

模糊控制在微波化学温控系统中的应用研究

摘 要

微波加热的特点是可在不同深度同时产生热效应。将微波应用到化学反应中可以加快化学反应的速度,由于“体加热作用”使反应物各部分受热均匀,化学反应的副产品减少,产率提高。本文结合与东北制药厂的合作项目,设计一套中试微波化学反应的温度控制系统。

确立中试规模微波化学反应系统的基本结构,包括微波功率源的选取、微波传输系统的建立、微波反应器谐振腔的类型及尺寸的计算、微波漏能抑制器、四分之一波导扼流槽和红外线温度传感器等。研究间歇式制药过程中微波催化反应的温度控制。由于无法建立微波催化间歇反应系统的数学模型,采用了模糊控制方法对反应温度进行智能控制。该模糊控制器具有单变量二维输入、增量型输出、比例因子可调等特点。

本文较详细研究了模糊控制的机理和算法,自行设计出三种新型的模糊控制算法:自调整比例因子的模糊控制、仿人智能模糊控制、带修正因子的两级智能模糊控制。对各种控制算法进行了 MATLAB 仿真分析和比较,并在计算机控制位置伺服实验平台上通过调试。实验结果表明,新型模糊控制方法具有较高的控制精度和较好的系统稳定性,达到了控制要求。

本文对计算机位置控制实验系统进行了设计和分析,介绍了从系统硬件设计、软件设计到控制算法编程的完整过程。硬件设计包括位置检测、数据采集、伺服驱动电路和数据转换与输出,并分析了系统硬件的工作原理。软件设计包括系统在 Windows 平台下实现实时控制的方法、虚拟驱动实现、MATLAB 联接运行方案、控制器设计扩展接口和用户高级图形数据操作功能实现等。

关键词:微波加热 温度控制 模糊控制 数据采集 MATLAB 仿真

The Application Research of Fuzzy Control Method in Microwave Catalysis Temperature Control System

Abstract

Microwave heating can make the different depth of things heated at the same time. The application of microwave in the chemistry reaction makes the produce rate increase and improves the reaction speed. In this dissertation, a set of temperature control system of microwave chemistry reaction is designed, which is a collaborative item with Northeastern pharmacy factory.

The basic structure of moderate dimension-microwave chemistry reaction system is established, which comprises the selection of microwave energy emitter, the building of microwave transmission system, the choice of the resonance cavity type and the calculation of its size, microwave leak suppresser, etc. The temperature control of microwave catalysis reaction in the interim pharmacy is researched. Because of a variable system model, a new fuzzy control method is applied to control the temperature intelligently. This is a fuzzy control system, which has single variable and two dimensions input, increment output, genes adjusted automatically.

The theory and arithmetic of fuzzy control is studied detailedly in this dissertation. Three new fuzzy control schemes are designed: many groups of genes adjusted automatically fuzzy control, imitate-human intelligently fuzzy control, two-grade intelligent fuzzy control. Emulational analysis and compare of these schemes based on MATLAB are presented. Moreover, these control schemes run on the position servo system. The results show that three new fuzzy control schemes work well and meet the requirement.

The digital control position servo system is designed and analyzed in this dissertation. The whole process of the development is introduced including design of hardware, software and control algorithm. Hardware development includes position signal, data acquisition, servo drive circuitry, data converting and outputting. Theory of hardware in system is analyzed. The design of

software includes realization of real time controlling under Windows operation system, virtual device driver, scheme of running linking to MATLAB. Expanding interface for design of controller and realization of high-level operation function in graphic-data for user are also included.

Key words: microwave heating; temperature control; fuzzy control;
data acquisition; MATLAB

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。

本人签名：

江昊焱

日 期：

2004. 2. 15

第一章 绪论

1.1 课题概述

本文研究和开发的是一个基于计算机控制的微波化学反应系统,其目的在于缩短加热过程的时间,节省能源,提高生产效率。在对模糊控制进行深入研究的基础上,根据实际情况设计一套基于新型模糊控制算法的温度控制系统,控制化学反应的速度。另外,本文还设计了一个计算机控制位置伺服系统实验平台,其目的在于给本文设计的新型模糊控制理论和今后的控制理论研究提供理想的实验和研究工具。

设计中试规模的微波化学反应系统,必须根据电磁场和微波理论,防止微波泄漏问题。另外,由于微波加热的本身特点,微波源的功率稍微发生变化,将迅速引起受热物质温度的大幅度变化,导致微波加热过程难以控制。温度控制通常采用开关控制、PID 控制、模糊控制等。模糊控制是一种基于人们经验规则的控制方法,它适合于解决难以建立数学模型的系统控制问题,控制性能明显优于开关控制和 PID 控制。本文采用自行设计的新型模糊控制方法。

随着电子计算机技术的飞速发展和计算机控制技术的进步,计算机已经越来越多的应用于控制领域,但目前针对于实时控制的系统大都应用于其专用的操作系统,这是因为 Windows 系统有其固有的缺陷,一般不能满足高实时性的控制工作,这就给实时控制的研究和工程应用带来了很大的困难和不便。因此,如何为理论研究提供一个方便而成熟的研究实验工具已经体现出其巨大的意义和价值,本文在此方向作了大量的工作,取得了一定的成绩。

1.2 微波化学概述

微波在化学中的应用开辟了微波化学这一化学新领域。将微波加热技术应用到化学反应中可以大大加快化学反应的速度,同时由于“体加热作用”使反应物各部分受热均匀,化学反应的副产品减少,产率提高。1986 年微波开始用于加快各种化学反应的速度。在有机合成反应中,微波催化提高反应速度非常显著,它也能使一些在常态下难以进行的反应顺利进行。

微波是一个十分特殊的电磁波段,因此,可以用电磁波和电磁场理论处理与微波有关的一些问题,特别是微波在空间的传播及其与物质的相互作用等。但是,

由于微波波长与所用的元器件尺寸相近,常用于电子学中的印刷电路已不能使用。在这里,能够使用的是同轴电缆、空心金属管波导、谐振腔、速调管和磁控管等。由于微波的波长很短,因此任何两个装置间的连接都可被看成为传输线,而任何距离的传输都有必要考虑波的原理。

1.3 传统控制与智能控制

随着科学技术突飞猛进的发展,控制理论虽然从经典的控制发展到现代控制理论,但对于复杂的、测量不确定的系统,基于精确模型的传统控制理论受到了很大的限制。与此同时,生物技术取得了突飞猛进的发展,在此基础上人们对于自身特别是自身的思维活动也有了一定的了解。

智能控制是一个新兴的科学领域,它是控制理论发展的高级阶段。它主要用来解决那些用传统方法难以解决的复杂系统的控制问题。其中包括智能机器人系统、计算机集成制造系统(CIMS)、复杂的工业过程控制系统、社会经济管理系统、交通运输系统、环保及能源系统等。

传统的控制是基于模型的控制,包括控制对象和干扰的模型。对于传统控制通常认为模型已知或者经过辨识可以得到。而智能控制的对象通常存在严重的不确定性,即一是模型未知或知之甚少,二是模型的结构和参数可能在很大范围内变化。无论哪种情况,传统方法都难于对它们进行控制,而这正是智能控制所要研究的问题。

在传统控制理论中,线性系统理论比较成熟。对于具有高度非线性的控制对象,虽然也有一些非线性的控制方法,但总的来说,非线性控制理论还不成熟,而且方法比较复杂。采用智能控制的方法往往可以较好的解决非线性系统的控制问题。

在传统的控制系统中,控制任务或者是要求输出量为定值(调节系统),或者是要求输出量跟随期望的运动轨迹(跟踪系统)。因此控制任务的要求比较单一。对于智能控制系统,任务的要求往往比较复杂。

因此,智能控制系统的开发与研究就显得越来越重要,同时它也是今后控制领域研究的主要方向。

1.4 模糊控制的发展及应用概况

模糊控制作为智能控制中的一个子系统，它的发展和应用是相当迅速的。1965年扎德教授创立了模糊集合论，为描述和处理事物的模糊性和系统中的不确定性，以及为模拟人的模糊逻辑思维功能提供了强有力的工具，并在此基础上把模糊集合论应用到控制理论上，从而产生了模糊控制。

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量进行模糊推理为基础的一种计算机的数字控制。它是一种非线性的智能控制。模糊控制器不像传统的控制器那样有精确的数学模型，它用一种自然的语言来描述，因此更符合人们的思维方式。当今，模糊控制正日益发展，几乎渗透到了所有领域，应用于自然科学、社会科学、工程技术等各个方面，并在每个领域都有成功的应用范例。在工业控制方面，已实现了冶金窑模糊控制、化工过程模糊控制和玻璃窑模糊控制等；在家电行业，已经实现了模糊洗衣机、模糊空调等40余种模糊家电产品。

第二章 中试微波催化化学反应系统

2.1 引言

微波是波长从 1mm 到 1m(即频率从 300MHz 到 3×10^5 MHz)范围的电磁波,其波长介于红外线与超短波之间。微波加热是一种全新的加热技术。微波加热技术广泛应用于化学、烧结、干燥、冶炼等生产领域中,由此带来的价值日益增加。相对于传统加热方式,微波加热主要优点在于它能够大大缩短加热过程的时间,节省能源,提高生产效率。

2.2 中试微波催化化学反应系统结构

本文设计了一套适用于化学反应的中试规模微波化学反应系统,不仅保证化学反应的速度,同时使加热更加均匀。

间歇式化学反应基本过程为:化学反应试剂放在微波谐振腔内,在微波的照射催化下进行反应。传感器测试的温度信号由 PCL-812 数据采集卡按一定的频率进行采集,送入工控机进行滤波处理。经过本文设计的模糊控制软件计算,输出控制电压信号给电子交流调压器,改变施加在磁控管上的电压,调节微波系统的实际加热功率。通过分段线性拟合确定工控机的控制电压与微波系统有效加热功率的对应关系。

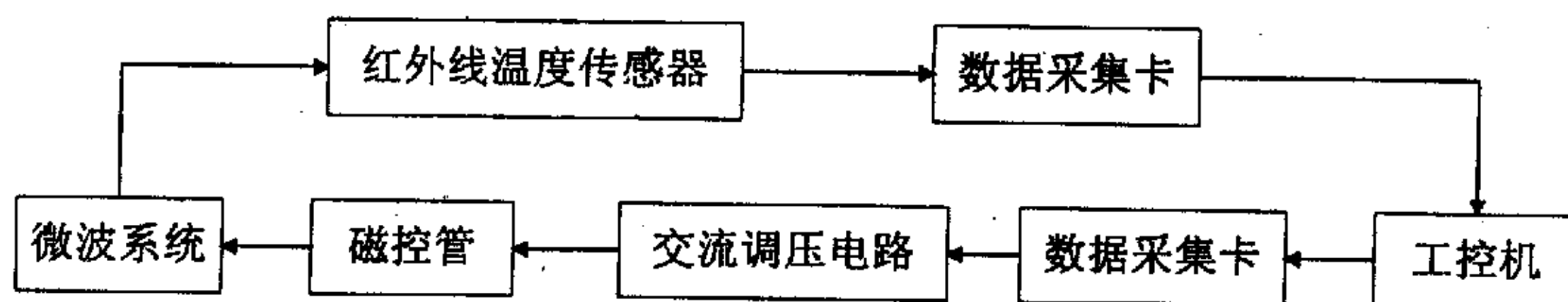


图 2.1 控制系统的硬件组成简图

Fig 2.1 Hardware constitute diagram of control system

主系统主要由微波功率源、磁控管输出激励头、波导过渡段、三端环行器、大功率负载、双向定向耦合器、手动三销钉调配器、过渡波导元件、圆柱形微波反应器等九大部分组成,如图 2.2 所示。在谐振腔两端有输入输出部分。工作时先将反应物料通过传送管道送入谐振腔中,然后通过波导将微波导入谐振腔。在谐振腔中的高频交变电磁场作用下完成反应物加热和化学反应。为了防止微波外泻伤及人体健康,在输入输出部分有微波漏能抑制系统。另外还有红外线测温系

统、自检微波泄露控制器等，所有硬件内外均涂有防酸防腐蚀涂层，排风系统将电磁管与酸雾分离。

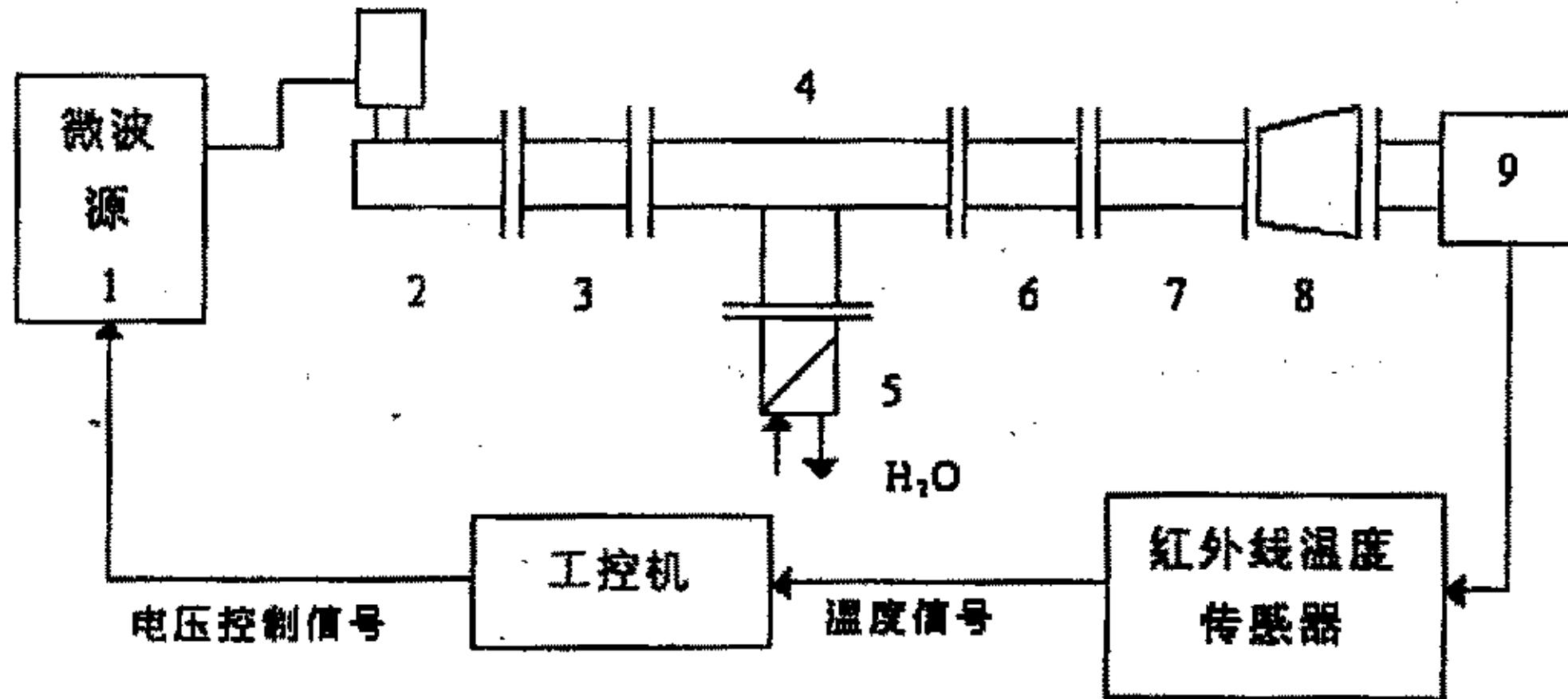


图 2.2 微波化学反应系统框图

Fig 2.2 The skeleton drawing of microwave chemistry reaction system

- 1. 微波功率源; 2. 磁控管输出激励头; 3. 波导过渡段; 4. 三端环行器;
- 5. 大功率负载; 6. 双向定向耦合器; 7. 手动三销钉调配器;
- 8. 过渡波导元件; 9. 圆柱形微波反应器

2.2.1 微波功率源

微波功率源的作用在于将 50Hz 或 60Hz 的交流电源功率转变成微波功率。一台典型的微波功率源，由微波管及其供电电源、微波元件和传输系统系统、保护装置冷却装置和防电磁干扰或射频干扰的机箱组成。按频率范围、功率电平、控制方式等不同要求，微波源有多种多样。从简单的 500W 家用微波炉的微波源，直到 50~100kw 的连续波微波源，供大型工业加工应用。本系统对微波源功率的基本要求是 50 公斤的水 20 分钟以内温度能够从 20℃ 升至 100℃，根据这一条件可以计算出水所吸收的热量为

$$Q = cm\Delta t \tag{2.1}$$

$$= 1 \times 50 \times (100 - 20)$$

$$= 4000 \text{ kcal}$$

代入 1 cal = 4.2 J

$$W = 4000 \times 4.2 = 16800 \text{ KJ} \tag{2.2}$$

选用磁控管作为微波功率源，磁控管是一种特殊构造的电子管，只有二个电极：阴极与由多个谐振腔构成的阳极。在阳极和阴极间加有直流电压，平行于阴极的轴向还加有恒定的磁场。利用电场和磁场同时作用于电子流而产生大功率微波振荡。磁控管的功率大、效率高，是一种较理想的大功率微波振荡源，在雷达技术和需要大功率的微波设备中得到了广泛的应用。一般千瓦级磁控管的效率是70~80%因此所需要磁控管的功率为

$$P = \frac{W}{0.7t} = \frac{16800}{0.7 \times 20 \times 60} = 20 \text{KW} \quad (2.3)$$

考虑到传输过程中的损耗，选用磁控管 CK—609，功率为 25KW。

2.2.2 磁控管输出激励头

CK-609 磁控管的输出激励头如图 2.3 所示。使用时将磁控管的输出天线头插入激励腔波导宽边上的孔中，保证磁控管输出天线头上所附的金属丝网垫圈与激励腔孔的翻边凸缘均匀良好接触，然后均匀紧固四个固定螺钉。在输出插孔至终端短路面之间附有单螺钉调配器，使用时微调以获得最佳的传输功率。在对着磁控管输出天线陶瓷杯处的激励腔宽壁焊有一个截止波导圆管，供干燥冷风入口，确保输出天线的冷却和不致泄漏微波辐射。

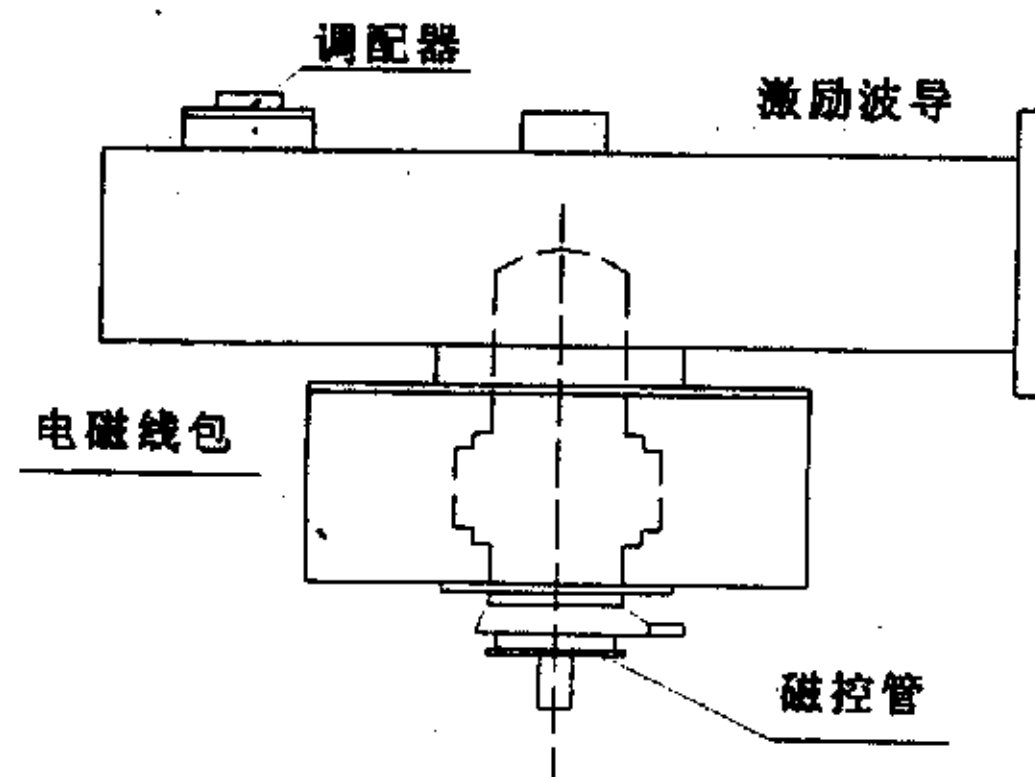


图 2.3 CK-609 (25KW/915MHz) 磁控管的输出激励器

Fig.2.3 The output prompting implement of ck-609 manetism control tube

2.2.3 微波传输系统

微波传输系统的主要作用是：

- (1) 按微波和传输系统的特点，在给定的某个微波频段，使微波源在输出激励腔中建立起一定波型和功率能向终端负载传播。适应工程应用的需要，波导

管均作成一定长度的波导段，波导段两端配置符合标准的波导法兰盘，以方便实现波导段和其他波导元件的平滑匹配连接。

(2)能以最低的损耗和最小的反射将微波源功率传输至终端反应腔和负载。

(3)由终端反应和负载阻抗的可能大范围变化而引起的反射波，对微波源工作稳定性的影响应减至最小（良好隔离）。

本文设计的微波传输系统如图 2.2 所示，该系统采用 CK—609 磁控管和一套高稳定计算机程控微波源 1，并把磁控管和输出激励腔组件 2 移至源机壳之外，利于任意架设系统和方便遥控。由磁控管输出的连续可调的微波功率经波导过渡段 3，将输出激励腔的截面尺寸平滑过渡到后面主波导系统的标准波导截面，馈到一只三端环形器的 4 的入口端，其出口端经过一只双向耦合器 6 和手动三销钉调配器 7，再经过过渡波导元件 8，最后与终端反应器 9 相连。在三端环形器 4 的第三端必须接大功率吸收负载 5，在极端情况下，如果终端短路全反射，则几乎有接近入射功率的反射功率进入该吸收负载 5。系统中的双定向耦合器 6 用来直接从主系统耦合入射和反射微波功率，分别经检波后送入微波功率源 1，实时以数字显示入射和反射功率的大小。通过调控手动三销钉调配器中销钉的位置，确保终端负载的驻波系数在 2~30 的大范围内变动时，主系统反射功率为最小。

1. 三端环形器 4

三端环形器是利用微波旋磁铁氧体的非互易特性而制成的特殊微波元件，特点是微波能量从任一端口进入环形器，它只能沿单方向从相邻一端口输出，反方向有很高的隔离度，如图 2.4 所示。如果微波功率从 1 端口进入，它只能沿箭头所示的方向，传输至相邻的与 2 端口相接的终端负载。如果微波功率从 2 端口进入，它也只能单方向进入第 3 端口的吸收负载，与反方向 1 端口有很高的隔离度。

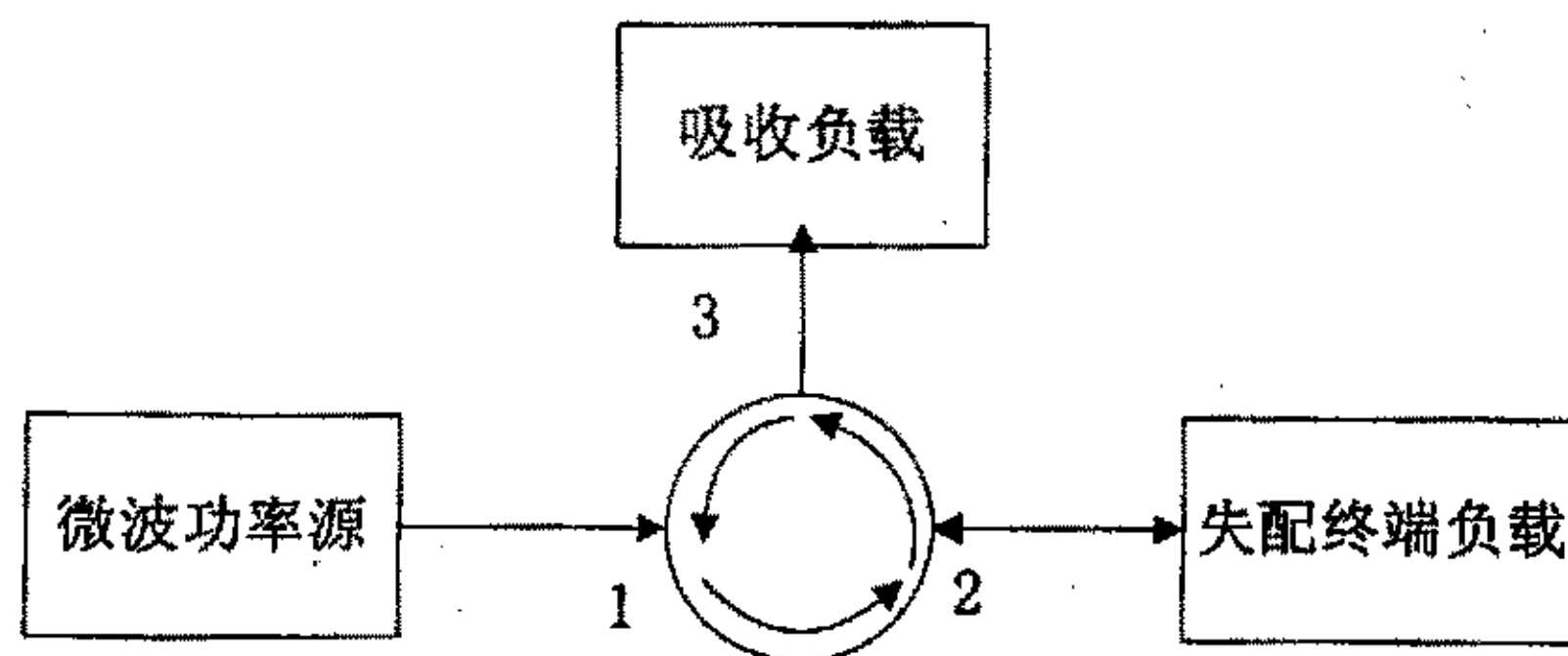


图 2.4 三端环形器的工作原理图

Fig.2.4 The work theory drawing of orbicular implement

本系统采用 30 千瓦自然风冷式 H 面 Y 结环行器,其示意图如图 2.5 所示。它的三个分支互成 120° 角,在 Y 结的中心处放置一铁氧体柱,沿柱轴方向加静磁场 H_0 。在外加恒磁场和微波场的作用下铁氧体出现不可逆性和非线性,理想情况下,各端口的能量传输是按照一定方向顺序“环行”的。能量从 1 口输入,2 口有输出,3 口无输出;能量由 2 口输入,3 口有输出,1 口无输出,在 3 口加水负载以吸收反射的微波能。

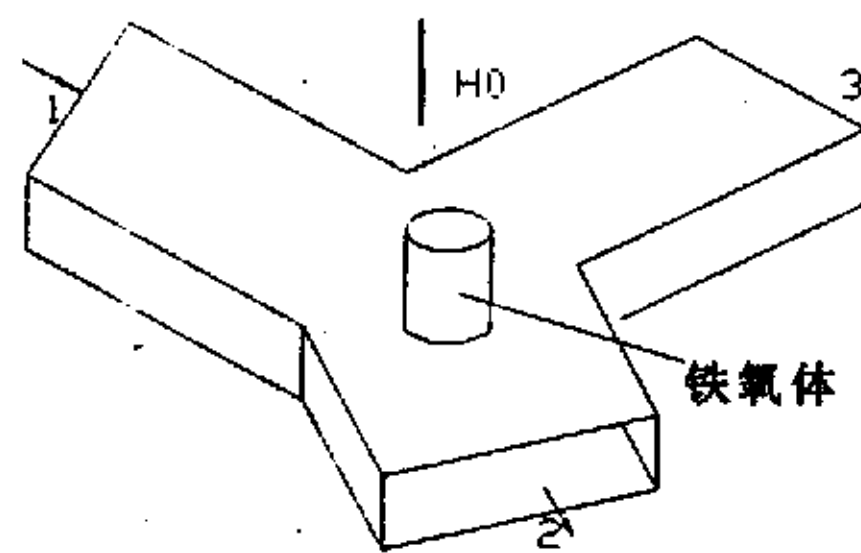


图 2.5 H 面 Y 结环行器

Fig.2.5 H surface and Y knot orbicular implement

2. 双向定向耦合器 6

双向定向耦合器是微波技术应用的一个重要元件。它主要用来从主传输系统中把沿线传输的入射波能量,或反射波能量,或两者同时分出一部分来,供分流、测量、监控等应用,其原理如图 2.6 所示:

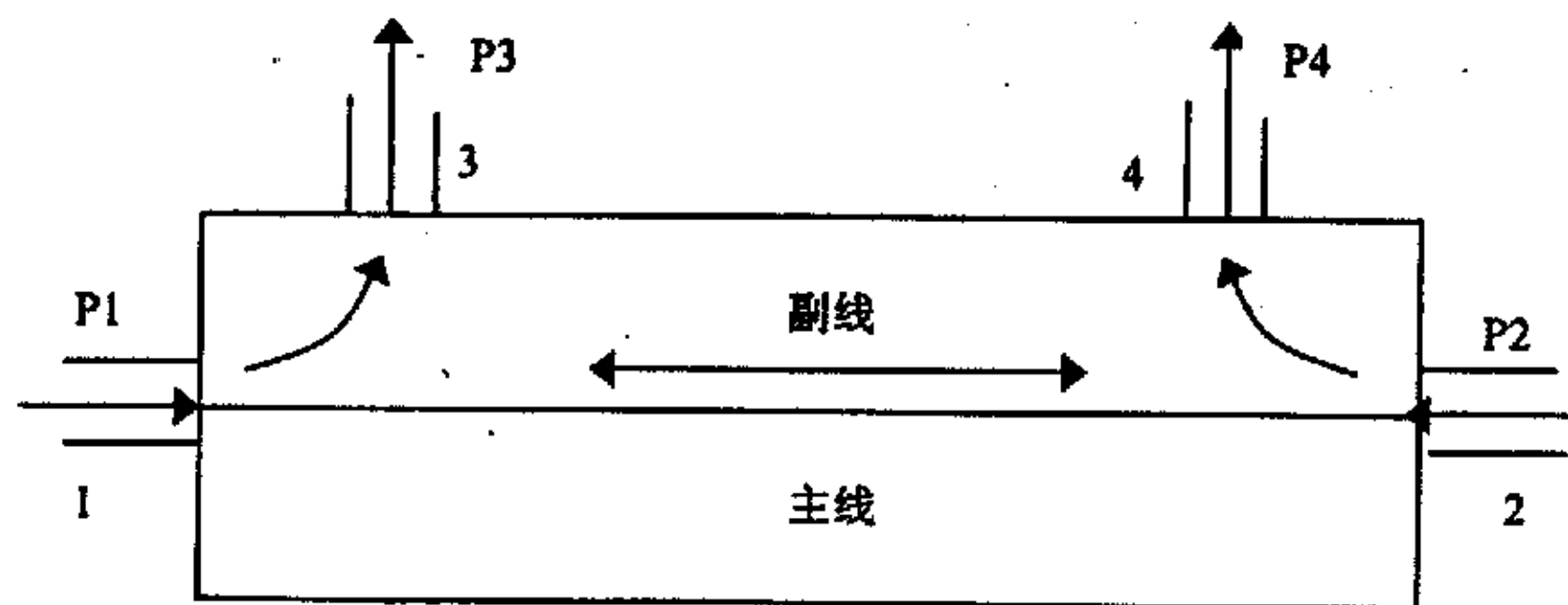


图 2.6 定向耦合器功率耦合原理图

Fig.2.6 The theory drawing of directional coupling implement

从端口 1 进入的入射波功率 P_1 除了经主线从端口 2 输出而外,部分功率经端口 3 作为入射波耦合功率 P_3 输出。而从端口 2 进入的反射功率 P_2 则只能从端

口 4 作为反射波耦合功率 P_4 输出。在端口 3 和 4 各接一个功率计，用于测量入射功率和反射功率，监测微波的传输情况。如果测量的反射功率过大，说明微波发射的功率大部分没有被反应物吸收，应立即暂停反应的进行，检查整个系统。

3. 手动三销钉调配器 7

三销钉调配器是根据经典的四分之一波长阻抗变换器的原理设计的三段可变短路销钉，其调配原理图如图 2.7 所示。

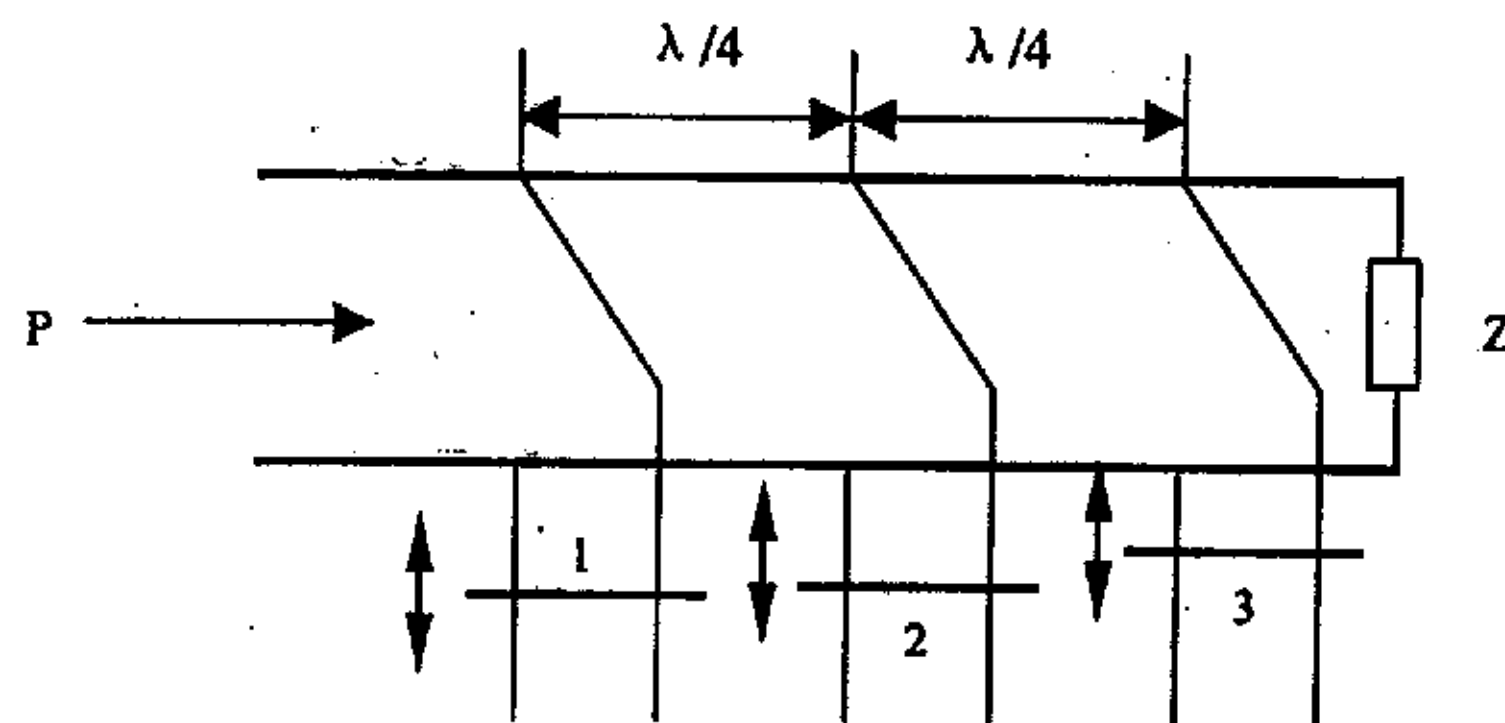


图 2.7 三销钉调配器的调配原理图

Fig.2.7 The manipulated theory drawing of three pins manipulator

在矩形波导宽面中心伸入一个与电场平行的、较粗的螺钉，其作用相当于并联电纳。螺钉一方面集中电场，具有容性电纳的性质，另一方面，波导宽面的纵向电流流进螺钉，产生磁场，又有感性电纳的作用。当螺钉插入波导较少时，其电感量很小，电容量较大，它相当于电容。当螺钉插入波导的深度约为 $\lambda/4$ 时，容性和感性相等，呈现串联谐振。当螺钉插入波导的深度大于 $\lambda/4$ 时，相当于电感。小于 $\lambda/4$ 时相当于电容。螺钉的等效电纳除与螺钉的直径和深入波导的深度有关外，还与螺钉的位置有关。螺钉离宽边中心越远，电场越弱，电纳越小。通过调节相距四分之一波长的三个销钉的位置，保证终端负载的驻波系数大范围变动时，主系统的反射功率达到最小。反射功率可通过双向定向耦合器端口 4 的反射波功率计测得。

4. 过渡波导元件 3 和 8

由于磁控管输出激励器和三端环行器的截面尺寸不同，所以在两者之间要加一段大小截面过渡波导。波导长度根据具体的安装条件自行调节，一般选为二分之一波长。

2.2.4 圆柱形谐振腔

微波谐振腔是整个中试微波化学反应系统的最核心部分。它是一套装置或终端互作用系统，它将由微波功率源经微波传输系统传输而来的微波功率，以最佳的匹配或最小的反射耦合至该装置，并在其中形成特定的电场分布，使之能与被加工物质产生最佳的互作用效果，包括最佳的互作用效率和互作用均匀性。

图 2.8 所示是本文设计的实用圆柱谐振腔的示意图，设置蒸汽层是为了方便用户在必要的时候采用蒸汽加热。

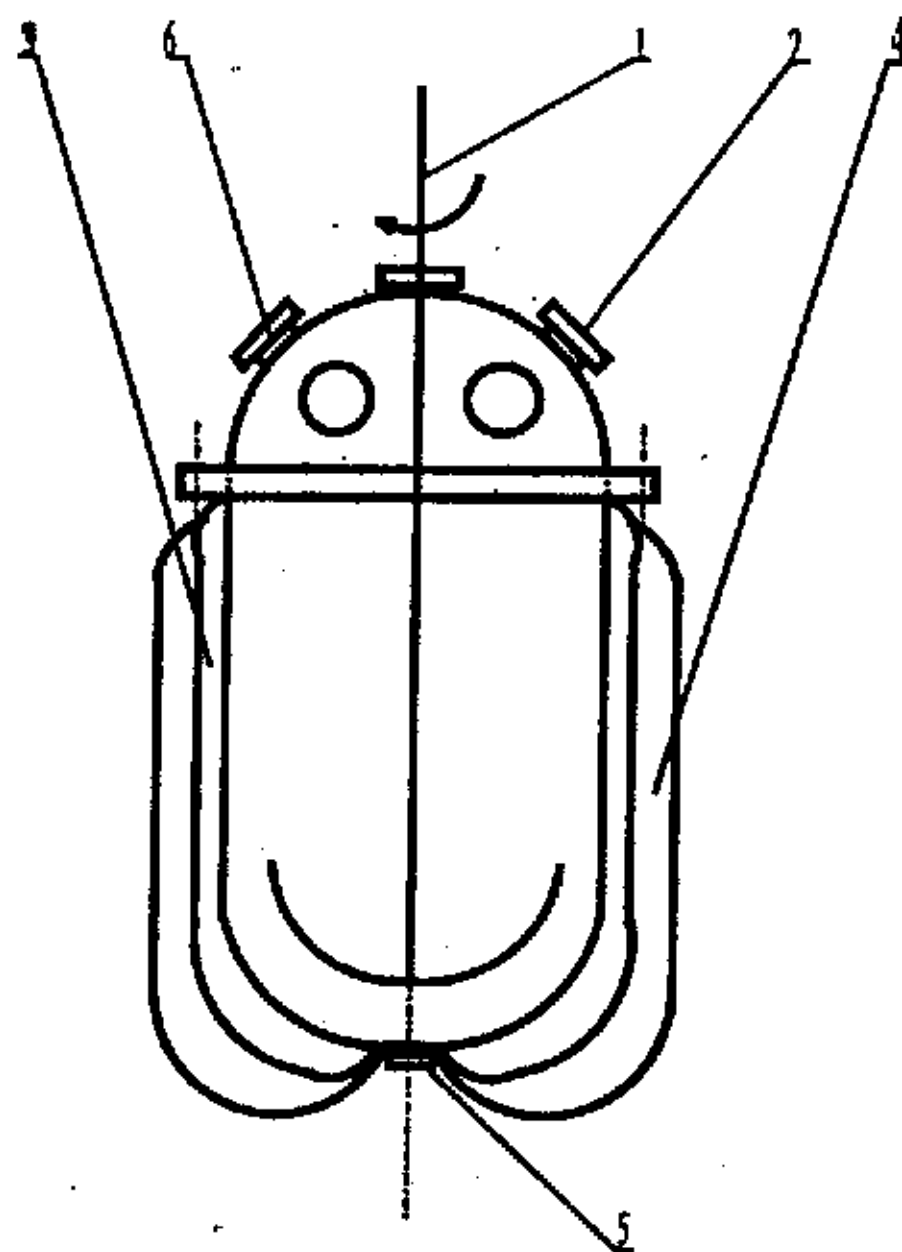


图 2.8 圆柱形谐振腔的外观示意图

Fig 2.8 The outside drawing of columned reactor

1. 锚型搅拌器 2. 进料口或微波输入口 3. 蒸汽层 4. 保温层 5. 泄料口 6. 观测窗口

微波加热主要选择 915MHz 或 2450MHz 两个频率，它们分别对应波长为 32.79cm 和 12.24cm。具体根据 ϵ_r 、穿透深度、材料尺寸等综合考虑。一般厚而大的材料，要求穿透深些，多选用 915MHz，小而薄的多采用 2450MHz。

根据本系统的实际情况，加热频率选用 915MHz，选用多模圆柱形谐振腔，增大腔内的均温区的范围。圆柱形谐振腔内存在 TE_{nip} 型和 TM_{nip} 型振荡模式 (n, i, p 分别表示圆柱坐标 ϕ 向的全波数和 r, z 向的半波数)，根据麦克斯韦方程和边界条

件，可解出两种模式的场分量。对 TM_{nip} 模

$$\left\{ \begin{aligned} E_r &= -\frac{p\pi}{l} \frac{a}{u_{ni}} E_0 J_n' \left(\frac{u_{ni}}{a} r \right) \cos n\varphi \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ E_\varphi &= \frac{p\pi}{l} \left(\frac{a}{u_{ni}} \right)^2 \frac{n}{r} E_0 J_n \left(\frac{u_{ni}}{a} r \right) \sin n\varphi \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ E_z &= E_0 J_n \left(\frac{u_{ni}}{a} r \right) \cos n\varphi \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ H_r &= -j\omega\epsilon_0 \left(\frac{a}{u_{ni}} \right)^2 \frac{n}{r} E_0 J_n \left(\frac{u_{ni}}{a} r \right) \sin n\varphi \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ H_\varphi &= -j\omega\epsilon_0 \left(\frac{a}{u_{ni}} \right) E_0 J_n' \left(\frac{u_{ni}}{a} r \right) \cos n\varphi \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ H_z &= 0 \end{aligned} \right. \quad (2.4)$$

其中

$$p, n = 0, 1, 2, \dots$$

$$i = 1, 2, 3, \dots$$

TE_{nip} 模

$$\left\{ \begin{aligned} E_r &= E_1 J_n \left(\frac{v_{ni}}{a} r \right) \sin n\varphi \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ E_\varphi &= \frac{r}{n a} \frac{v_{ni}}{a} E_1 J_n' \left(\frac{v_{ni}}{a} r \right) \cos n\varphi \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ E_z &= 0 \\ H_r &= -j \frac{p\pi}{\omega u_0 l} \frac{r}{n a} \frac{v_{ni}}{a} E_1 J_n' \left(\frac{v_{ni}}{a} r \right) \cos n\varphi \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ H_\varphi &= j \frac{p\pi}{\omega u_0 l} E_1 J_n \left(\frac{v_{ni}}{a} r \right) \sin n\varphi \cos \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \\ H_z &= j \left(\frac{v_{ni}}{a} \right)^2 \frac{r}{\omega u_0 n} E_1 J_n \left(\frac{v_{ni}}{a} r \right) \cos n\varphi \sin \left(\frac{p\pi}{l} z \right) \end{aligned} \right. \quad (2.5)$$

其中

$$i, p = 1, 2, 3, \dots$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

μ_{ni} 为 n 阶贝塞尔函数导数的第 i 个根， v_{ni} 为 n 阶贝塞尔函数的第 i 个根。从场方程可知，圆柱形谐振腔可能存在无穷多个 TE 模和 TM 模。根据谐振波长和频率的计算式，因为 TE 波的截止波长 $\lambda_c = \frac{2\pi a}{\mu_{mn}}$ ，TM 波的 $\lambda_c = \frac{2\pi a}{v_{mn}}$ ，求出圆柱

腔的 TM 和 TE 模的谐振波长分别为

$$(\lambda_0)_{TM_{nip}} = \frac{2}{\left[\left(\frac{p}{l} \right)^2 + \left(\frac{u_{ni}}{\pi a} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.6)$$

其中 $n, p=0, 1, 2, \dots$
 $i=1, 2, 3, \dots$

$$(\lambda_0)_{TE_{nip}} = \frac{2}{\left[\left(\frac{p}{l} \right)^2 + \left(\frac{v_{ni}}{\pi a} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.7)$$

其中 $n=0, 1, 2, \dots$
 $i, p=1, 2, 3, \dots$

变换后又可写成

$$TM_{nip} \text{ 模} \quad \left(\frac{D}{\lambda_0} \right)^2 = \left(\frac{p}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{l} \right)^2 + \left(\frac{u_{ni}}{\pi} \right)^2 \quad (2.8)$$

$$TE_{nip} \text{ 模} \quad \left(\frac{D}{\lambda_0} \right)^2 = \left(\frac{p}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{l} \right)^2 + \left(\frac{v_{ni}}{\pi} \right)^2 \quad (2.9)$$

式中 $D=2a$ 为腔直径, c 为光速 $c=\lambda_0 \cdot f_0$, u_{ni} 为 n 阶贝塞尔函数导数的第 i 个根, v_{ni} 为 n 阶贝塞尔函数的第 i 个根, 而零阶贝塞尔函数导数的第 i 次根和一阶贝塞尔函数的第 i 次根相等即 $u_{0i} = v_{1i}$ 。

根据上二式可作出模式图 2.9。图中每条直线标有相应的振荡模式, 它是对应模式的调谐曲线。 D, l 一定时圆柱腔中存在着无数个模式, 它们谐振在不同的谐振频率上, 模式号数 n, i, p 越大, 谐振频率越高。而一个固定频率的信号送入圆柱腔时, 也可与多条模式线相交, 此时这许多模式谐振在不同的长度 l 和直径 D 上。 TM_{nip} 与 TE_{nip} 的模式号 i, p 相同的那些模式是简并的, 它们有相同的谐振频率, 不同的场结构。

根据谐振器的模式图可以选出圆柱谐振腔的尺寸。

2.2.5 改善加热均匀性

多模圆柱腔加热的不均匀性是固有的, 腔在一个给定频率下激发了很多模式, 但是每个模式的功率分布在腔内沿坐标轴总是正弦变化的, 多个模式功率的不同正弦分布相互重叠可能减小了功率分布上的不均匀性, 但功率分布上的不均

匀性固有特点是仍然存在的。本文采用两种方法改善加热的均匀性：

1. 在加热腔中设置锚型搅拌器。当搅拌器运动时，引入的这种不均匀性会造成模式的分裂与增多，从而改善加热的均匀性。由于本化学系统中的化学反应物是固体和液体的混合物，搅拌起来比较费劲，所以采用金属锚型搅拌器增大搅拌面积和力度。
2. 在微波馈能口放置模式搅拌器。模式搅拌器实际上是放于腔体内的连续旋转的多叶片螺旋桨，有点象一个风扇，叶片数多至3~6个。叶片由金属制造，馈入腔体的微波入口正对着搅拌器叶片，叶片对辐射方向做成一定倾角，依靠此倾角，当炉启动加热时，旋转的叶片把微波功率散射至炉内各个方向，来实现多模场分布和均匀加热。

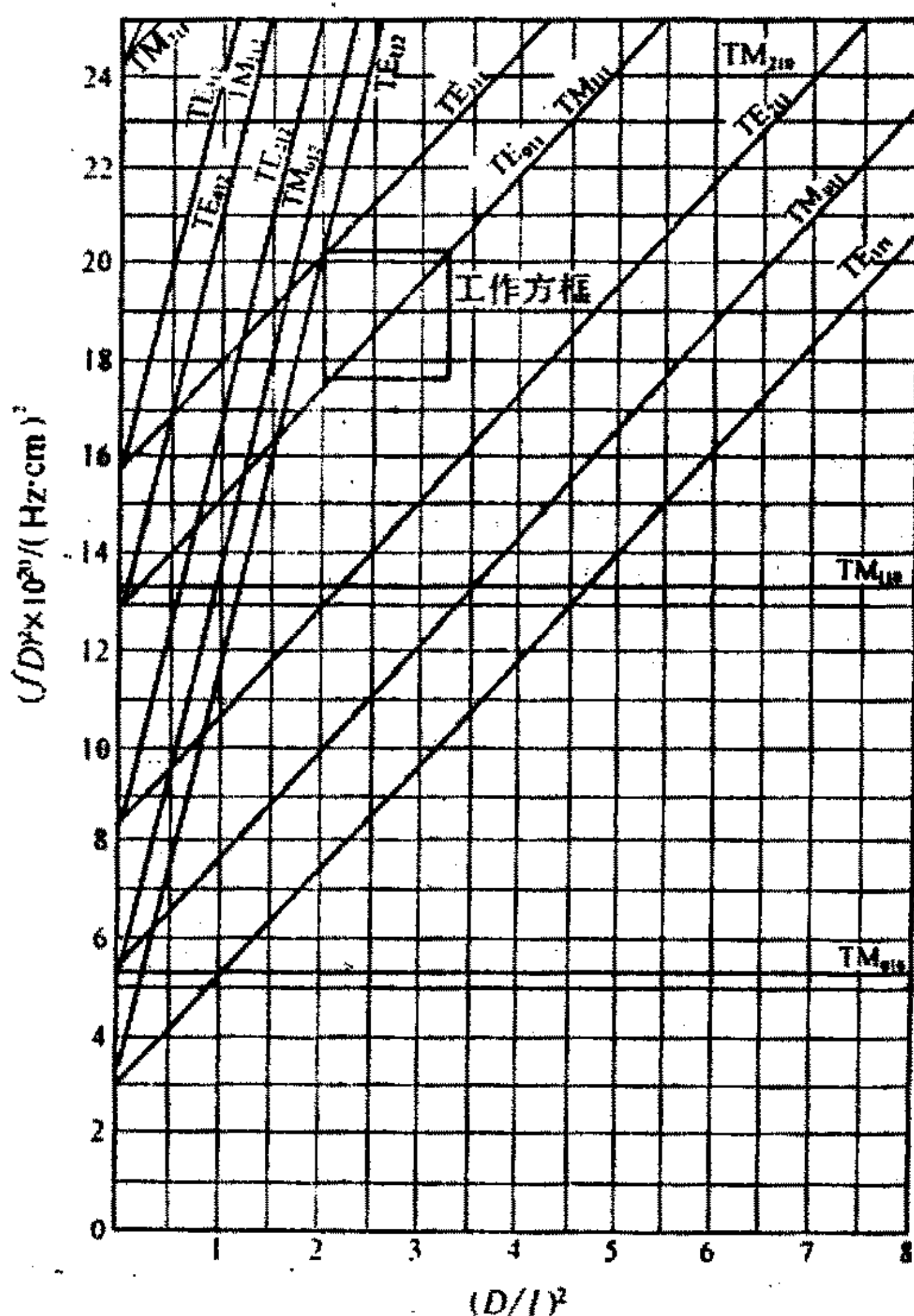


图 2.9 圆柱谐振器的模式图

Fig. 2.9 The mode chart of columned reactor

2.2.6 红外线温度传感器

由于微波的热效应,普通的金属温度传感器在微波场中不能使用。常用的水银温度计或热电偶温度计的传感元件和连接导线都是金属的,它们在微波炉腔中会使微波电磁场集中畸变,干扰原有的温度场分布,测量结果有误差,严重时甚至无法进行测量。所以选用非接触式的红外线测温系统。

红外线测温系统能实时测量目标物的表面温度,并且其探头不需与目标物直接接触,特别适合于本微波化学反应系统。它由光学系统,调制、运算、修正电路,显示和电源供给四大部分组成。光学系统主要功能是收集目标物红外辐射能量,并将其汇聚到红外探测元件上。

2.3 防止微波泄漏措施设计

微波泄漏是指微波从源或加热器漏到空间,这种泄漏主要构成了两个效应,一是对通信的干扰,二是微波辐照在人体上,可能由热效应和非热效应导致伤害。我国的安全标准是距外壳 5cm 处漏能不超过 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ (915MHz)。

微波化学反应系统的设备在加热器微波入口、进出物料口和设备接口等地方有缝隙和槽口,根据电磁场理论,形成微波电磁场的波导壁电流在传输途径上被缝隙或槽口所切断,成为辐射微波的新源头向外辐射微波能量。所以,必须做出特殊设计,使微波在此部位得到足够的衰减。其原理是传输线的截止特性和阻抗特性。

1. 传输线的截止特性

传输微波的波导有一截止频率 ν_c ,即微波频率低于此频率值时将得到强烈衰减。对应 ν_c 的波长,就是波导的截止波长 λ_c 。

2. 传输线的阻抗特性

传输微波时,由于负载反射等原因,波动呈驻波分布。短路线或开路线分别指传输线终端(x处)短路或开路,两者在该处的电压和电流所处的状态正好相反。若波导开口或开槽正处于x处(为 $\lambda/2$ 的倍数),则槽口电场强度最强,波导微波能量由此向外辐射。

另一方面,传输线上的输入阻抗也呈驻波分布,随沿线的电压和电流值的大小而变化。在 $L=\lambda/4$ 或 $\lambda/4$ 的奇数倍处,输入阻抗达到无穷大。

微波泄漏主要出现于微波源与加热器两个主要部件,考虑尽可能小的降低加

热器的效率，所以本文把防泄漏元件设计成无耗电抗系统。在微波传输系统和圆柱谐振腔的各个进出口采用微波漏能抑制器、四分之一波导扼流槽、加装微波吸收材料、用金属网外加钢化玻璃制作反应腔观察窗、炉门连锁装置、使操纵台尽量远离微波设备等有效防止泄漏的措施。建议工作人员穿戴金属丝织物的防护衣帽。

2.3.1 微波漏能抑制器

在加热器微波入口、进出物料口焊接一定长度的微波漏能抑制器，截止波的传播。微波漏能抑制器由扼流筒、多排梳状抑制片、吸收微波材料等各部分组成。内部结构如图 2.10 所示：

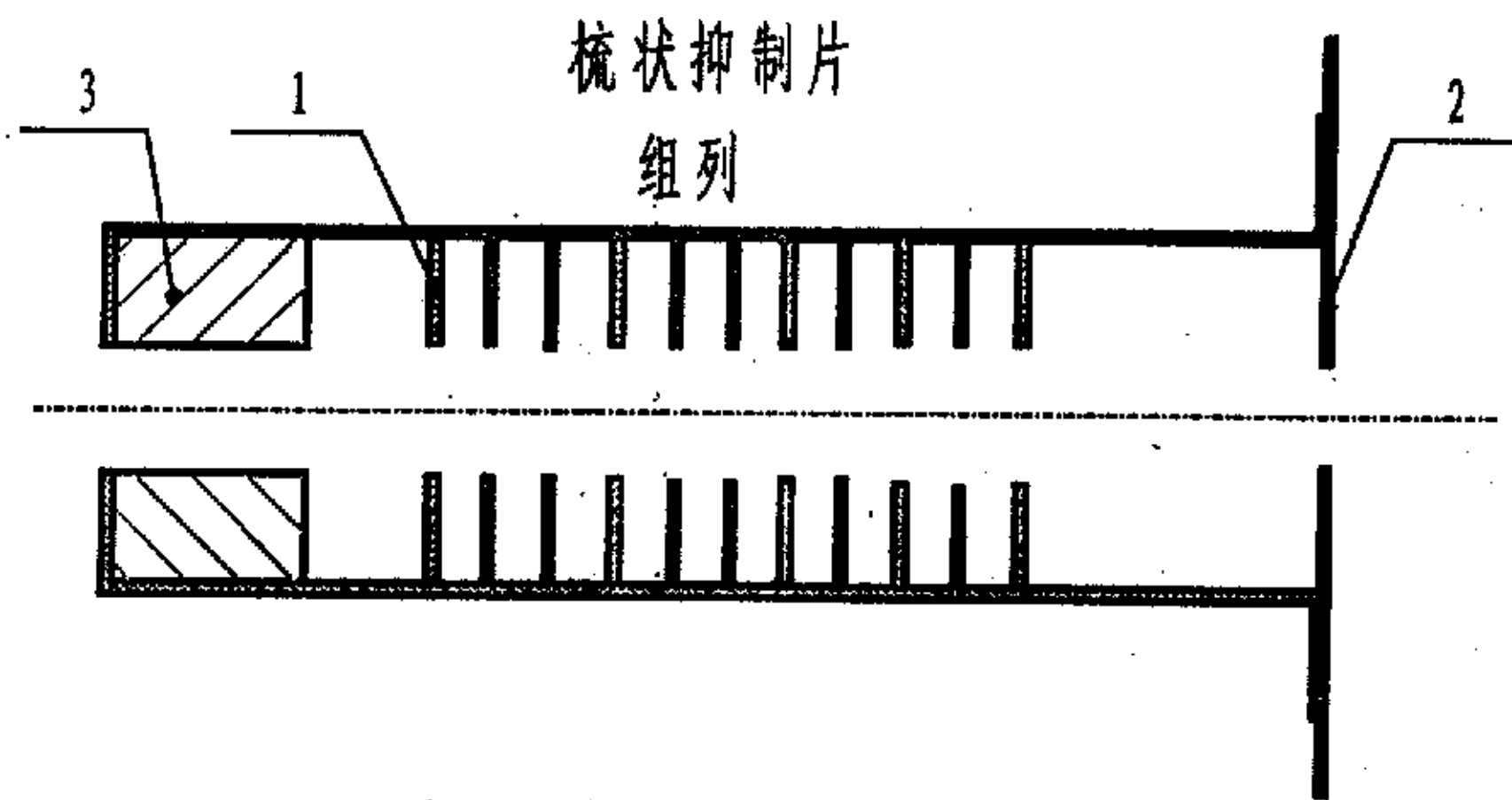


图 2.10 微波抑制器结构图

Fig.2.10 The construction drawing of microwave leak suppresser

1—梳状抑制片 2—加热器壁 3—吸收微波材料

1. 扼流筒

扼流筒实质上是一个截止圆波导，在谐振腔壁上开口之后，穿过孔装一截止圆波导。根据衰减系数 α 与截止波长 λ_c 的关系式 $\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_c} \sqrt{1 - \left[\frac{\lambda_c}{\lambda}\right]^2}$ 可求得当总衰减量达到安全要求时的截止圆波导的长度 l 。

2. 多排梳状抑制片

如果在波导中插入障碍物（如模片或销钉），都能使入射微波反射而成为微波传输途径上的不连续点，其反射强度视模片或销钉的多少而定。从衰减的角度来看，若反射越强，就等于使微波传输途径下游的微波功率强度减弱。因此，该结

构也可用在需要衰减微波能量的场合。

多排梳状抑制片由形如梳子状的金属片所组成,抑制片组成梳片群,上下对置,中间相距一定的距离。多排梳状抑制片能形成具有电阻抗为无穷大的特性,极大的衰减微波能量:当微波传输到梳状片所在处会得到反射,因此,这组上下对置的梳状片对微波有如高墙一样将其反射回去,而不会因留有物料出入通道而外泄。多排组合结构,能加强反射微波的能力。

3. 吸收微波材料

在抑制器外侧端,加装涂有能强烈吸收微波的材料,吸收可能从梳状抑制片处漏过的微波,最终使微波在物料进出口处的泄漏量达到安全要求。本文选用石墨。

2.3.2 四分之一波导扼流槽

由于本文采用的谐振腔是由上下两个部分组成的,在接合部分有缝隙,所以必须采用四分之一波导扼流槽来抑制微波泄漏。本文设计的该结构利用波导终端输入阻抗在 l 为四分之一波导波长的奇数倍处变为无穷大的特性,环绕加热圆柱腔接合处制作一组波导扼流槽对波导中的微波进行衰减。其衰减量可达到20dB,有效衰减频带宽度为1MHz。

具体结构如图2.11所示。该波导扼流槽将环绕对准间隙入口周围,其特征是G字形结构,由预冲裁打孔薄板折弯而成,注意扼流槽和冲裁孔板要整体制作,这样就没有接头密封问题。其中有水平的间壁,一侧是扼流槽的敞开入口,另一侧与一壁相连形成短路壁(槽底7)。紧贴敞开输入口的波导槽处有一间隙,由它引导从反应腔经过敞开入口至反应腔外部空间。同时它也是一个短路壁。扼流槽壁有两部分,隔板6构成水平内间壁与槽底7相连,槽底形成间隙的出口部分。由内间隙4经扼流槽口5和隔板6到扼流槽底7的传输路径(图2.11中虚线所示的路径)为二分之一波长的长度。

另外,设计沿着环绕方向扼流槽壁上有规律的大量分布着狭槽缝。这些槽缝能更进一步地降低微波泄漏。用石墨加水玻璃(粘结剂),再加适量的氟硅酸钠(固化剂),和匀后涂抹于扼流槽和反应腔出口四壁,一定的厚度以吸收微波。

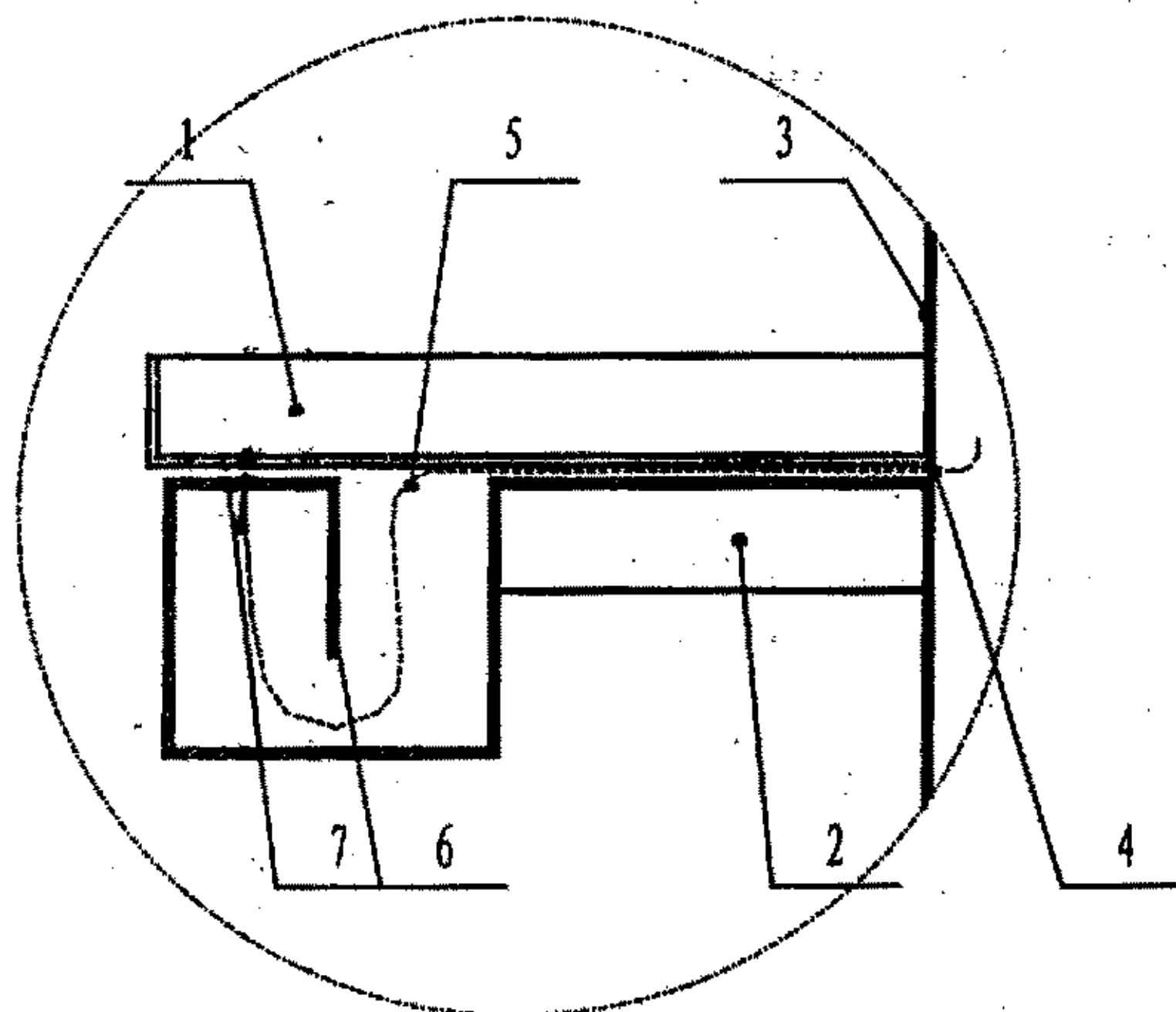


图 2.11 四分之一波导扼流槽的结构

Fig. 2.11 The construction drawing of wave-guide groove

- 1— 圆柱上半腔接合壁 2— 圆柱下半腔接合壁 3— 加热圆柱腔壁
4— 内间隙 5— 扼流槽口 6— 隔板 7— 扼流槽底

第三章 温度模糊控制研究

3.1 引言

中试微波化学反应系统中的温控采用模糊控制。模糊控制主要研究那些在现实生活中广泛存在的、定性的、模糊的、非精确的信息系统的控制问题。它主要是模仿人的控制经验而不是依赖控制对象的模型。模糊控制器实现了人类的某些智能，它是智能控制的一个重要分支。

3.2 模糊控制系统的组成

模糊控制系统的组成有常规计算机控制系统的结构形式，如图 3.1 所示。由图可知，模糊控制系统通常由模糊控制器、输入 / 输出接口、执行机构、被控对象和测量装置等五个部分组成。

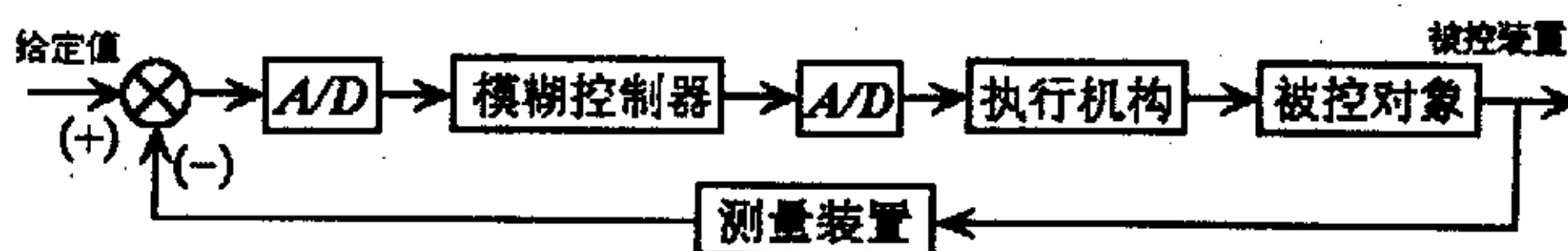


图 3.1 模糊控制系统组成图

Fig. 3.1 The constitute diagram of fuzzy control system

3.3 模糊控制器

由图 3.1 可知，模糊控制系统与常规计算机控制系统的主要区别是采用了模糊控制器。模糊控制器 (FC—Fuzzy Controller) 是模糊控制系统的核心，一个模糊控制系统的性能优劣，主要取决于模糊控制器的结构，所采用的模糊规则、合成推理算法，以及模糊决策的方法等因素。

模糊控制器的组成如图 3.2 所示。它包括有：输入量模糊化接口、数据库、规则库、推理机和输出解模糊接口五个部分。

1. 模糊化接口

模糊控制器的输入必须通过模糊化才能用于模糊控制输出的求解，因此它实际上是模糊控制器的输入接口。它的主要作用是将真实的确定量输入转化成一个模糊矢量。

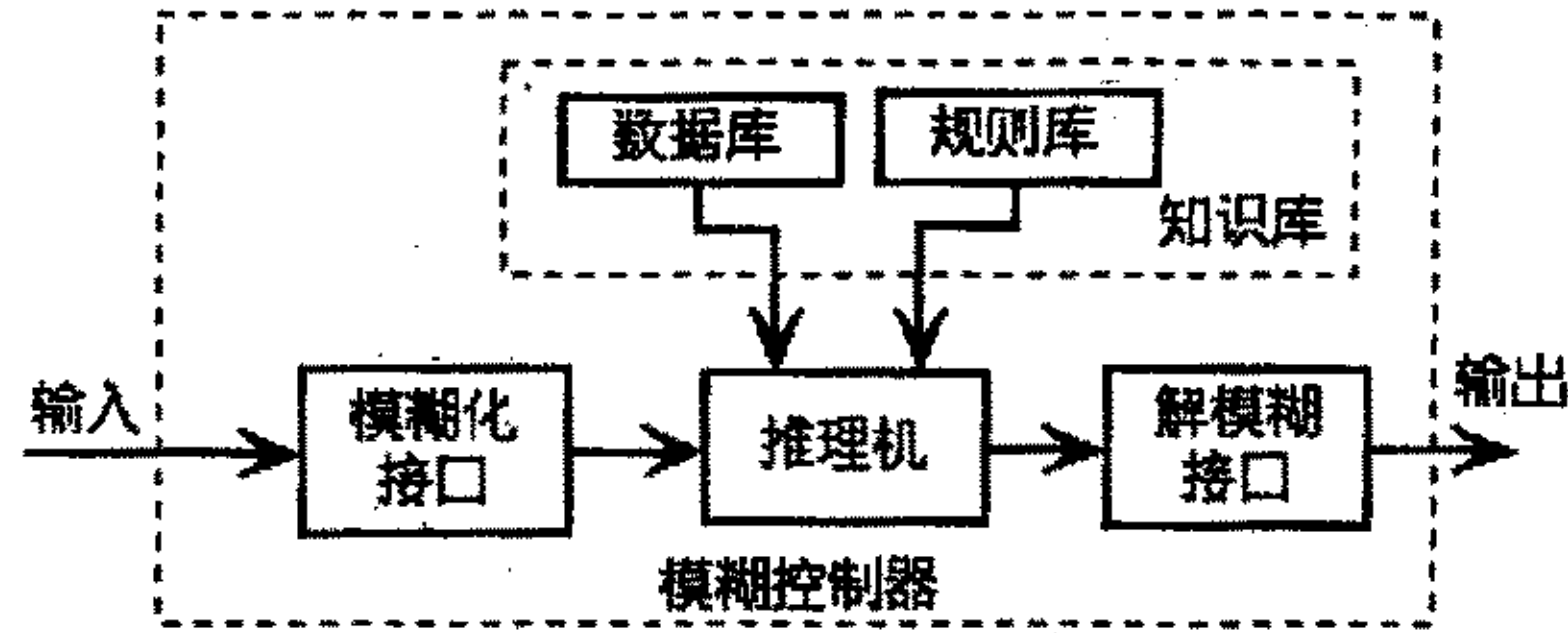


图 3.2 模糊控制器的组成

Fig. 3.2 The constitute diagram of fuzzy control implement

2. 数据库

数据库所存放的是所有输入、输出变量的全部模糊子集的隶属度矢量值（即经过论域等级的离散化以后对应值的集合），若论域为连续值，则为隶属度函数。在规则推理的模糊关系方程求解过程中，向推理机提供数据。

3. 规则库

模糊控制器的规则是基于专家知识或手动操作熟练人员长期积累的经验，它是按人的直觉推理的一种语言表达形式。模糊规则通常由一系列的关系词连接而成，如 if-then、else、also、end、or 等。关系词经过“翻译”，将模糊规则数值化，它指出模糊输入与模糊输出的规则对应关系。

规则库和数据库这两部分组成模糊控制器的知识库。

4. 推理与解模糊接口

推理是模糊控制器中，根据输入模糊量，由模糊控制规则完成模糊推理来求解模糊关系方程，并获得模糊控制量的功能部分。但是模糊推理获得的结果仍为一个模糊矢量，不能直接用来作为控制量，还要作一次转换，以求得清晰的控制量输出，这个过程为解模糊。通常把推理和输出端具有转换作用的功能部分称为解模糊接口。

综上所述，模糊控制器实际上是依靠计算机来构成的，它的绝大部分功能是由计算机程序来完成的。

3.4 微波催化化学反应的智能模糊控制器设计

把温度偏差 e 和温度偏差变化率 Δe 作为模糊控制器的输入，功率增量 Δu 作为模糊控制器的输出，构成单变量增量型二维模糊控制器。

设 \hat{e} 、 Δe 和 Δu 的模糊语言变量分别为 E、EC 和 U，其模糊化分别选取如下辞集：

$$E = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$EC = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$U = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

其中，P——POSITIVE，N——NEGATIVE，Z——ZERO，B——BIG，M——MEDIUM，S——SMALL，若 E、EC 和 U 取 13 个等级，即

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

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

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

考虑对论域的覆盖程度和灵敏度、稳定性、鲁棒性原则，各模糊子集以三角形为隶属度函数曲线，其相应的隶属度函数如表 3.1、3.2、3.3 所示。

对于温度控制对象来说，根据专家知识和操作人员经验积累，控制特性的控制规则表如表 3.4 所示，此处共有 49 条规则。此处采用加权平均法进行解模糊，则按上述推理规则可得模糊查询表如表 3.5 所示。

表 3.1 模糊变量 e 的隶属度值

Table 3.1 Membership values of fuzzy variable e

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.6	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.6	1	0.6	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1	0.6	0.2	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.6	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.6	1	0.6	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.6	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.2 模糊变量 Δe 的隶属度值

Table 3.2 Membership values of fuzzy variable Δe

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.3 模糊变量 Δu 的隶属度值

Table 3.3 Membership values of fuzzy variable Δu

	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1	0.5	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.4	1	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.5	1	0.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3.4 控制规则表

Table 3.4 Fuzzy control rules

E	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	
EC								
PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NB	
PM			PS	ZO		NS		
PS					ZO			NS
ZO			ZO	NS				
NS		PS	ZO	NS	NM			
NM				NS				NM
NB								

表 3.5 模糊查询表
Table3. 5 Values of fuzzy control variable

E	EC												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-5.4	-4.4	-4.0	-4.0	-4.0	-3.2	-2.2	-1.2	0	0.8	2.2	3.5	5.4
-5	-5.3	-4.3	-4.0	-4.0	-4.0	-3.3	-2.3	-1.3	0	0.8	2.3	3.5	5.3
-4	-5.4	-4.4	-4.0	-3.8	-3.8	-2.8	-1.8	-1.2	0	1.6	2.7	3.5	5.4
-3	-5.3	-4.3	-4.0	-3.3	-3.3	-2.3	-1.3	-1.3	0	2.3	3.3	3.6	5.3
-2	-5.4	-4.4	-4.0	-3.2	-2.7	-1.7	-0.7	-0.8	0	2.3	3.8	4.1	5.4
-1	-5.3	-4.3	-4.0	-3.2	-2.2	-1.2	0	1.2	1.2	2.2	4.0	4.3	5.2
0	-5.4	-4.4	-4.0	-2.8	-1.8	-1.2	0	1.2	2.0	3.0	4.0	4.4	5.4
1	-5.3	-4.3	-4.0	-2.3	-1.2	-1.2	0	1.3	2.0	3.0	4.0	4.3	5.3
2	-5.4	-4.1	-3.8	-2.3	0	0.8	0.7	1.2	2.0	3.0	4.0	4.4	5.4
3	-5.3	-3.6	-3.3	-2.3	0	1.3	1.3	1.3	2.0	3.0	4.0	4.3	5.3
4	-5.4	-3.5	-2.7	-1.7	0	1.2	1.8	2.3	2.5	3.0	4.0	4.4	5.4
5	-5.3	-3.5	-2.3	-1.3	0	1.3	2.0	3.0	3.0	3.0	4.0	4.3	5.3
6	-5.4	-3.5	-2.2	-1.2	0	1.2	2.0	3.0	3.5	3.5	4.0	4.4	5.4

3.5 化学反应腔温度模糊控制原理

在化学反应腔温度模糊控制系统中,由红外线传感器测量所得的 t 时刻反应腔温度 y 与温度给定值 s 进行比较后,即可得温度偏差 e 和温度偏差微分 Δe ,经真实论域到内部论域变换后,根据输入隶属度函数的定义可计算出输入变量对各模糊集合的隶属度,即转化为模糊值 E 、 EC ,再由 E 、 EC 及模糊控制规则,按照模糊推理的合成法则,可进一步计算出相应的输出模糊向量,最后,通过解模糊判决可得到 t 时刻的输出控制模糊值,经内部论域到真实论域变换后即可得 t 时刻与磁控管输出功率增量相对应的输出控制确切值 Δu 。

量化因子 k_e 、 k_c 及比例因子 k_u 的取值直接影响到系统的动态特性。一般情况下, k_e 成比例地反映控制系统的偏差信号,偏差一旦产生,控制器立即产生控制作用,以减少偏差。 k_e 越大,系统响应的超调越大,响应速度快,过渡时间较长, k_e 过小,降低调节精度,延长调节时间; k_c 反映偏差信号的变化趋势(变化速率),并能在偏差信号变得太大之前,引入一个有效的早期修正信号,从而加快系统的动作速度,减少调节时间。 k_c 选得大,超调量减少,但系统响应时间变长。 k_c 过大,会使响应过程提前制动,从而延长调节时间,降低抗干扰性能。增大 k_u ,控制量将增大,可使超调量增加,而上升时间减小。 k_u 过大,会导致系统振荡。

本文在常规模糊控制算法的基础上，设计出三种改进模糊控制算法。

3.5.1 自调整比例因子的模糊控制算法

由于模糊控制器接受的模拟量经过模糊化以后，成为离散的量，同样输出也是离散量，这增加了系统的鲁棒性，但另一方面也使控制系统总存在一个控制死区，将导致整个控制系统的控制精度降低。为了提高系统的控制精度，而又不降低系统的鲁棒性，我们采用了比例因子自调整的控制策略。

本文设计自调整比例因子模糊控制器根据温差和温差变化率将控制过程分为两个级别：粗调（非稳定区）和微调（稳定区）。两个级别共用一个控制表，只是比例因子不同。控制系统根据当前温度所处的状态，自动选择对应级别的比例因子，使控制系统在不降低鲁棒性的前提下，增加快速性，提高控制精度。具体对应关系由两级的温差量化因子 k_e 、温差变化率量化因子 k_{ec} 和比例因子 k_u 决定，各个因子由试验确定。

- (1) IF 非稳定区 THEN 选择非稳定区比例因子
- (2) IF 稳定区 THEN 选择稳定区比例因子

模糊控制流程图如图 3.3 所示：

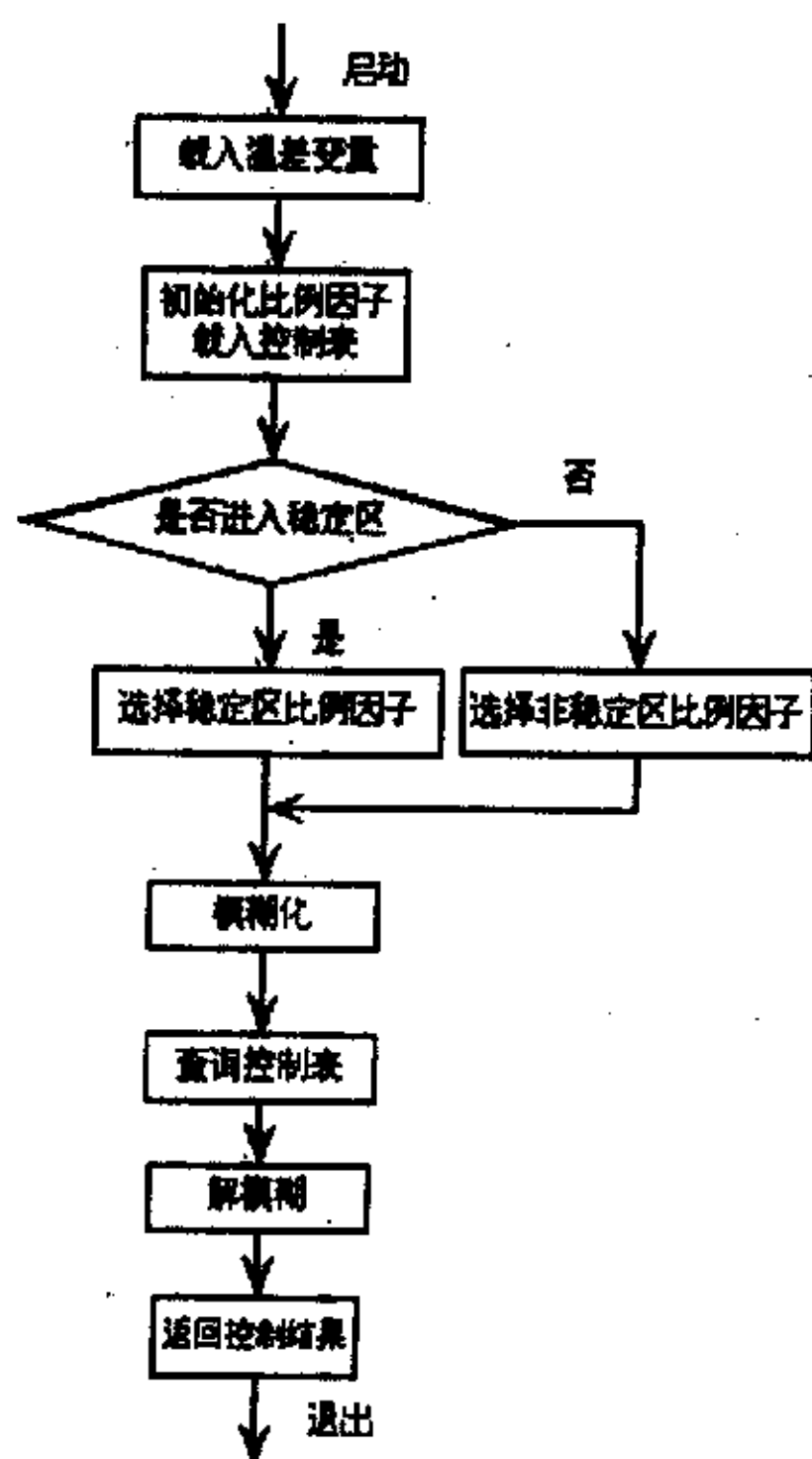


图 3.3 自调整比例因子模糊控制流程图

Fig.3.3 Flow chart of the many groups of genes adjusted automatically fuzzy control

3.5.2 仿人智能模糊控制算法

仿人智能模糊控制器的结构如图 3.4 所示。这是一种带有仿人智能积分和仿人智能参数自调整的智能型模糊控制器。

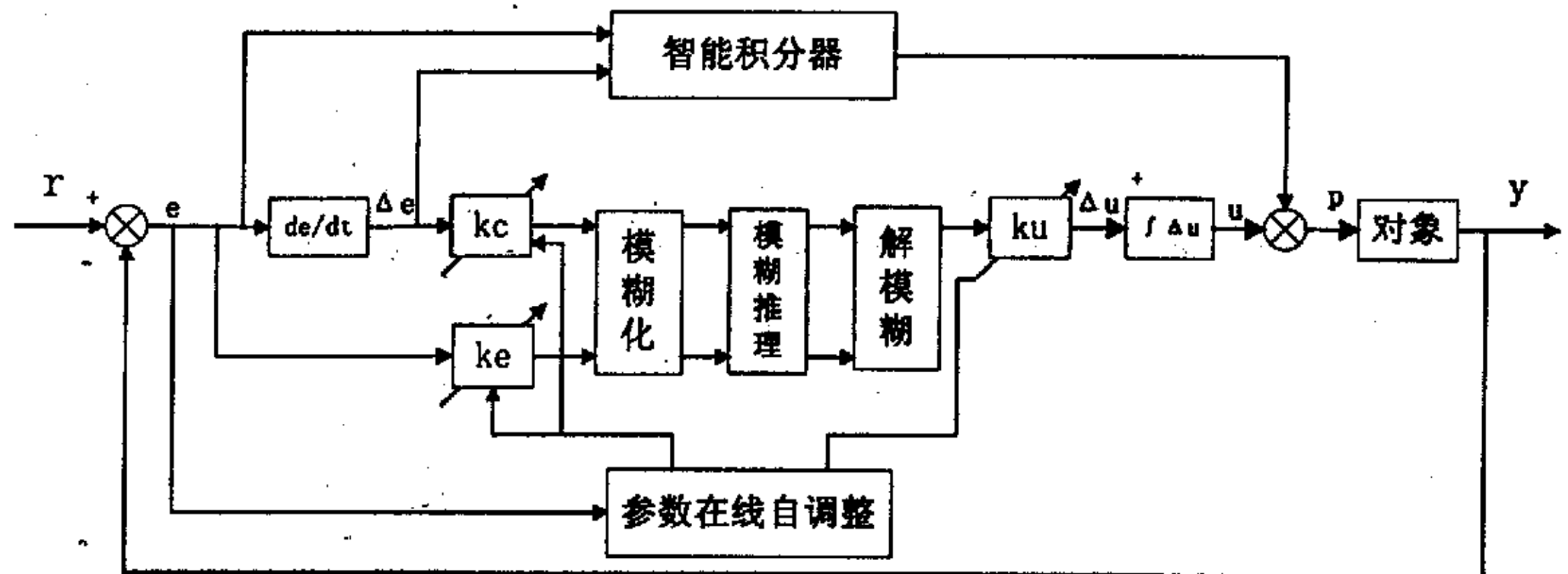


图 3.4 仿人智能模糊控制系统

Fig.3.4 The imitate-human intelligently fuzzy control system

1. 仿人智能积分及控制算法

在一个基本模糊控制系统中，系统必将产生稳态误差，且易产生极限环振荡现象。形成这种极限环振荡的一个重要原因是由输入量的模糊化和输出量的解模糊等因素，使系统具有多值继电器特性而引起的。引入仿人智能积分，不仅能够消除这种稳态误差和极限环振荡现象，而且可以改善系统的动态特性。

仿人智能控制的基本思想就是在控制过程中利用计算机模拟人的控制行为功能，最大限度地识别和利用控制系统的动态过程所提供的特征信息，进行启发和直觉推理，从而实现对缺乏精确模型的对象进行有效的控制。仿人智能积分的策略在于根据控制系统实际的输出特征，适时地加入或去除积分控制作用，以便使积分控制在消除系统余差的同时能够兼顾动态品质不受影响。通过研究和仿真分析，可以得到以下结论：

(1) 仿人智能积分引入的条件为： $|e| < \varepsilon$

其中 ε 表示常规模糊控制系统的稳态误差值。 ε 可按下式选取，式中 k_e 是量化因子。

$$\varepsilon = \frac{1}{2k_e} \quad (3.1)$$

因为常规模糊控制系统存在一定范围“用 ε 表示”的静态误差，显然，在系统偏差即将进入 ε 时加入智能积分，既可以消除静态误差，又不会对原模糊控制

规则产生影响, 因而不需要考虑重新调整模糊控制规则, 使系统实现简便。

(2) 仿人智能控制中, 可选择 e 、 Δe 和 $e \cdot \Delta e$ 作为仿人智能积分控制的特征变量。仿人智能积分的逻辑判断条件为: 当系统动态过程向误差增大方向变化, 而本次采样时刻的误差 e 及误差变化 Δe 具有相同符号, 即 $e \cdot \Delta e > 0$ 时, 对误差进行积分; 相反 e 与 Δe 异号, 即 $e \cdot \Delta e < 0$ 时, 不对误差积分。考虑到误差和误差变化的极值点, 即边界条件及仿人智能积分的引入条件, 可以用产生式规则将仿人智能积分控制算法表示如下:

① IF $[e \times \Delta e > 0 \cap |e| < \varepsilon \cap e \neq 0]$ THEN 对误差积分

② IF $[e \times \Delta e \leq 0 \cup e = 0]$ THEN 不对误差积分

积分常数 k_i 的选取对整个智能积分的效果起着重要作用。 k_i 过大, 在响应过程的初期会产生积分饱和现象, 引起较大的超调; k_i 过小, 系统的静态误差将难以消除。

2. 仿人智能参数自整定算法

为了进一步提高模糊控制器的性能, 人们提出了自组织模糊控制器, 其中最方便、最简单实用的方法是对量化因子和比例因子进行在线自调整。由于量化因子和比例因子的改变对模糊控制器的控制特性有较大影响, 因此, 调整这几个参数是改善模糊控制器品质的重要手段。但因 k_e 、 k_c 、 k_u 这 3 个参数是相互牵制、相互制约且对系统的影响是非单调的, 因此要使它们实现“最佳组合”而同时得到好的静态与动态特性, 仅靠参数的简单自调整, 效果并不十分理想。

为了解决这一问题, 本文引入了仿人智能控制的思想来对 3 个参数进行在线自调整。仿人智能参数自整定算法就是根据量化因子和比例因子对模糊控制动态性能和静态性能的影响, 在控制过程中模拟人的控制行为功能, 最大限度地识别和利用控制系统动态“过程”所提供的特征信息, 根据专家经验, 通过在线自学习和直觉推理, 得出控制决策, 从而对被控对象进行有效的控制。具体来讲就是分析和识别系统的输出状态, “动态地、独立地”对参数 k_e 、 k_c 和 k_u 进行在线自调整, 以调整整个控制过程中不同阶段上的控制特性, 获得动、静态均满意的控制效果。

通过研究分析和对控制经验的总结, 得出一组用来在线自调整量化因子和比例因子的仿人智能控制决策为:

- ① IF $e > 0$ AND $\Delta e < 0$ AND $e > \varepsilon$ THEN
[$A = \Delta KE, B = 0, C = \Delta KU$]
- ② IF $e > 0$ AND $\Delta e < 0$ AND $e < \varepsilon$ THEN
[$A = -\Delta KE, B = \Delta KC, C = -\Delta KU$]
- ③ IF $e < 0$ AND $\Delta e < 0$ THEN
[$A = -\Delta KE, B = \Delta KC, C = \Delta KU$]
- ④ IF $e < 0$ AND $\Delta e > 0$ THEN
[$A = -\Delta KE, B = -\Delta KC, C = -\Delta KU$]
- ⑤ IF $e > 0$ AND $\Delta e > 0$ THEN
[$A = \Delta KE, B = 0, C = -\Delta KU$]
- ⑥ IF $e > 0$ AND $\Delta e < 0$ THEN
[$A = 0, B = 0, C = -\Delta KU$]

其中, A、B、C 分别为量化因子 k_e 、 k_c 和比例因子 k_u 的动态修正因子, ΔKE 、 ΔKC 、 ΔKU 分别为 k_e 、 k_c 、 k_u 的最小增量, 其大小可根据实际情况适当选取。实际设计时对 k_e 、 k_c 、 k_u 应选择好初始值和最大值。

设 $k_e(n)$ 和 $k_e(n-1)$ 、 $k_c(n)$ 和 $k_c(n-1)$ 、 $k_u(n)$ 和 $k_u(n-1)$ 分别为当前时刻和上一时刻的量化因子和比例因子, 则参数在线修正算法如下:

$$k_e(n) = k_e(n-1) + A \quad k_c(n) = k_c(n-1) + B \quad k_u(n) = k_u(n-1) + C$$

该修正算法体现了在不同的控制阶段采用不同的量化因子和比例因子, 以调整不同阶段的输出特性。

为节省内存和保证系统的实时性, 采用离线推理模糊控制表、将推理出的模糊控制表存于工控机内存中, 然后在主程序中在线查询该控制表的方法。采用查表法有以下几个优点: ①由于是离线计算建立控制表, 故可把模糊变量的值和论域的元素取得多一点, 可以采用好的控制算法, 提高控制精度。②可以使工控机程序设计大大简化。③实时性好。

仿人智能参数自整定算法流程图如图 3.5 所示:

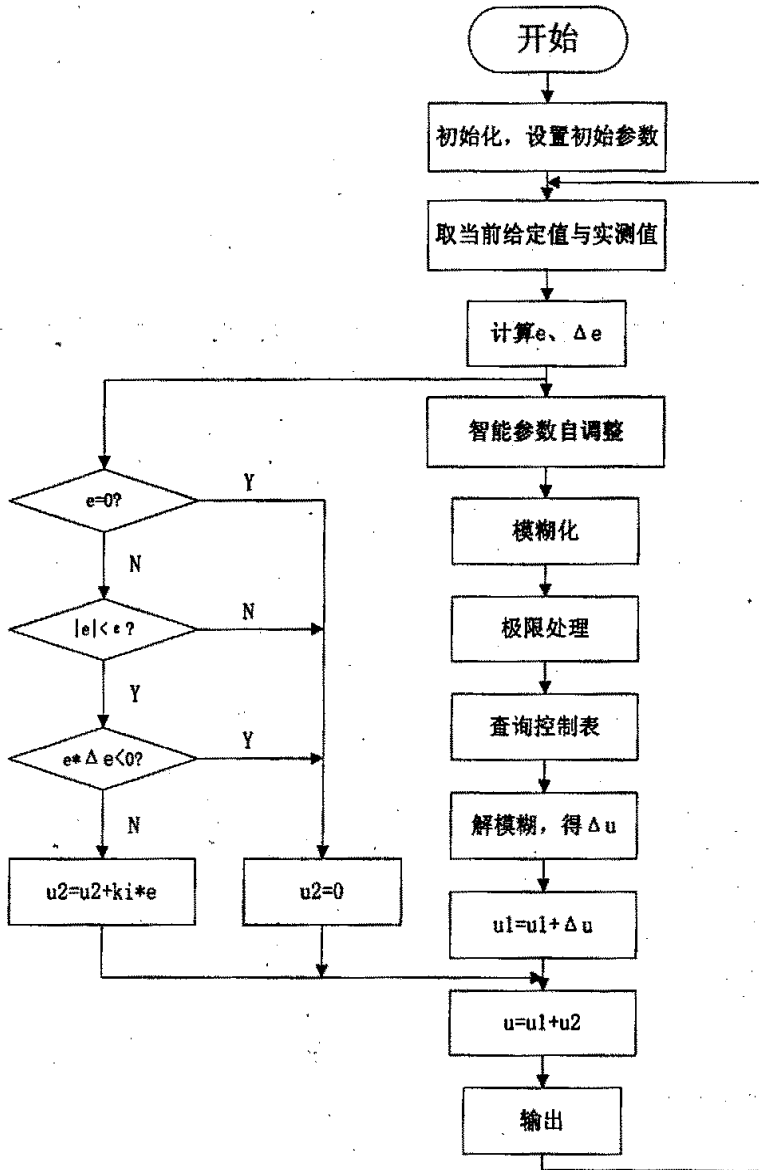


图 3.5 仿人智能参数自整定模糊控制程序框图

Fig 3.5 Flow chart of the imitate-human intelligently fuzzy control

3.5.3 带修正因子的两级智能模糊控制算法

在模糊控制系统中，模糊控制器的性能对系统的控制特性影响很大，而模糊控制器的性能在很大程度上又取决于模糊控制规则的确定及其可调整性。

由模糊控制的控制规则可以看出，控制作用取决于误差及误差变化率，且二者处于不同的加权程度。为了适应不同被控对象的要求，在模糊控制器中引入修

正因子 α ，这样就可以得到一种带有修正因子的控制规则

$$U = [\alpha E + (1-\alpha)C]$$

式中 α 为修正因子，又称加权因子，它是介于 0, 1 之间的实数。

通过调整系数 α ，就可以改变其控制规则，即可对控制规则进行调整和修正。 α 作为调整参数不仅是方便的，而且也包含着深刻的物理意义：这是因为， α 值的大小，直接意味着对误差和误差变化率的加权程度，这恰好反映了人进行控制活动时的思维特点。例如：当被控对象阶次比较高时，这时对误差变化率的加权值就应大于对误差的加权值，因而 α 可取较小值，反之亦然。

不同的 α 值对应的控制特性是不一样的。当 α 较大时，响应曲线产生较大超调，调整时间变长。当 α 较小时，意味着控制规则中对误差加权稍大于对误差变化加权，这种情况不仅超调小，而且响应时间也短。

带修正因子的两级智能模糊控制器的结构如图 3.6 所示。它实际上是智能积分、带多个修正因子模糊控制和 ku 在线自调整相结合的一种混合式的模糊控制器。

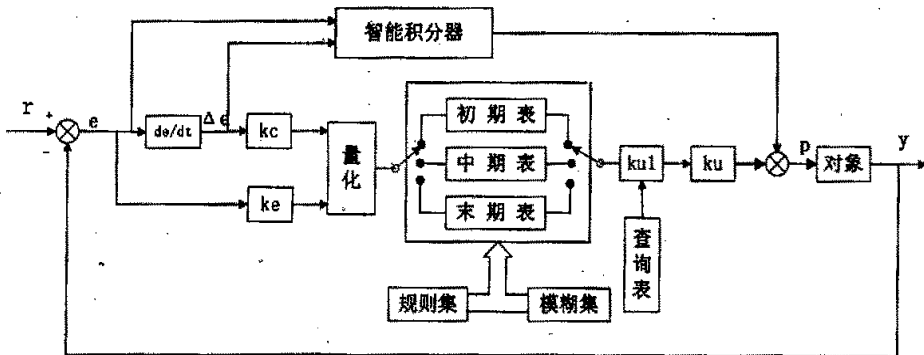


图 3.6 带修正因子的两级智能模糊控制系统

Fig. 3.6 The two-grade intelligent fuzzy control system

1. 带多个修正因子模糊控制算法

对二维模糊控制系统而言，当误差较大时，控制系统的主要任务是消除误差，这时对误差在控制规则中的加权应该大些；相反，当误差较小时，此时系统已接近稳定（控制系统的主要任务是使系统尽快稳定），为此必须减小超调。这样就要求在控制中误差变化率起的作用大些，即对误差变化率加权大些。这些要求只靠一个固定的加权因子 α 难以满足要求，于是考虑在不同的误差等级引入不同的加权因子，以实现模糊控制规则的自调整。

首先，把整个控制过程按照阶跃相应曲线分成以下三个部分：初期、中期、末期。如图 3.7 所示。

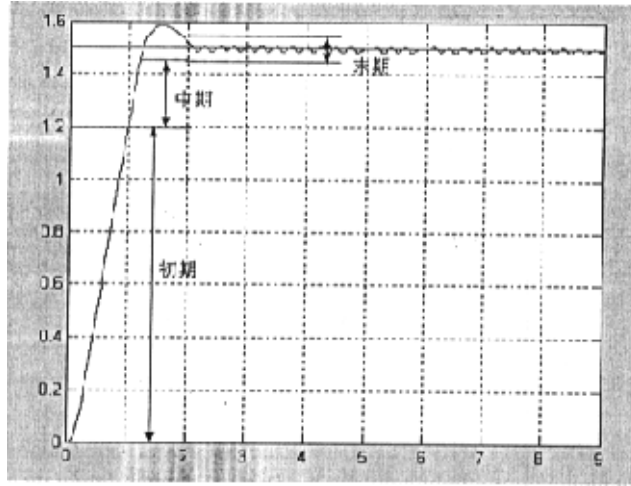


图 3.7 多个调整因子分段控制图解

Fig.3.7 The explanatory drawing of subsection control

在控制初期、中期和末期采用不同的修正因子 α_1 、 α_2 、 α_3 ，生成三张不同控制规则表，再根据误差的大小判断控制所处的阶段，查询不同的控制表。查询规则如下：

- 1) 当 $|e| > e_1$ 时， $\alpha = \alpha_1$ ， $U = [\alpha_1 E + (1 - \alpha_1) C]$ ，采用初期控制表。
- 2) 当 $e_2 < |e| \leq e_1$ 时， $\alpha = \alpha_2$ ， $U = [\alpha_2 E + (1 - \alpha_2) C]$ ，采用中期控制表。
- 3) 当 $|e| \leq e_2$ 时， $\alpha = \alpha_3$ ， $U = [\alpha_3 E + (1 - \alpha_3) C]$ ，采用末期控制表。

其中， e_1 、 e_2 、 α_1 、 α_2 和 α_3 都大于零，具体值在仿真时根据实验和经验整定。

经过模糊推理和对每个元素取值进行取整处理，如 $\langle u \rangle$ 表示取一个与 u 同号而其绝对值是大于或等于 $|u|$ 的最小整数，得出初期、中期和末期查询表分别如表 3.6~3.8 所示。

2. ku 在线自调整算法

本算法采用离线整定 ke 、 kc ，在线调整 ku 的方法。在控制过程中，根据误差和误差变化查询 ku 的调整参数 ku_1 ，然后由下式计算出 ku （式中 ku_0 为 ku 的初始值）：

$$ku = ku_0 \times ku_1 \tag{3.2}$$

根据经验计算得出调整参数 ku_1 的查询表如表 3.9 所示。

表 3.6 初期查询表 ($\alpha_1=0.6$)

Table 3.6 initial stages table ($\alpha_1=0.6$)

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

表 3.7 中期查询表 ($\alpha_2=0.3$)

Table 3.7 middle stages table ($\alpha_2=0.3$)

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

表 3.8 末期查询表 ($\alpha_3=0.5$)

Table 3.8 terminal stages table ($\alpha_3=0.5$)

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

表 3.9 调整参数 ku_1 的查询表

Table 3.9 The table of parameter ku_1

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

带修正因子的两级智能模糊控制算法流程图如图 3.8 所示：

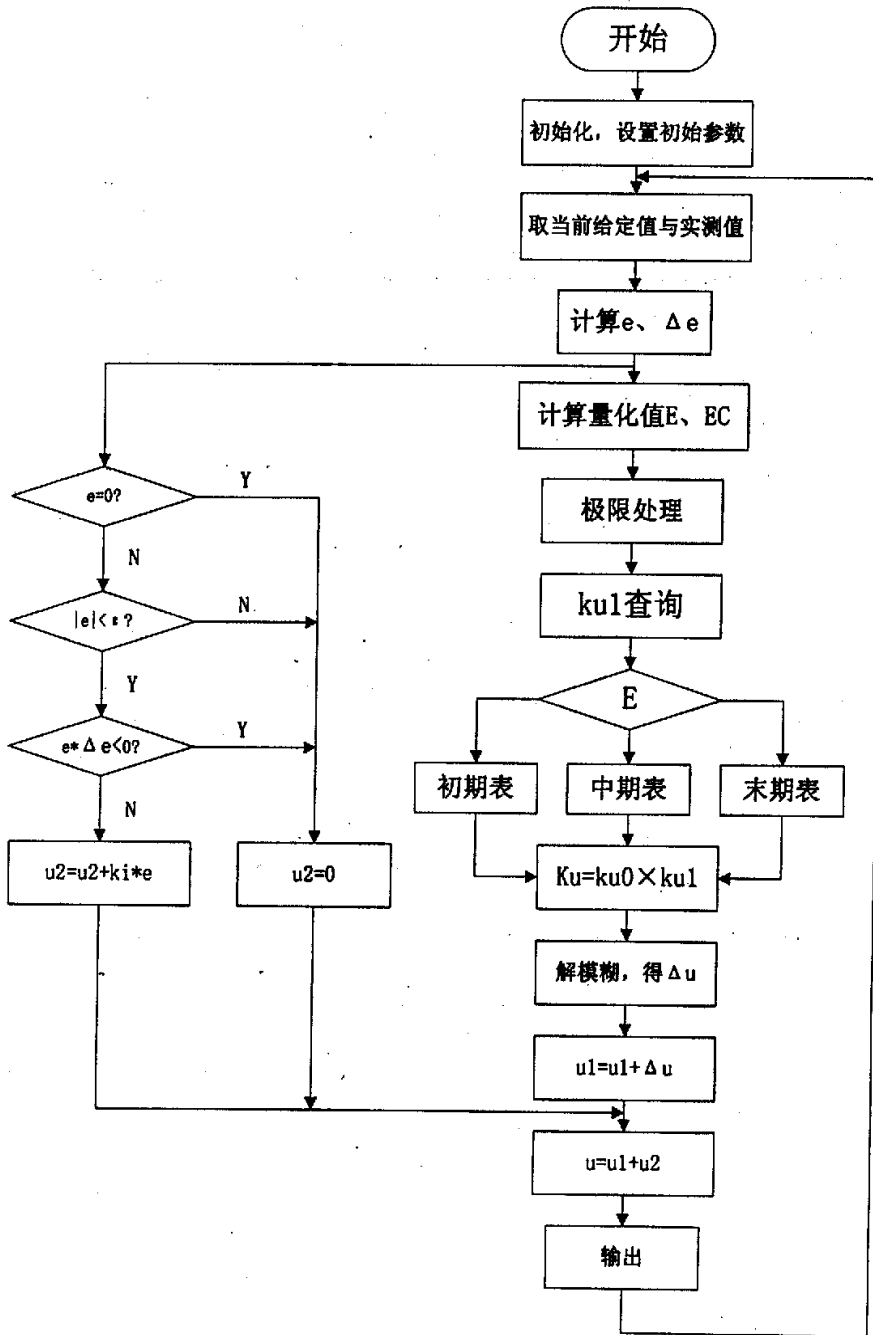


图 3.8 带修正因子的两级智能模糊控制算法流程图

Fig. 3.8 Flow chart of the two-grade intelligent fuzzy control

第四章 控制算法的仿真和结论

4.1 引言

由于计算机技术的高速发展，可以借助计算机完成获得时间响应的任务，这就是数字仿真。数字仿真实质上是根据被研究的真实系统的模型，利用计算机进行实验研究的一种方法。本章所进行的仿真主要是计算机仿真。

仿真的主要过程是：建立模型、仿真运行和分析研究结果。仿真运行就是借助一定的算法，获得系统的有关信息，特别是系统输入和输出响应的变化情况。由于连续时间系统和离散系统的数学模型不同，仿真算法也不同；对于连续时间系统，有不同求解微分方程的数值计算方法。

4.2 模糊逻辑工具箱简介

模糊控制仿真可以使用 Fuzzy Logic Toolbox，即模糊逻辑工具箱。MATLAB 与模糊逻辑工具箱和仿真环境 Simulink 的关系如下图 4.1 所示：

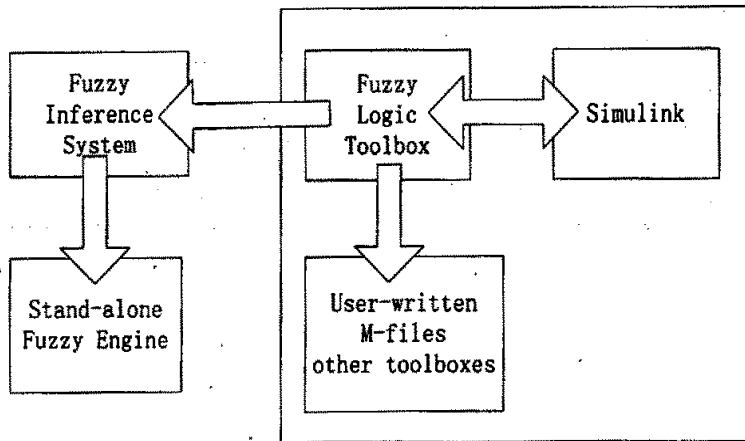


图 4.1 MATLAB 与模糊逻辑工具箱和 Simulink 的关系

Fig. 4.1 The relation of MATLAB, fuzzy logic toolbox and Simulink

模糊逻辑工具箱是 MATLAB 中用于设计模糊控制器的工具箱。由上图可以看出，模糊逻辑工具箱必须在 MATLAB 环境下运行，它所创建的模糊控制器可以为其它工具箱所有，也可以用 Simulink 环境对它进行仿真。

模糊逻辑工具箱支持两种模糊模型的建立，一种是 Mamdani 型，另一种是 Sugeno 型。这两种模型的唯一不同之处在于 Sugeno 型的输出变量的隶属函数是

常数或是线性的，而 Mamdani 型的输出变量可以采用三角形、钟形、高斯形等各种各样的隶属函数。但 Sugeno 型的模糊模型对输出变量的隶属函数进行了这种简化后，却获得了一些 Mamdani 模型所不具备的特性。

用图形的方式描述 Mamdani 模型的整个推理过程如图 4.2 所示。

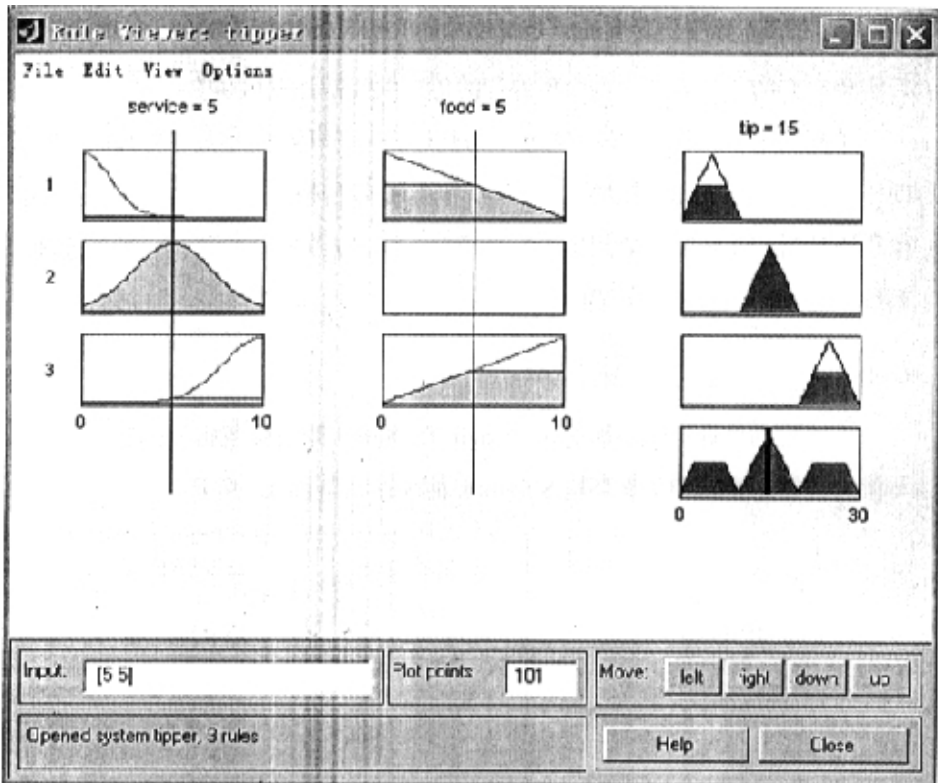


图 4.2 Mamdani 模型的推理过程

Fig. 4.2 The reasoning process of Mamdani model

4.3 仿真

对本文提出的各种控制算法的各种性能进行验证，对系统的动态特性、抗干扰特性、跟踪特性以及鲁棒性进行比较。

4.3.1 生成模糊控制器

根据上述已设计的模糊控制器，有两种方法可以生成模糊控制器：MATLAB 编程和利用 MATLAB 提供的模糊逻辑工具箱的 GUI 编辑器生成模糊控制器文件。然后在程序中调用该文件，接着就可以仿真整个控制过程。

1. MATLAB 编程

由第三章可知，模糊推理规则有 49 条，根据要求可设计出模糊控制器，MATLAB 程序如下：

```
a=newfis('fuzzyout');
a=addvar(a,'input','e',[-6,6]);
a=addmf(a,'input',1,'NB','trimf',[-8,-6,-3.6]);
a=addmf(a,'input',1,'NM','trimf',[-6.4,-4,-1.6]);
a=addmf(a,'input',1,'NS','trimf',[-4.4,-2,0]);
a=addmf(a,'input',1,'Z','trimf',[-2,0,2]);
a=addmf(a,'input',1,'PS','trimf',[0,2,4.4]);
a=addmf(a,'input',1,'PM','trimf',[1.6,4,6.4]);
a=addmf(a,'input',1,'PB','trimf',[3.6,6,8]);

a=addvar(a,'input','ec',[-6,6]);
a=addmf(a,'input',2,'NB','trimf',[-8,-6,-4]);
a=addmf(a,'input',2,'NM','trimf',[-6,-4,-2.6]);
a=addmf(a,'input',2,'NS','trimf',[-3.47 -1.97 -0.469]);
a=addmf(a,'input',2,'Z','trimf',[-1.5,0,1.5]);
a=addmf(a,'input',2,'PS','trimf',[0.5,2,3.5]);
a=addmf(a,'input',2,'PM','trimf',[2.5,4,6]);
a=addmf(a,'input',2,'PB','trimf',[4,6,8]);

a=addvar(a,'output','p',[-6,6]);
a=addmf(a,'output',1,'NB','trimf',[-8,-6,4]);
a=addmf(a,'output',1,'NM','trimf',[-6,-4,-2.5]);
a=addmf(a,'output',1,'NS','trimf',[-3.5,-2,-0.5]);
a=addmf(a,'output',1,'Z','trimf',[-1.5,0,1.5]);
a=addmf(a,'output',1,'PS','trimf',[0.5,2,3.5]);
a=addmf(a,'output',1,'PM','trimf',[2.5,4,6]);
a=addmf(a,'output',1,'PB','trimf',[4,6,8]);
```

```
rulelist=[ 7 1 7 1 1;
           7 2 7 1 1
           7 3 7 1 1
           7 4 7 1 1
           7 5 7 1 1
```

.....以下省略，总共 49 条规则]

```
a=addrule(a,rulelist);
```

这样就得到了模糊控制器(名为 a 的 FIS 结构)，然后可以根据误差和误差变化率通过模糊控制器计算出 P，例如，当 e=5，ec=2，则

```
evalfis([5,2],a)
ans = 4.4846
```

这说明模糊控制器的输出为 4.4846。

2. GUI 编辑器

首先，在 MATLAB 的 Fuzzy Logic Toolbox 中构建如下的模糊控制器。

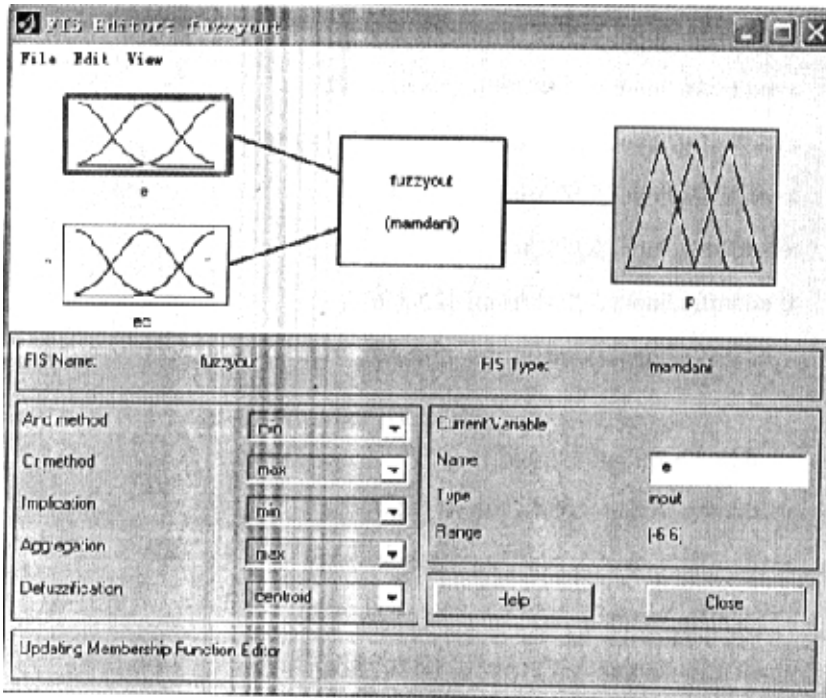


图 4.3 模糊控制器的构建

Fig.4.3 The build of fuzzy controller

以下是模糊控制器的各个变量的隶属函数图：

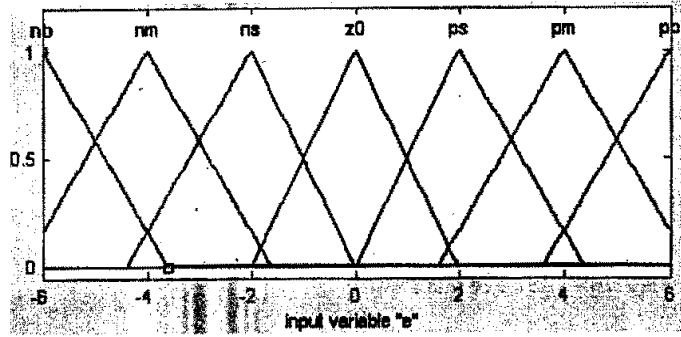


图 4.4 输入变量 E 的隶属函数图

Fig.4.4 Membership values function of input variable e

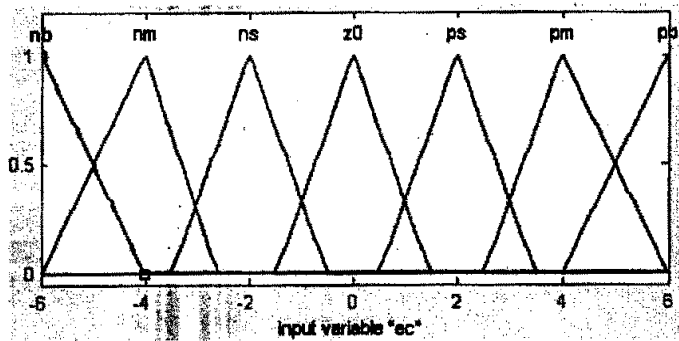


图 4.5 输入变量 EC 的隶属函数图

Fig.4.5 Membership values function of input variable ec

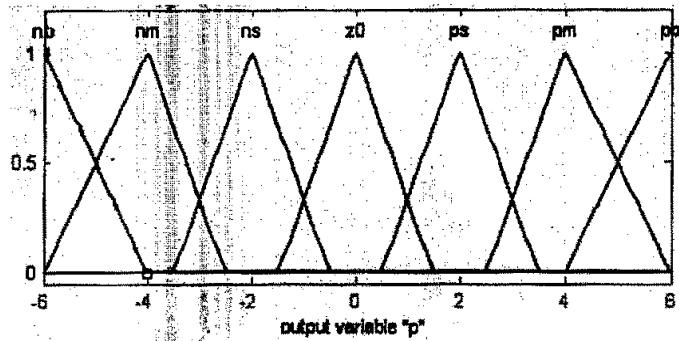


图 4.6 输出变量 P 的隶属函数图

Fig.4.6 Membership values function of output variable p

利用模糊工具箱中的规则编辑器，编写第三章中计算出的 49 条模糊控制规则（如图 4.7 所示），得到模糊控制器的控制规则表。

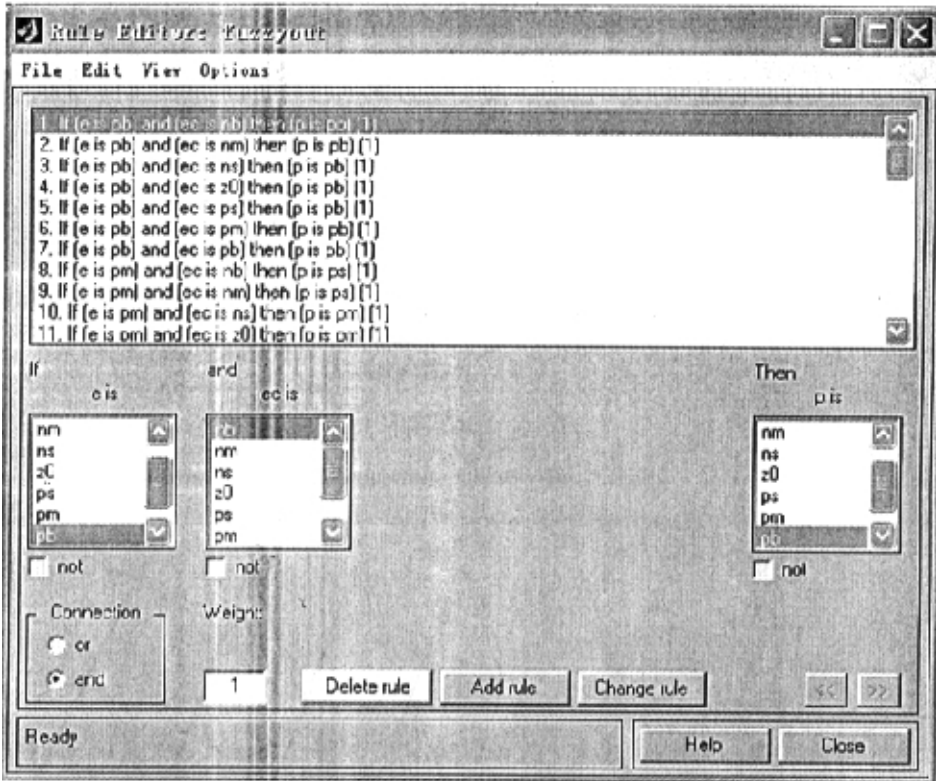


图 4.7 模糊控制器的控制规则编辑器

Fig. 4.7 The control rules editor of fuzzy control

还可以得到模糊控制器的输入/输出曲面，结果如图 4.8 所示。

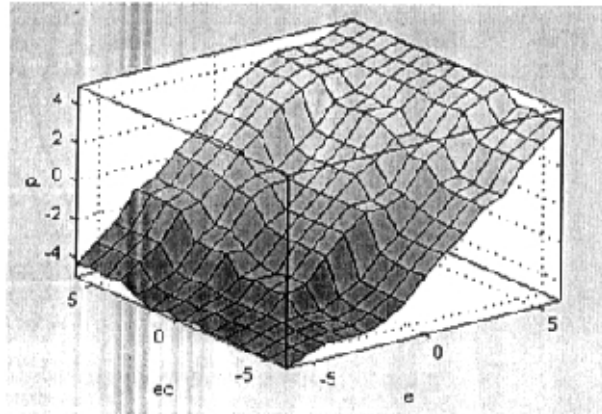


图 4.8 模糊控制器的输入/输出曲面

Fig. 4.8 Input/Output curve surface of fuzzy controller

4.3.2 用 MATLAB 语言编写仿真程序

算法 1 PID 控制算法仿真

许多工业控制过程都可以等效成二阶环节。本文采用典型二阶环节的模型进行仿真：

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \quad (4.1)$$

在 MATLAB 仿真程序中,采用位置式算法。初始化主要设置给定值 R 为 1.5, 采样周期 T 为 0.01 秒, 仿真时间为 9 秒, T_1 为 0.4, T_2 为 4, K 为 20 等。

由四阶龙格库塔方法求解微分方程(微分方程是描述被控对象的数学模型的), 得出控制结果。

龙格—库塔法的基本思路是:用函数值 $f(t,y)$ 的线性组合来代替 $f(t,y)$ 的高阶导数项, 既可以避免计算高阶导数, 又可以提高数值的计算精度。

四阶龙格—库塔公式:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= y_k + h/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 &= f(t_k, y_k) \\ k_2 &= f(t_k + h/2, y_k + (h \times k_1)/2) \\ k_3 &= f(t_k + h/2, y_k + (h \times k_2)/2) \\ k_4 &= f(t_k + h, y_k + h \times k_3) \end{aligned} \quad (4.2)$$

对于仿真中遇到的大多数工程实际问题, 四阶龙格—库塔的精度已能满足要求, 其截断误差 $O(h^5)$ 与 h^5 同数量级, 当步距 h 取得较小时, 误差是很小的。

用四阶龙格库塔方法求解微分方程仿真程序如下:

$$\begin{aligned} x &= [0; 0]; \\ k0 &= a1 \times x + b \times u; \\ k1 &= a1 \times (x + h \times k0/2) + b \times u; \\ k2 &= a1 \times (x + h \times k1/2) + b \times u; \\ k3 &= a1 \times (x + h \times k2) + b \times u; \\ x &= x + (k0 + 2 \times k1 + 2 \times k2 + k3) \times h/6; \\ y &= c \times x + d \times u; \end{aligned}$$

经过多次实验, 选择最佳参数为 $k_p=1$; $k_i=0.1$; $k_d=0.001$ 时, 系统的阶跃响

应曲线如图 4.16 中①所示。

算法 2 自调整比例因子的模糊控制算法仿真

自调整比例因子模糊控制的具体算法见 3.5.1。

同 PID 算法, 采用典型二阶环节的模型进行仿真。在 MATLAB 仿真程序中, 采用绝对值输出。初始化主要设置给定值 R 为 1.5, 采样周期 T 为 0.01 秒, 仿真时间为 9 秒, T_1 为 0.4, T_2 为 4, K 为 20 等。输入控制器一些参数, 这些参数都是可调的, 改变这些参数可调整控制结果。参数包括偏差量化因子 ke , 偏差变化量化因子 kd , 控制量比例因子 ku 以及当 e 的绝对值小于 $1/ke$ 时的微调偏差量化因子 $ke1$, 微调偏差变化量化因子 $kd1$, 微调整控制量比例因子 $ku1$ 。

首先, 将已经建好的模糊控制器 `fuzzyout` 读入 MATLAB 工作空间。语句如下:

```
a=readfis('fuzzyout');
```

然后在程序中调用该文件, 根据误差和误差变化率通过该模糊控制器计算出 P 的值, 语句如下:

```
in=[e1 de1];
z(k)=evalfis(in,a);
```

在仿真过程中, 根据误差 e 判断化学反应是否进入微调阶段, 从而判断是否选择微调比例因子, 语句如下:

```
if abs(e) <= 1/ke
    e1=ke1 * e;
    de1=kd1 * de;
else
    e1=ke * e;
    de1=kd * de;
end
if abs(e) <= 1/ke
    pp(1,k)=z(k) * ku1;
else
    pp(1,k)=z(k) * ku;
end
```

如果误差和误差变化率模糊化后的结果超出了 $[-6, 6]$ 的范围, 就要对此结果进行数据处理, 相当于限幅的作用, 语句如下:

```

if e1 >= 6
    e1 = 6;
elseif e1 <= -6
    e1 = -6;
end

```

经过多次实验, 选择最佳参数为 $ke=80; kd=1000; ku=0.1; ke1=15; kd1=8000; ku1=0.05$ 时, 系统的阶跃响应曲线如图 4.16 中②所示。

算法 3 自调整比例因子和智能积分的模糊控制算法仿真

自调整比例因子和智能积分模糊控制的具体算法见 3.5.1 和 3.5.2。

在 MATLAB 仿真程序中, 对典型二阶环节的模型进行仿真, 采用绝对值方式输出。设置智能积分的阈值 q 、积分常数 ki 和智能积分输出值 $u2$, 其余的初始设置和参数设置都和算法 2 相同。

仿真整个控制过程:

(1) 由被控对象输出和给定值输出的偏差 e 和偏差变化 Δe 判断是否满足智能积分引入的条件, 若满足, 采用有积分的模糊控制算法, 若条件不满足, 则采用普通模糊控制算法。

(2) 输出的控制量加到被控对象上。由四阶龙格库塔方法求解微分方程(微分方程是描述被控对象的数学模型的), 得出控制结果。一方面将本次控制结果存起来, 另一方面经传感器反馈到输入端。此时仿真时间 $t=t+T$, 判断仿真时间到否。时间未到, 就进行下一次循环计算; 仿真时间到了, 就退出计算, 画出仿真曲线, 整个仿真过程结束。

智能积分的仿真程序如下:

```

if abs(e) < 0.000001
    u2(k) = 0;
elseif (abs(e) < q)
    if (e * de < 0)
        u2(k) = 0;
    else

```

```

        u2(k) = u2(k-1) + ki * e;
    end
else
    u2(k) = 0;
end
    
```

经过多次实验，选择最佳参数为 $k_e=80$ ； $k_d=1000$ ； $k_u=0.1$ ； $k_{e1}=15$ ； $k_{d1}=8000$ ； $k_{u1}=0.05$ ； $k_i=100$ ； $q=0.00625$ 时，系统的阶跃响应曲线如图 4.9 所示。

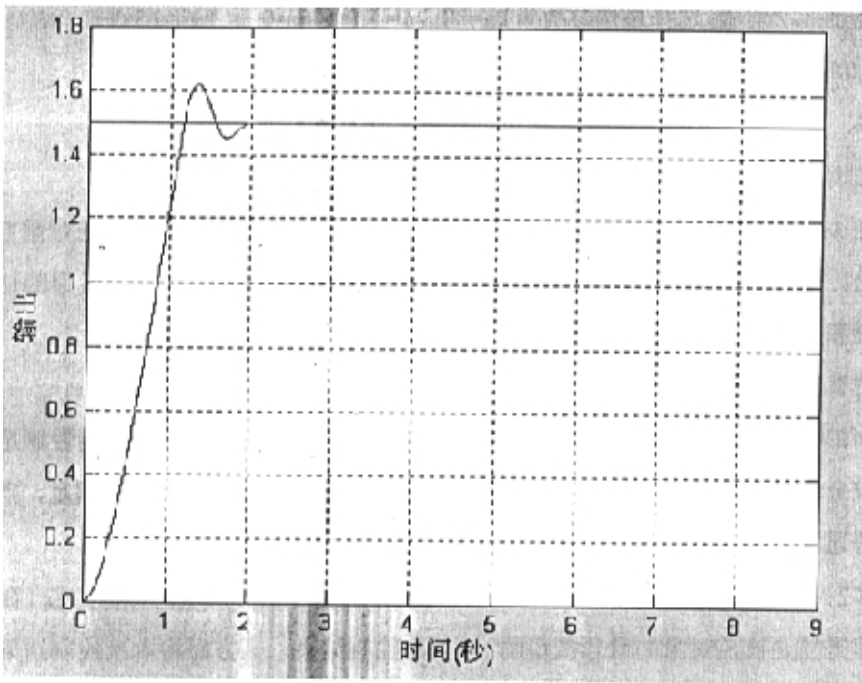


图 4.9 自调整比例因子和智能积分模糊控制算法的阶跃响应曲线

Fig.4.9 Rank responding curve of fuzzy control system with genes adjusted automatically and intelligent integrgraph

算法 4 仿人智能模糊控制算法仿真

仿人智能模糊控制算法的具体算法见 3.5.2。

在 MATLAB 仿真程序中，对典型二阶环节的模型进行仿真，采用绝对值方式输出，带有智能积分器，采用仿人智能参数自整定算法。设置许多新的参数：量化因子 k_e 、 k_c 和比例因子 k_u ，智能积分的阈值 q ，积分常数 k_i ，智能积分输出值 u_2 ，量化因子 k_e 、 k_c 和比例因子 k_u 的最小增量 k_{e0} 、 k_{c0} 、 k_{u0} ，量化因子 k_e 、 k_c 和比例因子 k_u 的动态修正因子 A 、 B 、 C ，其余的初始设置和算法 2 基本

相同。

智能积分引入的条件为 $|e| < \varepsilon$, ε 表示常规模糊控制系统的稳态误差值, 可按下式选取, $\varepsilon = 0.5/k_e$ (式中 k_e 是量化因子)。由于在仿人智能模糊控制算法中量化因子不停的在自调整, 所以 ε 的计算必须放在循环语句中, 以便 ε 的值也随着量化因子的变化而变化, 达到较好的控制效果。

根据实验调试和分析, k_{e0} 、 k_{c0} 和 k_{u0} 可按下式选择:

$$k_{e0} = k_e/50, \quad k_{c0} = k_c/150, \quad k_{u0} = k_u/100 \quad (4.3)$$

仿人智能参数自整定算法“动态地、独立地”对参数 k_e 、 k_c 、 k_u 进行在线自调整, 以调整整个控制过程中不同阶段上的控制特性, 获得动、静态均满意的控制效果。在仿真过程中, 先初始化动态修正因子 A、B、C, 然后根据已得出的一组仿人智能控制决策, 选择不同时刻瞬时值 A、B、C, 再计算出该时刻的参数 k_e 、 k_c 、 k_u , 从而实现在不同的控制阶段采用不同的量化因子和比例因子。仿真语句如下:

```

A=0;B=0;C=0;
if (e > 0 & de < 0 & e > q)
    A = ke0;
    B = 0;
    C = ku0;
elseif (e > 0 & de < 0 & e < q)
    A = -ke0;
    B = kd0;
    C = -ku0;
elseif (e < 0 & de < 0)
    A = -ke0;
    B = kd0;
    C = ku0;
elseif (e < 0 & de > 0)
    A = -ke0;
    B = -kd0;
    C = -ku0;

```

```

elseif (e > 0 & de > 0)
    A = ke0;
    B = 0;
    C = -ku0;
elseif (e > 0 & de < 0)
    A = 0;
    B = 0;
    C = -ku0;
end
ke = ke + A;
kd = kd + B;
ku = ku + C;

```

另外，在得出量化因子和比例因子的值之后，要注意 ke 、 kc 和 ku 的极限处理，以免超出常范围。通过仿真程序调试可知， ke 、 kc 和 ku 的极限值对整个系统的控制作用起着举足轻重的作用，对控制结果的影响较大，要反复调试。

经过多次实验，选择最佳参数为 $ke=1$ ； $kd=1000$ ； $ku=0.1$ ； $ki=100$ ； $q=0.5/ke$ ； $ke=[1,80]$ ； $kd=[1000,8000]$ ； $ku=[0.05,100]$ 时，系统的阶跃响应曲线如图 4.16 中 ③所示。

算法 5 带修正因子的两级智能模糊控制仿真

带修正因子的两级智能模糊控制的具体算法见 3.5.3。

这种算法实际上是一种两级智能模糊控制算法和智能积分的结合。采用带修正因子 α 的模糊控制器，实现了模糊控制规则的自调整，这是提高和改善模糊控制器性能的关键。

在 MATLAB 仿真程序中，对典型二阶环节的模型进行仿真，采用绝对值方式输出，带有智能积分器。设置参数：量化因子 ke 、 kc 和比例因子 ku ，智能积分的阈值 q ，积分常数 ki ，智能积分输出值 u_2 ，分段控制的阈值，在控制的初期、中期和末期的生成三张不同控制规则表的修正因子 α_1 、 α_2 、 α_3 ，在线调整 ku 的调整参数 ku_1 ，其余的初始设置和算法 2 基本相同。

在仿真程序中还专为调试设置了几个参数，以便能够详尽的知道实际运行过

程中 α 、 ku 和智能积分的变化情况, 分析这些参数变化对实际控制作用的影响, 使参数达到最优。

首先, 由于该算法的模糊控制规则是在线自调整的, 所以要构建一个原本没有控制规则的新模糊控制器 `fuzzyoutalpha`, 以便在仿真程序中实时根据需要写入控制规则。当模糊控制器的输入、输出取相同的论域时, 模糊控制规则可表示为:

$$U = \text{fix} \left(\frac{E + ED}{2} \right) = \text{fix}(\alpha E + (1-\alpha)DE) \quad (4.4)$$

其中, `fix` 为取整函数, E 表示误差的模糊集, DE 表示误差倒数的模糊集, α 为常数。因此可自动建立模糊规则库 (即产生以下程序中的变量 `rr`):

```
a=readfis('fuzzyoutalpha');
for i=1:7
    for j=1:7
        rr(i,j)=round(alpha*i+(1-alpha)*j);
    end
end
```

程序中用 `alpha` 表示 α , 这样表示的模糊控制系统可通过改变 α 值方便地修改模糊控制规则。

然后, 通过 MATLAB 语句给模糊控制器 `fuzzyoutalpha` 写入控制规则:

```
r1=zeros(prod(size(rr)),3);tempk=1;
for i=1:size(rr,1)
    for j=1:size(rr,2)
        r1(tempk,:)= [i,j,rr(i,j)];
        tempk=tempk+1;
    end
end
[r,s]=size(r1);
r2=ones(r,2);
rulelist=[r1,r2];
a=addrule(a,rulelist);
```

两级智能模糊控制算法在控制初期、中期和末期生成三张不同的控制规则表, 再根据误差的大小判断控制所处的阶段, 查询不同的控制表。如下所示:

```

if abs(e)>=0.1           %选不同的  $\alpha$  值
    alpha=0.6;           %初期
elseif abs(e)<=0.02
    alpha=0.5;           %末期
else
    alpha=0.3;           %中期
end

```

本算法在线调整 ku 。在控制过程中, 根据误差和误差变化查询 ku 的调整参数 $ku1$, 由下式计算出 ku (式中 $ku0$ 为 ku 的初始值):

$$ku = ku0 \times ku1 \quad (4.5)$$

比例因子 ku 的自调整程序如下:

```

lookel=fix(e1);           %查询  $ku1$ 
lookdel=fix(de1);
if lookel>=4
    lookel=4;
elseif lookel<=-4
    lookel=-4;
end
if lookdel>=4
    lookdel=4;
elseif lookdel<=-4
    lookdel=-4;
end
lookel=lookel+5;
lookdel=lookdel+5;
ku1=looklist(lookel,lookdel);
ku=ku0*ku1;

```

经过多次实验,选择最佳参数为 $k_e=20$; $k_d=100$; $k_u=0.05$; $k_i=100$; $q=0.5/k_e$; $\alpha_1=0.6$; $\alpha_2=0.3$; $\alpha_3=0.5$; 分段控制的阈值分别选用 0.1 和 0.02 (即[0.1, 1]为初期, [0.02, 0.1]为中期, [0, 0.02]为末期) 时, 系统的阶跃响应曲线如图 4.16 中 ④所示。

改变 α 的值, 根据不同的 α 值分别进行仿真。执行结果如图 4.10 所示, 从中可以看出系统响应与值 α 的关系, 当然它们之间不存在明显的单调关系, 而且与系统对象本身关系密切。

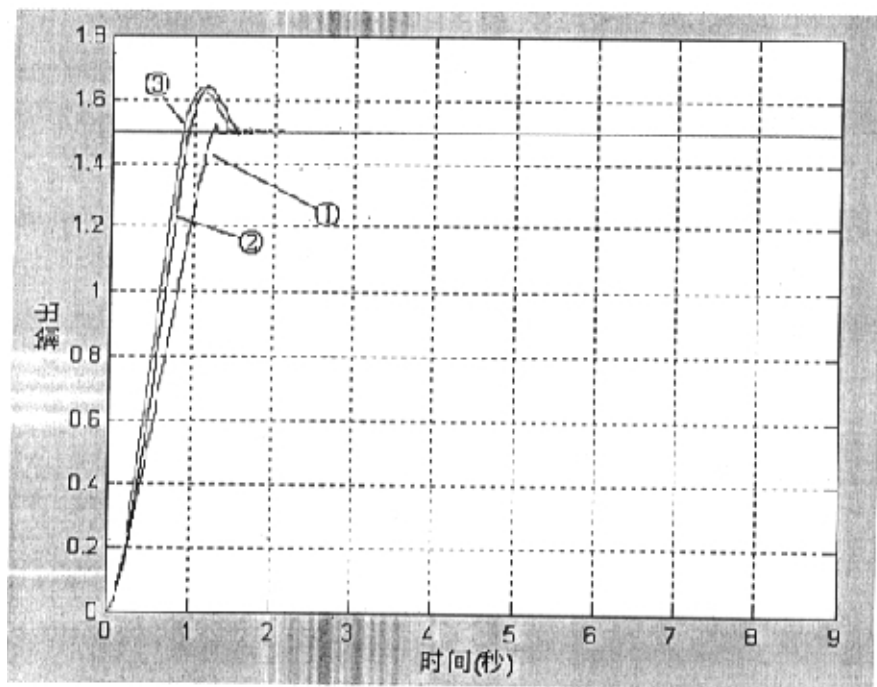


图 4.10 系统响应与 α 值的关系

Fig.4.10 The relation of responding curve

- ① $\alpha_1=0.6 \alpha_2=0.3 \alpha_3=0.5$ ② $\alpha_1=0.8 \alpha_2=0.2 \alpha_3=0.5$ ③ $\alpha_1=0.9 \alpha_2=0.1 \alpha_3=0.5$

4.3.3 仿真比较

比较 1 无智能积分和有智能积分的模糊控制算法比较

为了检验带有智能积分器的模糊控制器的控制性能, 做混合仿真试验。一方面在同一被控条件下, 将这种控制其与常规模糊控制器的性能对比, 另一方面改变被控对象参数, 分别观察比较它们的鲁棒性。

被控对象选用典型的二阶环节。对第一组对象参数分别调整两种模糊控制器以获得最佳的阶跃响应特性, 然后在固定参数情况下, 再分别改变对象参数。

带智能积分的模糊控制系统阶跃响应和不带智能积分的模糊控制系统阶跃响应如图 4.11 和图 4.12 所示。图 4.13 和图 4.14 分别是图 4.11 和图 4.12 的局部放大图。

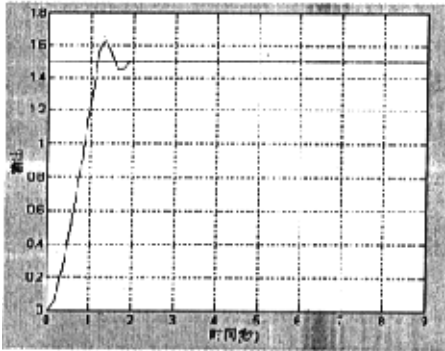


图 4.11 带智能积分模糊控制系统阶跃响应曲线图

Fig4.11 Rank responding curve of Fuzzy control system with intelligent integrator

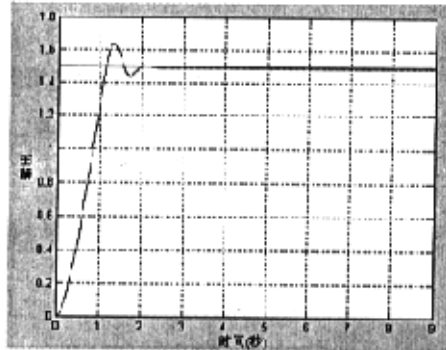


图 4.12 不带智能积分模糊控制系统系统阶跃响应曲线图

Fig 4.12 Rank responding curve of Fuzzy control system without intelligent integrator

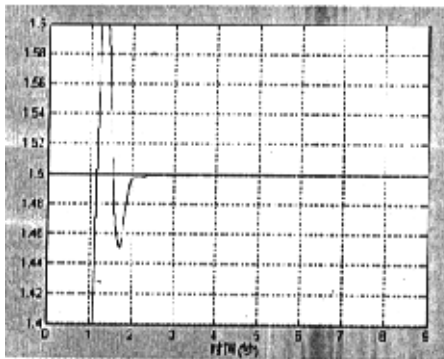


图 4.13 图 4.15 的局部放大图

Fig 4.13 Partial amplification curve of fig 4.15

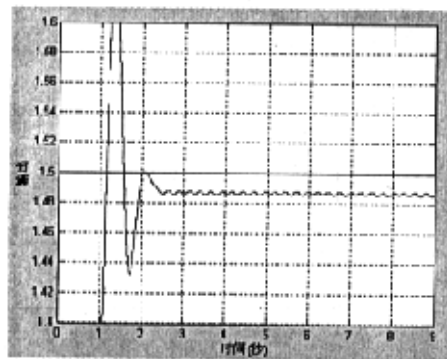


图 4.14 图 4.16 的局部放大图

Fig 4.14 Partial amplification curve of fig 4.16

仿真试验结果表明,这种引入智能积分控制的模糊控制器消除了系统的稳态误差和极限环振荡。同一般的模糊控制器相比,它具有稳态精度高的优点。

当被控对象发生变化时,如由二阶变为一阶或三阶,在模糊控制参数保持不变的情况下,其阶跃响应曲线如图 4.15 所示。上述结果表明,具有智能积分器的模糊控制在对象模型结构发生较大改变情况下,也能获得较好的控制效果,对参数变化有较强的鲁棒性。

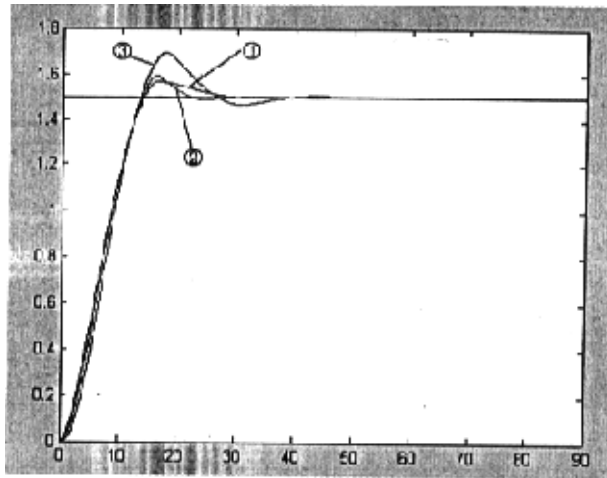


图 4.15 对象模型结构对引入智能积分控制的模糊控制器控制性能的影响

Fig 4.15 Effect of control performance after changing structure of object model

$$\textcircled{1}G_1 = \frac{20}{4s+1} \quad \textcircled{2}G_2 = \frac{20}{(0.4s+1)(4s+1)} \quad \textcircled{3}G_3 = \frac{20}{(0.4s+1)(4s+1)(0.6s+1)}$$

比较 2 改变模型参数时各个算法响应曲线比较

采用上述式(4.1)中的典型二阶模型进行仿真，对其参数 K 、 T_1 、 T_2 变化时的系统阶跃响应曲线进行比较，分析各个控制算法的性能特性。在仿真过程中，我们以式(4.1)为基本对象进行各种算法的参数整定，以后改变 K 、 T_1 、 T_2 来进行仿真，以比较各算法的特性。

当 $T_1=0.4$ ， $T_2=4$ ， $K=20$ 时，即

$$G(s) = \frac{20}{1.6s^2 + 4.4s + 1} \tag{4.6}$$

分别采用四种控制算法时系统的阶跃响应曲线如图 4.16 所示。

当 $T_1=1$ ， $T_2=2$ ， $K=20$ 时，即

$$G(s) = \frac{20}{2s^2 + 3s + 1} \tag{4.7}$$

分别采用四种控制算法时系统的阶跃响应曲线如图 4.17 所示。

当二阶模型为下式时：

$$G(s) = \frac{35}{1.2s^2 + 4s + 1} \tag{4.8}$$

分别采用四种控制算法时系统的阶跃响应曲线如图 4.18 所示。

图中①——算法 1 ②——算法 2 ③——算法 4 ④——算法 5

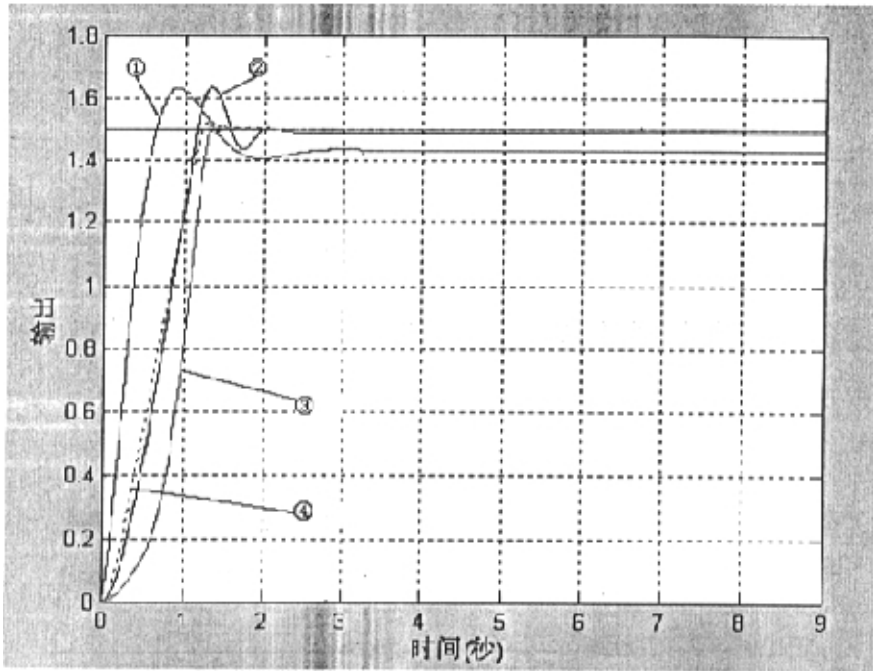


图 4.16 $G(s)=\frac{20}{1.6s^2+4.4s+1}$ 时各算法阶跃响应曲线

Fig. 4.16 Rank responding curve of four arithmetics

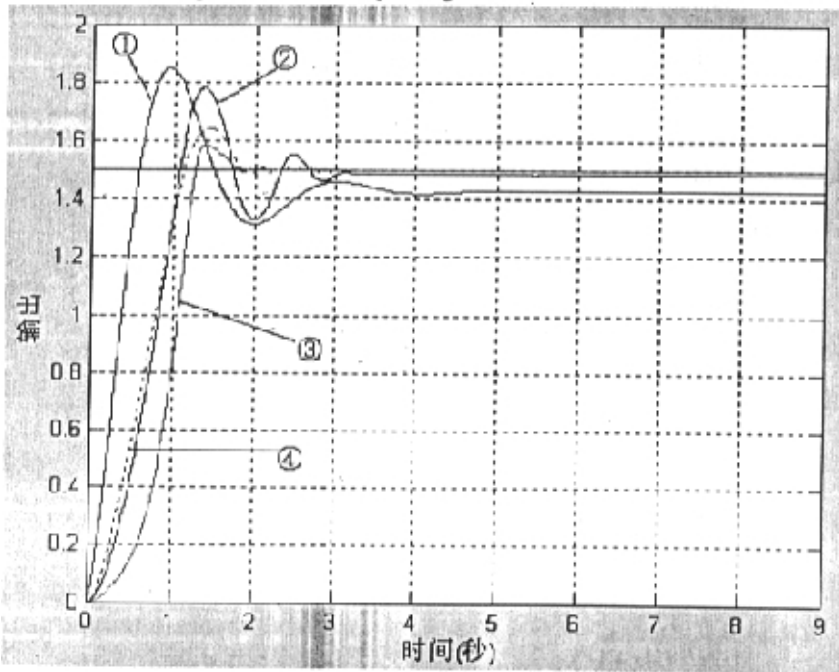


图 4.17 $G(s)=\frac{20}{2s^2+3s+1}$ 时各算法阶跃响应曲线

Fig. 4.17 Rank responding curve of four arithmetics

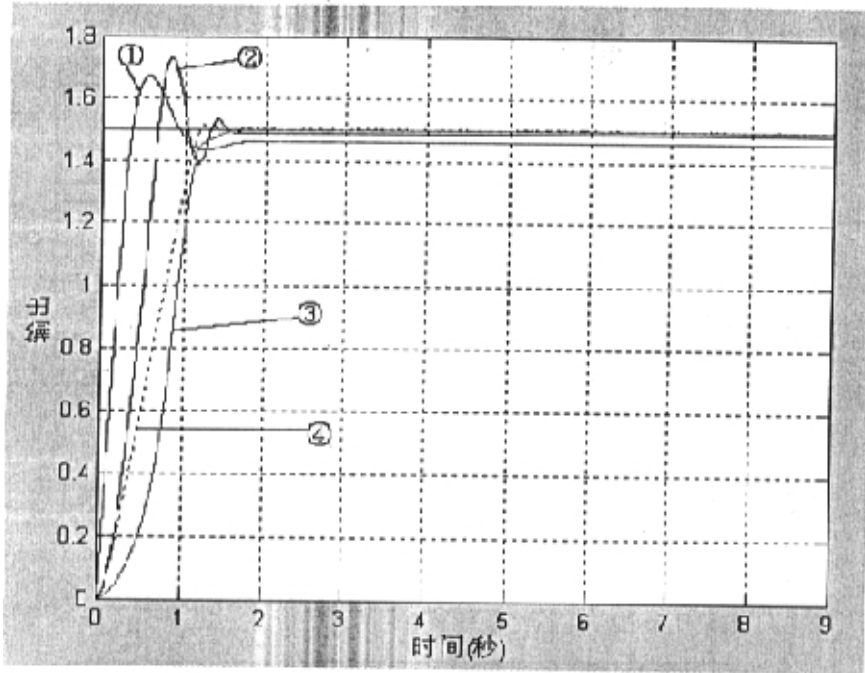


图 4.18 $G(s)=\frac{35}{1.2s^2+4s+1}$ 时各算法阶跃响应曲线

Fig. 4.18 Rank responding curve of four arithmetics

比较 3 抗干扰各个算法响应曲线比较

在仿真过程中，我们以式(4.1)为基本对象进行各种算法的参数整定，然后在不改变参数情况下加入干扰信号如脉冲干扰、随机干扰以及死区、饱和、延迟等非线性环节来进行仿真，以比较各算法的抗干扰特性。

在 $t=4$ 秒时，加入幅值为 5 的脉冲干扰信号，采用四种控制算法时系统的阶跃响应曲线如图 4.19 所示；在 $t=[4, 9]$ 秒时，给系统加入随机干扰信号，采用四种控制算法时系统的阶跃响应曲线如图 4.20 所示；给系统加入死区、饱和及延迟等非线性环节，如图 4.21 所示。

假设系统为 $G(s)=\frac{20e^{0.02s}}{1.6s^2+4.4s+1}$ 。

控制执行结构具有 0.07 的死区和 0.7 的饱和区，取样时间间隔 $T=0.01$ 。从仿真结果图 4.19 至图 4.21 的对比可以看出，模糊控制比 PID 控制的抗干扰性好，波动较小，调节时间短。当给系统加入随机干扰信号后，PID 控制失控，完全不能跟随设定值，算法 2 即自调整比例因子模糊算法的控制性能也不好，但仿人智能模糊控制算法和带修正因子的两级智能模糊控制算法几乎不受影响，表现出很

好的抗干扰性。

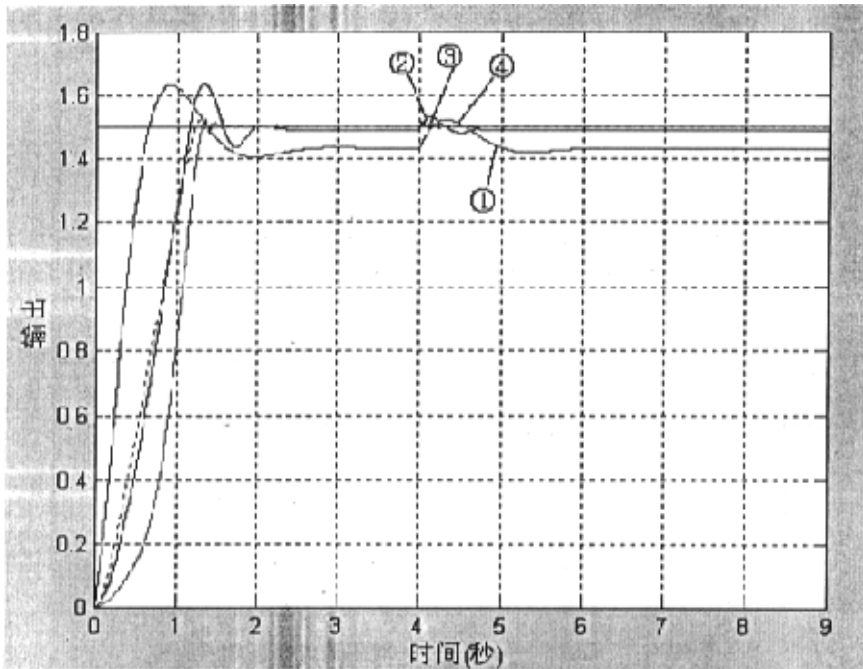


图 4.19 幅值为 5 的干扰下各算法的响应曲线

Fig. 4.19 Rank responding curve of four arithmetics when pulse signal is added

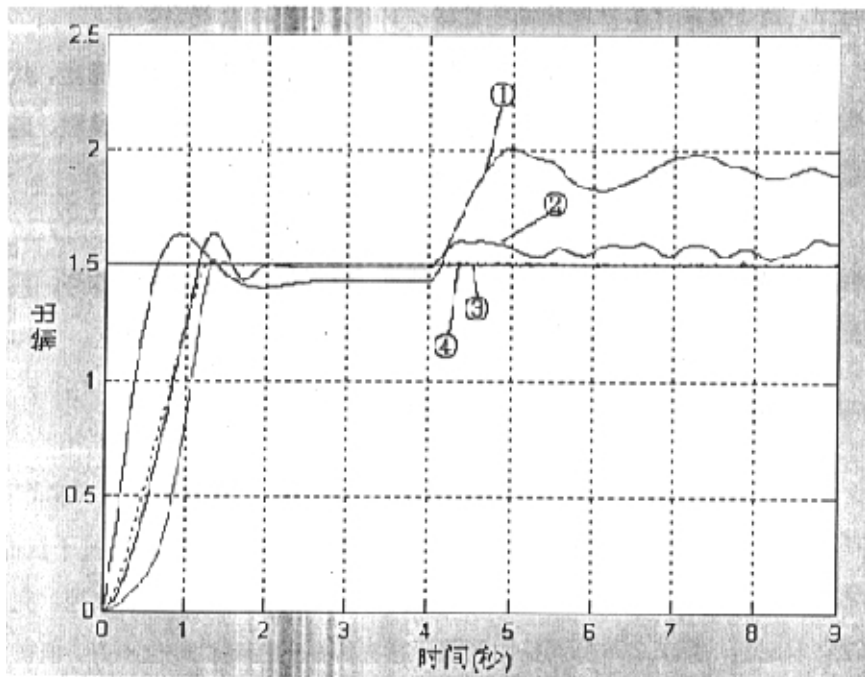


图 4.20 随机干扰信号下各算法的响应曲线

Fig. 4.20 Rank responding curve of four arithmetics when stochastic signal is added

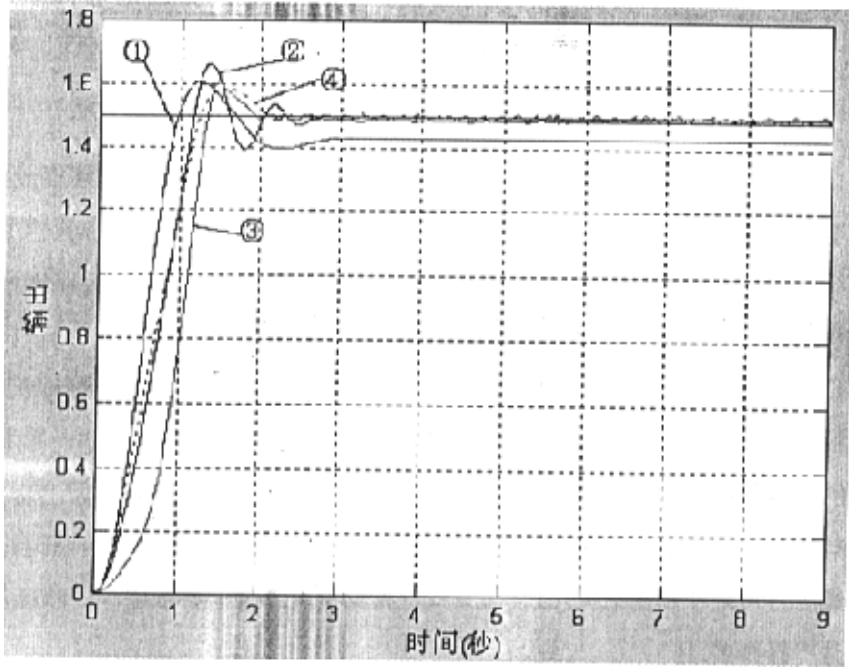


图 4.21 加入死区、饱和及延迟等非线性环节时各算法的响应曲线

Fig. 4.21 Rank responding curve of four arithmetics when nonlinear tache is added

第五章 计算机控制位置伺服实验平台

5.1 引言

由于中试微波催化化学反应系统的搭建成本很高,暂时没有足够资金实验,鉴于实验室的实际条件,本文研究和开发了一个基于计算机控制的位置伺服实验系统,目的在于给本次设计的改进模糊控制理论和今后的各种新型控制理论提供理想的试验和研究工具。

位置伺服系统主要用于解决位置跟随的控制问题,其根本任务就是通过执行机构实现被控量(位置输出)对给定量(位置指令)的及时和准确跟踪。一般是以足够的位置控制精度、位置跟踪精度和足够快的跟踪速度作为它的主要控制目标。系统运行时要求能以一定的精度随时跟踪指令的变化,因而系统中伺服电机的运行速度常常是不断变化的,故伺服系统在跟踪性能方面的要求比一般的调速系统高且严格得多。

5.2 计算机实时控制与本系统相关的几个特殊问题

1. 实时性

在本文的研究过程中,采用流行的 WINDOWS 系统作为运行平台,而 Windows 系统属于非抢先式多任务调度机制,依靠消息驱动,显然不能满足实时系统的要求。定时采样控制需要高精度的定时器,而 Windows 系统定时器使用的是时钟中断,由于 Windows 在初始化时将系统的时钟定时器的计数值设为 65535,输入频率为 1.19MHz,经过定时器分频后,产生 18.2Hz 的时钟,其最小定时精度为 55ms(18.2Hz)。Visual Basic 中自带的 Timer 控件(基于 Windows 消息 WM_TIME 的时钟脉冲发生器)定时不精确,同步性差的缺点。因此,不能满足要求。

采用 CCRP 高性能定时器,它是一种基于 Windows 中断的时钟脉冲发生器,定时精度达到了真正意义上的 0.001 秒,在系统中最多可以建立 32 个定时器。有效的补充了 Visual Basic 等开发工具应用于工控环境的不足,使 Visual Basic 类软件更好的应用于工业控制中。经过实际调用 API 函数 GetTickCount()验证,确实能达到 1ms。本系统利用定时器事件驱动来实现定时采样、控制运算、数据记录、实时曲线的绘制等功能,系统的结构紧凑,可靠性好。

2. 数据采集和变换

数据采集和变换是计算机实时控制系统的重要组成部分，它是计算机与控制对象交换信息的通道。图 5.1 表示数据采集和变换部件方块图。

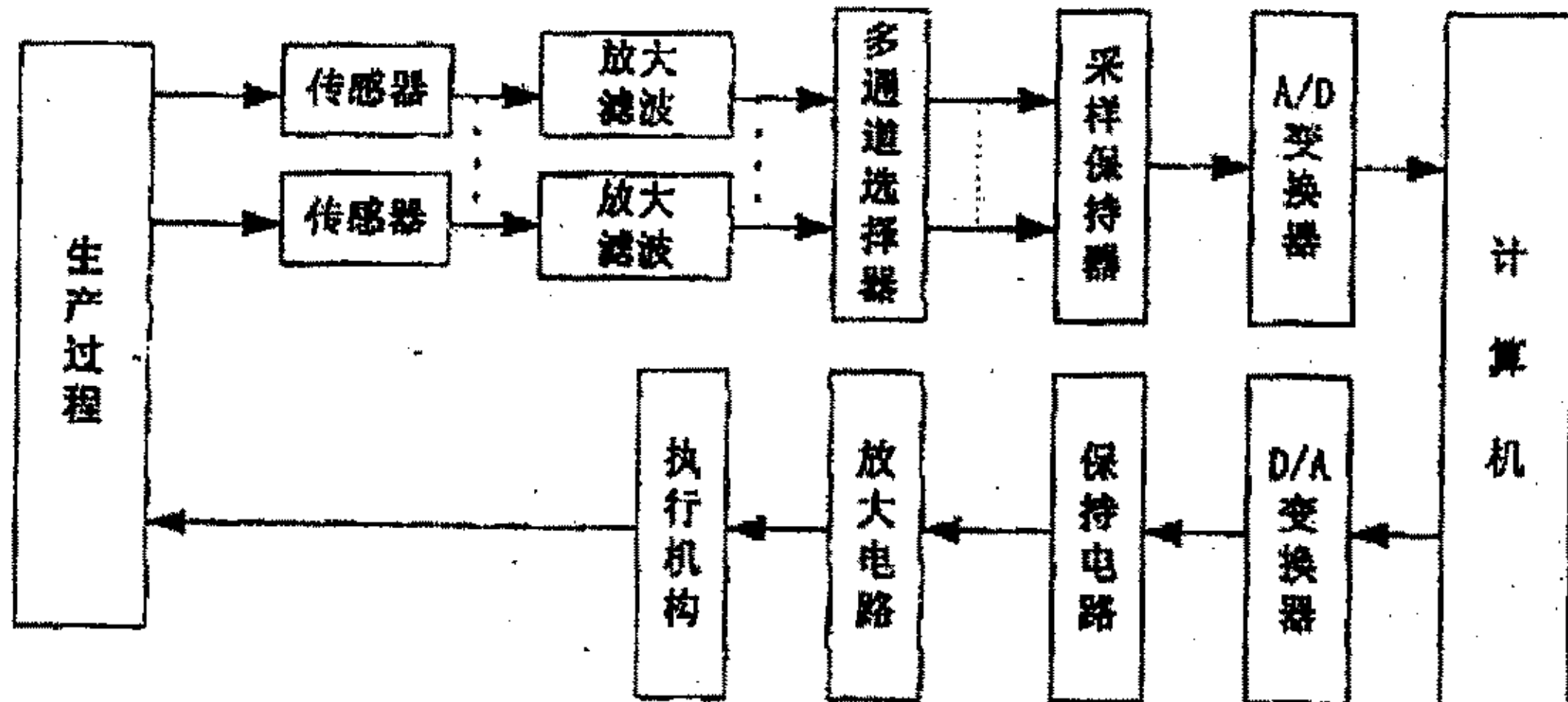


图 5.1 数据采集和变换部件方块图

Fig.5.1 The framework drawing of data acquisition and disposal

多通道选择器实际上是一个多点开关，本文采用软件对通道进行选择；在本系统中由于测量装置是增量式编码器和行程开关，编码器经过方向判别电路之后得到数字信号，不需要对其进行模/数变换，但要进行处理。行程开关信号要经过光电耦合器隔离后才能输入计算机。数据采集采用 PCL-812PG 卡和 PCL-836 卡完成；数/模转换采用 PCL-812PG 卡完成。

PCL-812pg 和 PCL-836 卡属于输入 / 输出(I/O)接口板卡，采用工业 PC/ISA 总线标准，它们主要用于在计算机和控制对象之间的信号变换、传送和数据的采集、处理。两块卡都是 ISA 插槽，控制程序通过虚拟驱动程序读写 ISA 卡的端口地址来实现数据传送。

在分配 I/O 端口地址时，要注意 ISA 卡的端口地址不能和系统现有已分配的端口地址冲突，所以必须首先了解系统现已分配了哪些端口，然后找到未使用的地址通过卡上的跳线来设定基地址，在本系统中将两块卡的基地址做如下分配：

PCL-812PG BaseAddress: 220H

PCL-836 BaseAddress: 240H

考虑到用户在使用时所用主控计算机可能有其他外围设备占用此地址，所以在主程序中可以设定相应的端口地址，当发生冲突时同时更改卡上跳线和主程序

基地址即可重新设定 I/O 端口。

在 PCL-812PG 卡的应用中, A/D 转换电路的触发工作方式主要分为软件触发、定时触发和外触发三种方式。本文选择软件触发编程 A/D。本系统主要采用 PCL-8121PG 卡的模拟输出通道(D/A)和四路数字输入通道,以解决电动机运转的控制电压信号和行程开关、光电编码器的旋转方向信号。

本系统中利用 PCL-836 卡的四个独立计数器测量计算光电编码盘发出的正反转脉冲,通过设定不同的工作方式,得到控制对象的位移、速度。

3. 采样周期

计算机控制本质上是一种采样控制,系统的输入输出信号都是离散信号。采样周期是采样频率的倒数,采样频率太低,会使输入信号与输出信号之间误差太大,将不能真实反映被控对象的运行状态,若低于系统内的最小时间常数还会导致控制失败,所以采样频率应该满足香农定理的要求。采样定理给出了从采样的离散信号恢复到原来连续信号所必须的最低频率。

4. 控制算法

由于本系统是一个研究工具,要尽可能多的提供控制方案,所以系统采用除自己设计和编写的控制算法以外,还实现了主程序和 MATLAB 的连接运行,从而可以方便的运用 MATLAB 提供的大量工具箱函数来实现控制,大大增加了可供选择的控制方案。

5.3 实验平台的硬件构成

本位置伺服系统的硬件总体结构如图 5.2 所示。

本计算机控制系统主要由以下部件构成:

1. 被控对象,在本文研究的伺服系统中是一个小车;
2. 调节装置,在本文研究的伺服系统中是直流电机,装在小车轨道的一端。当其接受输出控制量控制电压时,产生转矩,通过链条带动小车在轨道上滑行;
3. 测量装置,在本文研究的伺服系统中是两个行程开关和一个增量式光电编码盘;
4. 模-数转换器(A/D)和数-模转换器(D/A),在本文研究的伺服系统中是由一块 PCL-812PG 数据采集卡和 PCL-836 计数器/定时器卡加上部分

电路完成的。

5. 数字计算机系统(包括硬件和软件):在本文研究的伺服系统中是指控制用的主机,要求使用主板上至少有两根 ISA 接口插槽的计算机。推荐使用 1GHz 以上 CPU 和 256M 以上内存,因为实验表明,计算机的处理速度对控制程序的实时性影响很大。它在控制系统中主要起控制器的作用,对信号进行加工,形成所要求的控制信号,其次它还要承担数据处理、监督、管理等任务。在本文研究的伺服系统中,它主要承担了对原始数据的采集和对采集来的原始信号进行滤波,计算给定值,计算偏差量,对误差信号调用相应的控制算法子程序,对其进行处理以得到输出信号,当然主机对人机对话和数据的其他操作如保存、分析和打印等功能也是由运行在其上的应用程序完成的。

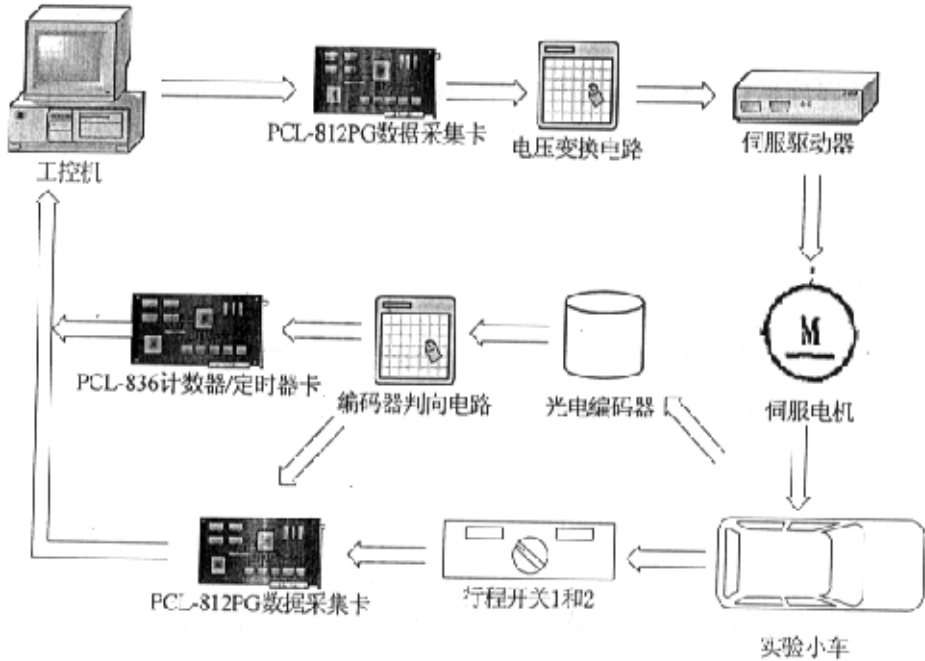


图 5.2 位置伺服系统硬件总体结构

Fig.5.2 The general arrangement drawing of system hardware

5.3.1 D/A 转换与数据转换

1. D/A 转换

数模转换只需将要转换的数字量写入 D/A 的缓冲器中,经过 30 微秒的建立

时间, 相应的电压值就会输出到模拟量输出口 AO, 数字量的数值 DAn 和输出电压的数学关系如下:

$$V_{out} = -V_{ref} \times \frac{DAn}{2^{12}} = -V_{ref} \times \frac{DAn}{4096} \quad (5.1)$$

V_{ref} 是参考电压, 取值根据跳线可以为 -5 伏或 -10 伏, V_{out} 是输出电压, DAn 是 D/A 数字缓冲器里的数字量, 范围从 0 到 $2^{12}-1$, 完成 D/A 转换前, 需要通过跳线设定参考电压。本系统取参考电压为 -10 伏。

注意, D/A 寄存器是“双缓冲的”, 这样 D/A 模拟输出信号直到第二个高字节被写入后才被刷新, 这个过程可以保证 D/A 转换的单步骤转换。因此, 当向 D/A 缓冲器写入数字时, 必须先写低位, 因为缓冲器将暂时挂起, 不转化并输出, 当高位被写入后, 高位和低位相加, 然后送到 D/A 转换器, 只要高位写入, 转换就自动触发。

2. 输出控制量的转换

由计算机上 PCL-8121PG 卡输出的电压信号为 0~10 伏, 由于输出功率仅来自于计算机主板上的电源, 不能提供较大的驱动能力, 而且输出量为单极性正值, 无法直接驱动伺服电机做正反旋转, 因此, 要使输出信号能够正确地驱动伺服电机转动, 必须要提供相应的功率放大和电压转换。功率放大将在伺服驱动电路中详细介绍。电压转换电路设计成双极性变换电路。

该电路模块的功能是它把 PCL-812 卡的模拟输出通道 1 的输出电压(0~10V)转换成双线性控制电压(-7.5V~7.5V), 以实现正反两个方向的可逆旋转。主要原理是应用运集成放的线性减法器原理, 其中运放选用 RC4558。

双极性变换电路详见图 5.11。

3. 行程开关信号的转换

行程开关的开关量信号是由触点吸合和断开产生, 可能会引起瞬间的高电压、过电压、接触抖动以及噪声等干扰。为避免这些干扰, 提高系统的抗干扰能力, 采用光电耦合器作为输入开关量信号的抗干扰隔离元件。

信号转换电路使得行程开关的通断变成输入电平的高和低。光电耦合器的输入端的工作电流 I_F 一般为 10mA, 这样就可以保持较大的电流 CTR, 使得输出端的光敏三极管集电极电流 I_C 比较稳定。

5.3.2 伺服驱动电路

本文设计的伺服驱动电路采用的是 PWM 伺服驱动系统的工作原理。

1. L292 芯片

本文采用了伺服电机控制的智能化功率集成电路 (Smart Power IC) L292, 把具有不同功能的功率单元, 逻辑单元、传感单元、调节控制单元和保护单元集成在一起, 具备了“电路”的功能。

L292 集成芯片是意大利 SGS 公司专为直流电机控制而设计的。它是一个 15 脚多瓦数 (Multiwatt) 塑封智能化功率集成电路, 其引脚接线图如图 5.3 所示。L292 的主要功能是: 驱动能力为 2A, 36V, 1~30kHz (调制频率可在外部设定); 双逻辑复原输入; 外设环路放大系数调整; 单电源供电 (18~36V); 输入信号对称; 过载保护及电源欠电压保护。

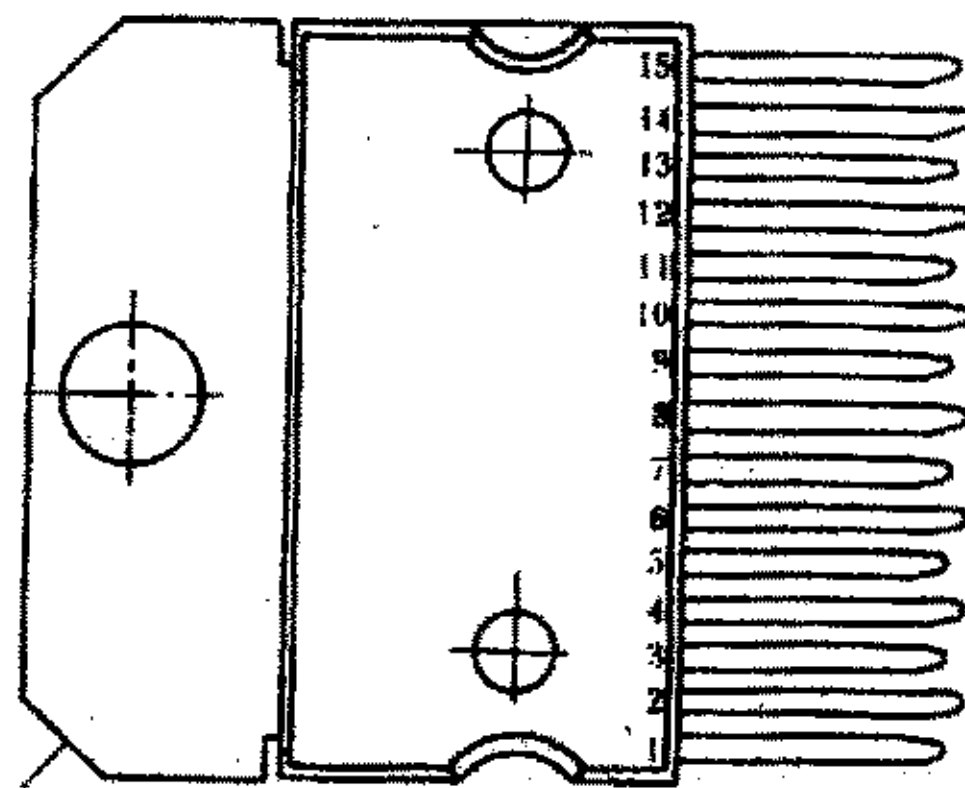


图 5.3 L292 引脚接线图

Fig. 5.3 The connection diagram of L292

1, 5—电动机 2— R_{s2} 3— $+U_s$ 4—比较器输入 5—输出 CSA 6—输入 7—误差放大器输入 8—接地
9—误差放大器输出 10—振荡器 C 11—振荡器 R 12—抑制 (CE2) 13—抑制 (CE1) 14— R_{s1}

L292 是第三代功率集成电路, 其内部包含有一个功率跨导放大器, 其供给直流电动机的电枢电流与来自 L292 的控制信号成正比, 有效的以 PWM 工作方式驱动电机。L292 芯片内部还包括电流检测及电流调节器, 电流调节器的参数和反馈滤波器的参数可从外部调整, 因而可实现电流的闭环调节控制。芯片内部还设有电平移动环节 (由于是单电源供电), 以实现电机的可逆运行。为避免 H 型主回路桥臂出现共态直通故障, 芯片内设置了 PWM 脉冲前后沿错开电路 (即

开通延迟电路), 其延迟时间与调节周期成正比。

L292 的结构原理图如图 5.4 所示。

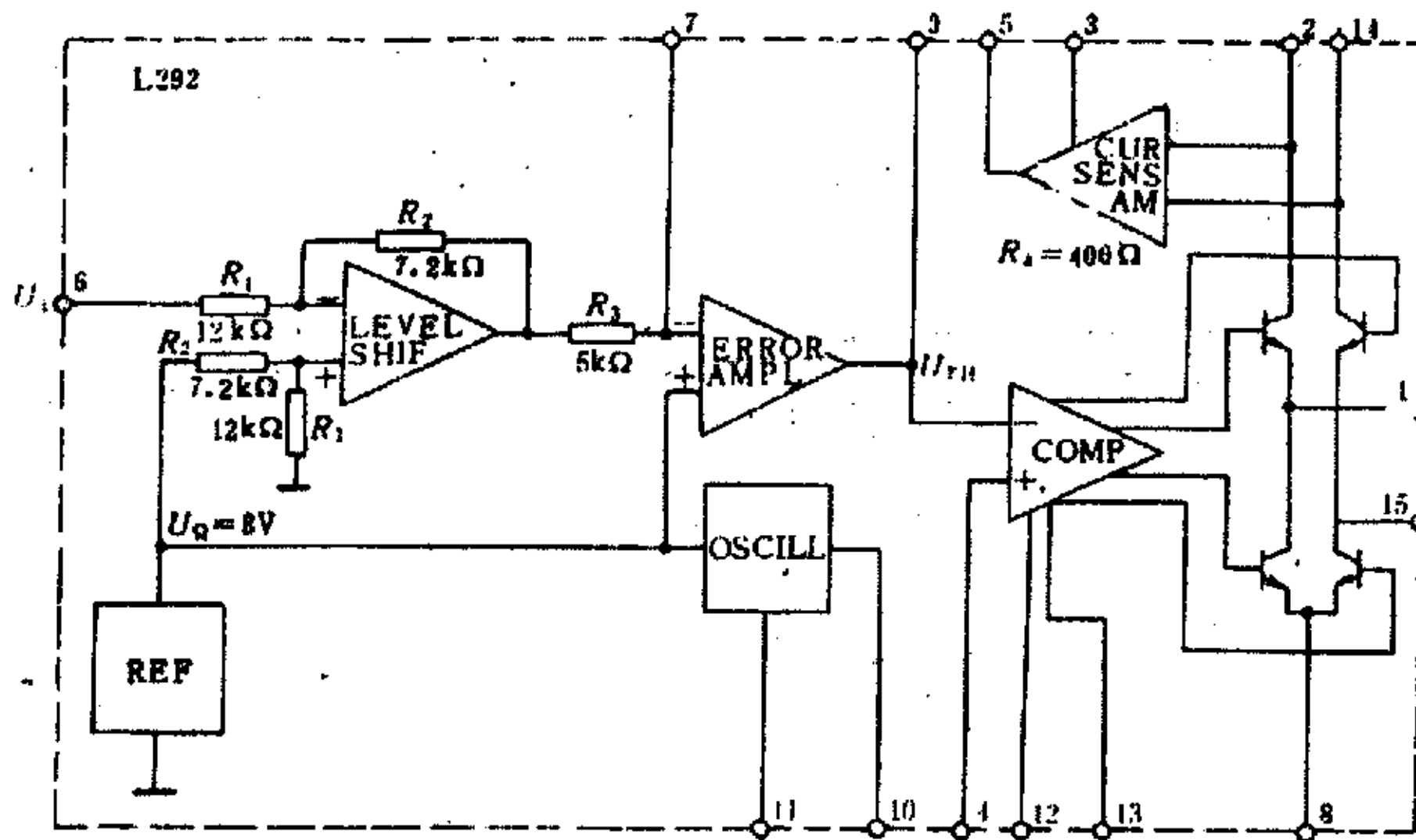


图 5.4 L292 的内部结构图

Fig. 5.4 The inner construction drawing of L292

2. 伺服驱动电路的搭接

本文利用 L292 芯片设计了计算机控制位置伺服实验系统的驱动电路, 根据该芯片的性质选择合适的外接电路元件。6 脚为芯片的输入信号即计算机给出的控制电压信号。根据引脚 12、13 的逻辑电平真值表把 13 引脚接电源, 12 引脚接地, 使芯片能正常工作。引脚 10 和 11 外接电阻和电容构成 RC 振荡电路。具体元器件及其电路如图 5.5 所示。

但实验结果表明, 按图 5.5 所接电路驱动本系统选用的直流电机效果并不理想。因为 L292PWM 驱动器在 36V 电源作用下最大能提供 2A 电流至电机, 在普通仪表伺服系统中使用是足够的。然而, 在诸如本文所用的较大功率电机或机器人驱动、机床进给等大功率应用场合, 不足以应用。基于此, 本文重新采用在基本线路上外加功率扩展级的方法使该芯片能应用于较大功率电机。选择四只大功率晶体管 (V1~V4) 和续流二极管 (VD1~VD4) 以及电流取样电阻 (R7、R8), 这样, 该电路能够输出 4A 的电流, 足以驱动电机。实际线路如图 5.6 所示。

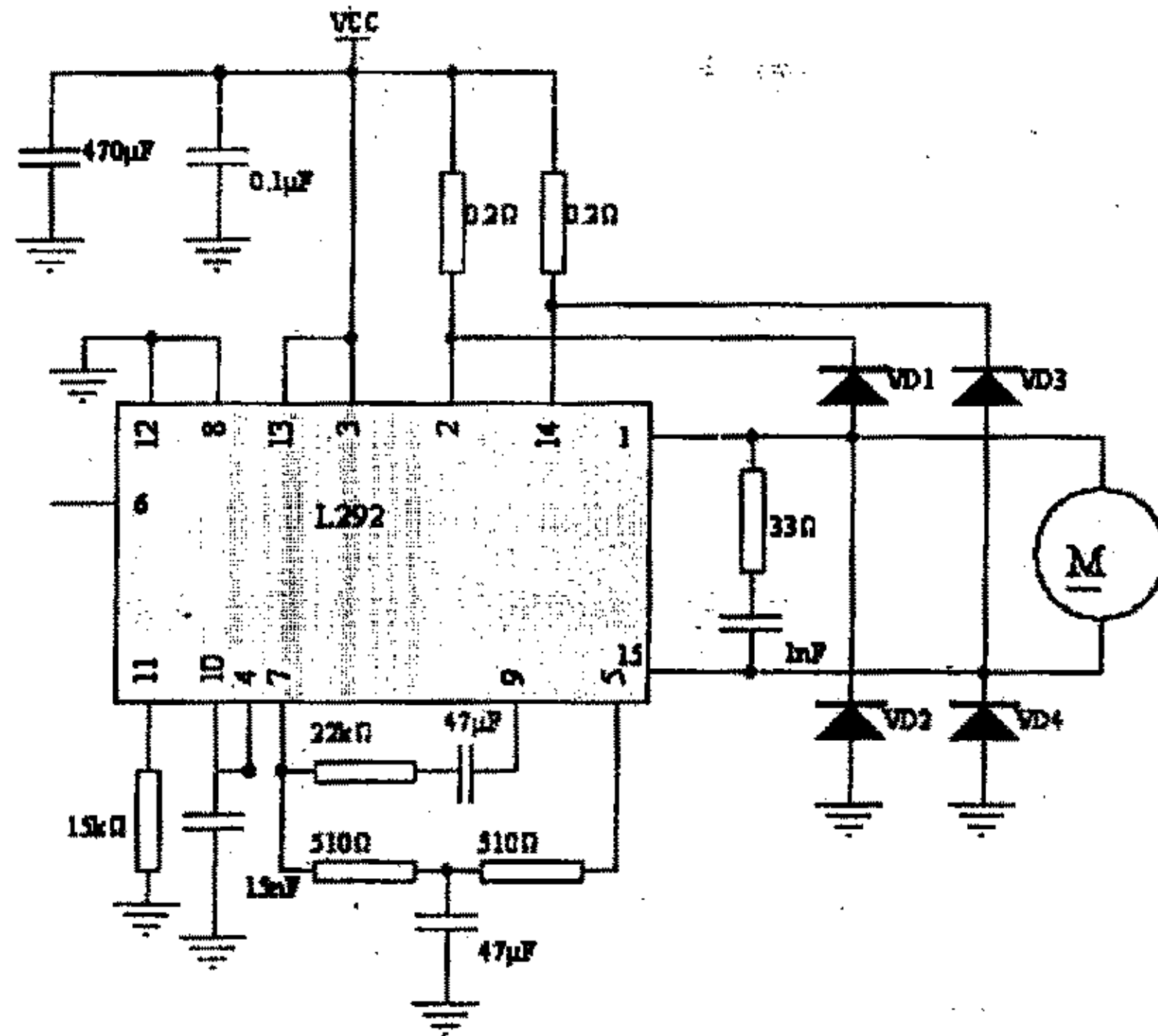


图 5.5 L292 的应用电路

Fig. 5.5 The application circuit of L292

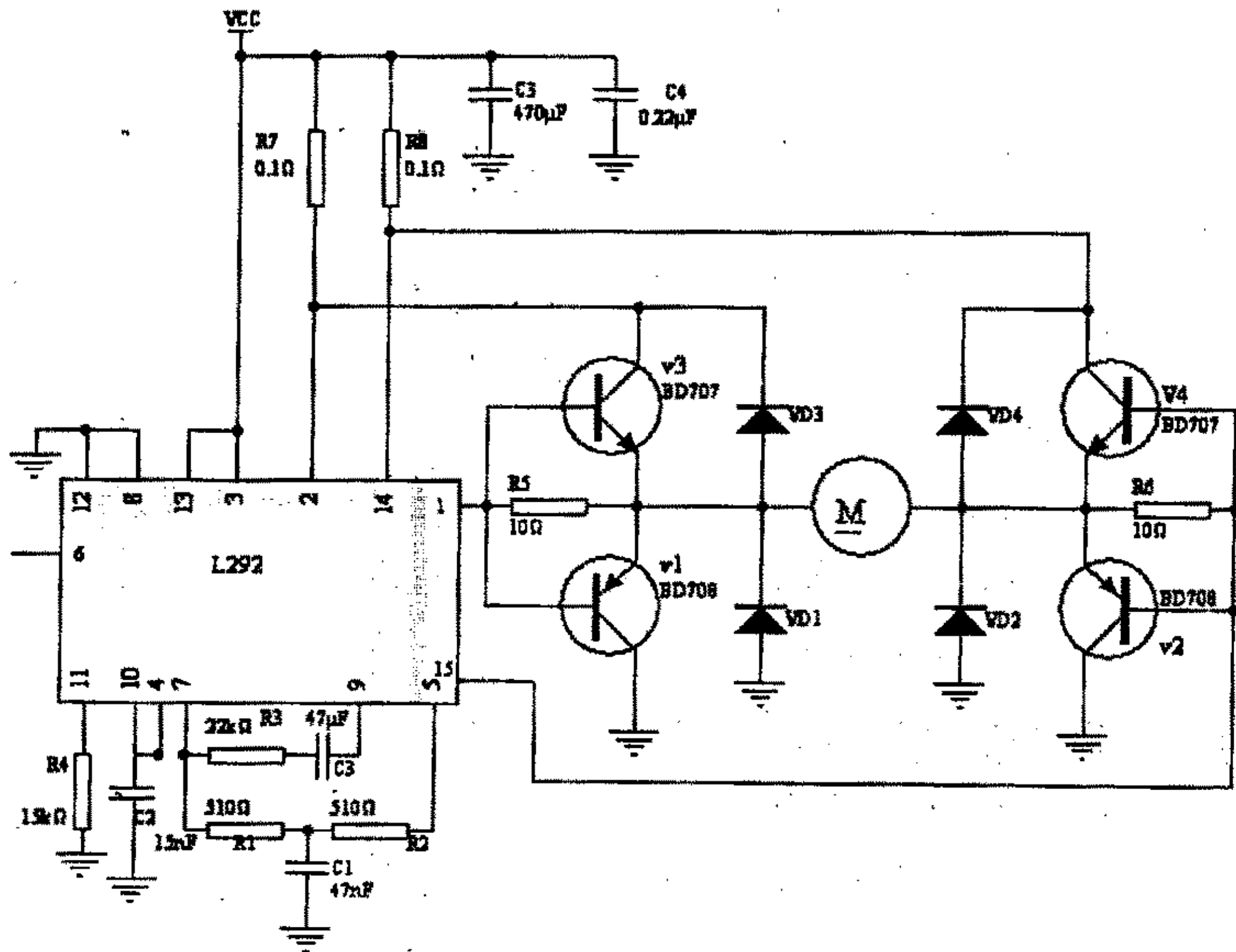


图 5.6 L292 利用外接晶体管扩展功率的电路

Fig. 5.6 The power extend circuit of L292

3. L292 的电源设计

L292 芯片采用单电源供电 (18~36V)。利用实验室现有设备 30V 交流电压源, 本文设计了电源电路如图 5.11 中所示, 把 30V 交流电压变成稳定的 L292 芯片可用的 36V 电压。整个电源电路分为三部分: 整流、滤波、稳压。

a. 整流部分:

交流电压信号通过整流电路变成单方向的直流电压。为了提高整流的效率, 采用全波整流, 即正负半周都有电流按同一个方向流过负载。本文采用了桥式整流电路, 它与电桥的结构相似。

选择整流管主要是从最大整流电流和最高反压两方面考虑。对于桥式整流器, 每只二极管都只是半周导通, 故流过每只二极管的电流只是输出电流 I_3 的一半, 考虑到浪涌等因素, 常取整流电流为

$$I_f = 1.5\left(\frac{1}{2}I_3\right) = 0.75I_3 \quad (5.2)$$

整流管处于反向时两端电压的最大值 U_{RM} 必须大于变压器次级电压的峰值 $\sqrt{2}U_2$, 在电网电压最高时, 整流管承受的反压 U_{RM} 应满足

$$U_{RM} \geq \sqrt{2}U_2(1+10\%) \quad (5.3)$$

由 I_f 和 U_{RM} 选择整流管或组合整流管 (整流桥堆)。

b. 滤波部分:

经过整流的直流电幅值变化很大, 是脉动大的直流电。若作为电源去供给电子电路时, 电路的工作状态也会随之变化而影响性能。利用截止频率低于整流输出电压基波频率的低通滤波电路, 将脉动大的直流电处理成平滑的脉动小的直流电, 将其中的交流成分滤掉只留下直流成分。

本文选用的是电容滤波电路, 利用电容器两端的电压不能突变的特点, 将电容器和负载电阻并联, 达到使输出波形基本平滑的目的。该电路的输出波形很难用解析式表达, 常常采取近似估算。

估计滤波电容 C_6 , 从滤波效果来看, C_6 宜取大值, 但 C_6 过大, 相应的体积和漏电都将增大。一般在整流内阻不太大而 $R_L C$ 比较大 (例如, $R_L C = (3 \sim 5)\frac{T}{2}$)

时, 可近似认为 $U_{O(AV)}$ 值应在 $1.4U_2$ 和 $0.9U_2$ 之间, 即

$$U_{O(AV)} \approx 1.2 U_2 \quad (5.4)$$

与之相对应的 $R_L C \approx 1.75T$.

c. 稳压部分:

电压值受电网电压波动和负载变化的影响。稳压电路的作用就是在这两种情况下, 将输出电压基本稳定在一个固定的数值。本文采用的是稳压管稳压电路。

稳压管也是一种半导体二极管, 正常工作的条件有两条: 一是必须工作在反向击穿状态; 二是稳压管中的电流要在稳定电流和允许的最大电流之间。当电压或负载变化时, 稳压管中的电流发生变化, 但在一定范围内其两端电压变化很小, 即能起到稳定输出电压的作用。稳压管的稳压原理可以认为是利用调节流过自身的电流大小(端电压基本不变)来满足负载电流的改变, 并和限流电阻器配合将电流的变化转换成电压的变化以适应电网电压的波动。

选择合适的限流电阻器。限流电阻器的主要作用是当电网电压波动和负载电阻变化时使稳压管的工作点始终在稳压工作区内, 即 $I_{Zmin} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$ 。设电网电压最高时整流输出电压为 U_{Imax} , 最低时为 U_{Imin} , 负载电流最大时为 $\frac{U_Z}{R_{Lmin}}$, 最

小时为 $\frac{U_Z}{R_{Lmax}}$ 则电阻器的阻值必须满足以下条件:

$$R > \frac{U_{Imax} - U_Z}{R_{Lmax} \cdot I_{Zmax} + U_Z} \cdot R_{Lmax} = R_{min} \quad (5.5)$$

$$R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{R_{Lmin} \cdot I_{Zmin} + U_Z} \cdot R_{Lmin} = R_{max} \quad (5.6)$$

根据式(5.5)和式(5.6)可知限流电阻的范围是 $R_{min} < R < R_{max}$ 。

5.4 控制系统软件设计

控制计算机通过运行在自身上程序完成数据采集、转换、输出、控制算法的实现、与用户操作的响应接口、定时、纠错等等工作, 一个采样周期内控制动作的实现需要系统的各个部分相互配合, 各任务之间的良好的协调都要由程序来实

现,由此可见控制程序的重要性,在实时控制系统中这些任务变得尤其困难,所以计算机控制中控制程序的好坏是系统性能的关键。

本系统中的应用主程序是用户实现控制方案的通道,一切与外界的信息交换,内部的任务触发和协调都是由它来实现,控制程序与应用程序配合完成控制算法,是整个系统的核心。

5.4.1 软件的总体架构

本系统采用 Visual Basic (简称 VB) 作为开发工具。虽然 VB 不具备直接对硬件 I/O 地址进行访问的函数,但通过使用 Windows 内部的应用程序接口 (API) 函数以及动态链接库 (DLL) 等技术,能大大扩展其应用功能。

根据实际应用的需要,软件进行编程时划分为以下几个模块:

- (1) 用户接口模块:主要负责接收用户输入信息,反映当前状态,还包括数据的保存、读写、实时动画过程显示等。
- (2) 数据采集模块:负责定时、数据采集与滤波和对数据进行转换等。
- (3) 控制模块:完成当前控制算法,实现和 MatLab 接口与数据通讯。
- (4) 图形操作模块:完成实时曲线的绘制和为方便用户分析曲线而完成的鼠标读图、缩放、复制图片等功能。

具体的结构如图 5.7 所示。

1. 数据采集模块编程

动态链接库(DLL)实质上是 Windows 环境下的一种特殊可执行模块,它包含一系列函数和资源,供一般的应用程序或其它动态链接库来调用。API 是由操作系统支持的函数定义、参数定义和消息格式的集合,应用程序可借助 API 函数进行处理,API 函数提供 Windows 所执行的所有系统服务。API 函数也是通过调用动态链接库来实现的,利用 API 函数可以实现 SDK 的功能。在 VB 中使用 DLL 中的函数,首先必须要有特殊的声明,用 Declare 声明语句在窗体级、模块级或全局模块的代码声明段进行声明,将动态链接库中的函数声明到 VB 中,供 VB 应用程序调用。语句格式:

Declare Function 函数名 Lib "库名" ([ByVal 参数 As 类型])As 类型

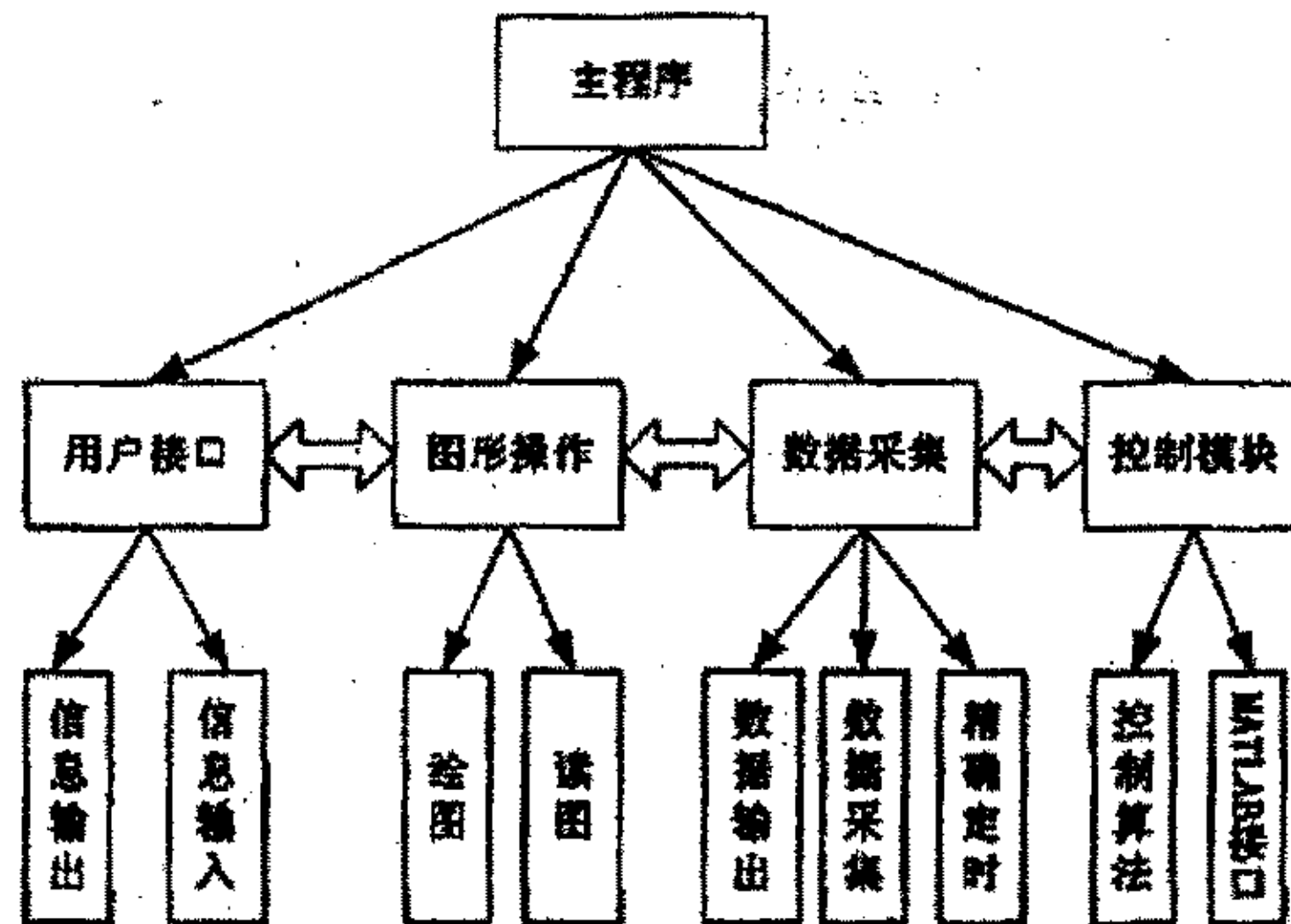


图 5.7 控制软件的功能模块

Fig: 5.7 The constitute diagram of control software

同样，调用 API 函数也须遵守这样的格式，Windows API 函数的三大类动态链接库主要有“User、Kernel、GDI”。其中 gdi32.dll—图形显示界面的 API，kernel32.dll—处理低级任务的 API，user32.dll—处理窗口和消息的 API。在声明语句中，参数、返回值的类型必须与动态链接库（DLL）中的相应参数、返回值的类型相一致，这样才能保证参数传递的正确。动态链接库（DLL）和 API 函数一经声明，就可以在 VB 开发的应用程序中跟通用函数一样，使用库中处理函数。

PCL-812PG 卡和 PCL-836 卡的使用就是通过 DLL 来实现的，调用相应的函数实现初始化（基地址设置）、设置数字输入通道（DI）、模拟输出（DA）、计数器的写操作（设置工作方式和写入值）、计数器的读操作等等。CCRP 定时器也是调用 DLL 的函数。程序中使用的具体函数如下：

812 卡基地址设置: `W_812pg_Initial(int card_number,int base_addresses)`

836 卡基地址设置: `W_830_Initial(int base_address)`

812 卡数字输入: `W_812pg_di_Channel(int di_ch_no,unsigned int dada)`

836 卡数字输入: `W_830_Read_Counter(int CntrNo,unsigned int dada)`

812 卡模拟输出 (D/A): `W_812pg_DA(int da_ch_no, unsigned int dada)`

其中 `di_ch_no`、`CntrNo`、`da_ch_no` 为数字输入和 D/A 转换的选用通道；

`dada` 分别为读入数存放地址和 D/A 转换值。

812 卡模拟输入 (A/D):

`result = W_812pg_AD_Set_Gain(1)`

```
result = W_812pg_AD_Set_Channel(0)
```

```
result = W_812pg_AD_Aquire(k)
```

其中设置转换通道为 0, 增益为 1, k 为 A/D 转换得到的值, 它的范围是 -32768~32767。

CCRP 定时器主要包括 CCRP.dll 文件, 通过调用动态链接库来实现的。使用前在窗体模块上声明定时器 1 (Timer1):

```
Private WithEvents Timer1 As ccrpTimer
```

就可以产生一个 Timer 事件, 同时在窗体加载中初始化 ccrpTimer 对象:

```
Set Timer1=New ccrpTimer
```

初始化后就可以设置 ccrpTimer 的各种属性, 时间间隔 (Interval)、Enabled、EventType、Notify、Stats、Tag 等。

另外, 由于上文所使用的函数都是动态链接库 812pg.dll 和 830.dll 中的函数,

```
例如: Declare Function W_812PG_Initial Lib "812pg.dll" (ByVal card_number As Long, ByVal base_address As Long) As Long
```

```
Declare Function W_813_Initial Lib "813.dll" (ByVal card_number As Long, ByVal base_address As Long) As Long
```

所以必须安装 PCL-812PG 和 PCL-836 卡的驱动程序 PCLS-DLL2。PCLS-DLL2 是 Evoc 公司为其生产的多功能卡 PCL-812PG 等编写的 Windows 驱动程序, 能和 VB 等编程语言共同使用调用动态链接库。具体调用过程如图 5.8。

2. 控制模块编程

程序提供与 MatLab 的接口, 用户可直接在程序中调用 MatLab, 用 MatLab 语言编辑控制算法, 然后可在本程序中配合运行, 直接控制被控对象。控制程序调用用户自行编写的算法子程序得到结果作为控制器输出, 用户只需考虑系统当前信息与当前输出间的关系和算法实现, 有关的数据转换由主程序完成, 用户不必考虑。

程序与 MatLab 的接口实际上是一个运行于 MatLab 环境下的函数, 用户可将自己的控制算法编写成一个函数, 以当前传入的系统信息如: 小车的当前位置, 当前误差及变化率等为函数参数, 经过函数的运行得到结果, 结果必须是当前控制器送到被控对象的输出量, 如控制电压。

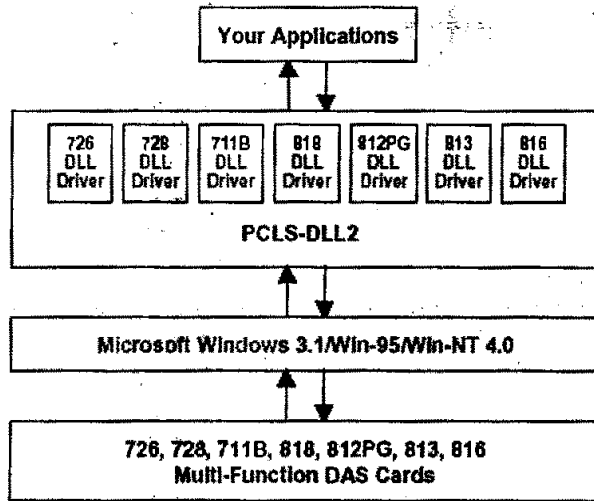


图 5.8 应用程序访问 PCL 卡的过程

Fig.5.8 The diagram of interface between applications and PCL

5.4.2 MATLAB 引擎与进程间通讯

在本章引言中曾经提出：本系统的研发目的是为理论研究和教学提供理想的实验工具。作为一个控制系统试验平台，仅能进行有限的以两种控制方案验证是远远不够的，软件的功能必须有足够的可扩展性，可是控制系统本身是多种多样的，控制规律的实现要求有多种复杂的程序结构，这对一般的开发能力而言是不可能达到的。而 MatLab 已经被证明是在应用数学、物理、工程学和其它涉及复杂数值计算等领域中解决问题的优秀工具。

VB 是十分优秀的高级程序设计语言，但其在数据处理分析和算法工具等方面，效率远远低于 MatLab 语言。在准确方便地绘制数据图形方面，MatLab 语言具有 VB 无法比拟的优势。但 MatLab 作为一种以解释方式运行的计算机语言，其程序的执行效率较低，而且不能实现端口操作和实时控制。因此，将两者结合运用，实现优势互补，将获得极大的效益。

但令人遗憾的是 MatLab 只有供 C 和 Fortran 语言使用的编程接口，这对本系统用 VB 编写的程序来说不便。通过 ActiveX 与 DDE 技术，即可在 VB 程序中调用 MatLab 的函数，也可在 MatLab 中调用 VB 程序，从而实现 MatLab 与 VB 混合编程，充分发挥两者各自的优势。

本系统采用和 MatLab 进行混合编程的方式来在控制中调用 MatLab，通过程

序来实现对系统硬件接口的访问和用户界面, 而通过 MatLab 来实现控制算法和试验结果图形的绘制, 从而可以利用 MatLab 强大的绘图功能和控制系统工具箱、模糊控制工具箱等功能, 大大扩展了系统控制方案实现的范围。

1. 实现 Matlab 与 VB 混合编程基本原理

ActiveX 是一种开放式标准, 它允许应用程序或部件控制另一个应用程序或部件的运行。ActiveX 部件是 Microsoft 公司提供的一种用于模块集成的新协议, 由一些遵循 ActiveX 规范的可执行代码组成, 比如一个 .exe, .dll 或 .ocx 文件。在程序中加入 ActiveX 部件后, 它将成为开发和运行环境的一部分, 并为应用程序提供新的功能。ActiveX 部件保留了一些 VB 普通控件的属性、事件和方法, 其特有的方法和属性大大地增强了程序设计者的能力和灵活性。

当前的新软件一般都支持 ActiveX 部件的嵌入, MatLab 语言也不例外, 它可以通过 ActiveX 技术与其他任何应用程序作接口, 如 VB, VC++, Access 等。这使得 MatLab 语言可以集成其他软件的优点, 进一步加强自己的功能。MatLab 提供了一个自动化对象, 其外部名称是 MatLab.Application, 它支持 COM 技术, 而其他程序通过 COM 技术提供的函数得到自动化对象支持的接口指针, 通过调用接口函数便可控制和使用自动化对象了。

由于 VB 支持 ActiveX 自动化控制端协议, MatLab 支持 ActiveX 自动化服务器端协议, 因此如果已经建立了一个 VB 应用程序和 MatLab 之间的 ActiveX 自动化连接, 那么在一个应用程序中就可以调用 MatLab 的命令了。

2. MatLab 自动化服务器

将 MatLab 作为一个自动化服务器使用, 首先必须查阅所希望的自动化控制器的文档, 查明如何在控制器中开启一个自动化服务器, 其次必须知道 MatLabActiveX 对象在系统注册表中定义的名字, 即 ProgID, 一般可以使用 MatLab.Application 或者使用 MatLab.Application.single, 它们分别代表了不同的含义。前者表示将 MatLab 自动化服务器作为一个共享的服务器, 后者表示将 MatLab 自动化服务器作为一个单独的服务器使用, 而不与别的应用程序共享。知道了这两方面的信息, 就可以开启 MatLab 自动化服务器了。具体操作如下:

- (1) 首先在你的机器内安装 MatLab。为了在 Windows 的注册簿中登录关于 MatLab 的 ActiveX 项, 需要在 MatLab 安装完成以后以命令行

形式执行下列命令: `MatLab/regserver` 这个命令只要执行一次就可以了, 除非你移动了 MatLab 在你硬盘内的位置。

- (2) 在 VB 应用程序中创建 ActiveX 对象。下面的一段程序源代码实现在 VB 中开启 MatLab 自动化服务器功能:

```
Dim MatLab As Object
Set MatLab = CreateObject("MatLab.application")
```

如果需要在启动时直接将 MatLab 初始化为一个自动化服务器, 只需在启动时使用参数/Automation 即可。创建好一个 ActiveX 对象后, 就可对此对象进行操作, 如同在 VB 中对其他对象的操作一样。

3. ActiveX 对象的操作

Matlab.Application 对象主要有 5 个方法, 分别是 Execute, GetFullMatrix, PutFullMatrix, MinimizeCommandWindow, MaximizeCommandWindow, 通过它们, 用户不但可以在 MatLab 中执行其命令, 而且可以向 MatLab 输送数据, 同时还可以从 MatLab 中获取数据。用法简要介绍如下:

- (1) STRExecute([BSTRCommand]);

执行 Execute 方法将调用 MatLab, 执行一条由 Command 字符串决定的 MatLab 命令, 所有在 MatLab 命令窗口可键入的命令在此都可使用, 同时返回命令的执行情况, 绘图命令生成的图形窗口将显示在屏幕上。举例如下:

```
Dim MatLab As Object
Dim result As String
Set MatLab = CreateObject("MatLab.application")
result = MatLab.execute("plot(a, b)")
```

- (2) GetFullMatrix ([in]BSTRName,
[in] BSTRWorkspace,
[in, out]SAFEARRAY(double) pr,
[in, out] SAFEARRAY (double) pi);

GetFullMatrix 方法将指定的 MatLab 工作空间中的一个一维或二维数组送到 VB 程序中, Name 指定了 MatLab 中的矩阵变量名, Workspace 指定了该矩阵所在的工作空间, pr 和 pi 分别是数组的实部和虚部。

- (3) PutFullMatrix ([in] BSTRName,
[in] BSTRWorkspace,
[in, out]SAFEARRAY(double) pr,
[in, out] SAFEARRAY (double) pi);

PutFullMatrix 方法将 VB 程序中的一个一维或二维数组传达到指定的 MatLab 工作空间中。

- (4) void MinimizeCommandWindow()

这个方法用来使 MatLab 命令行窗口最小化。具体调用如下:

```
Call MatLab.MinimizeCommandWindow()
```

- (5) void MaximizeCommandWindow()

这个方法用来使 MatLab 命令行窗口最大化。具体调用如下:

```
Call MatLab.MaximizeCommandWindow()
```

利用 ActiveX 协议实现从 Visual Basic 6.0 调用 MatLab 绘制一个二维曲线图的例子, 详细程序如下:

```
Private Sub Command1_Click()  
Dim MatLab As Object  
Dim result As String  
Dim h() As Double  
Dim x(0 To 3) As Double  
Dim y(0 To 3) As Double  
x(0) = 0   x(1) = 1   x(2) = 2   x(3) = 3  
y(0) = 1   y(1) = 5   y(2) = 3   y(3) = 2  
Set MatLab = CreateObject("MatLab.application")  
Call MatLab.maximizecommandwindow  
Call MatLab.putfullmatrix("a", "base", x, h)  
Call MatLab.putfullmatrix("b", "base", y, h)  
result = MatLab.execute("plot(a, b)")  
result = MatLab.execute("grid")  
result = MatLab.execute("saveas(gcf, 'c:\flame.bmp')")
```

```

FileCopy "c:\flame.bmp", "c:\whj.bmp"
Picture1.Picture = LoadPicture("c:\whj.bmp")
Kill "c:\flame.bmp"
Call MatLab.quit
Set MatLab = Nothing
End Sub

```

本程序已在一台 Pentium 4 微机上调试通过，在调用上述 VB 子程序前要求在同一台机器内已安装 MatLab，并在 Windows2000 的记录簿上登记了 MatLab 的 ActiveX 项。程序运行结果如图 5.9 所示：

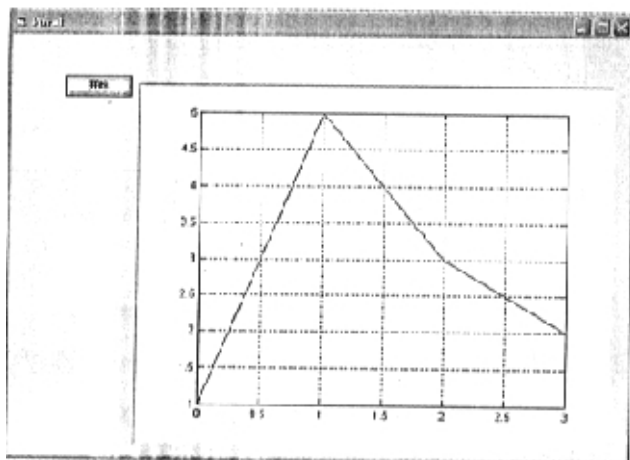


图 5.9 程序运行结果

Fig. 5.9 Output of the program

上述子程序实现将 VB 中的数组传递到 MatLab 中，用 MatLab 绘制二维曲线图。在子程序开始时首先创建一个 MatLab 类型的对象，此举将导致 VB 通过 ActiveX 协议自动激活 MatLab 并打开其命令行窗口，随后调用该对象的 maximizecommandwindow () 方法使其命令行窗口最小化，接着将绘制二维曲线的数据传送到 MatLab 工作区内，并在屏幕上绘出曲线。plot 函数无疑使得二维仿真曲线的绘制大为简化，尤其是避免了在 VB 环境下复杂的重复实现。但根据系统结构的设计思想，仿真曲线应在 VB 环境下输出，因此将 MatLab 环境下的曲线图形以 bmp 格式保存到磁盘文件中。利用 VB 的 Picture 控件调用该位图文件。这样在 VB 窗口上就能直接看到并分析 MatLab 的运行结果了。通过这种混合编程实现了 VB 的可视化界面与

MatLab 强大的图形处理能力的结合, 为程序员提供了极大的方便。

5.5 实验结果

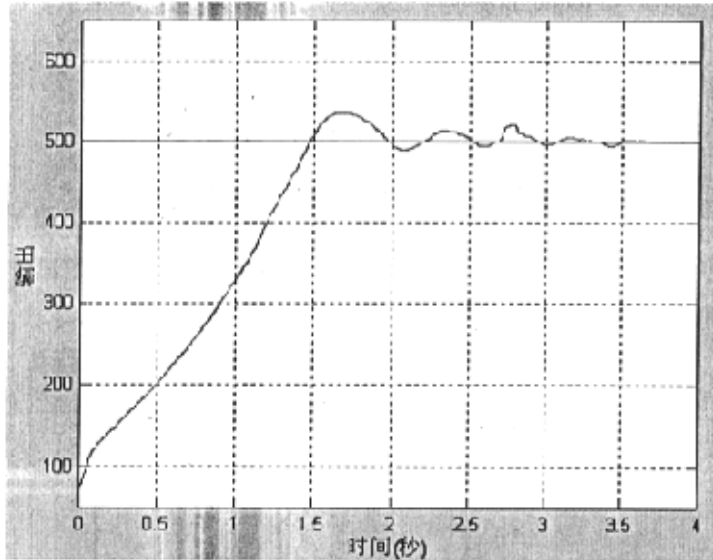


图 5.10 实验结果

Fig. 5.10 The result of vehicle experiment

实验设定小车初始位置为原点 0, 目标位置为 500mm, 通过实验设定采样周期为 0.016 秒, 分别采用 PID、简单模糊控制、改进模糊控制等多种控制器控制系统, 经过大量实际调试, 选择合适的参数, 得到较好得控制效果, 平均误差在 $\pm 1\text{mm}$ 之间。

例如, 当采用 PID 控制算法时, 取 $K_p=0.001$, $K_i=0.0001$, $K_d=0.0000001$ 时, 其实验结果如图 5.10, 稳态误差为 0.2mm, 达到控制精度要求。

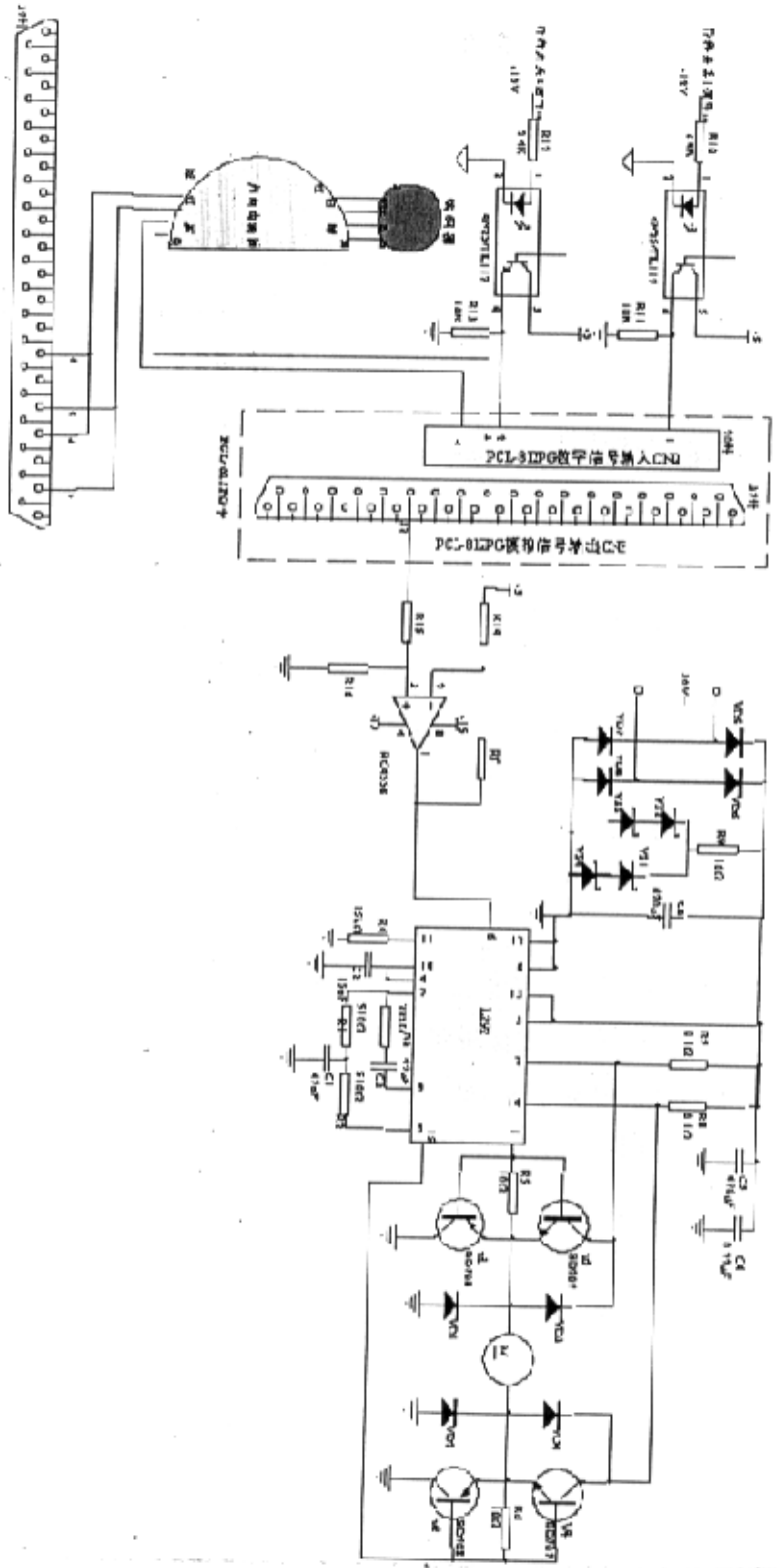


图 5.11 计算机控制位置伺服系统实验接线图

Fig. 5.11 The connection diagram of position servo system based on industrial computer control

第六章 总结和展望

6.1 结论

6.1.1 本课题结论

到这里,本文的主要内容已经写完,课题根据微波原理设计了中试微波催化化学反应系统,根据模糊控制原理设计了多种新型模糊控制算法,并完成了计算机控制位置伺服系统实验平台的构建和新型模糊控制算法的仿真和现场调试。该系统的软、硬件结构合理,运行良好,已经达到多种控制方案实验研究的预期目标。纵观整个课题完成的工作,说明了以下几点:

- (1) 微波用于中试化学反应系统中是完全可行的。
- (2) 控制算法方面完成了PID、普通模糊控制、自调整比例因子的模糊控制、仿人智能模糊控制、带修正因子的两级智能模糊控制等方案的设计,仿真和实验证明,本文设计的三种新型模糊控制算法达到了较高的性能指标,效果明显优于PID和普通模糊控制算法。
- (3) 通过合理的安排,充分利用Windows的动态链接库等技术,在目前主流的兼容PC上实现高实时控制是完全可能的也是可行的,本文中的位置伺服系统可在Windows环境下运行达到最高一毫秒的采样精度就是一个证明。
- (4) Windows用户界面友好,操作方便,可利用资源多是一大优势,但由于Windows平台本身的缺陷,一般不用于高实时性控制系统,通过利用应用程序接口和Windows的消息机制,实现主程序和MATLAB的配合运行,充分利用了MATLAB的强大功能,也满足了系统实时性的要求。

6.1.2 本文创新点

本文的研究工作主要着眼于控制理论研究及其工程应用和中试微波化学反应系统的整体设计。在设计微波系统和构建实验平台的过程中,为了能更好的提高系统的性能,提出了一些新的实现方法,其中包含了一些创新思想,主要集中在以下4个方面:

- (1) 目前微波催化化学反应还处在实验室阶段。许多小试微波化学系统已经获得成功,但中试微波系统还在开发试制过程中。本次课题针对东北制药厂

的中试微波系统项目进行设计和研究,开发出一套中式规模微波化学反应系统,实现微波催化维生素生产。

- (2) 根据微波原理和化学反应腔的实际形状自行设计了微波漏能抑制器和环绕加热圆柱腔接合处的波导扼流槽对微波进行衰减。
- (3) 自行设计了自调整比例因子的模糊控制、仿人智能模糊控制、带修正因子的两级智能模糊控制等方案。
- (4) 结合 MATLAB 对软件进行功能扩展。

6.2 完成的主要工作

经过一年半的研究工作,课题已基本完成,研究工作接近尾声,也已达到了研究预期目标,回顾全部的工作历程,完成的主要工作有以下几点:

- (1) 中试微波化学反应系统的整体规划和设计。包括谐振腔和温度传感器的选取、改善加热均匀性、防微波泄漏措施等。
- (2) 控制器设计。本文主要完成了 PID、普通模糊控制、自调整比例因子的模糊控制、仿人智能模糊控制、带修正因子的两级智能模糊控制等方案的设计,设计控制方案并整定参数,在 MATLAB 下进行仿真分析和调整,最后分析其方案的计算机实现,编写算法程序,加入主程序运行,获得实际运行结果数据,再与仿真结果和其他方案进行对比分析。
- (3) 计算机控制位置伺服实验平台硬件部分,主要工作内容包括数据采集卡和相应数据采集电路部分以及伺服驱动电路部分,完成底层接口的通讯,对采集卡进行硬软件调试,完成了采集卡的采样程序。对伺服驱动电路的测试和调整,对光电编码器位置采样电路的研究和数据转换处理,对小车实验台整体(包括光电码盘和直流电机)的测试和调整。
- (4) 计算机控制位置伺服实验平台应用软件开发。首先,完成了应用程序的硬件驱动部分,在 Windows 系统下完成底层驱动的设计。其次,完成主程序的设计,完成应用程序的人机界面;完成高精度的系统定时以保障采样频率;完成程序对数据实时曲线的绘制和保存;完成主程序的文件处理和数据分析功能。然后,完成主程序的控制算法部分,实现对被控对象的控制;完成了主程序对 MATLAB 的数据通讯,利用 ActiveX 与 DDE 技术完成主程序和 MATLAB 的接口,实现和 MATLAB 配合运行。

在课题研究的工作中，并不是一帆风顺的，主要困难集中在电磁场与微波技术理论和计算机控制位置伺服系统的硬件设计方面。由于没有做硬件的经验，在做硬件时遇到了很多困难，绕了很多弯路。

6.3 不足与对今后工作的建议

课题前期的主要工作集中在了微波传输系统和防泄漏措施研究上，这直接导致了后期位置伺服系统的研究时间较为紧张；由于系统硬件本身不够完善，存在较严重的非线性和误差，因此造成控制信号的死区较大，给调试工作带来困难；位置伺服系统被控对象的时间常数很小，这对系统的运行效率也提出了较高的要求。以上种种原因，采用的处理方法未能很好的达到要求，因而使得本课题仍有一些不足之处：

- (1) 微波传输系统和防泄漏措施的可靠性有待进一步理论计算和实验验证。
- (2) 位置伺服系统硬件部分的伺服驱动电路输入电压和输出电压的线性度不理想，导致电机的调速范围较小。
- (3) 位置伺服系统软件功能需要继续拓展，后期的时间紧张，未能完成更多的功能。
- (4) 位置伺服系统稳定性有待进一步验证和改进。

本课题从开发开始就留意到了后续工作的进行，采用软件接口技术使后续工作有了更大的便利，结合位置伺服系统中存在的不足，对后续研究工作提出以下建议：

- (1) 系统硬件部分完善：改进伺服驱动电路是后续工作的根本，要提高系统性能和精度，硬件部分引入的误差必须首先减小或消除。可更改 L292 芯片的外接电路或采用更加稳定的稳压电源给芯片供电。
- (2) 现有的补偿控制电压等是在系统硬件存在问题的情况下得出的，在硬件得到完善的基础上，应首先重新设定。
- (3) 软件功能拓展：系统对可实现控制方案的增加预留了软件接口，可开发子模块实现更多的控制方案，利用 MATLAB 的强大功能，可在本系统环境下方便地实现多种控制。

参 考 文 献

1. 刘岐山. 微波能应用[M], 北京: 电子工业出版社, 1990
2. 王绍林. 微波加热工艺及国外专利精选[M], 北京: 专利文献出版社, 1995
3. 刘钟栋. 微波技术在食品工业中的应用[M], 北京: 中国轻工业出版社, 1998
4. 王绍林. 微波炉知识问答[M], 北京: 机械工业出版社, 1998
5. 马冰然. 电磁场与微波技术[M], 广州: 华南理工大学出版社, 1999
6. 吴宏雄, 丘秉生. 微波技术[M], 广州: 中山大学出版社, 1995
7. 金钦汉. 微波化学[M], 北京: 科学出版社, 2001
8. 马昌贵. 工业微波加热及磁性元件的应用[J], 磁性材料及器件, 1995, 26(3): 34-38
9. 孙嫚等. 适用于化学合成的微波炉的改造与性能测定[J], 微波学报, 1998, 14(4): 377-382
10. 李金树等. 微波技术在化学合成中的应用[J], 石化技术, 2002, 9(3): 178-183
11. 龚成龙等. 微波加热反应釜的微机控制系统设计[J], 自动化仪表, 2002, 8(3): 45-48
12. 郑勤红等. 谐振腔本征值问题的多极理论分析[J], 微波学报, 2001, 13(3): 73-77
13. 杨鸿生等. 用于回流化学反应的微波加热装置的改进[J], 微波学报, 2000, 11(5): 616-619
14. 柳洪义, 原所先. 机械工程控制基础[M], 沈阳: 东北大学出版社, 1999
15. 孙增圻. 计算机控制理论及应用[M], 北京: 清华大学出版社, 1989
16. Lee.Kwang Y. Hybrid algorithm with fuzzy system and conventional PI control for the temperature control of TV glass furnace[J], IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(4): 548-554.
17. Ewald, Thomas. Fuzzy state controller for the soft process drying of natural material foil[J], Chemical Engineering and Technology, 2003, 26(1): 21-29
18. Kuo, H.C. A real-time shipboard fire-detection system based on grey-fuzzy algorithms[J], Fire Safety Journal, 2003, 38(4): 341-363
19. 诸静. 模糊控制原理与应用[M], 北京: 机械工业出版社, 1995

20. 李士勇. 模糊控制和智能控制理论与应用[M], 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1990
21. 章卫国. 模糊控制理论与应用[M], 西安:西北工业大学出版社, 1999
22. 刘航等. 基于自调整模糊控制方法的交流变频调速实验系统[J], 工业仪表与自动化装置, 2002, 1(3): 3-6
23. 陈志旺等. 模糊控制在退火炉炉温控制中的应用[J], 信息技术, 2002, 1(8): 34-36
24. 杨纶标等. 模糊控制关系与模糊蕴涵算法[J], 华南理工大学学报, 2002, 30(7): 21-23
25. 李洪兴等. 模糊控制系统的建模[J], 中国科学, 2002, 32(9): 772-782
26. 朱彤等. PID—模糊控制的应用探讨[J], 电气传动自动化, 2002, 3(3): 11-13
27. 周万坤等. 采用均匀设计法在线优化模糊控制因子[J], 工业控制计算机, 2002, 15(4): 31-34
28. 徐国忠, 诸静. 单片机模糊控制恒压供水系统的研究[J], 微电子学与计算机, 1998, 1(4): 8-12
29. 郑伟, 李士勇. 非线性量化因子模糊控制器及其应用[J], 系统工程与电子技术, 2001, 23(9): 23-25
30. 李士勇. 复杂系统、非线性科学与智能控制理论[J], 计算机自动测量与控制, 2000, 8(4): 1-4
31. 蒋海琳, 靳东明. 基于基因算法的模糊控制研究[J], 电子学报, 2002, 30(5): 676-679
32. 赖旭芝, 蔡自兴. 模糊控制系统的稳定性分析和设计方法研究[J], 计算技术与自动化, 1998, 17(1): 4-8
33. 蔡自兴. 模糊控制的典型结构[J], 工业控制计算机, 1997, 1(3): 1-4
34. 吕其恒, 诸静等. 模糊自校正流量控制系统[J], 电子技术应用, 1999, 1(11): 28-30
35. 秦继荣, 沈安俊. 现代直流伺服控制技术及其系统设计[M], 北京:机械工业出版社, 1993
36. 陈离, 秦清俊. 电路与电机技术[M], 北京:机械工业出版社, 1994

37. 王宏华. SR 电机模糊控制器设计研究[J], 中小型电机, 2000, 9(6):26-30
38. 张晶, 曾宪云. 基于 MATLAB/SIMULINK 直流电机调速系统模糊控制的建模与仿真[J], 现代电子技术, 2002, 10(4): 12-15
39. YU Chi-ming. A comparison of two different fuzzy controllers for DC motor current control [J], Pure and Applied Mathematics, 2000, 16(3): 99-105.
40. 童诗白. 模拟电子技术基础[M], 北京:清华大学出版社, 1988
41. 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M], 北京:清华大学出版社, 1996
42. 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M], 北京:电子工业出版社, 2003
43. 刘志俭. MATLAB 应用程序接口用户指南[M], 北京:科学出版社, 2000
44. 罗文广, 韩俊峰等. 基于 MATLAB(SIMULINK)语言的模糊控制系统高效仿真[J], 计算机仿真, 2001, 20(3): 14-16
45. 邵俊鹏, 徐星辉等. MATLAB 在模型参考模糊自适应控制系统仿真中的应用[J], 计算机仿真, 2003, 20(1): 59-61
46. 于浩洋, 宋清昆等. 基于 MATLAB/SIMULINK 锅炉燃烧系统的双模糊控制仿真[J], 自动化技术与应用, 2002, 5(6): 19-22
47. 赵志诚等. 基于 VB 和 MATLAB 的直流调速系统仿真软件开发[J], 电气传动自动化, 2002, 8(1): 37-40
48. 陈淑燕等. 应用 MATLAB 设计炼钢电弧炉电极模糊控制器[J], 计算机工程与应用, 2003, 20(1): 220-223
49. 贾东耀等. 基于模糊控制的直流电机调速系统 MATLAB 仿真[J], 电机电器技术, 2002, 1(5): 2-5
50. 三味创作室. Visual Basic6.0 应用与提高[M], 北京:科学出版社, 1999
51. Petrousos E. Visual Basic6.0 从入门到精通[M], 北京:电子工业出版社, 1999
52. Brian Farrar. ActiveX 使用指南[M], 北京:机械工业出版社, 2000
53. Paul Lomax. ActiveX 与 VBScript 实战解析[M], 北京:机械工业出版社, 2000

致 谢

本文是在导师柳洪义教授的精心指导下完成的，导师渊博的学识，敏锐的思想，严谨的治学态度以及锐意进取的敬业精神都使我终生难忘、受益匪浅。在两年半的学习和科研阶段，柳老师严格而细致地指导，并提供了大量的研究条件和实践机会，不仅为本文的完成打下了坚实的基础，而且使我的个人能力得到了良好的锻炼。在此，学生向柳老师表示深深的谢意和崇高的敬意！

在论文的完成过程中，还得到了教研室其它老师的热心帮助和指导，在此表示衷心的感谢。感谢博士生郭大忠、张威，硕士生罗忠、尹峰、王磊、马现刚等在课题方面的大力帮助和共同探讨。

衷心感谢我的父母，在生活上给我的关心和照顾，在学习和工作上给我鞭策和鼓励，正是他们一如既往的关爱和支持使我顺利完成学业。

最后，谨以此文献给所有以各种方式关心和帮助过我的人们！