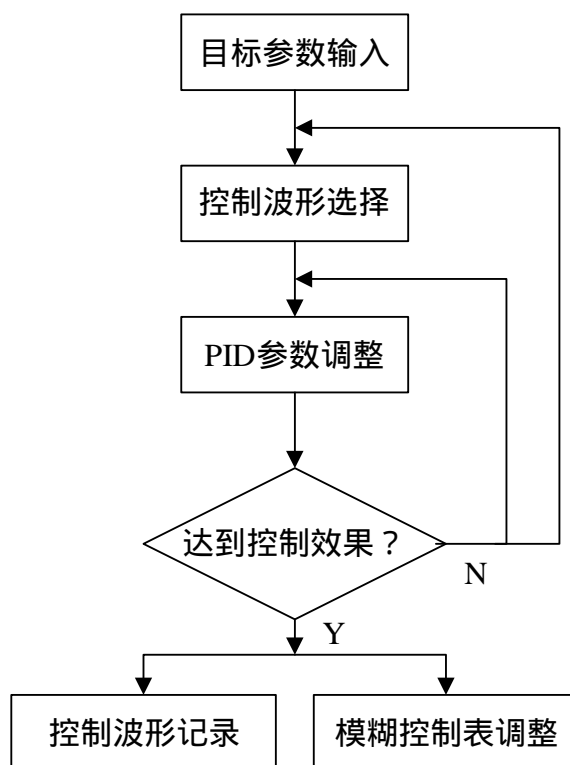


图 5.2 波形生成调试步骤

其中目标参数包括波形的幅值和周期，常采用的控制波形有三角波、梯形波、矩形波和正弦波，通过调节 PID 参数，观测实际的控制效果，从而调整模糊控制总表，达到波形生成的可自动调控。

### 5.3 主控程序测试与设备试运行

在其他主要的功能测试完成之后，需启动控制程序主线程对设备进行综合测试，需要模拟实际运行情况，主要工作包括：

1. 基于向用户提供手册指导的模拟操作；
2. 无故障运行测试；
3. 变工况运行测试。

### 5.4 本章小结

本章首先概述了设备调试的重要性和主要调试内容，然后根据具体的调试分类进行了详细描述，本章所涉及的调试方法对同类型的项目设计同样具有参考价值。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本文针对增达公司所承接的大众汽车公司的压力波动试验台项目,给出了该系统设计与实现的过程与方法。论文首先概述了系统设计所设计的一些关键技术,然后较为详细的探讨了系统硬件设计的一些方法,分析了系统关键元器件的原理与选型。如何控制生成满足要求的压力波形,一直是设计中的难点,论文中对压力控制策略进行了深入探讨,并论述了使用模糊自适应 PID 作为最终控制手段的原因以及软件的算法实现。论文同时对系统软件设计进行了较为全面的说明,对各软件模块都有阐述。在论文最后,对系统软硬件的调试过程与方法进行了研究。

### 6.2 成果与收获

本人于 2006 年 1 月参与该项目,在项目的推进过程中,学习到许多理论与实际的项目操作知识。本人在该项目中主要负责控制程序与算法设计以及后期的通信调试等工作。本人在该项目中的主要成果有:

1. 归纳系统工艺要求,总结系统控制逻辑,对过程控制元件如比例阀、脉冲缸、电磁阀等的工作原理与使用有了较为深刻的了解;
2. 系统控制元件如温控计、PLC、变频器等的通信调试与功能测试,从中掌握并熟悉了串口调试方法与通信编程;
3. NI 数据采集卡的通信调试与测试,熟练掌握了 NI 板卡驱动软件的使用,并且对 Measurement Studio 集成开发套件有了全面的了解且能够应用其进行编程。
4. 压力波形生成控制策略分析与最终选择模糊 PID 控制作为压力控制策略,在此过程中,学习与了解了常用控制策略的理论知识;
5. 控制软件设计与算法实现,实现了友好的用户操作界面,控制算法也能够实现令人满意的最终压力控制效果;

6. 系统软硬件调试，对电气知识、结构知识有了进一步的了解，并且掌握了一般设备的调试方法。

### 6.3 展望

随着现代工业的发展，对产品的质量和可靠性要求越来越高，这在一方面促进了包括压力试验台在内的环境模拟设备的发展，同时也对此类设备的控制精度、稳定性提出了更高的要求。系统硬件设备的改善，如采用高性能数据采集设备、精度更高的比例阀、功能更为完备的 PLC 和温控设备固然对提高系统的控制性能具备一定的作用，但是如果不能找到一种合适的控制策略，系统的性能瓶颈则始终无法突破。因此，加强对过程控制理论研究，并应用于系统设计，才是此类项目研究的关键所在。当然，我们也有理由相信，随着控制理论的进一步发展，结合现代过程控制元件性能的提高，包括压力波动试验设备在内的更多类型的工业设备设计将获得更好的基础支撑。

## 参考文献

1. 王浚, 环境模拟技术——一门新的综合性工程技术, 中国工程科学, 2003
2. 周俊容, 高速数据采集系统, 电子工程师, 2005
3. 韩建海, 张河新, 气动比例/伺服控制技术与应用, 机床与液压, 2001
4. 气控压力交变试验台技术协议, 上海增达 - 上海大众, 2005
5. 气控压力交变试验台设计任务书, 上海增达 - 上海大众, 2005
6. 李素玲, 刘军营, 比例控制与比例阀及应用, 液压与气动, 2003
7. 德国 FESTO 公司产品说明书
8. SMC(中国)有限公司, 现代气动实用技术, 机械工业出版社, 2003
9. 潘瑜, 基于 PCI 总线的数据采集系统, 计算机系统应用, 2002
10. 美国 NI 公司产品说明书
11. 周万珍, 高鸿斌, 《PLC 分析与设计应用》, 电子工业出版社, 2004
12. 台湾台达公司产品说明书
13. 徐克林, 气动技术基础, 重庆大学出版社, 1997
14. 李永堂、雷步芳, 液压系统建模与仿真, 冶金工业出版社, 2003
15. 王树青, 先进控制技术及应用, 化学工业出版社, 2001
16. 金以慧, 过程控制, 清华大学出版社, 2000
17. 刘行堂, 应用自适应控制, 西北工业大学出版社, 2003
18. Karl Johan Astrom, Bjorn Wittenmark, Adaptive Control, 科学出版社, 2003
19. 廉小亲, 模糊控制技术, 中国电力出版社, 2003
20. 王立新, 模糊系统与模糊控制教程, 清华大学出版社, 2003
21. 刘国荣, 阳宪惠, 模糊自适应 PID 控制器, 控制与决策, 1995
22. 况荣华, 荣太平, 一种新型 PID 参数自适应模糊控制器, 华中科技大学学报, 2001
23. G Chen, Conventional and fuzzy PID controllers: An overview[J]. Int J. of Intelligent Control & Systems, 1996

24. Klawonn F , Kruse R. , Constructing a Fuzzy Controller from Data , Fuzzy Sets and Systems. , 1997
25. 孔繁镍 ,模糊自适应 PID 控制在煮糖过程中的仿真研究 ,广西大学硕士学位论文 , 2004
26. National Instruments , Measurement Studio Evaluation Guide , 2005
27. National Instruments , Measurement Studio User Manual , 2005
28. National Instruments , NI -DAQmx Guide, 2005
29. 文香军 , 计算机之间的远程串口数据通信 , 广西电力工程 , 2000
30. 刘金 , 用 Windows API 实现通信 , 计算机应用 , 2000
31. Kate Gregory. , Special Edition Using Visual C++ , 2000
32. 潘洪跃 , 基于 MODBUS 协议通信的设计与实现 , 计量技术 , 2002
33. 刘新华 , 王仲东 , 基于 MODBUS 协议 PLC 通讯的模块化实现 , 电气自动化 , 2001
34. 赵庆林 , 用 VC++设计多线程串行通信程序 , 计算机应用 , 2000
35. 罗宇 , 操作系统多线程实现技术研究 , 微型计算机系统 , 2000

## 攻读硕士期间发表的论文情况

王海峰, 付小飞, 陈坚, 《面向分层教学与科研的网络控制实验室的创建》, 实验室研究与探索, 已发表, 2006(12), 1485 ~ 1487

## 致 谢

本课题在选题及研究过程中得到陈坚老师的悉心指导。陈老师多次询问研究进程，并为我指点迷津，帮助我开拓研究思路，精心点拨、热忱鼓励。陈老师一丝不苟的作风，严谨求实的态度，踏踏实实的精神，不仅授我以文，而且教我做人，虽历时三载，却给以终生受益无穷之道。在此谨向陈老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。

在此，我还要感谢付小飞、陈皎皎、刘蕾蕾、赵忠丹、田晓露同学，感谢你们陪我度过了愉快而紧张的研究生生活，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。

我还要特别感谢彭象梅、孙擎宇、商万国等项目组的同仁们，你们的丰富的项目经验使我受益无穷，与你们的探讨交流也促进了我的不断进步。

最后，向我亲爱的家人和亲爱的朋友表示深深的谢意，他们给予我的爱、理解、关心和支持是我不断前进的动力。