

电气工程自动化论文

题 目： 基于模糊控制的弧焊电源的研究
专 业： 电气工程及其自动化

摘 要

焊接是现代工业生产中不可或缺的加工方法,而弧焊电源是决定焊接质量的关键因素。逆变弧焊电源是近年来发展起来的一种小型、轻量、高效、节能的弧焊电源。模糊控制方以其适用范围广,控制精度高等特点已广泛应用于生产的各个领域,随着微机技术的发展,将其应用于弧焊电源已经成为可能。本课题以研究出性能优越、经济实用的逆变弧焊电源为目的,将最新的软开关逆变技术和先进的模糊控制方式结合起来应用于弧焊电源的设计之中。

本课题研究的主要内容是基于模糊控制的软开关式逆变弧焊电源的设计,在分析了全桥零电压逆变主电路的运行规律的基础上,详细介绍了主电路的设计方案,包括功率器件的选择、保护以及高频变压器的设计等;本课题采用集成化的微机控制,采用移相 PWM 控制方式实现逆变器的软开关,所采用的闭环反馈和模糊控制实现了电源的恒流输出,为提高控制系统的可靠性及抗干扰性能,本文采取了一系列有效的措施;按照弧焊电源所需实现的功能要求,本文开发了组成系统控制软件的主程序、中断服务程序及其它一些功能程序,并详细介绍了新型逆变弧焊电源的控制核心——模糊控制器的设计过程。该逆变弧焊电源的输出具有很高的稳定性和良好的动态性能。

关键词: 逆变弧焊电源 全桥移相零电压 模糊控制

Abstract

Weld is an important method in process, welding power is the key factor which determines the quality of weld. Inverter welding power has developed rapidly because of its advantages such as high efficiency, energy saving, small bulk, light weight and multifunction etc. Fuzzy control has been applied in many fields, with the development of microcomputer technology, it becomes realizable to use fuzzy control in welding power. The purpose of this subject is to develop high performance, economical and practical welding power. the newest soft-switch invert technology and advanced fuzzy control method combined to design welding power.

The main content of this subject is to design a full- bridge shift-phase inverter welding power with fuzzy controller, in the base of analyzing the running principle of full-bridge zero-voltage-switch inverter. The design of main circuit is introduced in detail. This design includes the selection and protection of elements, the design method and calculation of high frequency transformer. In this subject, the low cost and integrated microcomputer are applied. The hardware circuit of this welding power is designed based on philips's89C58 single chip computer. In order to realize the soft, switch of inverter , the shift-phase PWM control method is adopted. The welding current closed loop feedback control and fuzzy control systems are applied to gain the constant welding current external characteristics. Many anti-jamming measures are used to protect the reliability of control system. According to the functions soft the welding power , the software is developed which includes main program, interrupt service routines and some function subprograms The design of tow input and single output fuzzy controller is introduced in detail. The whole system is debugged and tested after completing sotf ware and hard ware design of the welding power The results make clear that this welding Power can export prospective constant current characteristic , and the inverter has excellent dynamic capabilities with fuzzy controller.

Key words: inverter welding power, phase shift full-bridge, ZVS, fuzzy control

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
1 绪论	1
1.1 课题的背景和提出	1
1.2 弧焊电源的发展状况和研究现状	1
1.3 软开关	5
1.4 本文的研究内容、目的和意义	6
2 逆变弧焊电源原理及设计方案	7
2.1 逆变弧焊电源原理	7
2.2 设计方案确定	11
3 模糊控制器设计	15
3.1 模糊理论的提出及可行性	15
3.2 模糊控制基本原理	15
3.3 模糊控制器设计	16
4 主电路设计与实现	29
4.1 移相控制软开关全桥逆变器设计	29
4.2 高频变压器设计	33
4.3 输入整流器设计	36
4.4 输出整流器设计	37
5 控制系统软件设计	38
5.1 软件结构设计	38
5.2 控制系统主程序设计	39
5.3 外中断服务程序设计	44
5.4 数据采集控制	47
5.5 标度变换	47
6 逆变弧焊电源控制硬件系统设计	48
6.1 控制系统设计要求	48
6.2 控制系统的设计思路	49
6.3 单片机核心电路设计	49
6.4 参数给定与操作键的控制	50
6.5 检测电路	52
6.6 A/D 和 D/A 转换电路	53
6.8 驱动电路	57
6.9 显示电路	58

6.10 保护电路.....	60
7 结论.....	62
致 谢	63
参考文献.....	64

1 绪论

1.1 课题的背景和提出

在现代制造业生产中，焊接是一种重要的加工手段，随着制造业的现代化进展，焊接在机械制造、核工业、能源交通、石油化工和电子等行业中的应用越来越广泛。电弧焊接是焊接的一种基本方法。弧焊电源就是为焊接电弧提供电能的一种装置。焊接电弧的物理本质是一种气体导电现象，电弧中的带电粒子依靠电弧中气体介质的电离和电极的电子发射两个物理过程产生。弧焊电源要提供稳定的焊接电弧进行焊接，就必须要求其自身的电气性能满足焊接电弧的电特性要求。弧焊电源的电气性能主要包括弧焊电源的静特性、动特性及控制特性等，因此弧焊电源是决定焊接质量的关键因素^[1]。

随着科学技术的不断进步，焊接已经成为制造业中的一项基础工艺和精确的生产手段，对焊接质量的要求也越来越高，为了提高现有的焊接工艺水平，同时节约能源和成本，以适应生产的需要，研制出小型、轻量、低成本、高效率、节能、可靠性好、输出精度高的新型弧焊电源已经成为当务之急^[2]。

1.2 弧焊电源的发展状况和研究现状

1.2.1 弧焊电源的发展状况

传统的弧焊电源的外、动特性的控制方式有两种：机械控制和电磁控制。采用机械装置控制外、动特性的弧焊电源有动铁式、动圈式、抽头式弧焊变压器和弧焊整流器等，机械控制式弧焊电源的外、动特性主要取决于弧焊电源本身的结构。采用电磁控制外、动特性的弧焊电源有串联饱和电抗器式弧焊变压器、磁放大器式弧焊整流器和弧焊发电机等等。采用电磁控制的弧焊电源的外、动特性也主要取决于弧焊电源本身的结构。其可控制参数少，调节精度低，稳定性差^[3]

。在这两种弧焊电源之后出现的是电子控制式弧焊电源，电子控制式弧焊电源的外、动特性完全借助于电子线路控制，可以实现对输出电流、电压波形的控制，而且其控制性能与本身结构没有决定性的关系。电子控制式弧焊电源克服了传统弧焊电源的一些缺点，逐渐取代了传统的弧焊电源，逆变弧焊电源正是在这一基础上发展起来的。

1.2.2 逆变弧焊电源的发展

上世纪七十年代开始有技术人员进行逆变弧焊电源的研究，到七十年代末开发出了快速晶闸管逆变弧焊机，至此以后，各公司陆续推出了逆变产品。八十年代，随着电力电子技术的发展，逆变弧焊电源的发展速度也十分迅速。随着各种新型的功率电力电子器件的问世并应用于弧焊电源，逆变弧焊电源得到了迅速的发展，其控制性能越来越好，效率也越来越高。现在，国外各电源生产商都基本完成了全系列逆变弧焊电源的商品化。

我国逆变弧焊电源的起步较晚，但中期的发展较快，晶闸管式逆变弧焊电源已经投入批量生产。场效应管式和 IGBT 管式逆变弧焊电源也逐步得到完善。不少科研院所正在积极进行这方面的研发工作。

随着科技的发展，各种新型功率开关器件不断出现，集成电路和微电子技术在不断进步，新型铁磁材料也在不断涌现，它们都为逆变弧焊电源的不断发展和广泛应用创造了条件。

1.2.2.1 器件创新推动逆变器的发展和更新

功率开关管和整流管对逆变器的发展起着巨大的推动作用，电力电子器件的发展推动着逆变弧焊电源的发展和更新。电力电子器件从七十年代的快速晶闸管到以后的功率晶体管(GTR)、门极可关断晶闸管(GTO)、功率 MOS 场效应管(Power MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)和栅极控制晶闸管(MCT)以及近年来正在研制的栅极控制晶闸管(MCT)等器件都有力推动着逆变弧焊器向着性能更佳，控制更精确的方向发展。

1.2.2.2 新型材料的应用

中频或高频变压器是逆变弧焊电源的关键部件之一,其磁性材料性能的好坏,直接影响逆变弧焊电源的工作性能,决定逆变弧焊电源的工作输出能力。同时,变压器的尺寸、结构和重量也决定了逆变弧焊电源的体积、结构和重量。因此磁芯材料的选用十分重要。

逆变弧焊电源的磁芯材料主要有薄矽钢片、软磁性铁氧体、非晶和微晶材料等。薄矽钢片具有饱和磁通密度高,使用薄带可降低涡流损耗等特点,在前期的逆变弧焊电源中得到了较多的应用,但由于其电阻率低,高频损耗大,已逐渐被其它材料所取代。目前应用最多的是软磁性铁氧体,其优点有:电阻率大,涡流损耗小,高频铁损小,价格便宜、装配方便等,但其缺点是饱和磁感应强度低,铁心结构较大。非晶合金材料是近年来出现的新材料,其磁感应强度高,电阻率大,对涡流阻力大,能耗低,更适合应用在逆变弧焊电源的高频变压器的生产中,是替代软磁性铁氧体的好材料。在非晶合金基础上经过处理的微晶合金,性能比非晶合金更高。磁性材料由矽钢片、坡莫合金向软磁性铁氧体、非晶、微晶材料发展,大幅度提高了磁芯的磁通密度、减小了变压器的重量,提高了逆变弧焊电源的工作频率和效率。

1.2.2.3 控制性能的优化和智能控制

控制方法的选择和控制系统的性能是决定逆变弧焊电源性能的关键因素,其好坏直接决定着逆变弧焊电源性能的优劣。控制性能的优化方法主要有特性控制,波形控制和功率因数校正等。控制电路的设计由最初的分立原件控制方式,逐渐转为主要采用专用的集成控制芯片实现的控制方。

随着现代生产对逆变弧焊电源性能要求的不断提高,传统的控制方式已经无法很好的满足要求。计算机技术的发展,使得采用微机控制的弧焊电源开始逐渐问世,与传统的控制方法相比,微机控制的弧焊电源具有显著的优点:对逆变弧焊电源的控制变得容易和灵活,既能对其外特性进行多种形状和变换的控制,还可以实现对电流波形、动特性和工作程序的灵活和精确的控制;此外,还能完成人机对话、参数预制、存储、故障分析、参数变换、专家系统等功能。从而协调整个焊接生产线的工作,调节焊接参数,实现焊接过程的自动化和智能化。

在已有的采用微机控制的弧焊电源中,控制系统软件的控制策略普遍采用的是传统的 PI(比例积分)控制,这种算法的优点是控制系统的稳态精度高,但其缺点是必须建立精确的数学模型并进行整定,而精确的数学模型在实际问题中往往难以得到;同时,由于逆变弧焊电源中的逆变器在工作过程中具有严重的非线性,因而其控制比较困难,特别是当工作调节的范围比较大时,传统的基于线性系统的控制方法将会导致不良的动态过程或导致系统的不稳定。因此传统的控制方法无法很好的满足逆变弧焊电源作为一个多输入、多输出、非线性系统的控制性能要求。

随着对焊缝质量和自动化程度要求的不断提高,实现逆变弧焊电源的智能化控制是逆变弧焊电源发展的必然趋势。智能控制的研究方向可分为:模糊控制技术、人工神经网络控制和专家系统。模糊控制技术、人工神经网络控制、专家系统控制等智能控制方法在逆变弧焊电源控制策略中的应用,将大大提高逆变弧焊电源的性能。现阶段模糊控制技术、人工神经网络控制是智能控制研究的热点,神经网络的突出优势是其并行大规模运算能力,而模糊控制的优势则在于其附加成本不高,却可获得精确的控制效果,因此模糊控制的应用领域更加广泛,在逆变弧焊电源中的应用前景也十分广阔。

1.2.3 模糊控制在焊接领域的应用状况

模糊控制是智能控制的重要分支,其应用领域十分广泛。模糊控制算法的特点是不需要建立精确的数学模型,根据模糊控制规则,经过模糊推理得出决策。模糊控制规则是人的实践经验的总结,模糊控制以模糊集合论为基础,将过去只能用语言表达的概念转变为定量的过。模糊控制技术在焊接领域的应用主要途径有专用的模糊控制芯片及开发工具、基于通用单片机的汇编代码开发软件和基于 PC 机的高级语言开发平台三种,专用的模糊控制芯片及开发工具,其特点是速度、控制精度高,但价格较高,通用性差。而基于通用单片机的汇编代码开发软件,其速度和控制精确度高,实现方便,对于采用单片机的场合,所需的附加成本很少。基于 PC 机的高级语言开发平台,则适用于对于相对复杂的焊接过程和设备。

上世纪八十年代国外科学家将模糊控制应用于自适应焊接机器人的研究,拉开了模糊控制在焊接领域应用的序幕。经过多年的发展,在众多国内外专家的共同努力下,模糊控制已经在焊接过程的各个领域中得到应用。日本学者将模糊控制应用于脉冲 MIG 焊接的溶宽控制,建立了一套弧焊机器人专家系统,运用模糊控制实现了 MAG 焊接的溶池控制。德国科学家在 PC 微机平台上,采用模糊控制对弧焊机器人的焊接工艺参数进行了优化研究。国内清华大学的专家系统的研究了弧焊过程的模糊控制,对单变量 MIG 焊进行溶透控制。对于多变量的 CO₂ 焊接的模糊控制也作了初步的研究。华中理工大学进行了 TIG 焊溶宽自调整与积分的混合控制的研究,随着模糊技术等智能控制方法在逆变弧焊电源中的应用,逆变弧焊电源的性能必将大大提高,从而推动我国的基础工业水平的发展。

1.3 软开关

1.3.1 软开关技术的提出

逆变弧焊电源一般情况下采用恒频脉宽调制(PWM)的控制方式。在这种方式下,功率开关器件工作在硬开关状态,不可避免地具有容性开通、感性关断、开通和关断损耗大以及二极管反向恢复等四大问题。开关管工作时会产生很大的开关损耗,这是由于开关管不是理想器件。在开通时开关管的电压不是立即下降到零,而是有一个下降时间;同时电流也不是立即上升到负载电流,也有一个上升的时间;这段时间里,电压和电流有一个交叠区,由此而产生的损耗,称为开通损耗。同理,也有关断损耗的存在,二者统称为开关损耗。因为逆变器的开关损耗与其开关频率成正比,所以随着开关频率的提高,总的开关损耗会增大,逆变器的效率将会降低。开关损耗的存在限制了逆变器开关频率的提高,从而限制了逆变器的小型化和轻量化。为了减小逆变器的体积和重量,其工作频率必须提高而要提高开关频率,同时提高变换器的效率,就必须减小开关损耗,减小开关损耗的途径就是实现开关管的软开关,软开关技术应运而生。

1.3.2 软开关技术的发展

自 20 世纪 70 年代以来,国内外电力电子界和电源技术界不断研制开发高

频软开关技术，到目前为止，已提出了多种不同的软开关拓扑结构，也取得了一系列成功的应用。软开关技术先后经历了串联或并联谐振技术(70 年代)、准谐振或多谐振技术(80 年代中)、ZCS-PWM 或 ZVS-PWM 技术(80 年代末)、移相全桥 ZVS-PWM 技术(80 年代末)、ZCT-PWM 或 ZVT-PWM 技术(90 年代初)、全桥移相 ZVZCS-PWM 技术(90 年代中)几个发展阶段。

目前,软开关技术的进展主要体现在小功率开关电源领域,对于中大功率电源,特别是弧焊电源,由于其负载大范围变化频繁,工作环境恶劣,器件容量及可靠性等方面的原因,软开关技术应用还比较少。但从长远观点来看,软开关技术应用到逆变弧焊电源中是弧焊电源的发展方向。目前已有研制产品问世,如双IGBT管正激零电压转换一脉宽调制(ZVT-PWM)软开关弧焊电源,电源功率20KW、输出额定电流500A,开关频率40kHz,效率90%。该电源冲击电流小,动态特性好,无过冲,负载变化不影响软开关特性。

20世纪80年代末期出现的恒频脉宽调制软开关技术,结合了谐振技术和脉宽调制技术,能够很好地解决硬开关脉宽调制方式中出现的各种问题,推动了逆变焊机的进一步发展。可以预言:软开关技术将逐渐运用到逆变焊机中,软开关式逆变焊机将成为发展的主流。

1.4 本文的研究内容、目的和意义

1.4.1 本文研究的内容

本文研究的主要内容是基于模糊控制的软开关式逆变弧焊电源,电源的主电路采用全桥逆变电路,虽然该拓扑结构的电路和控制系统较为复杂,但开关管承受同样电压和电流的前提下,逆变器有更大的功率输出,同时功率开关器件的电流、电压额定值小,结构对称,变压器的利用率高,滤波电感小,结构紧凑有利于采用模块式功率器件。在功率器件的选择上,采用目前技术较为成熟,应用广泛的IGBT;控制系统采用集成化的微机控制,采用移相PWM控制方式以实现逆变器的零电压开关。控制系统以软件形式实现的模糊控制器实现主电路的移相PWM控制方式,使该逆变弧焊电源系统具有很高的稳定性和良好的动态性能。

1.4.2 研究的目的和意义

本文的研究目的是将最新的软开关技术和先进的模糊控制方式应用于逆变弧焊电源的设计之中,使新技术和新方法在实际中得到应用。现代化生产对弧焊电源的要求越来越高,不但要求弧焊电源具有较高的效率,较小的损耗,较高的控制精度以节约能源,提高电源的可靠性,提高输出精度,确保质量;而且要求其向小型、轻量、低成本发展。因此,研究出满足上述要求的经济、实用的逆变弧焊电源产品,具有很高的现实意义。同时,应该看到要从根本上解决这些问题需要众多同仁的共同努力。这里,我们研制的基于模糊控制的逆变弧焊电源具有

一定的理论和实践探索作用，希望能为今后的研究工作提供参考。

2 逆变弧焊电源原理及设计方案

2.1 逆变弧焊电源原理

2.1.1 逆变弧焊电源的基本原理

逆变是指由直流到交流的变换，实现这种变换的装置称为逆变器，为焊接电弧提供电能，具有弧焊工艺所要求的电气性能的逆变器，称为逆变弧焊电源。其基本组成框图如图 2-1 所示，其基本工作原理简述如下：单相或三相交流电经输入整流器 VD1 整流，滤波器 LC1 滤波之后，通过功率开关器件构成的逆变器 Q 的交替开关作用，变成几十至上百千赫的高频交流电，再经高频变压器 T 降至适合于焊接的几十伏电压，并借助于控制驱动电路和反馈电路，以及焊接回路的阻抗，获得焊接所需的外特性和动特性。如果需要采用直流焊接，还须经输出整流器 VD2 整流，电抗器、电容滤波，变为直流电输出。图示为“AC-DC-AC-DC”的逆变系统原理图。

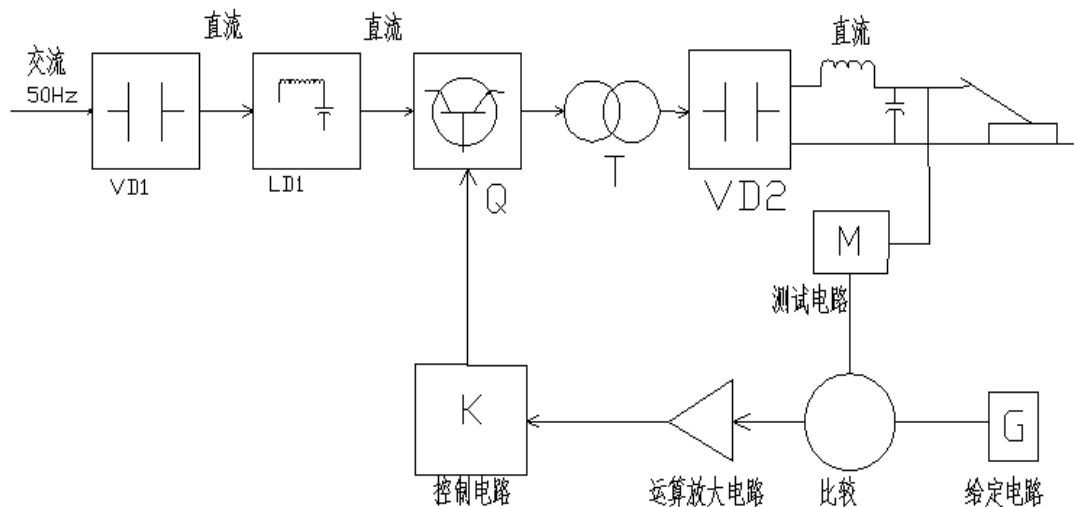


图 2-1 逆变弧焊电源基本原理图

在逆变弧焊电源中，逆变主电路和控制系统(包括控制、驱动电路和反馈、给定电路)的质量是决定逆变弧焊电源质量的关键因素，控制系统应该能设置和检测工作参数，并对功率主电路进行正确的控制，从而实现对焊接过程的控制。

2.1.2 逆变弧焊电源的组成

由弧焊电源的基本原理图可见，其主要由主电路和控制电路两部分组成，电路的功能是将电网电能传递给负载，控制电路的功能是向主电路提供足够大的脉冲触发信号，驱动主电路按照要求工作，反馈电路是控制电路的一部分，以现逆变弧焊电源的闭环控制。

2.1.2.1 主电路的基本形式

逆变弧焊电源的主电路的基本形式有很多，如单端正激逆变主电路，双重正激单端主电路，单端反激式逆变主电路，半桥式逆变主电路，全桥式逆变主电路等。比较常用的是单端正激式，半桥式和全桥式三种。

(1) 单端正激式逆变主电路

单端正激式逆变主电路的结构如图 2-2 所示，当功率开关管 VT 导通时，整流二极管 VD1 导通，电能通过整流二极管传递给负载，同时，有部分能量储存在输出回路的储能电感 L 中，当开关管 VT 截止时，高频变压器原副边产生反向感应电势，整流二极管反偏截止，电感储能经过续流二极管向负载供电，高频变压器的作用是实现电能变换和输入、输出之间的隔离。

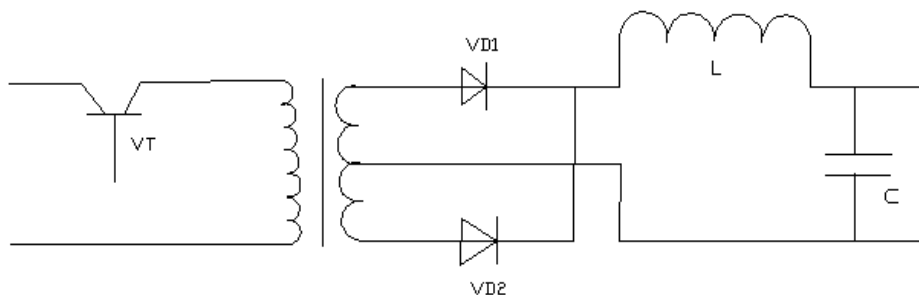


图 2-2 单端正激式逆变主电路

(2) 半桥式逆变主电路

半桥式逆变主电路的结构如图 2-3 所示，当功率开关管 VT₁ 导通时，电容 C₁ 放电，C₂ 充电，变压器副边输出交流方波的正半波；当功率开关管 VT₂ 导通时，电容 C₂ 放电，C₁ 充电，变压器副边输出交流方波的负半波。通过控制系统对功率开关管 VT₁、VT₂ 的控制，在换流电容 C₁、C₂ 的配合作用下，功率开关管 VT₁、VT₂ 交替通断，从而实现从直流到可控交流方波的逆变。

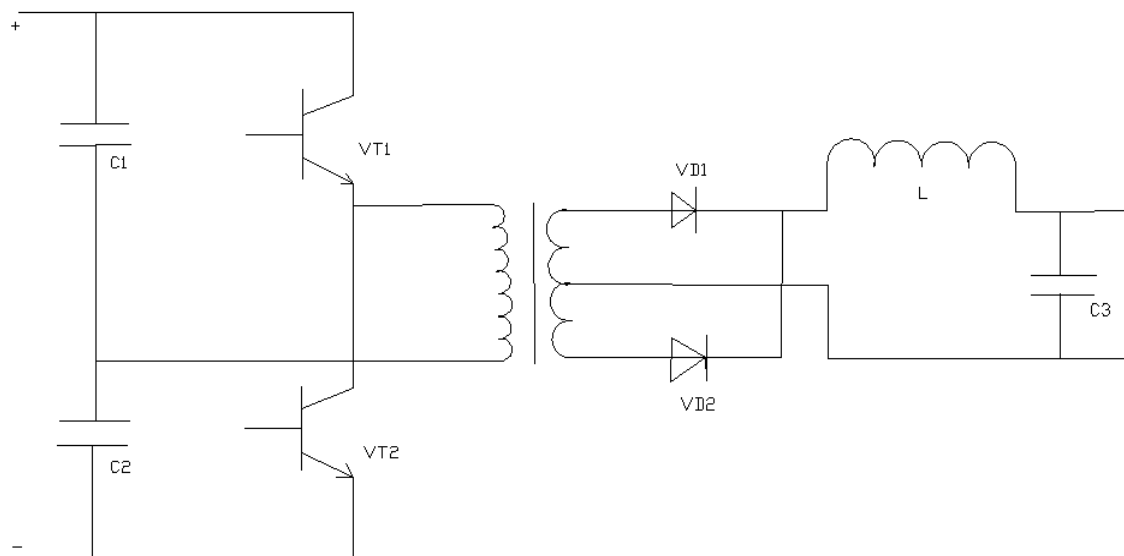


图 2-3 半桥式逆变主电路

(3)全桥式逆变主电路

全桥式逆变主电路结构如图 2-4 所示，四个功率开关管分为两组导通，VT1、VT4 一组，VT2、VT3 为另一组。当 VT1、VT4 导通时，VT2、VT3 截止，变压器副边输出交流方波的正半波；当 VT2、VT3 导通时，VT1、VT4 截止，变压器副边输出交流方波的负半波。由控制系统对四个功率开关管进行控制，使 VT1、VT4 和 VT2、VT3 交替导通，从而实现直流电到高频交流电的逆变。

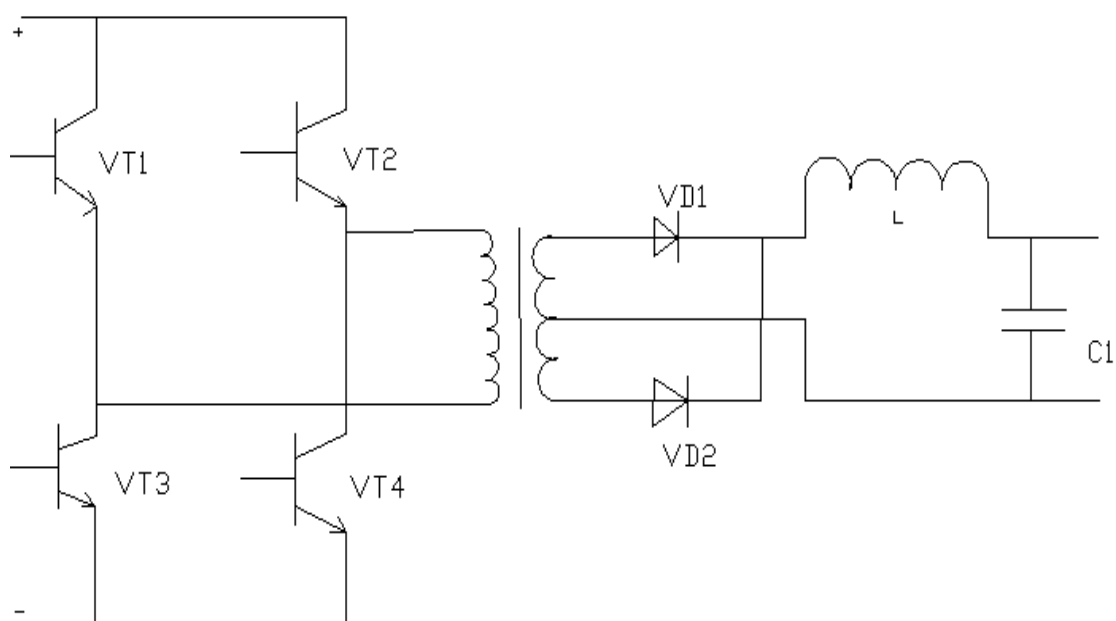


图 2-4 全桥式逆变主电路

单端正激式逆变电路在开关电源中应用很多,技术上较为成熟,其结构简单,调试容易,没有开关管直通和高频变压器的单向偏磁问题,其缺点是变压器磁芯工作在磁滞回线的半边,磁芯的利用率低,输出功率不高,适用于中小功率的逆变弧焊电源。

半桥式逆变电路与单端正激式相比,同样的频率在同一周期可进行两次控制,因此,其动态调节性能好,而且相对来说可以输出较大的功率,而与全桥相比电路结构简单抗不平衡能力较强,适用于中等容量的逆变弧焊电源。

全桥逆变电路的电路和控制系统较为复杂,且存在单相偏磁问题,采用全桥的目的在于开关管承受同样电压和电流的前提下,逆变器有更大的功率输出,同时,其结构紧凑,有利于采用模块式功率器件。全桥逆变电路的主要缺点就是可能发生直通现象,直通是指同一桥臂上的两个功率开关在工作周期内不是正常的交替导通,而是在某一时刻同时导通的现象。电路发生直通时,变换器的上下两个功率开关管短路,将导致功率开关损坏,逆变失败,因此必须采取有效措施,防止直通现象的发生。

2.1.2.2 控制策略与控制电路的基本形式

逆变弧焊电源是通过控制电路来实现不同外特性的输出,实现工艺参数调整,从而适用于不同的焊接对象对焊接工艺的要求。逆变弧焊电源一般通过三种调节机制实现对外特性的控制及工艺参数的调节。

- (1) 定脉宽调频率 逆变器输出高频脉冲电流宽度不变,通过改变逆变器的开关频率来调节工艺参数。频率越高,工作电流越大。
- (2) 定频率调脉宽 逆变器的开关频率不变,通过改变逆变器输出高频脉冲电流的脉宽比(占空比)来调节工艺参数。脉宽比越大,工作电流越大。
- (3) 混合调节 调频率和调脉宽相结合。例如在某些电路频率调节范围不够大的场合,可通过调节脉宽加大调节范围。

逆变弧焊电源的控制电路发展到现在已经主要采用专用集成控制芯片来实现，将在一定的时期内占据主导地位。随着对电源性能要求的不断提高，越来越多的应用场合需要弧焊电源满足输出稳定，调节灵活的要求，这种控制方式可以方便的在一台焊接电源上实现多种功能、多特性输出。微机控制的弧焊电源应运而生，与传统的控制方法相比，微机控制弧焊电源具有显著的优点:减少漂移和电磁干扰;改善系统的可靠性;软件设计方便灵活，可以根据系统要求进行修改;实现实时的监控和诊断，这一方式将是未来发展的主流。

2.1.3 逆变弧焊电源的特点

逆变弧焊电源对弧焊工艺性能的影响很大，传统的弧焊电源均采用工频传递电能和变换电参数，而逆变弧焊电源则把工频交流电变换为几十至上百千赫的交流电来进行电能变换，因而其结构上的突出特点是效率高、体积小、重量轻、节能省材。逆变弧焊电源控制性能上的特点是其控制性能好、动态响应快、易于实现焊接过程的实时控制，因而被广泛应用。逆变弧焊电源与传统弧焊电源的主要技术指标见表 2-1。

表 2-1 逆变弧焊电源与传统弧焊电源的主要指标

电源类型	输出电流 A	负载持续率%	效率%	功率因数	质量 Kg
弧焊发电机	300	50			530
硅弧焊整流器	300	60			200
晶闸管整流器	300	60			150
逆变弧焊电源	300	60		0.9 以上	

逆变弧焊电源的主要优点有:

- (1) 高效节能，其效率可达 80%~90%;
- (2) 空载损耗小，引弧可靠，可实现多种功能;
- (3) 调节速度快，所有参数均可无级调节;
- (4) 具有良好的动特性和焊接工艺性能;

- (5) 重量轻，体积小，变压器质量为传统变压器的几十分之一，设备费用低。

2.2 设计方案确定

本文设计的逆变弧焊电源组成原理框图如图 2-5 所示。电源主要由主电路和控制电路两部分组成。单相或三相工频交流电经输入整流滤波之后,通过全桥逆变器的功率开关管的交替开关,逆变成几十至上百千赫的高频交流电,再经高频变压器降至适合于焊接的几十伏电压,最后经输出整流器整流,获得所需的直流电。控制电路借助于驱动电路和反馈电路控制大功率开关管交替开关,以获得弧焊所需的外特性和动特性。

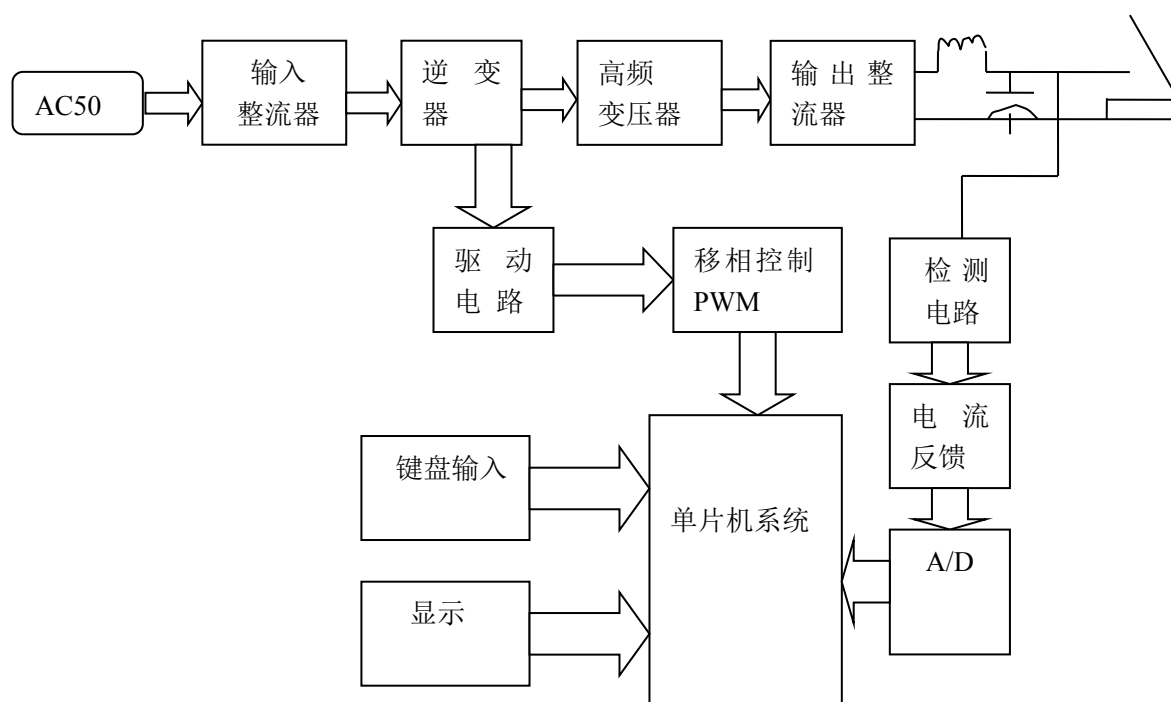


图 2-5 逆变弧焊电源原理图

2.2.2 主电路方案确定

主电路的功能是负责将电网电能传递给负载部分,主要由输入整流器、IGBT 全桥逆变器,高频变压器和输出整流器组成,逆变主电路采用零电压软开关工作方式,这一方式具有开关频率高,关断损耗小,可靠性好和工作效率高等特点。高频变压器不但起着功率传递和降压的作用,还实现了负载端与控制端的电气隔离,高频变压器的铁芯采用了性能优越的铁基非晶态合金,这两项是逆变弧焊电源设计的关键。因此,主电路的设计主要集中在全桥移相逆变主电路和高频变压器的设计上。同时,本文采用移相 PWM 控制方式,这一控制方式结合了谐振技术和脉宽调制技术,能够很好地解决硬开关脉宽调制方式中出现的一些问题,使

逆变器在软开关状态下工作，减小了逆变器的开关损耗，推动了逆变焊机的进一步发 展。

2.2.3 控制电路方案确定

控制电路以单片机系统为核心,单片机系统通过电流反馈电路从主电路获得焊接电流反馈,然后将其与焊接电流的设定值比较,由此得到焊接电流偏差 e 及焊接电流偏差的变化 ec ;用软件实现的模糊控制器以焊接电流偏差 e 和焊接电流偏差变化率 ec 为两个输入量,进行模糊控制调节,输出的控制量经过移相控制芯片 3875 得到需要的脉宽控制波形输出,控制逆变主电路进行工作,从而实现焊接规范的调节。

焊接过程中逆变弧焊电源的控制电路部分的工作过程如下:首先操作者由键盘输入焊接过程的预设工艺参数,这一参数指令直接输入单片机,并由单片机控制逆变主电路按设定工作,由开关通过控制电路发出焊接指令,焊接电流通过电流反馈及模糊控制器的控制实现恒流特性控制。当接收到焊接停止信号时,微机发出收弧指令,进行收弧处理,收弧完毕微机关闭所有通道,进入焊接结束状态。若在焊接进行的过程中出现故障信号,则故障信号以中断方式供微机处理。单片机控制系统的硬件部分设计主要包括三方面,系统输入的模拟量和开关量及其通道数的确定,单片机最小应用系统和单片机系统外围接口电路。控制系统设计的原则是尽量简化外围电路、减少分立元件,提高其抗干扰能力和工作的可靠性、稳定性。该电源控制系统采用了以单片机为核心控制芯片的应用系统,根据系统软件完成算术和逻辑运算。发出指令,调节输出等关键性工作均由单片机完成,其它电路均为之服务。外围接口电路是控制电路与主电路连接的桥梁,包括焊接电流、电压反馈电路和信号采集电路,为提高转换精度,系统采用 12 位 A/D 转换器 AD574;故障信号锁定电路,当有故障发生时,故障信号以中断方式供微机处理;移相 PWM 驱动电路,用以实现全桥移相 PWM 控制。人机界面包括系统键盘和显示电路,是人机之间交流的工具,操作者可以通过键盘方便的设定和修改合适的焊接参数。采用 8 位 LED 数码管实时显示焊接电流和电压,使操作者可以直观的了解电源的工作状态。

2.2.4 软件系统实现方案确定

控制系统的软件是逆变弧焊电源系统的灵魂，硬件系统只有在软件的指挥下才能工作。控制系统的软件主要完成焊接电流、电压的调节，恒流特性的输出及其他功能。微机控制系统的软件设计包括：

- (1)软件结构设计
- (2)主程序设计
- (3)中断服务程序设计
- (4)子程序设计

根据前述，软件主要完成焊接电流电压的调节，恒流输出，参数显示等功能。主要由主程序和两个中断服务程序和其他一些功能子程序组成。主程序用于控制焊接工作的流程，中断服务程序包括故障信号中断和键盘参数设定输入中断，属于外部中断方式。功能子程序用于完成模糊控制、程序初始化、键盘处理、软件数字滤波、参数显示等功能。模糊控制子程序是本文研究的核心，逆变弧焊电源利用模糊控制实现恒流外特性的控制，是软件设计的关键，后面有单独的章节介绍。

3 模糊控制器设计

3.1 模糊理论的提出及可行性

随着科技的发展，现代控制理论在许多领域都得到了成功应用。但应用这些控制方法都有一个基本要求：必须建立被控对象的精确数学模型并进行整定。随着各个领域对自控系统精度、响应速度、系统稳定性与适应能力等要求的不断提高，一些非线性、时变、过程机理复杂由于很难建立精确的数学模型而无法找到合适的控制方法。模糊控制因此应运而生，模糊控制是在总结人类自然语言概念、操作经验的基本上，模仿人类智能的一种控制方法。

开关变换器在工作过程中具有严重的非线性，所以逆变弧焊电源的精确的数学模型在实际问题中往往难以得到，因而要实现对开关变换器的精确控制是比较困难的。同时，当逆变弧焊电源的工作调节范围比较大时，传统的基于线性系统的控制方法将会导致不良的动态过程或者系统不稳定。因此传统的方法无法满足弧焊电源作为一个多输入，多输出，非线性系统的控制性能要求。

本设计采用模糊控制方法解决这一问题，将模糊控制应用于控制系统。很好的提高了弧焊电源的控制性能和可靠性，从而保证了系统的稳定性和良好的动态性能。

3.2 模糊控制基本原理

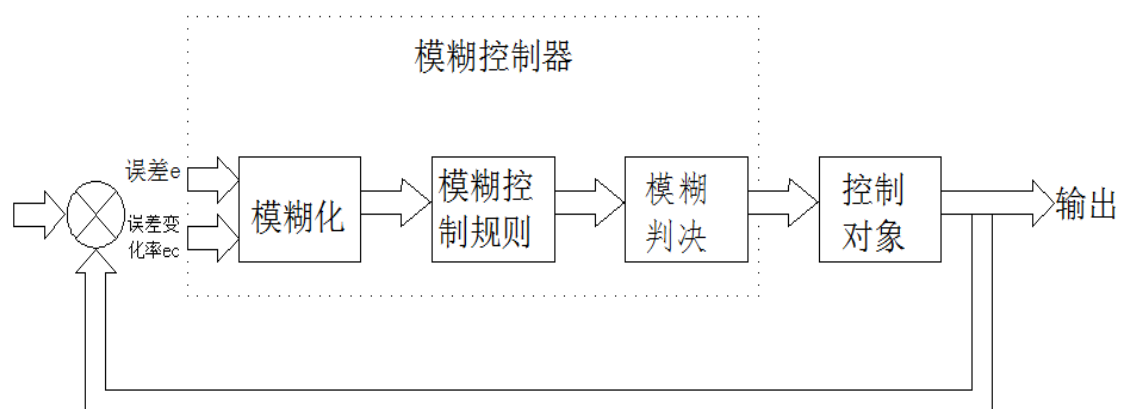


图 3-1 模糊控制原理

模糊控制由模糊化处理、模糊推理和解模糊化三部分组成。模糊化的目的是将过程状态信息的精确值转换为语言变量模糊子集的隶属函数。模糊推理是利用模糊知识库中的模糊关系，推导出模糊控制动作的过程。解模糊化是将模糊控制子集转变为确切的控制量输出。

模糊控制的基本原理是：模糊控制器的输入量通过模糊化处理。经过一定的语言规则进行模糊推理，推理得出的输出结果明晰化，最后得到控制变量的精确输出值。模糊控制的基本原理如图 3-1 所示。

3.3 模糊控制器设计

模糊控制器的实现可以通过多种方法进行。一是采用专用的模糊逻辑芯片及开发工具，其速度快、控制精度高，并有多种型号可供选用。但目前成本较高，不太适合做成通用产品，而且对输入、输出规则有所限制，缺乏灵活性。二是采用基于通用单片机的汇编代码开发软件，速度和精度较高，实现方便，对于应用单片机的场合其所附加成本较少。在采用单片机软件实现模糊控制时，又可分为两种运算方法：一是计算机离线计算出查询表，既事先将输入量模糊化、模糊推理和输出控制量解模糊化都用表格的形式表现出来，再通过运算将这些表格整合成一张模糊控制表；然后，将模糊控制表存储在单片机系统的数据存储器中；在进行控制时，通过查询模糊控制表来实现模糊控制。这一方法的优点是响应速度快，实时计算量少，程序编制较为简单，开发周期短。另一个方法是在模糊控制过程中在线计算输入变量，并将其模糊化处理，模糊推理和解模糊化输出。这一方法的隶属函数和控制规则比较灵活，通用性好；但实时计算量大，控制效果较差；并且开发周期长，对编程人员的要求较高。

基于上面的分析，本文采用查表法应用单片机软件编程来实现模糊控制。模糊控制器的设计是指实现模糊控制的软件设计，主要包括以下几个方面：确定模糊控制器的输入变量和输出变量，选择输入、输出变量的论域及参数；变量的语言描述与赋值表的建立；设计模糊控制器的控制规则；确立模糊化和明晰化方法，模糊控制表的生成。

3.3.1 模糊控制器的输入、输出语言变量

按照模糊控制器的输入与输出变量的数量，模糊控制器常可分为一输入一输出模糊控制器，二输入一输出模糊控制器和多输入一输出模糊控制器。在理论上，模糊控制器的输入变量的个数(维数)与控制精度成正比，但维数越多，控制越复杂，越难以实现。因此，本文采用二输入一输出的二维模糊控制器。

模糊控制器的输入语言变量多取被控对象的偏差及其变化率，输出语言变量取控制量的变化。在这里输入变量取为焊接电流的偏差 e 及其变化率 ec 。在移相控制电路中，OUT1、OUT2、OUT3、OUT4 分别是逆变器功率器件 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 的触发脉冲，如图 5-2 所示。OUT1、OUT3 分别是超前桥臂上、下功率器件 S_1 、 S_3 的触发脉冲，相位相反；OUT2、OUT4 分别是滞后桥臂上、下功率器件 S_2 、 S_4 的触发脉冲，相位相反。OUT1、OUT4 和 OUT2、OUT3 分别有共同导通部分，这个共同导通部分是电源向负载传送功率部分。通过调节共同导通部分即可调节输出参数。因此，模糊控制器的输出变量为逆变器中 S_1 、 S_4 和 S_2 、 S_3 的共同导通时间的变化。

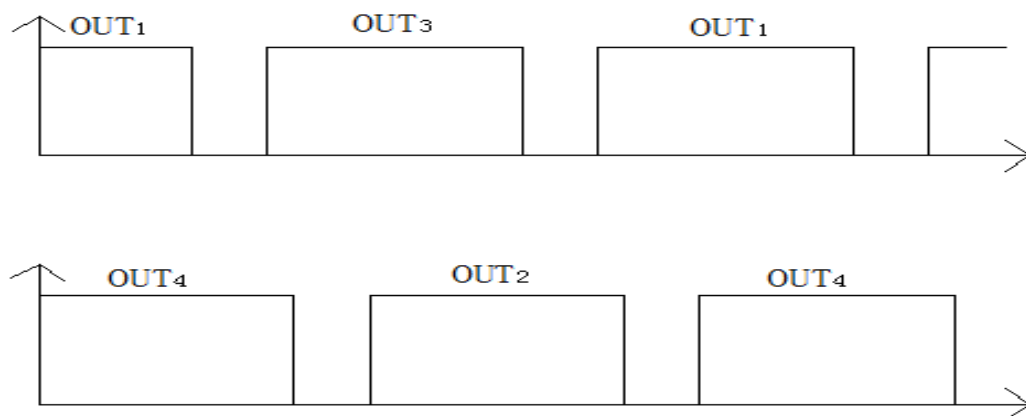


图 3-2 移相控制电路触发脉冲波形

3.3.2 变量的语言描述与复制表

在模糊控制器的设计中，首先要确定输入变量的基本论域和离散。在二输入一输出的模糊控制系统中，输入变量电流偏差变化率 ec 的实际变化范围为语言变量的基本论域。被控制量实际的控制变化范围为模糊控制器输出变量的基本论域。

本文取输入变量电流偏差 e 的基本论域取为 $[-20, 20]$ 。

输入变量偏差变化率 ec 的基本论域取为 $[-6, 6]$ 。

输出变量共同导通时间的变化 t_c 的基本论域为 $[-24, 24]$ 。

输入变量焊接电流偏差 E 的离散论域为:

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

输入变量焊接电流偏差变化率 EC 的离散论域取为:

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

输出变量 TC 的离散论域取为:

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

基本论域中的量是精确量,而模糊子集的量是离散量,其离散值代表一个模糊子集,因此要将输入变量的基本论域中的量向其模糊子集的离散子集的离散化论域模糊化。要将输入精确量转换为模糊量,首先要确定量化因子。量化因子的定义为:

$$k_x = 2n/(x_H - x_L) \quad (3-1)$$

其中, $[,]$ 为控制量变化的基本论域, n 为基本论域的量化档数。由公式 3-1 得到电流偏差及其变化率的量化因子分别为:

$$k_e = 2n/(e_H - e_L)$$

$$k_{ec} = 2n/(ec_H - ec_L)$$

一旦量化因子确定,系统的任何偏差和偏差的变化率总可以变化为离散论域中的元素。在设计时应当注意,当量化因子 ke 取值大时,基本论域会有所缩小,可以增加偏差控制的灵敏度,但容易出现超调,系统过渡时间长;当量化因子 ke 取值小时,基本论域会放大,降低偏差控制的灵敏度,控制不够精确。当量化因子 kec 大时,不易超调,但系统响应慢。

基于量化因子的概念,对于模糊控制器的输出量,定义从其模糊量到精确量的变换的比例因子为:

$$k_u = (u_H - u_L)/2n \quad (3-2)$$

其中, $[u_L, u_H]$ 为输出量变化的基本论域, n 为基本论域的量化档数。由公式 5-2 得到输出量变换的比例因子为:

$$k_{tc} = (tc_H - tc_L)/2n = 4$$

比例因子的大小对系统性能的影响表现为:比例因子大,则被控过程阻尼下降;相反,比例因子小,则过程的响应迟缓。

焊接电流偏差 E 所对应的语言变量在基本论域上模糊子集为:

{正大(PB), 正中(PM), 正小(PS), 正零(P0), 负零(N0), 负小(NS), 负中(NM), 负大(NB)}。

焊接电流偏差变化 EC 语言变量在基本论域上的模糊子集为:

{正大(PB), 正中(PM), 正小(PS), 正零(P0), 负小(NS), 负中(NM), 负大(NB)}。

输出变量 TC 的语言变量在基本论域上的模糊子集为:

{正大(PB), 正中(PM), 正小(PS), 正零(P0), 负小(NS), 负中(NM), 负大(NB)}。

语言变量论域上的模糊子集由隶属函数 $\mu(x)$ 来描述。隶属函数 $\mu(x)$ 可以通过总结操作者的操作经验或统计方法获得。输入、输出变量的隶属函数采用常用的三角形隶属函数,在偏差较大的区域,隶属函数形状为平缓型,而在偏差较小时,为提高控制的灵敏度,隶属函数形状陡一些。其隶属函数分别如图 5-3、5-4、5-5 所示。

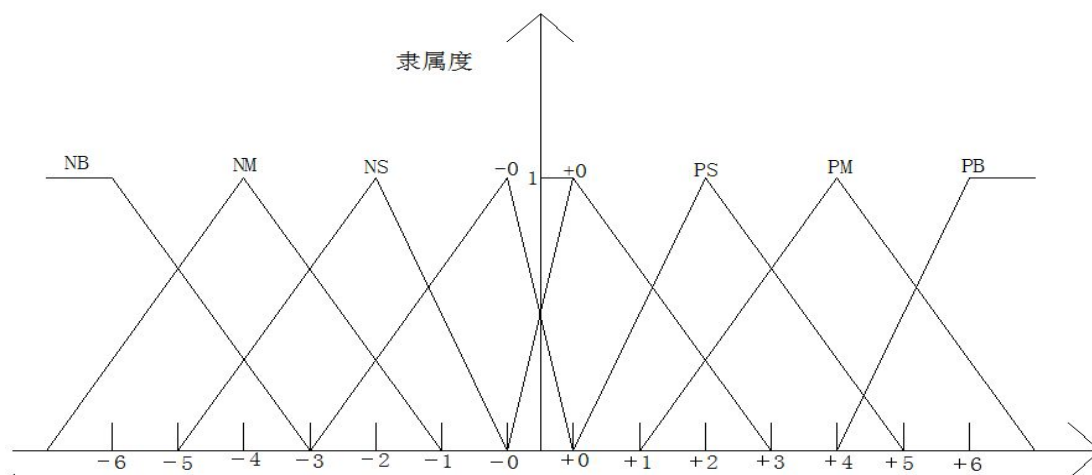


图 3-3 E 的隶属函数曲线

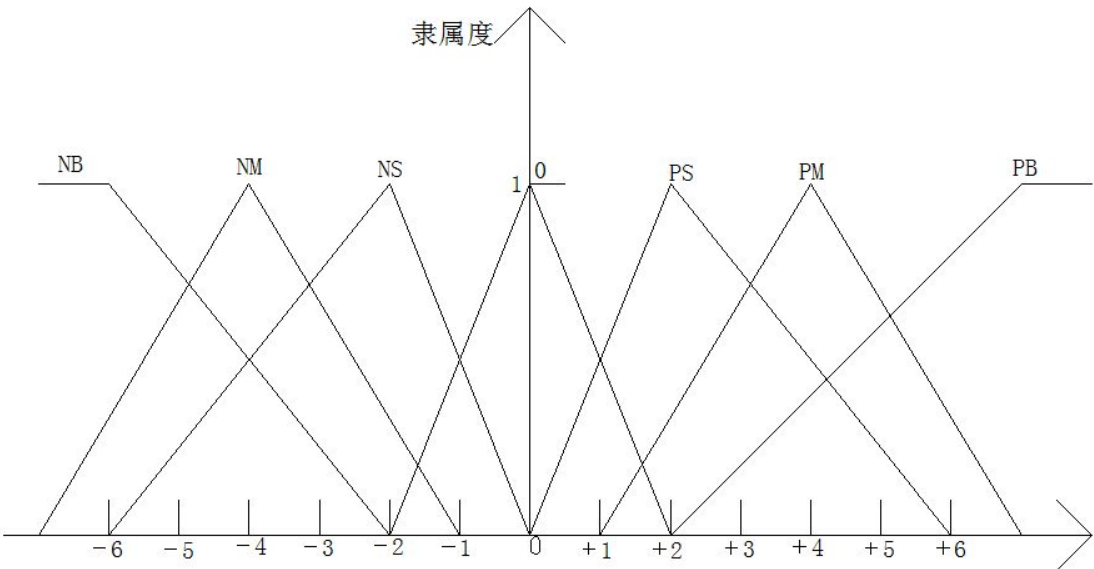


图 3-4 EC 的隶属函数曲线

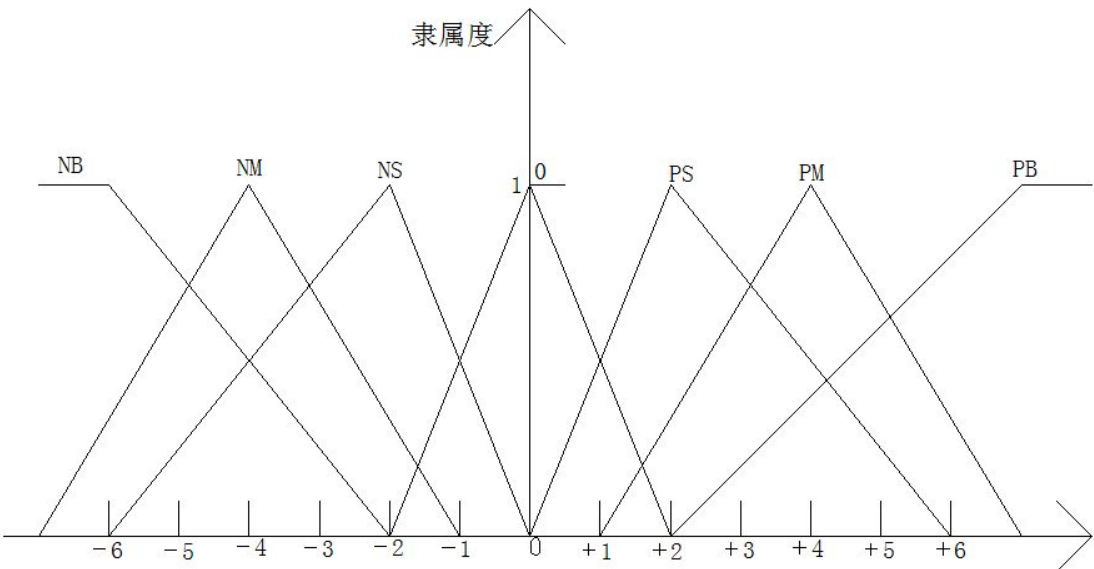


图 3-5 TC 的隶属函数曲线

在选定模糊控制器的语言变量及其所取的语言值，并确定了语言变量在各自论域上子集之后，要为语言变量分别建立用以说明各语言值从属于各个自论域程度的表格，称为语言变量赋值表。表 3-1,3-2,3-3 分别为电流变差 e ，电流偏差表格化 ec 和输出 tc 的赋值表。

表 3-1 电流偏差 e 赋值表

$\begin{matrix} u \\ e \\ E \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB											0.3	0.5	0.8	1.0
PM										0.3	0.7	1.0	0.7	0.3
PS								0.3	0.7	1.0	0.7	0.3		
P0								1.0	0.7	0.3				
N0					0.3	0.7	1.0							
NS			0.3	0.7	1.0	0.7	0.3							
NM	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3									
NB	1.0	0.8	0.5	0.3										

表 3-2 电流偏差变化 ec 赋值表

$\begin{matrix} u \\ ec \\ EC \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB										0.3	0.5	0.8	1.0
PM									0.3	0.8	1.0	0.7	0.3
PS								0.5	1.0	0.7	0.3		
0						0.5	1.0	0.5					
NS			0.3	0.7	1.0	0.5							
NM	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3								
NB	1.0	0.8	0.5	0.3									

表 3-3 输出 tc 赋值表

$\begin{matrix} u \\ tc \\ \pi \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB										0.3	0.5	0.8	1.0
PM									0.3	0.7	1.0	0.7	0.3
PS									0.8	0.5	0.3		
0							0.5	1.0					
NS			0.3	0.5	0.8	1.0	0.5						
NM	0.3	0.7	1.0	0.7	0.3								
NB	1.0	0.8	0.5	0.3									

3.3.3. 模糊规则建立

模糊控制算法又称模糊控制规则是将操作者在操作过程中的实践经验加以总结，而得到的若干条模糊条件语句的集合，是模糊控制器的核心。

以焊接电流偏差及其变化率为输入，逆变器功率器件触发脉冲的共同导通时间为输出的二输入一输出模糊控制系统中，选取控制量的变化 TC 的基本原则是：偏差较大时，选择控制量以快速消除偏差为主，当偏差较小时选择控制量应防止超调，以控制稳定性为主。通常选用

if E and EC then TC

的形式，本文建立控制规则如下：

- 1) if E=PB and EC=PB then TC=NB
- 2) if E=PB and EC=PM then TC=NB
- 3) if E=PB and EC=PS then TC=NB
- 4) if E=PB and EC=0 then TC=NB
- 5) if E=PB and EC=NS then TC=NM
- 6) if E=PB and EC=NM then TC=0
- 7) if E=PB and EC=NB then TC=0
- 8) if E=PM and EC=PB then TC=NB
- 9) if E=PM and EC=PM then TC=NB
- 10) if E=PM and EC=PS then TC=NB
- 11) if E=PM and EC=0 then TC=NB
- 12) if E=PM and EC=NS then TC=NM
- 13) if E=PM and EC=NM then TC=0
- 14) if E=PM and EC=NB then TC=0
- 15) if E=PS and EC=PB then TC=NS
- 16) if E=PS and EC=PM then TC=NM
- 17) if E=PS and EC=PS then TC=NM
- 18) if E=PS and EC=0 then TC=NM
- 19) if E=PS and EC=NS then TC=0
- 20) if E=PS and EC=NM then TC=PS
- 21) if E=PS and EC=NB then TC=PS
- 22) if E=P0 and EC=PB then TC=NM

23) if E=P0 and EC=PM then TC=NM

- 24) if E=P0 and EC=PS then TC=NS
- 25) if E=P0 and EC=0 then TC=0
- 26) if E=P0 and EC=NS then TC=PS
- 27) if E=P0 and EC=NM then TC=PM
- 28) if E=P0 and EC=NB then TC=PM
- 29) if E=N0 and EC=PB then TC=NM
- 30) if E=N0 and EC=PM then TC=NM
- 31) if E=N0 and EC=PS then TC=NS
- 32) if E=N0 and EC=0 then TC=0
- 33) if E=N0 and EC=NS then TC=PS
- 34) if E=N0 and EC=NM then TC=PM
- 35) if E=N0 and EC=NB then TC=PM
- 36) if E=NS and EC=PB then TC=NS
- 37) if E=NS and EC=PM then TC=NS
- 38) if E=NS and EC=PS then TC=0
- 39) if E=NS and EC=0 then TC=PM
- 40) if E=NS and EC=NS then TC=PM
- 41) if E=NS and EC=NM then TC=PM
- 42) if E=NS and EC=NB then TC=PM
- 43) if E=NM and EC=PB then TC=0
- 44) if E=NM and EC=PM then TC=0
- 45) if E=NM and EC=PS then TC=PM
- 46) if E=NM and EC=0 then TC=PB
- 47) if E=NM and EC=NS then TC=PB
- 48) if E=NM and EC=NM then TC=PB
- 49) if E=NM and EC=NB then TC=PM
- 50) if E=NB and EC=PB then TC=0
- 51) if E=NB and EC=PM then TC=0
- 52) if E=NB and EC=PS then TC=PM
- 53) if E=NB and EC=0 then TC=PB

54) if E=NB and EC=NS then TC=PB

55) if E=NB and EC=NM then TC=PB

56) if E=NB and EC=NB then TC=PB

由以上 56 条模糊控制规则，可建立如表 3-4 所示的控制规则表：

表 3-4 控制规则表

TC \ E EC	PB	PM	PS	P0	N0	NL	NM	NS
PB	NB	NB	NM	NM	NM	NS	0	0
PM	NB	NB	NM	NM	NM	NS	0	0
PS	NB	NB	NM	NS	NS	0	PM	PM
0	NB	NB	NM	0	0	PM	PB	PB
NS	NM	NM	0	PS	PS	PM	PS	PS
NM	0	0	PS	PM	PM	PM	PB	PB
NB	0	0	PS	PM	PM	PM	PB	PB

3.3.4 模糊推理

模糊控制器输入、输出语言变量在各自论域上语言值的模糊子集已知，模糊控制规则表的每一条语句都决定一个模糊关系矩阵，在计算出所有的模糊条件语句决定的模糊关系 $R_i (i=1,2,\dots,m)$ 之后，(R_i 为一组具有“或”关系的模糊语句)这组模糊语句所代表的控制规则总的模糊关系为：

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_m = \bigcup_{i=1}^m R_i \quad (3-3)$$

由模糊语句“if E and EC then TC”所决定的三元模糊关系 R 为：

$$R = (E \times EC)^{T_1} \times TC \quad (3-4)$$

其中 $(E \times EC)^{T_1}$ 为由模糊关系矩阵构成的 $n \times m$ 维列向量， n 、 m 分别为模糊集合 E 和 EC 论域的元素数。基于模糊推理合成规则，依据公式 (3-4) 的模糊关系可以求得与给定输入集合 E1、EC1 对应的集合 TC1：

$$(3-5)$$

其中 $(E_1 \times EC_1)^{T_2}$ 为由模糊关系矩阵 $(E_1 \times EC_1)^{T_2}$ 构成的 $n \times m$ 维列向量， n 、 m 分别为模糊集合 E 和 EC 论域的元素数。具体计算时可采用如下算法

(3-6)

(3-7)

得到的 tc_1 是一个模糊集合，全部共可得到 $tc_1 \sim tc_{56}$ 共 56 个模糊集合。

显然，模糊控制器输出的控制量是一个模糊子集，它反映的是控制语言不同取值的一种组合。但是，被控对象只能接受一个控制量，这就需要从输出的模糊子集中判决出一个精确控制量。也就是设计一个由模糊集合到普通集合的映射，称之为模糊判决。本文采用加权平均法进行模糊判决，以得到控制量的精确值。加平的公为:

$$u_{OUT} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) g_{u_i}}{\sum_{i=1}^n \mu(u_i)} \quad (3-8)$$

其中 u_i 为模糊量输出， $\mu(u_i)$ 为模糊量的隶属度， u_{OUT} 为求得的判决结果。

上面得到 $tc_1 \sim tc_{56}$ 共 56 个模糊集合，而这 56 条规则是或的关系，所以综合

这 56 条规则得到控制变量为 tc_{OUT} ，进行模糊判决后，即可得到控制量的精确值。下面给出该方法的计算实例。

设采样得到的焊接电流偏差 e 及偏差变化 ec 的精确量经模糊化后 e 为 6， ec 为 6， e 、 ec 的隶属函数值在对应的量化等级上取 1，其余取 0，则

e : [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]

ec : [0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1]

对于第一条规则:if E=PB and EC=PB then TC=NB 有:

[illegible]

[illegible]

$$\begin{aligned}
 &=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \\
 &\quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.8 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0.8 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 &=[1.0 \ 0.8 \ 0.5 \ 0.3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \\
 &\quad \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.8 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.0 & 0.8 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

根据公式(5-7) $tc_1 = e \cdot [E \times tc] \cdot ec \cdot [EC \times tc]$

$$=[1.0 \ 0.8 \ 0.5 \ 0.3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

同理可推出其它控制规则的控制变量 $tc_2 \sim tc_{56}$ 。

采用加权平均法进行模糊判决，

$$tc_{OUT} = \frac{1.0 \times 6 + 0.8 \times 5 + 0.5 \times 4 + 0.3 \times 3}{1.0 + 0.8 + 0.5 + 0.3} = 5$$

同理可推出不同 e 和 ec 值的其它执行量。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。

如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/968043016074006074>