

## ABSTRACT

The characteristic, history, actuality and foreground of submerged arc welding are introduced in the introduction part of this paper. It analyses the advantages and disadvantages of analog circuit control system and digital control system, point out that digital is the direction. It has an analysis on the process of submerged arc welding and control system, discusses the theory and reason of change-speed wire-feed system, analysis characteristic of the electrical arc, offer the theory for the design of digital control system of the submerged arc welding.

According to the problems of too big body, complex control circuit and bad reliability, it design control system of microprocessor and FPGA, based on analog control system. Because the uniformity of wire-feed speed affects welding process to be stable and weld joint quality directly. Good control system of the wire-feed speed is precondition of realize high grade weld. This article design a fuzzy controller based on the VHDL language, according to the characteristic of electric arc specially. It is used to adjust the wire-feed speed, in order to make the electrical arc stable. The speed of the car adjusts by the closed-loop control. The PWM pulse drives the motor produced by digital PI. To designed the welding program with the VHDL language, according to the characteristic of the flow with the submerged arc welding, to realize the entire control of welding process and all kinds of protection functions.

Electromagnetism disturbances are inevitable in digital control system. Reliability and noise resistance designs are also covered in control circuit and software. The reasons of disturbance are analyzed, and some hardware and software measures are adopted in chart design, PCB making and program.

Do an experiment on the control system of this paper, the experiment results indicates: It can meet the request of power source and process

# 山东大学硕士学位论文

---

control of SAW. And the control system has many advantages such as simple circuit, high control precision, strong anti-interference ability, intelligible man-machine dialogue and reliable performance. It has improved comprehensive performance of the welder and automatic degree.

The digital control system of this paper uses the design of micro controller and FPGA. It displays the control ability of micro controller and logic ability of FPGA. The welding machine has the good output characteristic and it can adjust by the request. It can realize non-linear control and satisfy submerged arc welding and hand-arc welding. The output characteristic, wire-feed speed and welding speed of the digital control welding machine are control by digital control arithmetic. The process of start-arc, welding and stop-arc are controlled by software. The arc is steady and the quality of welding is good. And that, the welding machine has the functions of data memory and trouble diagnosed.

Key words: submerged arc welding, microprocessor, FPGA, fuzzy control, digital PI.

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 杨介辉      日 期： 2006.5.26.

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 杨介辉 导师签名： 平海 日 期： 2006.5.26

## 第一章 绪论

### 1.1 埋弧焊简述

埋弧焊是电弧在焊剂层下燃烧进行焊接的一种方法，它是利用焊丝与焊件之间在焊剂层下燃烧的电弧产生热量，熔化焊丝、焊剂和母材金属而形成焊缝，连接被焊工件。在埋弧焊中，颗粒状焊剂对电弧和焊接区起保护和合金化作用，焊丝是填充金属<sup>[1]</sup>。

埋弧焊产生于1935年，到上世纪50年代在我国开始应用。埋弧自动焊与其他焊接方法相比具有很多优点：（1）焊接电流大，生产效率高。在焊接时，焊丝从导电嘴伸出长度小，可以大大提高焊接电流，因此熔透能力和焊丝熔敷率得到很大提高；另外由于焊剂和熔渣的隔热作用，电弧散热少、飞溅小，热效率高，可以提高焊接速度。（2）焊缝质量高。埋弧焊时，焊剂和熔渣能有效地保护熔池，并可以降低熔池的冷却速度，从而可以提高焊缝的力学性能。（3）节省焊接材料和能源。较厚的焊件不开坡口也能焊透，省去开坡口和填充坡口所需的能源和时间。（4）劳动条件好。焊接过程的机械化和自动化使得焊工的劳动强度大大降低，有害气体少而且没有弧光的有害作用，很好地改善了焊工的劳动条件。（5）焊接范围广。可焊接碳素钢、低合金钢、不锈钢、耐热钢及复合钢材等，也可用于镍基合金、铜合金焊接及耐磨耐蚀合金堆焊。而且埋弧焊的自动化程度高，尤其适用于焊接中厚板结构的长焊缝。因此埋弧焊在造船、锅炉、化工容器、钢结构建筑、桥梁、起重机械及冶金机械制造业中应用非常广泛<sup>[2-5]</sup>。

在焊接领域，埋弧焊技术相对其他自动焊技术是比较成熟的技术。埋弧焊接工作过程需要焊接电源、控制系统和工装配合等几方面协调工作才能顺利进行，弧焊电源控制系统的研究和发展是埋弧焊接发展的必要条件。弧焊逆变电源具有体积小、重量轻、动特性好、调节速度快和节约能源等优势，成为焊接电源的一个重要发展方向，研究和发展逆变埋弧焊机的控制系统对于焊接领域的发展和相关工业的发展都具有重要的意义<sup>[6]</sup>。

### 1.2 数字化焊接技术的发展状况

数字化焊接技术是指用计算机技术来控制焊接设备的运行状态，使其满足和

达到焊接工艺所提出的要求，以得到合格的焊缝。它的数字化控制电路由专用集成电路ASIC、数字信号处理器DSP以及复杂可编程逻辑器件CPLD、现场可编程门阵列FPGA构成，通过程序软件调整控制方案，实现多种控制策略，控制电弧特性可以得到意想不到的焊接性能。

虽然 CPLD/FPGA 和 DSP 的应用处于起步阶段，但是数字系统本身具有的优势和现有数字化焊机的特点，已经使焊机数字化成为焊机控制的发展趋势。数字化焊机的优点可以归纳为以下几点：（1）容易实现非线性控制。由于模拟电路很难实现非线性控制，数字化控制系统的这一优势就显得尤为突出。（2）实现了柔性化控制和多功能集成。系统的控制策略通过软件的形式加以实现，有利于进行控制系统的优化设计和多功能集成。（3）控制精度高，稳定性好。数字化控制系统以数字信号处理为基础，受环境温度和噪声的影响较小，可靠性高。（4）产品的一致性好。模拟控制系统的性能受元件参数性能变化的影响比较大，而数字系统基本上不受影响，因此数字系统便于测试、调试和大规模生产。（5）接口兼容性好。由于数字化焊机采用了单片机、CPLD/FPGA 和 DSP 等数字芯片，它们与其他数字技术为基础的系统和设备是相互兼容的，与这些系统接口来实现某些功能要比模拟系统相对容易的多。（6）数字化控制使焊接电源具有很好的系统灵活性。模拟系统的配置和增益是由阻容网络硬件所决定的，一旦确定就很难改变，而在数字化控制系统中，由于采用了数字系统的可编程芯片，设计人员可以灵活方便地对软件进行修改和升级<sup>[7,8]</sup>。

电焊机的数字化主要包括三方面的内容：

（1）主电路的数字化，即大量应用的是 IGBT、MOSFET 或双极性晶体管式弧焊逆变主电路，功率越来越大，相对体积越来越小，焊接电源的工作频率有了很大的提高，响应速度也更快，焊机可以获得更好的动态响应特性。与此同时，功率损耗大大减少，效率达到 90% 以上。自 1982 年瑞典 ESAB 公司率先推出晶闸管弧焊逆变器产品，美国的 Lincoln、Miller、Powcon、芬兰的 Kemppi、瑞士的 ELTRON 和日本的大坂变压器公司等国际著名的焊接设备公司都相继推出了各自的弧焊逆变器产品。这也标志着焊接电源主电路从模拟到数字化的跨越。对于焊接专业领域来讲，这是一项革命性的技术跨越。目前为止，主电路的发展已经比较成熟，逆变式焊机已在全国推广使用<sup>[9]</sup>。

(2) 控制电路的数字化，这方面的技术应用发展非常迅速。就控制系统的结构而言，数字化焊接的控制部分由单片机，DSP，CPLD/FPGA 或者它们中的两种或几种共同构成，对给定信号、参数反馈进行综合处理与运算、控制，达到焊接电源的数字化、信息化、柔性化的控制。1998 年奥地利 Fronius 全数字化焊机进入市场，标志着控制电路数字化焊机的实用化，将传统逆变焊机的模拟控制发展为数字化控制，极大地提高了焊机对电弧的控制品质。但是目前国内数字化焊接设备的研究基本处于实验室研究成果或中试阶段，成功用于焊接生产示例的较少。控制电路数字化是目前焊接技术发展的重点，同样也是本课题所研究的主要内容<sup>[10, 11]</sup>。

(3) 人机接口技术。人机交互系统是人机最直接的操作界面，是操作者向计算机输入信息、发出指令及观察现场参数和信息的窗口，具有友好性、灵活性、功能性、明确性、一致性、可靠性等特点。国外已有焊机将液晶显示和键盘操作相结合，进行焊接方法、焊接工艺参数设置和信息显示等的人机交互过程。近些年，焊机数字化技术发展越来越快，不断的有更加先进、功能更加强大的数字化焊机推出，数字化的人机交互系统得到深入的开发，这是很值得重视的一个数字化焊机技术发展的最新动向<sup>[12, 13]</sup>。

### 1.3 埋弧焊机控制系统的发展现状

与大多数焊机一样，埋弧焊控制系统按其发展过程分为模拟电路控制和数字电路控制。传统的模拟电路控制系统，经过几十年的发展，已经相当成熟，在目前使用的焊机中占有很大比例。但是，由于模拟电路的一些固有的缺点和近几年数字技术的迅猛发展，模拟电路控制正在被数字控制技术取代。

#### 1.3.1 国内埋弧焊机控制系统发展现状

目前，大多数国产埋弧焊机设备中核心的控制电路，仍使用简单的分立元件、集成电路组成，元件数目众多，电路复杂，因而导致系统的稳定性差，故障率高，维修麻烦。而且模拟系统的配置和增益是由阻容网络硬件所决定的，一旦确定就很难改变。另外，由于元器件本身缺点，温度漂移、参数分散性等问题在模拟电路中不可能消除，因此这种焊机只具备基本的控制功能，根本谈不上智能化和高性能。从控制方式上讲，有的只是使用了简单的比例闭环反馈，没有使用PID

或更复杂的模糊、模糊PID或专家控制等先进算法，这就决定了其焊接效果不可能很好。

少数处于国内先进水平的企业，其生产的埋弧焊机应用了单片微处理器控制，带有液晶显示界面，具有通讯接口。其主要特征就是单片机在焊机中的主要作用是完成焊机的管理和焊接参数的给定，焊接工艺中的恒压、恒流控制则通过程序中的PI算法来完成。更先进的通过模糊控制、神经网络、传感器、专家系统、IC卡、数字化控制对焊接电流进行精细和智能调节，把焊接“粗活”做细、做精、做快等等，科研水平已经达到或接近国外先进水平，但是在实际应用上，很多并没有达到生产实用的水平，与国外相比差距很大。

### 1.3.2 国外埋弧焊机控制系统发展现状

在国外，埋弧焊机数字化已经达到了很高的水准，微处理器控制系统，结构复杂，功能繁多，很多还使用了DSP(数字信号处理器)技术，有的甚至使用了含有该公司专利技术的芯片，以提高运算速度，实现先进的控制算法；具有丰富的人机对话功能，可以输入很多焊接相关参数，并且可以保持很多组，根据各种不同的场合，随用随调；带有RS232或RS485通讯接口，或以太网，可以与工作站进行数据交换，方便工艺管理和操作。另一方面，可以与焊接专家系统构成一个功能更加强大、完善的焊接系统：焊接区域图像传感、CCD焊缝自动跟踪、双面埋弧焊接等高科技日趋成熟。

### 1.4 课题研究背景

随着计算机技术的不断发展和普及，数字化技术已经在诸如马达控制、汽车的ABS系统等领域得到广泛应用，从20世纪90年代末，奥地利Fronius全数字化焊机进入中国市场，拉开了国内焊机数字化控制的序幕，数字化技术成为焊机控制系统发展的必然趋势，也是现代焊接技术研究的一个热点。

近年来，随着微处理器、数字信号处理器DSP(Digital Signal Processor)和大规模专用集成电路ASIC(Application Specific Integrated Circuit)的发展，使焊接电源设备与工艺的控制电路，已经由过去的分立元件、简单集成电路发展到以单片机、工控机、DSP和CPLD/FPGA为核心的数字化控制电路，即向数字化方向发展。

微处理器即单片机，具有较强的事件处理能力，中断、I/O 资源丰富，国内经过 20 多年的开发应用，开发的软件、硬件条件比较好，但是它的数据处理能力较弱，在实时性数据处理量大系统应用中难以胜任。

DSP 面向高性能、重复性、数值运算密集型的实时处理；DSP 是在硬件、软件和指令集等方面经过优化适应数字信号处理的微控制器或微型计算机，在高速实时应用的场合，DSP 更能满足大量、快速的运算。

ASIC 是专门为某一专门用户或某一应用领域设计制造的 LSI 或 VLSI 电路，具有体积小、重量轻、功耗低、高性能、高可靠性和高保密性等优点。ASIC 的分类如图 1.1 所示<sup>[14]</sup>：

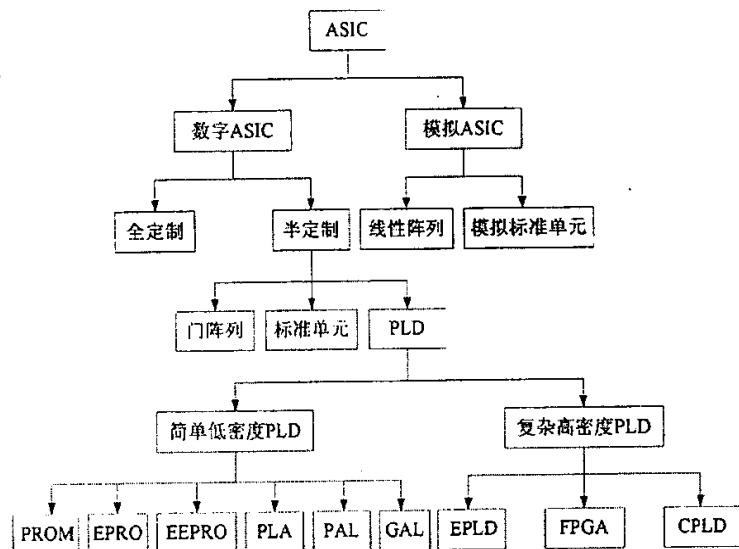


图 1.1 ASIC 的分类

半定制的 ASIC 是在芯片上制作好一些具有通用性的单元元件和元件组的半成品硬件，用户仅需考虑电路逻辑功能和各功能模块之间的合理连接即可。这种设计方法灵活方便，性价比高，缩短了设计周期，提高了成品率。半定制 ASIC 包括门阵列、标准单元和可编程逻辑器件三种。其中最常用的是 CPLD（Complex Programmable Logic Device）与 FPGA（Field Programmable Gate Array）器件。

### (1) 复杂的可编程逻辑器件 CPLD

CPLD 是 20 世纪 80 年代末 Lattice 公司提出了在线可编程 (ISP, In System

Programmability) 技术以后于 20 世纪 90 年代初出现的。CPLD 采用 E<sup>2</sup>CMOS 工艺制作，包含至少三种结构：可编程逻辑宏单元、可编程 I/O 单元和可编程内部连线。典型器件有 Altera 的 MAX7000 系列，Xilinx 的 7000 和 9500 系列，Lattice 的 PLSI/isplSI 系列和 AMD 的 MACH 系列。

## (2) 现场可编程逻辑器件 FPGA

FPGA 器件是 Xilinx 公司 1985 年首家推出的，它是一种新型的高密度的 PLD，采用 CMOS-SRAM 工艺制成。FPGA 的结构与门阵列 PLD 不同，其内部有许多独立的可编程逻辑模块（CLB）组成，逻辑块之间可以灵活的相互连接。FPGA 的结构一般分为三部分：可编程逻辑块、可编程 I/O 模块和可编程内部连线。CLB 的功能很强，不仅能够实现逻辑函数，还可以配置成 RAM 等复杂的形式。配置数据存放在片内的 SRAM 或者熔丝图上，基于 SRAM 的 FPGA 器件工作前需要从芯片外部加载配置数据。配置数据可以存储在片外的 EPROM 或者计算机上，设计人员可以控制加载过程，在现场修改器件的逻辑功能，即所谓现场可编程。FPGA 出现后受到电子设计工程师的普遍欢迎，发展十分迅速。Xilinx、Altera 和 Actel 等公司都提供高性能的 FPGA 芯片。

由于 CPLD/FPGA 善于处理逻辑信号，具有现场可编程的特点，可以实现专用集成电路，因此越来越受到硬件电路设计工程师们的青睐。

现代逆变式埋弧焊接电源具有控制周期短，动态响应快，能够进行精确控制等优势，与数字化信号处理相结合，可实现两个目的：一是使用数字化技术可以解决焊接电源设备自身所存在的问题；二是用数字化技术提升它的功能和性能，满足先进制造技术的需求<sup>[15-18]</sup>。

## 1.5 课题研究的意义

随着数字技术的发展，焊接领域正面临着一次“数字化革命”。数字化焊机的特点，主要体现在超强的控制能力和快速的响应性能这两个方面，正是这两方面的优势使其具备了更完美地控制焊接工艺过程的潜能。勿庸置疑，采用数控技术，是埋弧自动焊的发展趋势，因此研制数控埋弧焊机具有很现实的意义<sup>[19]</sup>。

本课题所研究的埋弧焊机数字化控制系统，采用单片机与 FPGA 相结合的双机控制方案。单片机主要负责参数设置、焊接参数实时显示、电压和电流采样等；FPGA 主要负责故障判断、电机驱动和焊接过程控制。采用此控制方案的焊机具

有良好的输出特性，可以实现非线性控制，满足埋弧焊、手工焊等工艺要求，实现一机多用。送丝速度由模糊算法进行控制，走车速度采用数字 PI 进行闭环调节，引弧、焊接和收弧过程完全由软件控制，具有电弧稳定、焊接质量好等特点，而且还具有焊接数据存储和故障自诊断功能。

高速、高效、优质和自动化、智能化是现代焊接技术的主要发展方向，而研发和推广应用数字化焊机是它的基础，也是实现现代化焊接工艺的重要标志。

## 1.6 本论文主要研究内容

- (1) 通过对国内外数字化焊接技术、焊接过程控制以及埋弧焊控制系统研究现状的分析，针对目前国内埋弧焊电源及过程控制存在的问题，确定本控制系统的设计方案。
- (2) 对传统埋弧焊机模拟控制系统进行数字化改进，针对焊接电源、埋弧焊工艺要求及送丝、小车行走装置，设计了基于单片机和 FPGA 的数字化埋弧焊控制系统。
- (3) 依据相关的电弧控制理论，结合埋弧焊接过程，设计基于 FPGA 的模糊控制器用于送丝速度的调节，用 VHDL 语言编写程序；设计基于 FPGA 的数字 PI 调节器，用于行车速度闭环调节。
- (4) 绘制埋弧焊机的控制系统软件流程图，用 VHDL 语言编写程序。
- (5) 设计多种抗干扰措施，提高逆变埋弧焊机数字控制系统的抗干扰性能，保证控制系统能够在复杂的环境中正常工作。
- (6) 对改进后的埋弧焊机进行焊接实验，检验控制系统的工作情况。

## 第二章 埋弧焊工作原理及控制系统分析

### 2.1 埋弧焊接原理分析

埋弧焊以连续送进的焊丝作为电极和填充金属。焊接时，在焊接区的上面覆盖一层颗粒状的焊剂，电弧在焊剂层下燃烧，将焊丝端部和局部母材熔化，形成焊缝。埋弧焊实施过程如图 2.1 所示，它由四个部分组成：(1) 焊接电源接在导电嘴和工件之间来产生电弧；(2) 焊丝由焊丝盘经送丝机构和导电嘴送入焊接区；(3) 颗粒状焊剂由焊剂漏斗经软管均匀地堆敷在焊缝接口区；(4) 焊丝及送丝机构、焊剂漏斗和控制箱等通常装在焊接小车上以实现焊接电弧的移动<sup>[20]</sup>。

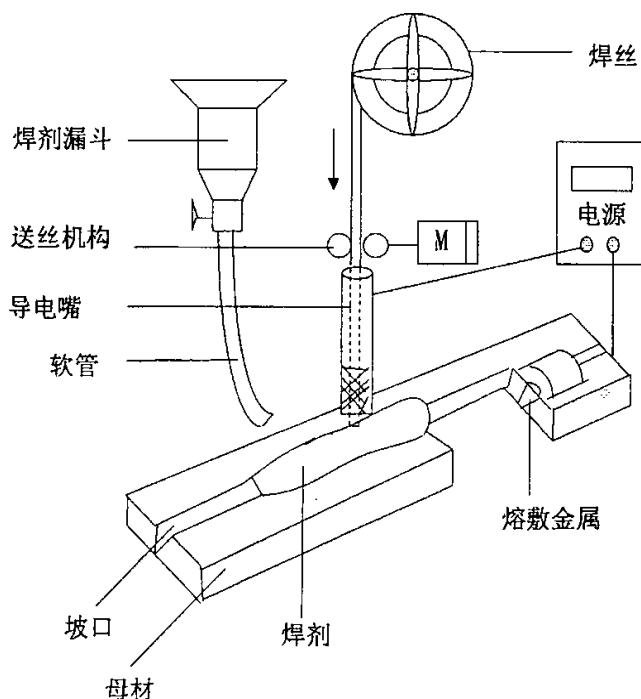


图 2.1 埋弧焊接过程示意图

在电弧热的作用下，一部分焊剂熔化成熔渣并与液体金属发生冶金反应。熔渣浮在金属熔池的表面，一方面可以保护焊缝金属，防止空气污染，并与熔化金属发生物理化学反应，改善焊缝金属的成分和性能；另一方面还可以使焊缝金属缓慢冷却。

埋弧焊焊缝成形过程如图 2.2 所示。埋弧焊时连续送进的焊丝在一层可熔化的颗粒状焊剂覆盖下引燃电弧。当电弧热使焊丝、母材和焊剂熔化以致部分蒸发后，在电弧区便由金属和焊剂蒸气构成一个空腔，电弧就在这个空腔内稳定燃烧。空腔底部是熔化的焊丝和母材形成的金属熔池，顶部是熔融焊剂形成的熔渣。电弧附近的熔池在电弧力的作用下处于高速紊流状态，气泡快速溢出熔池表面，熔池金属受熔渣和焊剂蒸气的保护下不与空气接触。随着电弧向前移动，电弧力将液态金属推向后方并逐渐冷却凝固成焊缝，熔渣则凝固成渣壳覆盖在焊缝表面。焊接时焊丝连续不断地送进，其端部在电弧热的作用下不断地熔化，焊丝送进速度和熔化速度相互平衡，以保持焊接过程的稳定进行。

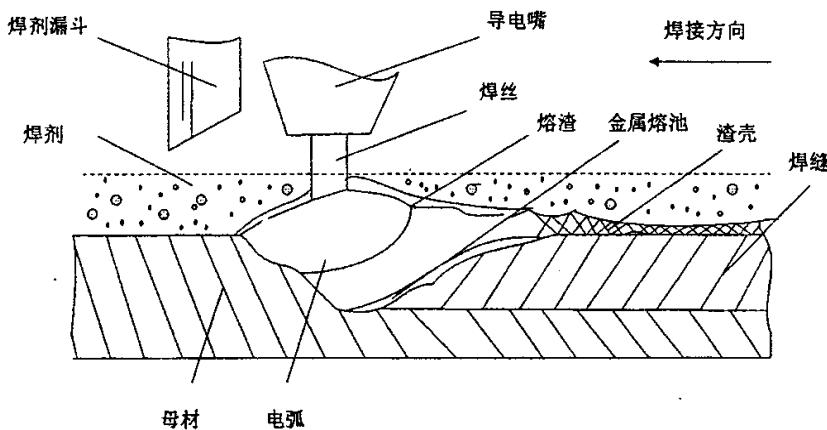


图 2.2 埋弧焊电弧和焊缝形成示意图

焊接电弧是焊接电源的负载，对焊接电源控制的最终目的是控制焊接电弧，使其在合适的规范参数下，稳定燃烧，得到高质量的焊缝。

## 2.2 焊接电弧特性分析

### 2.2.1 焊接电弧的静特性<sup>[21]</sup>

一定长度的电弧在稳定状态下，电弧电压  $U_f$  与电弧电流  $I_f$  之间的关系，称为焊接电弧的静态伏安特性，可表示为：

$$U_f = f(I_f) \quad (2-1)$$

焊接电弧是非线性负载，即电弧两端电压与电弧电流之间不成正比关系。当电弧电流从小到大变化时，焊接电弧的静特性呈 U 形曲线，如图 2.3 所示。

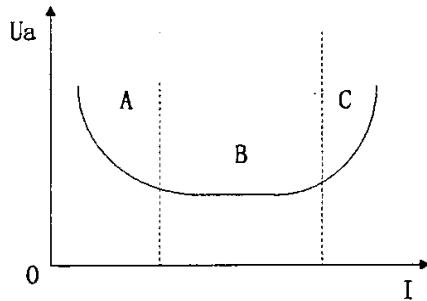


图2.3 电弧静特性曲线示意图

U形静特性曲线可分为A、B、C三段。在A段，电弧电压随电流的增加而下降，是下降特性段；在B段，电弧电压不随电流的增加而变化，是平特性段；在C段，电弧电压随电流的增加而上升，是上升特性段。

当两电极之间产生电弧放电时，在电弧长度方向上的电场强度是不均匀的，图2.4是沿电弧长度方向实测的电压分布。

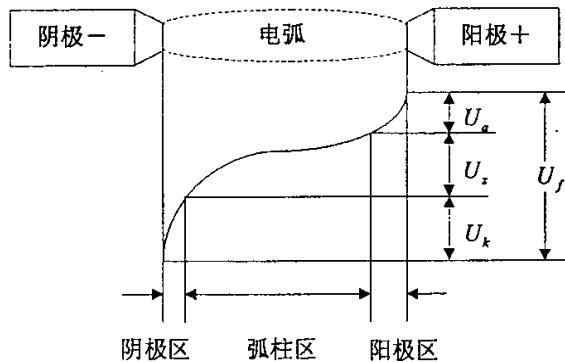


图2.4 电弧电压分布图

电弧与电源正极所接的一端称阳极区，与负极相连的一端称阴极区。阴极区与阳极区之间的部分称为弧柱区，或称正柱区、电弧等离子区。阴极区的宽度仅约 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ cm，而阳极区的宽度仅约 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ cm，因此，电弧长度近似等于弧柱长度。沿着电弧长度方向的电位分布是不均匀的。在阴极区和阳极区，电位分布曲线的斜率很大，而在弧柱区电位分布曲线则较平缓，可认为是线性的，如图2.4。这三个区的电压降分别称为阴极压降 $U_k$ 、阳极压降 $U_a$ 和弧柱压降 $U_z$ 。它们组成了总的电弧电压 $U_f$ ，可表示为：

$$U_f = U_k + U_a + U_z \quad (2-2)$$

由于阳极压降基本不变（可视为恒定）；而阴极压降在一定条件下（电弧电流、电极材料和气体介质等）基本上也是固定数值；弧柱压降在一定气体介质下与弧柱长度成正比。

在阳极区，阳极电压基本上与电流无关，焊接电弧静特性曲线为一水平线，如图 2.5 所示  $U_f$  曲线。在阴极区，当电弧电流较小时阴极斑点的面积  $S_i$  小于电极端部的面积。这时， $S_i$  随焊接电流增加而增大，阴极斑点上的电流密度  $j_i = I_f / S_i$  基本上不变。即阴极的电场强度不变，因而  $U_k$  也不变，此时  $U_k$  波形为一水平直线。到了阴极斑点面积和电极端部面积相等时， $I_f$  继续增加，则  $S_i$  不能再扩张，于是  $j_i$  就随着变大，就造成阴极压降上升，以加剧阴极的电子发射，阴极压降  $U_k$  的变化曲线如图 2.5 所示。

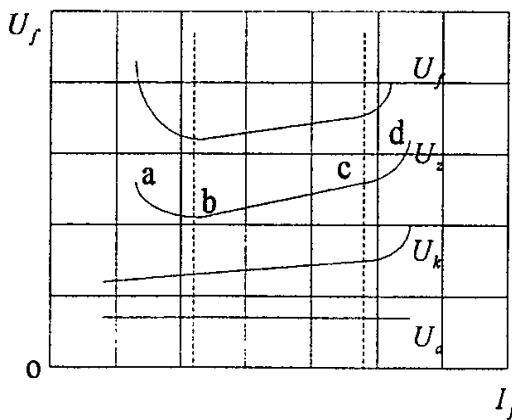


图 2.5 电弧各区域电压与焊接电流关系图

在弧柱区，可以把弧柱看成一个近似均匀的导体，其压降可表示为：

$$U_z = I_f R_z = I_f \frac{L_z}{S_z \gamma_z} = j_z \frac{L_z}{\gamma_z} \quad (2-3)$$

式中：

$R_z$ —弧柱电阻；

$L_z$ —弧长；

$S_z$ —弧柱截面积；

$\gamma_z$ —弧柱的电导率;

$j_z$ —弧柱中的电流密度。

由此可见, 弧长一定时,  $U_z$ 与 $j_z$ 和 $\gamma_z$ 有关。可把 $U_z$ 与 $I_f$ 的关系曲线分为ab、bc、cd三段来分析, 见图2.5所示。

ab段: 电弧电流较小,  $S_z$ 随 $I_f$ 的增加而扩大, 而且 $S_z$ 扩大较快,  $j_z$ 越低。同时,  $I_f$ 增加使弧柱温度和电离度均增高, 因而 $\gamma_z$ 增大。由式(2-8)可知, 随着 $j_z$ 的减小或 $\gamma_z$ 的增大, 都会使 $U_z$ 下降, 使ab段呈下降趋势。

bc段: 电弧电流中等大小时,  $S_z$ 随 $I_f$ 成比例的增大,  $j_z$ 基本不变, 此时 $\gamma_z$ 不再随温度增加而增加, 故 $U_z = j_z \frac{L_z}{\gamma_z} \approx \text{常数}$ , bc段呈水平趋势。

cd段: 此时电流很大, 随着 $I_f$ 的增加,  $\gamma_z$ 仍基本不变,  $S_z$ 不再扩大,  $j_z$ 随着 $I_f$ 的增加而增加, 所以 $U_z$ 随 $I_f$ 的增加而上升。cd段呈上升趋势。

由上面的分析, 将 $U_k$ 、 $U_a$ 、 $U_z$ 迭加起来, 就形成如图2.5所示 $U_f$ 曲线。对于不同的焊接工艺, 电弧的静特性曲线是不同的, 而且在其正常使用的范围内, 并不包括电弧静特性曲线的所有部分。静特性曲线的下降段由于电弧燃烧不稳定而很少采用。

## 2.2.2 焊接电弧的动特性

电弧的静态特性是在稳定状态下得到的, 但在多数焊接过程中, 焊接电流和电压都是工作在高速变动状态, 所以电弧不总是处在稳定状态。焊接电弧的动特性是指在一定的弧长下, 当电弧电流快速变化时, 电弧电压和电流瞬时值的关系。

如图2.6所示, 电流由a点快速增加到d点, 当电流增加到 $i_b$ 时, 由于热惯性作用, 电流还没有达到 $i_b$ 时达到稳定状态的温度。由于电弧空间温度低, 弧柱导电性能差, 阴极斑点和弧柱横截面积增加较慢, 维持电弧燃烧的电压不能降到b点, 而是高于b点的 $b_1$ 点, 当电流增加到 $i_c$ 时, 维持电弧燃烧的电压降到 $c_1$ 点。依此类推, 对应于每一瞬间电弧电流的电弧电压, 不是曲线abcd, 而是 $a_1b_1c_1d_1$ 。也就是说, 在电流增加的过程中, 动特性曲线上的电弧电压比静特性曲

线上的电弧电压要高；反之，当电弧电流迅速减少时，由于热惯性的影响，电弧空间温度来不及下降，此时，对应于每一瞬间电弧电流的电弧电压比静特性曲线上的电弧电压要低，如图 2.6 中的曲线  $a_2b_2c_2d_2$ 。

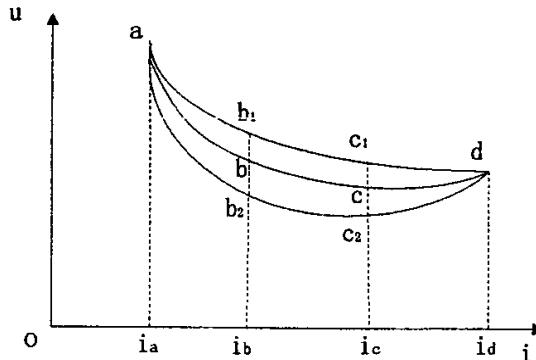


图 2.6 电弧的动特性曲线

## 2.3 焊接电源的特性

### 2.3.1 弧焊电源的静特性

在稳定状态下弧焊电源的输出电压与输出电流的关系曲线称为弧焊电源的静特性，也称为弧焊电源的外特性。弧焊电源的外特性分为平特性和下降特性两大类，平特性又称为恒压特性，下降特性又分为缓降特性、陡降特性和垂降特性三种，其中垂降特性又称为恒流特性。如图 2.7 所示。通常情况下，气体保护焊电源采用平特性，而埋弧焊电源采用垂降特性。

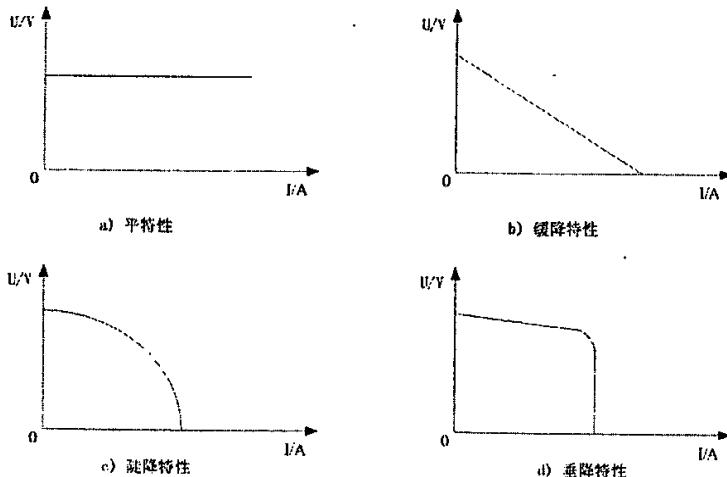


图 2.7 各种弧焊电源外特性

### 2.3.2 弧焊电源的动特性

弧焊电源的动特性是指当负载状态发生瞬间变化时，电源的输出电流与输出电压的关系，用以表征电源对负载瞬间的反应能力，主要表现在以下两个方面：一是对负载变化的响应，如在利用自身调节作用的 GMAW 焊接过程中，要求弧长变化能够引起电流的迅速变化；当焊丝与焊接熔池短路时，要有合适的短路电流上升率。二是对控制信号输入要有足够快的响应速度，在逆变电源使用以前，由于电源对控制信号的输入响应慢，通常只能采用在电源输出端串连电感的方法调节对负载变化的响应，但是不能达到对焊接工程的最佳控制要求。如果电源对控制信号的输入有足够高的响应速度，则可以通过对反馈及给定量的控制，在其响应的速度范围内获得任意的动态响应特性，逆变式弧焊电源的应用使改善焊接工艺特性的控制难题得到了很好的解决。

### 2.4 焊接过程的弧长调节

电源外特性与电弧静特性的交点为焊接过程中的静态工作点，电弧电压及焊接电流是由静态工作点确定的。凡是影响电源外特性曲线和电弧静特性曲线位置的干扰因素，都会影响到焊接电流和电弧电压的稳定性。这些干扰因素主要有：弧长波动、电弧气氛的成分变化、网压波动等。其中，弧长波动引起的干扰最为严重。电弧之所以能够持续燃烧，主要原因是在焊丝熔化过程中存在自动调节过程，弧长的自动调节方式分为等速送丝调节系统的自身调节和变速送丝系统的电弧电压反馈调节<sup>[22]</sup>。

电弧自身调节适用于细丝，采用此调节方式时，焊丝以恒定的速度送进，弧长波动时，熔化速度发生变化，依靠熔化速度的变化调节弧长，使其恢复到原来的长度。

但是，在进行粗丝焊接时，仅仅依靠电弧的自身调节作用是不够的，需要依靠外力来改变送丝速度，使弧长在受扰动时“强迫”弧长恢复。由于电弧电压能够间接反映出电弧长度而且又容易取出，因此，电弧强迫调节系统，一般采用电弧电压  $U_a$  作为反馈的变速送丝调节系统，其原理框图如 2.8 所示。

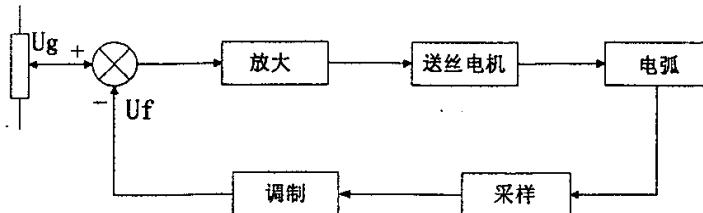


图 2.8 电弧电压反馈送丝调节系统原理框图

这是一个闭环控制系统，电弧电压采样与给定值比较后的差值，经过放大后去控制送丝电机，通过调节送丝速度达到调节电弧长度的目的，具体调节过程如图 2.9 所示。假设电弧的原始工作点为 a 点，由于受到扰动弧长升高，使工作点变化到 b 点，相应的电弧电压由  $U_a$  升高到  $U_b$ ，这一变化反馈到系统中，送丝电机就会加快送丝速度，使弧长降低，工作点又恢复到 a 点。反之，如果扰动使弧长变低，工作点变化到 c 点，送丝电机就会减缓送丝速度，使弧长升高，工作点又回到 a 点。

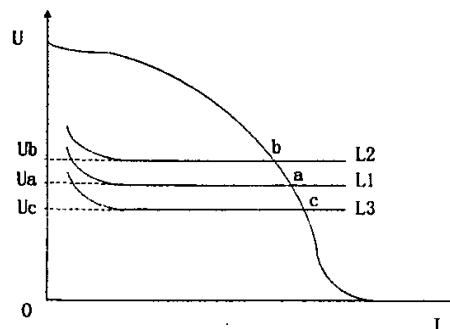


图 2.9 电弧强迫调节过程示意图

## 2.5 埋弧焊控制系统分析

埋弧焊根据其行走机构形式可分为焊车式、门架式、机床式和悬臂式几种，我们通常所说的埋弧焊是指带有行走小车的焊车式埋弧自动焊，本文所提到的埋弧焊也是指这一种。焊车式埋弧自动焊设备主要分为焊接电源和焊接小车，而焊接小车包括送丝机构、行走机构、焊头调整机构、控制箱、焊丝盘、焊剂漏斗等几部分。焊接电源与小车外部机构连线如图 2.10 所示。

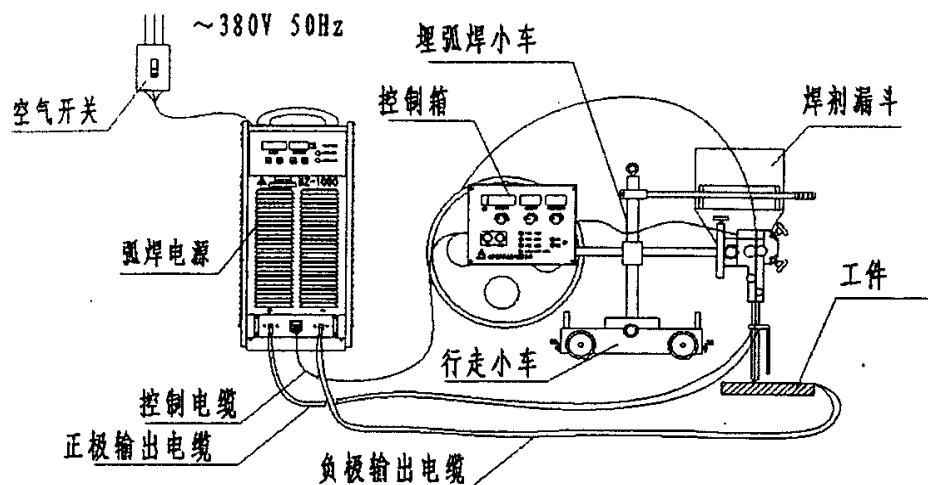


图 2.10 埋弧焊电源与小车外部连线图

埋弧自动焊机的控制系统包括电源外特性控制、送丝和小车拖动控制及焊接过程的自动控制。其中埋弧焊接自动控制过程中包括引弧、焊接和熄弧三个阶段，三阶段的动作必须通过自动控制系统来完成。

引弧一般有两种方式，即划擦引弧和反抽引弧，均是先使焊丝与焊件接触短路，然后自动回抽焊丝或前移，引燃电弧。

电弧引燃后，要求焊机能自动按预先选定的焊接工艺参数，如焊接电压、焊接电流、焊接速度等进行焊接，并能够保证这些参数在整个焊接过程中稳定。

焊接即将结束时，要求焊机能先停止送丝，再切断焊接电源，即熄弧，这样即能填满弧坑，又可以防止焊丝与焊件粘住。

在这三个阶段中，引弧和熄弧的自动过程通过少量电路和软件设计就可以实现。而在焊接过程中，要保证焊接工艺参数稳定是十分困难和复杂的，因为实际焊接时，由于受到许多因素干扰工艺参数会不断地发生变化。所以要分析影响焊接质量的因素，采取相应的措施。焊接电流是直接影响焊缝成形的主要工艺参数，在埋弧焊接过程中它的变化主要是弧长变化引起的，而弧长的变化受到很多因素影响，如网络电压波动、焊件表面起伏不平、焊接接头坡口加工不规则，在焊道上有定位焊等不平状态，这些因素在焊接中是不可避免的，在焊接过程中保持弧长稳定是埋弧焊接自动控制的关键，这要求焊接过程中出现干扰引起弧长变化时，控制系统能及时调整，使弧长马上恢复原来长度。

图2.11所示为应用最广泛的埋弧焊控制电路工作原理框图，这种通用的小车式埋弧焊机控制系统由送丝与行走驱动控制、引弧和熄弧程序控制、电源输出特性控制等环节组成<sup>[23]</sup>。

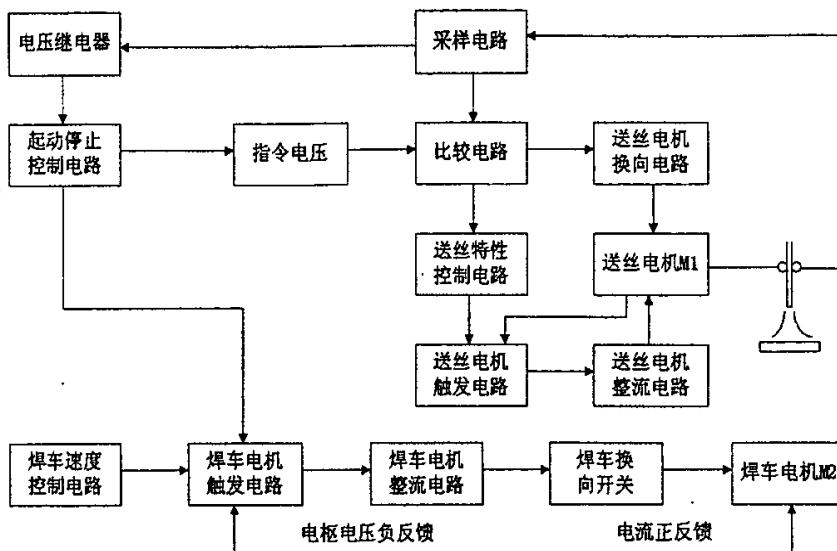


图2.11 埋弧焊机控制电路工作原理图

目前所研究的埋弧焊控制系统中，单片机的应用比较普遍，系统完成了参数给定和程序管理的功能，在一元化控制和波形控制等方面发挥了很好的作用，但是由于单片机运算速度和存储能力有限，在数据处理和 PWM 控制方面受到一定限制，其系统灵活性受到很大的影响，而且数据信号通讯能力得不到很好的发挥。因此，数字化的优势并没有在单片机控制的焊接逆变电源中完全得到体现。严格的说，逆变焊机的单片机控制还不能算是真正的数字化控制，只能成为准数字化控制，属于模拟电路控制和数字电路控制的一个过渡阶段，它在性能上与真正的数字化控制有着不少的差距。

## 2.6 本章小结

本章主要对埋弧焊接的原理进行了介绍，并分析了焊接电弧静特性和动特性。对变速送丝电弧控制系统的原理和特点以及电弧控制进行讨论，对焊接电源特性及其控制系统进行分析，为埋弧焊数字化控制系统的设计提供理论依据。

### 第三章 控制系统的硬件设计

本文设计的控制系统以高性能的单片机和FPGA为核心构成，对电源外特性、送丝速度、行车速度和焊接过程实行软件控制。单片机和FPGA之间的数据交换采用并口通讯，小车和焊机数据交换通过串行485通讯实现，控制系统的功能框图如图3.1所示。并且设计了基于FPGA的模糊控制系统，模糊算法流程用VHDL语言编写，通过电弧电压反馈控制送丝速度，以获得精确的焊接工作点控制。小车行走速度由数字PI调节器进行闭环控制。并且对焊接过程中可能出现的过热、环流、顶丝等故障进行检测，确保焊接设备的安全及焊接过程顺利进行。

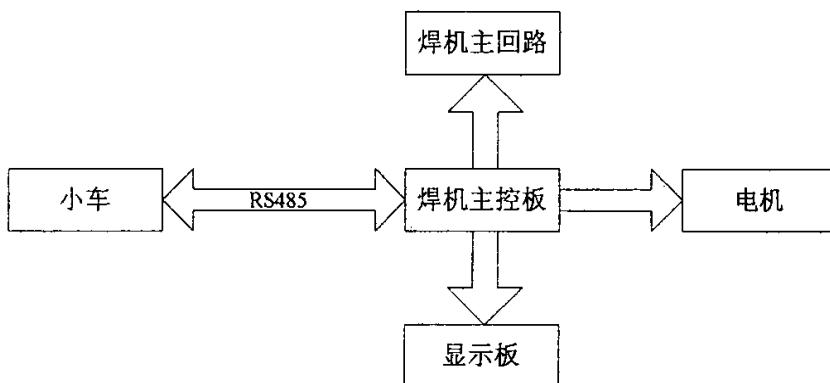


图3.1 数字埋弧焊控制系统功能框图

#### 3.1 基于单片机和FPGA控制系统的整体结构

整个控制系统由单片机和FPGA双机控制系统以及外围电路组成，系统构成原理图如图3.2所示。控制系统以FPGA和单片机构成的双机系统为核心。单片机的主要功能有参数的预置、开关量的选择、焊接过程参数显示和A/D采样等。从控制的角度来看，FPGA是主要的处理芯片，它的主要功能是负责送丝电机和走车电机的驱动，各种故障状态的检测和保护以及整个焊接过程的软件控制。

控制系统工作原理如下：在焊接过程开始前，根据其工艺要求和焊工的实践经验对焊接电流和电弧电压、焊接速度进行预置。焊接过程中，单片机不断采样焊接电流和电压，与给定电流和电压之差经比例环节，生成电流变化量，与面板生成的电流给定作和，得到最终的电流给定，送外部DA模块，通过硬件电路控

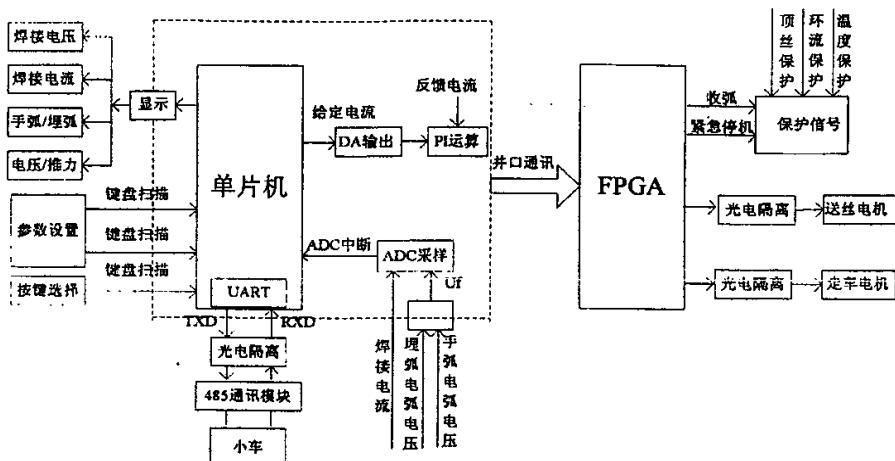


图 3.2 基于单片机和 FPGA 的控制系统框图

制焊接电源的输出特性。其中的比例系数随着给定电压与实际电压之差的变化通过软件进行调整。为保持电弧燃烧的稳定，送丝方式采用变速送丝，送丝速度的调节采用闭环控制，具体原理是：FPGA 根据给定电压和反馈电弧电压之差进行模糊运算，并最终输出一定占空比的 PWM 信号，经放大后控制 MOSFET 的开通和关断，从而使送丝电机得到一定平均值的电枢电压，以达到控制电机转速的目的，电机的正转和反转通过继电器切换实现。走车电机控制采用反电动势反馈，与给定电压由 FPGA 经过 PI 运算产生 PWM 信号驱动走车电机。正常的焊接过程中，焊机实时显示焊接电流、电弧电压和焊接速度，待机状态显示其相应的给定值。焊机与小车之间数据交流采用串行 485 通讯，单片机和 FPGA 之间采用并口通讯。埋弧自动焊过程控制完全由 FPGA 通过程序软件实现，控制焊接过程按以下流程自动进行，参数预置→回抽或划擦引弧→焊接控制→收弧→焊接结束→复位。

### 3.2 控制芯片的选择

#### (1) FPGA 芯片的选择<sup>[24]</sup>

本系统采用的 FPGA 是 Altera 公司 FLEX10K10 系列的 EPF10K10LC84-4 芯片。该芯片集成有 1 万个等效逻辑门，含有 572 个逻辑单元（LEs）、72 个逻辑阵列块（LABs）、3 个嵌入式阵列块（EABs），并具有 720 个片内寄存器，可以在不占用内部资源的条件下实现 6144 bit 的片内存储器；内部模块间采用高速、延时可预测的快速通道连接；逻辑单元间具有高速的级联链和快速进位链；片内还有

三态网络和 6 个全局时钟、4 个全局清零信号以及丰富的 I/O 资源；每个 I/O 引脚可以选择为三态控制或集电极开路输出，可以通过编程控制每个 I/O 引脚的速度以及 I/O 寄存器的使用。

由于 FLEX10K 在工作期间，将配置数据保存在 SRAM 中，而 SRAM 数据是易丢失的。SRAM 单元必须在器件加电后装入配置数据，且配置完成后，它的存储器和 I/O 引脚必须被初始化。然后，器件进入用户模式开始系统运行。FLEX10K 系列器件进行配置时，调试阶段先用被动串行法（passive serial）通过下载电缆对器件进行配置的，当整个系统设计完成后，利用 EPPOM 方式对器件进行配置。这样固化在 EPROM 中的数据将在系统上电时对 FPGA 芯片配置，其中 EPROM 芯片选用 EPC2LC20。

### （2）单片机芯片的选择<sup>[25]</sup>

本系统采用的单片机是具有 16KB 系统内可编程 Flash 的 ATmega16。它是高性能、低功耗的 8 位 AVR 微处理器。AVR 单片机是目前最新的单片机系列之一，具有速度高、片内硬件资源丰富等优点，可作为真正意义上的单片机使用。它的最大特点是低功耗和高速度，其掉电方式、闲置方式至工作方式下的耗电约为  $1 \mu A \sim 2.5 \mu A$ 。该系列单片机采用现代微处理器流水管线预取指令技术，淘汰了机器周期的概念。它以时钟周期为指令执行的基本时间单位，每个时钟周期可执行一条指令。时钟频率通常采用  $4MHz \sim 8MHz$ ，故最短的指令执行时间为  $250ns \sim 25ns$ 。在  $12MHz$  频率下，指令的吞吐量为  $12MIPS$ ，这是一般 MCS-51 单片机速度的 12 倍。AVR 系列片内含有模拟比较器，与输入捕捉功能配合可进行多种模拟控制和转换。它借鉴了某些机型的高速输入输出 HSI0 和可编程计数阵列 PCA 的概念，实现了本身的输入捕捉、输出比较和脉冲宽度调制输出功能，从而成为脉冲信号测量、开关量按时控制及某些直流马达调速的得力工具。在软件开发方面，AVR 单片机内含容量不等的闪速程序存储器（Flash Memory，简称 Flash），可反复擦写至少 1000 次，极大地方便了产品开发和软件修改。Flash 存储器中的程序可由 PC 机串行下载，亦可在通用写入器上以并行方式写入。

### 3.3 采样回路的设计

由于焊接过程中需要对焊接电流和电弧电压的瞬时值以进行实时控制，所以需要对焊接电流和电弧电压进行实时采集。手弧焊状态完成对焊接电流和焊接电

压（焊机输出端采集）的分时采样，而在埋弧焊状态时分时完成对焊接电流和电弧电压（小车机头处采集）的采样。为了保持行车速度稳定，还需要对走车电机的反电动势进行采集。

ATmega16 内部自带 8 路 10 位 ADC 模块，当定时时间到，A/D 开始采样，转换结束后，引起 A/D 中断，在中断子程序中读取相应通道数据，同时打开下一通道，为下一次转换做准备。埋弧焊状态下，采集到的电弧电压与给定电压的偏差通过软件模糊算法，实现送丝速度闭环控制；采集到的走车电机反电动势与给定电压的偏差经过软件 PI 实现行车速度的闭环控制。

### 3.3.1 采样电路<sup>[26]</sup>

电弧电压采样电路如图 3.3 所示。埋弧焊时，电弧电压是直接采样机头电弧电压；手弧焊时，电弧电压是直接采样电源的输出电压。电弧电压采样后经过线性光耦隔离后送到单片机，进行 A/D 转换。焊接电流的电路如图 3.4 所示，焊接电流是通过 LEM 传感器来检测电流。LEM 传感器输出的微小电流信号首先经过 I/V 转换成电压信号，由电压跟随器缓冲后，经过线性光耦 HCNR200 隔离送入单片机，进行 A/D 转换。为了使控制过程平稳，线性光耦后的采样电阻两端并联 2200pF 电容以滤平采样值。

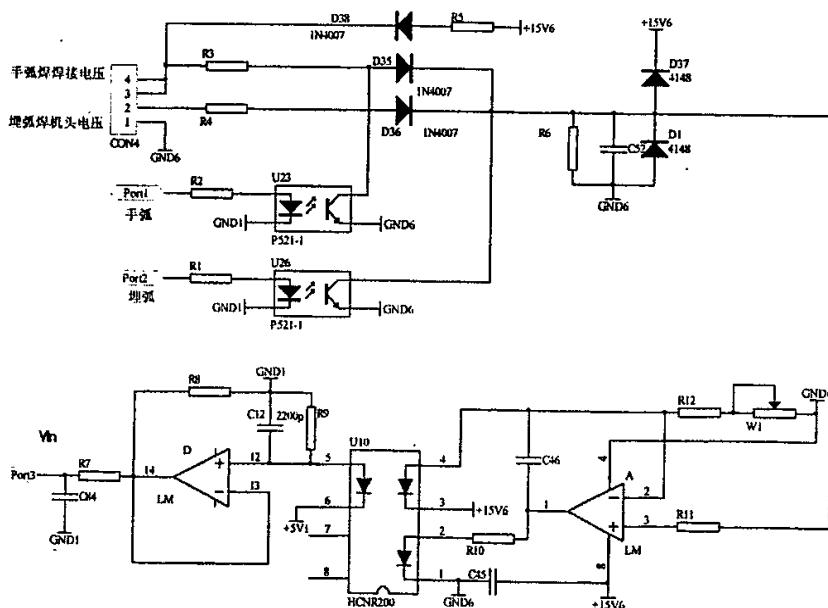


图 3.3 电弧电压采样电路

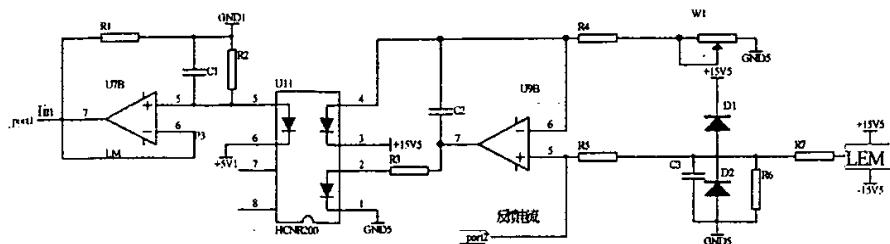


图 3.4 焊接电流采样电路

### 3.3.2 线性光耦的选择

本系统采样电路应用的是 Agilent 公司的 HCNR200 精密线性光耦合器。它是由一个红外光 LED 照射分叉配置的一个隔离反馈光二极管和一个输出光二极管组成。反馈光二极管吸收 LED 光通量的一部分而产生控制信号，该信号可用来调节 LED 的驱动电流，这种技术可用来补偿 LED 时间和温度特性的非线性，输出光二极管产生的输出信号与 LED 发出的伺服光通量成线性比例。简单地说就是通过反馈通路的非线性来抵消直通通路的非线性，从而达到实现线性隔离的目的。

#### (1) HCNR200 线性光耦合器的内部结构

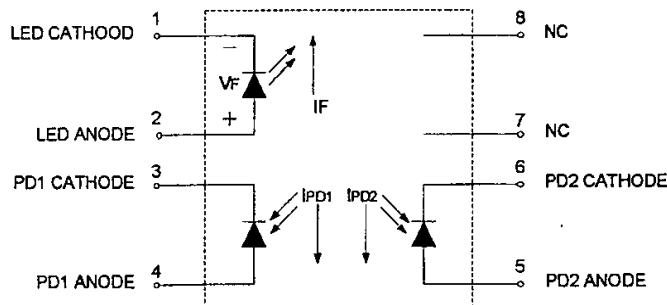


图 3.5 HCNR200 的内部结构

HCNR200 的内部框图如图 3.5 所示。其中 1、2 引脚作为隔离信号的输入，3、4 引脚用于反馈，5、6 引脚用于输出。1、2 引脚之间的电流记作  $I_f$ ，3、4 引脚之间和 5、6 引脚之间的电流分别记作  $I_{PD1}$  和  $I_{PD2}$ 。输入信号经过电压-电流转化，电压的变化体现在电流  $I_f$  上， $I_{PD1}$  和  $I_{PD2}$  基本与  $I_f$  成线性关系，线性系数分别记为  $K_1$  和  $K_2$ ，即

$$K_1 = \frac{I_{PD1}}{I_F}, \quad K_2 = \frac{I_{PD2}}{I_F}$$

$K_1$  与  $K_2$  一般很小, 约为 0.50%, 并且随温度变化较大 (变化范围在 0.25% 真正影响输出/输入比值的是二者的比值  $K_3$ , 线性光耦正利用这种特性才达到满意到 0.75% 之间), 但芯片的设计使得  $K_1$  和  $K_2$  相等。

### (2) 典型应用电路

线性光耦真正隔离的是电流, 要想真正隔离电压, 需要在输入和输出处增加运算放大器等辅助电路。HCNR200 的典型的应用电路如下图所示:

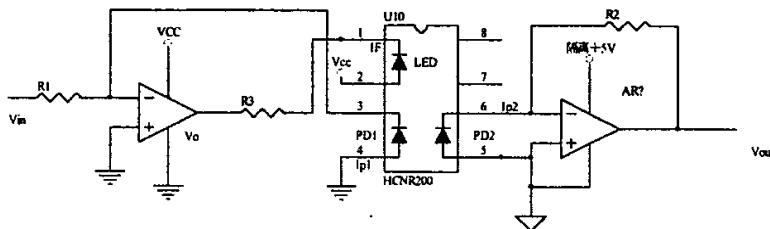


图 3.6 HCNR200 典型电路

设输入端电压为  $V_{in}$ , 输出端电压为  $V_{out}$ , 输入和输出之间的关系取决于  $K_1$  和  $K_2$  之间的关系。其中,  $K_1$  为伺服电流增益, 它是反馈光二极管电流 ( $I_{PD1}$ ) 与 LED 电流 ( $I_F$ ) 之比, 即  $K_1=I_{PD1}/I_F$ 。 $K_2$  为正向增益, 它是输出光二极管电流 ( $I_{PD2}$ ) 与输入 LED 电流 ( $I_F$ ) 之比, 即  $K_2=I_{PD2}/I_F$ 。 $K_3$  为传输增益, 是正向增益与伺服增益之比, 即  $K_3=K_2/K_1$ 。

### (3) 阻值的选择

HCNR200 前置输入部分等效电路如图 3.7 所示:

电阻值选则需要考虑运放的线性范围和线性光耦的最大工作电流  $I_{max}$ 。 $K_1$  已知的情况下,  $I_{max}$  又确定了  $I_{PD1}$  的最大值  $I_{PD1max}$ , 这样, 由于  $V_o$  的范围最小可以为 0, 假设确定  $V_{cc}=5V$ , 输入在 0~4V 之间, 输出等于输入, 采用 TLE2141 运放芯片以及上面电路, 以下是阻值的确定过程。HCNR200 的手册上推荐器件工作的  $I_{max}$  为 25mA 左右。

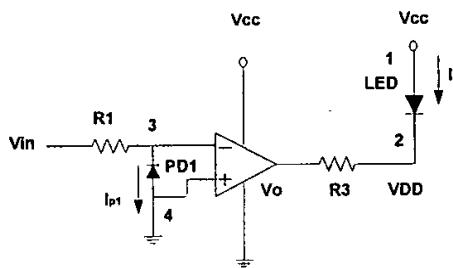


图 3.7 HCNR200 反馈电路

$$\text{则: } R_3 = 5V / 25mA = 200 \Omega ;$$

$$R_i = R_o / K_i = 200 / 0.50\% = 40K \Omega ;$$

$$R_2 = R_i = 40K \Omega .$$

### 3.3.3 电压采样时刻的选择

在对送丝电机和走车电机的反电动势进行采样时, 应该注意采样时刻的正确选择。如果采样时刻选择不准确, 采样结果就会出现错误, 就会导致送丝和走车不稳定, 进而影响整个焊接过程。图 3.8 为一个 PWM 周期内电机两端电压的变化情况。

从图中可以看出一个 PWM 周期内电机两端电压在不同时间段的变化情况:  $t_0$  时刻开关管开通;  $t_1$  时刻开关管关断;  $t_2$  时刻由于电机自身感性负载作用, 电机开始续流, 电机两端电压由正变负过零;  $t_3$  时刻电机两端电压由负变正过零, 电机续流结束;  $t_4$  时刻 FPGA 发出采样信号给单片机, 开始采样;  $t_5$  时刻采样结束;  $t_5 \sim t_6$  时刻为 PI 运算时间。

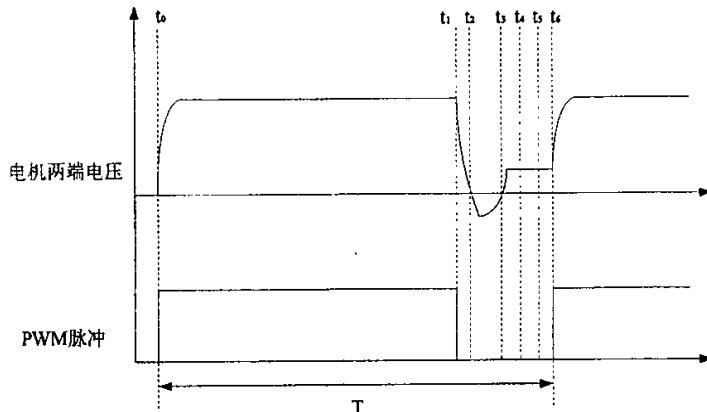


图 3.8 单个 PWM 周期内电机的两端电压

### 3.4 送丝系统与小车调速系统的设计

由于埋弧焊的焊接电流大，熔池熔深大，焊接速度对焊缝质量的影响尤其突出。因此埋弧自动焊设备中，送丝系统和小车行走装置的稳定性和可靠性对焊接质量将会产生直接影响。设计合理，性能优良的电机调速系统是实现高质量焊接的前提。

本文设计送丝和行车电机的调速系统，采用的是直流电机脉宽调制(PWM)系统。其原理是利用功率MOSFET的开关作用将直流电源电压转换成一定频率的方波电压，加在110V直流伺服电动机的电枢上，通过调节方波脉冲宽度来改变电枢的平均电压，从而达到调节电动机转速的目的。由于PWM调速系统的功放元件工作在开关状态，且开关频率高，与传统采用的晶闸管电动机(SCR-M)调速系统相比具有以下优点<sup>[27,28]</sup>：

- (1) 电枢电流波动小，系统低速性能好，调速范围宽；
- (2) 调节系统频率高，系统响应速度快，动态抗干扰能力强；
- (3) 主电路器件开关损耗小，电机发热少，装置效率高。

实际上，送丝速度的控制分为两个时段，第一个时段是从电机开始送丝到焊丝到达工件之前，以及反向抽丝过程。在这个时间段内，送丝电机控制原理与行车电机控制原理完全一样，都是利用给定电压与反电动势的偏差经过PI运算，实现速度的闭环控制，如图3.9所示。第二个时段是引弧成功后的焊接过程。在焊接过程中需要实时采集电弧电压与给定电压作比较，偏差经过模糊运算，最终生成PWM脉冲，用于送丝电机转速控制，如图3.10所示。

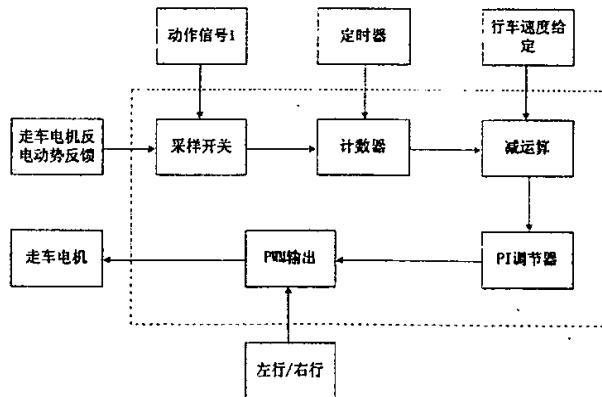


图3.9 走车系统控制原理框图

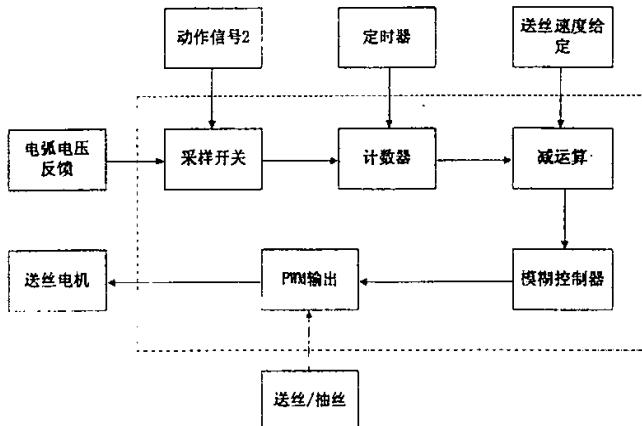


图3.10 送丝系统控制原理框图

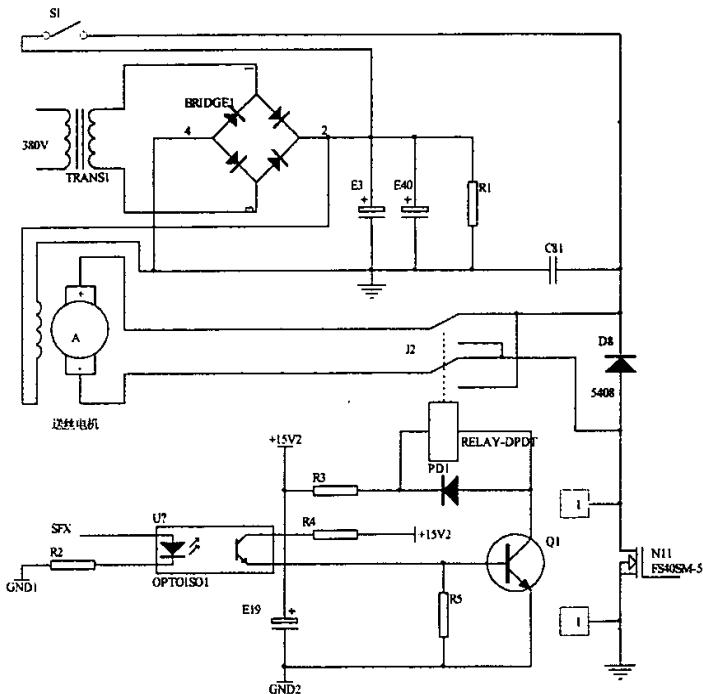


图3.11 埋弧焊送丝系统控制电路原理图

本文设计的送丝电机调速系统采用PWM脉宽调制技术，由FPGA来实现PWM输出，利用模糊运算控制PWM输出占空比，送丝电机采用110V直流伺服电机。如图3.11所示，380V交流电经变压器输入后，由整流桥整流并滤波后给电枢绕组和励磁绕组供电。图中MOSFET开关管的开关频率为100KHz，保证了很高的系统响应速度。MOSFET两端由R和C组成吸收回路，以改变MOSFET的负载曲线，增大它达到最

大功率时的可靠性；Ds为快速恢复二极管，主要在高频状态下起续流作用。

另外，对埋弧焊而言，送丝机需要有抽丝、送丝动作，为此在电动机电枢绕组前加有继电器电路，通过单片机控制继电器的动作，改变加在电机上电压的极性，实现对送丝电机正转和反转的控制，使调速系统构成可逆调速系统。

小车电机的调速电路与送丝电路相同，不同之处在于PWM输出占空比由PI算法控制，焊接速度的大小由预置电路预先向单片机给定，也可以在焊接过程中动态调节。

### 3.5 数据通讯<sup>[29-32]</sup>

在焊接过程中，单片机需要把电压和电流的给定值和反馈值以及各种开关量发送给FPGA，以便进行各种运算和实现逻辑控制。

与此同时，焊机需要向小车发送实时焊接电流/给定电流和电弧电压信号，供小车显示保持小车显示与焊机显示一致。焊机还要接受来自小车的给定焊接电流、给定电压和焊接速度等数据，接受起/停焊接、左行/右行和抽丝/送丝等状态参数，用于显示和控制。

#### 3.5.1 单片机与FPGA之间通讯

##### (1) 串口通讯与并口通讯的比较

通常通讯的形式可以分为两种，其一为并行传输式的通讯（Parallel Communication），另一种则为串行式的通讯（Serial Communication）。这两种不同形式的通讯模式如图3.12所示。

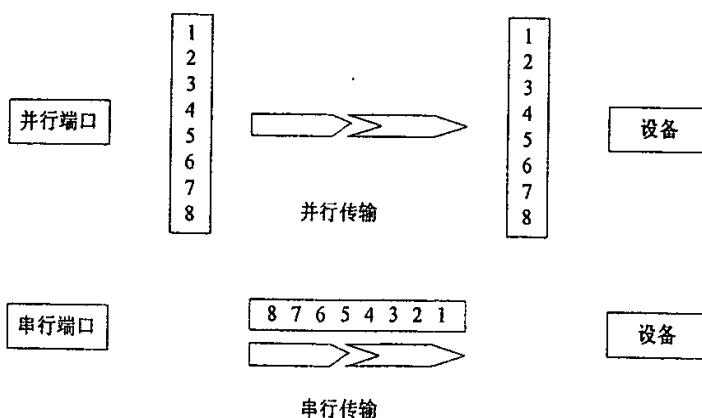


图 3.12 串行并行通讯示意图

由图中可以了解，所谓的并行通讯，即是一次的传输量为多个位（图中为8位）；而串行通讯则是一次只传输1个位。同一时间内，二者的传输数据量相差8倍之多。但是，这并不是说串行通讯就不好，它之所以存活这么久，自然有其长处。并行通讯虽然可以在一次的数据传输中就可以传输8个位，但是因为数据电压传输的过程中，容易因为线路的原因使电压准位发生变化（最常见的是电压衰减问题，以及讯号间相互干扰的问题（Cross Talk）），从而使得数据传输发生错误。如果传输线路比较长的话，电压衰减以及Cross Talk问题会更加明显，数据的传输错误也会常常发生。相较之下，串行通讯一次只传1个位，处理的数据电压也只有一个电压准位，因为不容易把数据丢失，再加上一些防范措施后，要数据漏失就更不容易了。

## （2）并口通讯的实现

本文所设计控制系统中ATmega16和EPF10K10LC84-4之间数据传输的距离很近（二者在同一块电路板上），为了保证传输速度，采用并口通讯。通讯示意图如图3.13所示。其工作原理为：当ATmega16和EPF10K10LC84-4之间处于非通讯状态时，CS为高电平，其余都为高阻态；当需要通讯时，CS变为低电平，然后按照所要发送数据类型设置WR1，WR2，WR3的状态，进行数据发送。WR1，WR2，WR3的状态与所需传输数据类型的对应关系如表3.1所示。

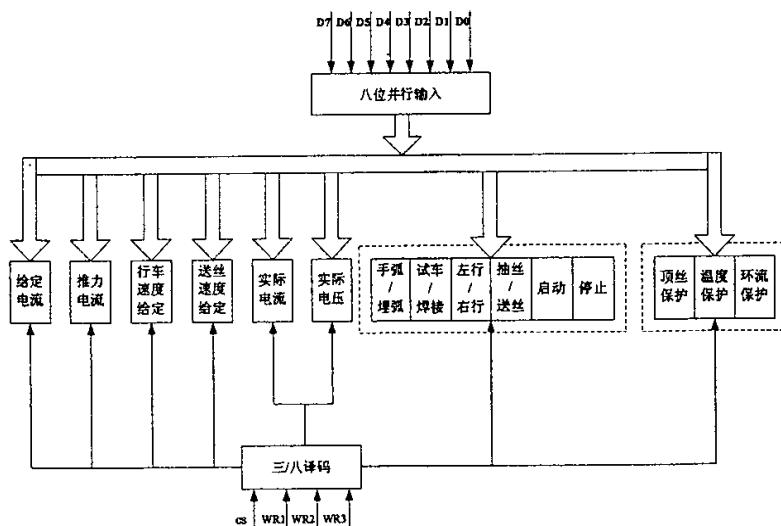


图3.13 ATmega16与EPF10K10LC84-4并口通讯示意图

WR1	WR2	WR3	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	定义
0	0	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	给定电流
0	0	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	给定电压
0	1	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	行车速度给定
0	1	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	送丝速度给定
1	0	0	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	实际电流
1	0	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	实际电压
1	1	0			手弧/ 埋弧	试车/ 焊接	左行/ 右行	抽丝/ 送丝	启动	停止	操作状态
1	1	1							环流 保护	顶丝 保护	温度 保护
											故障状态

表3.1 数据类型定义信号与传送数据的对应关系

### 3.5.2 焊机与小车之间通讯

首先对RS-232以及RS-485两种串行通讯作简要说明。

RS-232的通讯端口是每个计算机上的必要配备，通常含有COM1与COM2两个信道，古老一点的计算机将COM1以9Pin接头接出，而以25Pin的接头将COM2接出。新一代计算机均以9Pin的接头接出所有的RS-232通讯端口。在计算机上的RS-232均是公头。通常与计算机连接的设备，最简单的沟通接口就是RS-232，不仅简单实用，而且价格上也便宜很多。

由于串行通讯的简单实用，使得工业上也用串行通讯作为数据的流通之用。可是工业环境通常会有噪声干扰传输线路，在以RS-232作为传输时，就经常会因为外界的电气干扰而使得讯号发生错误。为了解决这个问题，RS-485的通讯方式就应运而生了。

#### (1) RS-232与RS-485的通讯模式比较

首先，RS-232的讯号传输模式如图3.14所示。

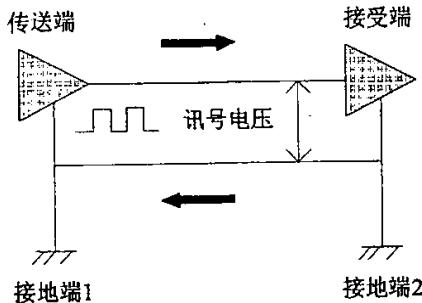


图 3.14 RS-232 的讯号传输示意图

由图中可知，RS-232的讯号准位乃是参考地线而来的，传送端参考接地端1而据以传送数据；接收端则参考接地端2而还原出传送端的讯号准位。在两个接地端同电位的前提下，传送端与接收端的讯号准位会呈现一样的结果。如果有噪声进到传输线路的话，可能会如图3.15所示。

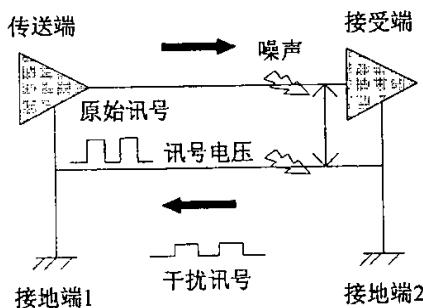


图 3.15 噪声干扰的 RS-232 讯号传输

干扰讯号在地线及讯号上均产生影响，原始讯号再加上噪声后依然是传送到接收端；而地线部分的讯号则被地准位给平均掉了。因此，讯号便发生了扭曲，当然讯号整个都不对了。

而RS-485的讯号传输方式如图3.16所示。

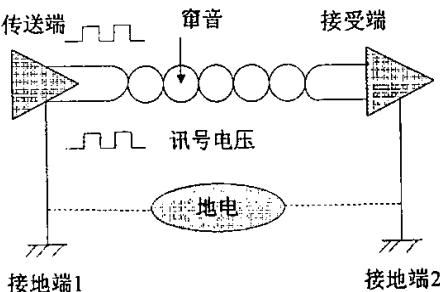


图 3.16 RS-485 的讯号传输示意图

RS-485的讯号将被传送出去时会先分成正负两条线路，当达到接受端后，再将讯号相减还原成原来的讯号；如果将原来的讯号表示成(DT)，而被分成后的讯号分别标成(DT+)及(DT-)，则原始的讯号与离散的讯号在由传送端送出去时的运算关系如下：

$$(DT) = (DT+) - (DT-)$$

同样地，接受端在接收到讯号后，也依上式的关系将讯号还原成原来的样子。而如果此线路受到干扰，其情形可能如图3.17所示。

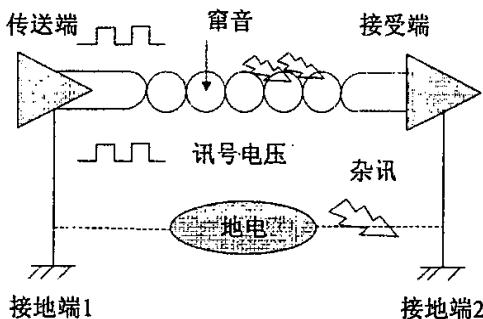


图 3.17 有干扰的 RS-485 的讯号传输

这时候在两条传输线上的讯号会分别成为(DT+) + Noise 及 (DT-) + Noise。如果接收端接收此讯号，它必须依照一定的方式将其合成，因此合成的方程式如下：

$$\begin{aligned} (DT) &= [(DT+) + \text{Noise}] - [(DT-) + \text{Noise}] \\ &= (DT+) - (DT-) \end{aligned}$$

此式与前一式的结果是一样的。

所以，使用RS-485网络可以有效地防止噪声的干扰，也因为此种特性，工业上比较适合采用此种方式传输数据。

## (2) RS-485通讯的实现

RS-485数据信号传输采用差分方式，也称作平衡传输，它使用一对双绞线，将其中一线定义为A，另一线定义为B，如图3.18所示，通常情况下，发送驱动器A、B之间的正电平在+2~+6V，是一个逻辑状态，负电平在-2~-6V，是另一个逻辑状态。还有一个“使能”控制信号由于控制发送驱动器与传输线的切断与连接，当“使能”端起作用时，发送驱动器处于高阻状态，称为“第三态”，它是有别于逻辑“1”和“0”的第三种状态。

单片机的标准串行口通过RXD直接连接RS-485芯片的R0引脚，通过TXD直接连接到RS-485芯片的DI引脚，R/D信号直接控制RS-485芯片的发送器/接收器使能，R/D信号为“1”，则芯片发送器有效，接收器禁止，此时微处理器可以向RS-485总线发送数据，R/D信号为“0”，则芯片发送器禁止，接收器有效，此时微处理器可以接收来自RS-485总线数据。

连接到A脚的上拉电阻R7、连接到B脚的下拉电阻R8用于保证未连接网络时的芯片处于空闲状态，以提高这一个节点的工作可靠性。为了更加可靠地保护RS-485网络，确保系统安全，需要增加一些保护电路，如图3.18所示钳位于6.8V的TVS管V4、V5、V6都是用来保护RS-485总线的，避免其在受干扰时产生的高压损坏收发器。另外，电路中的L1、L2、C1、C2用于提高电路的EMI性能。

使用DC-DC产生一组与单片机完全隔离的电源输出，用于向RS-485收发器电路提供+5V电源，RS-485通讯速率定为9600bps。

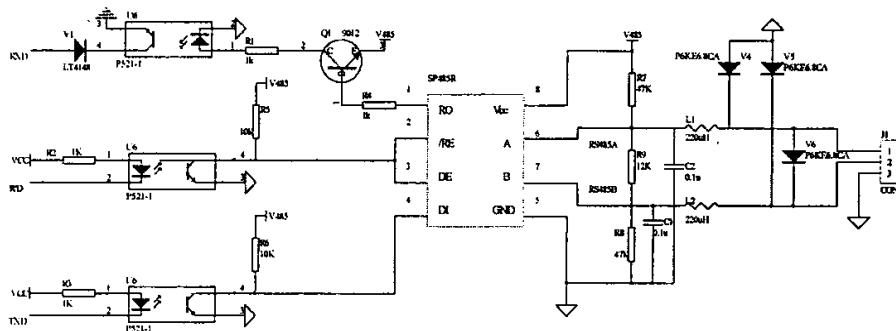


图 3.18 485 通讯连接电路

### 3.6 系统保护

为了保证控制系统能够安全可靠地工作，系统提供了各种保护功能。

**温度保护：**位于各散热片的温度继电器串联，当任一散热片温度超过 75℃ 时，温度继电器发生动作，发生温度保护。

**环流保护：**当实际输出焊接电流小于 250A，同时一路逆变器的主变压器原边电流大于 40A，可判断此时发生环流。

**顶丝保护：**当调整焊丝位置时，焊丝如果和工件短路，则只可以退丝，不可以再送丝，其操作通过焊机反馈电压来判断。

系统一旦检测到发生温度保护和环流保护，光耦输入端就会出现信号，则立

即停逆变器，电流给定变为零，并把产生的错误状态送给单片机做显示。

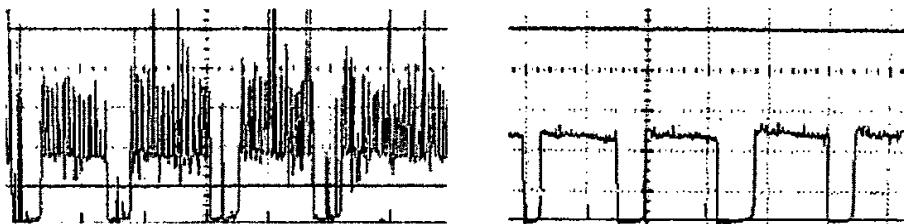
### 3.7 硬件抗干扰措施

#### 3.7.1 电压电流采样的抗干扰措施<sup>[33, 34]</sup>

无论是波形的控制还是信号的检测，都需要从输出回路中准确、可靠地获得焊接电流或焊接电压信号。为此，分别对这两个信号的传输途径采取了如下措施。

##### (1) 电弧电压信号采样点的选取

弧焊逆变器是个强干扰源，当电弧电压信号取自电源输出端且经过焊机内部引线至微控制器时，易引入较强的干扰信号。图3.19(a)是实测的逆变器两端取输出的电弧电压波形图。若在电弧两端取样，得到的波形干净而且平滑，毛刺几乎没有，干扰明显减少。图3.19(b)是电弧两端取样时的电弧电压波形。



(a) 逆变器两端取样的电弧电压波形      (b) 电弧两端取样的电压波形

图3.19 不同取样点的电弧电压波形

##### (2) 采样信号的光电隔离

采用光耦隔离可以切断控制器与焊机输出主回路之间的电路的联系，它能有效地抑止尖峰脉冲及各种噪声的干扰。提高了信噪比，具有很强的抗干扰能力。所采用的是精密性光耦HCNR200。这种光耦具有线性度范围宽（宽带>200KHZ），传输增益稳定性高（±0.05%℃）等优点。实践证明其具有良好的隔离性能，完全适用于电弧电压和焊接电流的采集。

##### (3) 信号的屏蔽线与双绞线传输

屏蔽线对静电干扰有强抑制作用，而双绞线有抵消电磁感应干扰的作用，电流和电压信号采样后，经屏蔽双绞线传输至主控板。由执行机构反馈的信号在传输过程中会受到电场、磁场和地阻抗等干扰因素的影响，采用接地屏蔽线可以减小电场的干扰。双绞线与同轴电缆相比，波阻抗高，抗共模噪声能力强，能使各个小环节的电磁感应干扰相互抵消。这一措施抗共模干扰、噪声能力强。

### 3.7.2 控制系统主要抗干扰措施

#### (1) 时钟电路的抗干扰措施<sup>[35]</sup>

时钟电路产生 CPU 的工作时序脉冲, 是 CPU 正常工作的关键部件。很多干扰归根到底是破坏了时钟的正常运行, 从而导致 CPU 的工作失控。图 3.20 表明时钟信号中叠加噪声干扰后, 会改变时钟分频信号, 导致 CPU 工作时序发生紊乱。

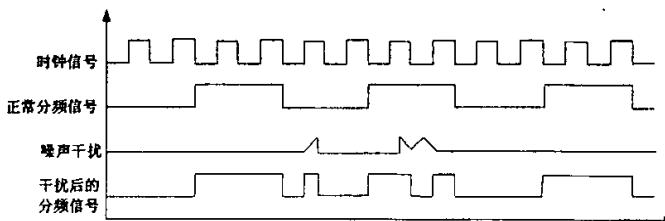


图 3.20 噪声对时钟信号的干扰

为了避免因时钟电路引起的干扰, 本系统在PCB 布线时采取了以下抗干扰措施:

1. 时钟脉冲电路配置在靠近单片机ATmega16处, 采用粗而短的引线。
2. 振荡电路用地线包围起来, 晶体外壳接地。
3. 晶振电路的电容器采用性能稳定、容量值准确的电容, 并且远离发热元件。
4. 印刷板上的大电流信号线、电源变压器远离晶振信号的连线。

#### (2) 电源抗干扰<sup>[36]</sup>

根据实验分析, 微机系统70%的干扰是通过电源耦合进来的。电源上的尖峰脉冲、浪涌、下陷、欠压和过压等都会造成系统工作不正常甚至损坏, 可以说, 电源品质的好坏是抗干扰的一个决定性因素。因此, 提高电源系统的供电质量, 是确保单片机正常工作的一个主要因素, 为此, 在系统中采取了以下几种措施:

1. 主控制板供电电源采用专用微机开关电源供电。
2. 电源和地采用电源分层设计, 并在电源层上使不同的电源分块, 同时在板卡电源和地层之间均匀地分布一些电容, 这样可以有效地滤除各种频率的干扰。
3. 在给驱动板与送丝板供电的交流电源的引线上接入电容滤波器。直流电源的输出也接电容滤波器。以使输出的电压纹波限制在一定的范围内。并能抑制数字信号产生的干扰。
4. 驱动板所用的电源采用分离式供电方式。即各组电源分别经过驱动变压器

变压、整流、滤波和稳压后供给各个驱动模块使用。这样可以有效地消除各单元电路间的电源线、地线间的耦合干扰。

5. 在整流与滤波环节之间接入三端稳压电源，这样不仅进一步减少了来自交流电网的干扰，还可以抑制负载变换造成的直流工作电压的波动。

### (3) 隔离与接地

本系统中采用了光电耦合器和继电器两种隔离方式。系统中所有的模拟与数字输入、输出通道都普遍采用了光耦进行隔离；弱电与强电之间的功率接口普遍采用了继电器进行隔离。除了隔离之外，接地技术也是抑制噪声的重要手段。本系统采取了以下做法：

1. 在印刷电路板上，将所有器件的数字地和模拟地分别相连，但数字地与模拟地仅在一点上相连，模拟信号线避免直角走线。另外，地线尽量加粗、加宽，并形成环路。
2. 印刷电路板电源引线应采用一点接地。
3. 将控制系统的数字地和模拟地浮空，而焊机及控制电源的外壳采用屏蔽接地，这样可以有效地防止静电和电磁感应干扰。

## 3.8 本章小结

- (1) 根据埋弧焊控制电路的要求，设计了以ATmega16和EPF10K10LC84-4为核心的数字化控制系统。
- (2) 设计了电流、电压采样电路，用LEM传感器对电流进行检测，并确定了线性光耦的型号和使用方法。
- (3) 设计了脉宽调制型送丝和小车行走调速系统，送丝电机和小车电机均采用110V直流伺服电机。
- (4) 确定了单片机与FPGA以及焊机与小车之间的通讯类型和方法。
- (5) 介绍了一些主要的硬件抗干扰措施。

## 第四章 控制系统的软件设计

### 4.1 控制系统软件流程

埋弧焊逻辑功能框图如图4.1所示。

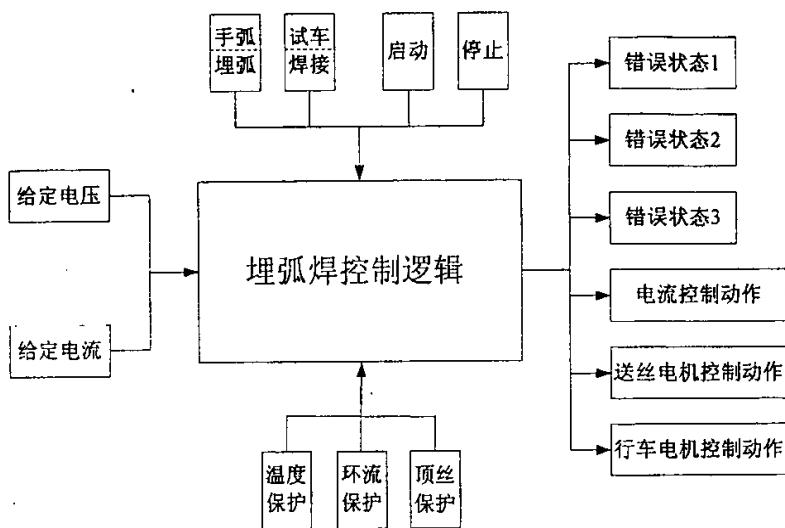


图4.1 埋弧焊逻辑功能框图

焊接过程控制主程序具体执行过程如下：接通电源，系统上电复位后进行初始化，然后进行手弧/埋弧选择。选择埋弧后，自动进入埋弧焊待机状态；选择试车后，进入试车程序，否则进入焊接待引弧状态。进入试车程序后，按下左行、右行，小车按照所选的方向左行、右行，试车程序下也可以控制送丝、抽丝。若“送丝”键按下，则执行点动送丝，若“抽丝”键按下则执行点动抽丝，以此调整焊丝与工件的距离。单片机读取预置焊接参数(电流、电压和速度)，经A/D转换后存入内存，并显示其数值。在此状态下，循环执行以上步骤，等待焊接“开始”键的按下。“开始”键按下后，系统软启动建立空载电压，则进入引弧程序，如果发生顶丝保护，则停止送丝，只能抽丝；当系统判断电流大于10A，表示引弧成功，进入焊接过程控制。此过程中，如果发生温度保护或环流保护，立即停逆变器，电流给定变为零，并产生错误状态送给单片机做显示，与此同时焊机立刻停机，小车也停车。焊接过程中，单片机实时采样焊接电流和电弧电压，经过一系列的计算生成焊接电流给定，送到外部的DA模块，如图4.2所示，送丝

速度由模糊控制器根据给定电压和采样电压的偏差进行控制，并且周期调整焊接

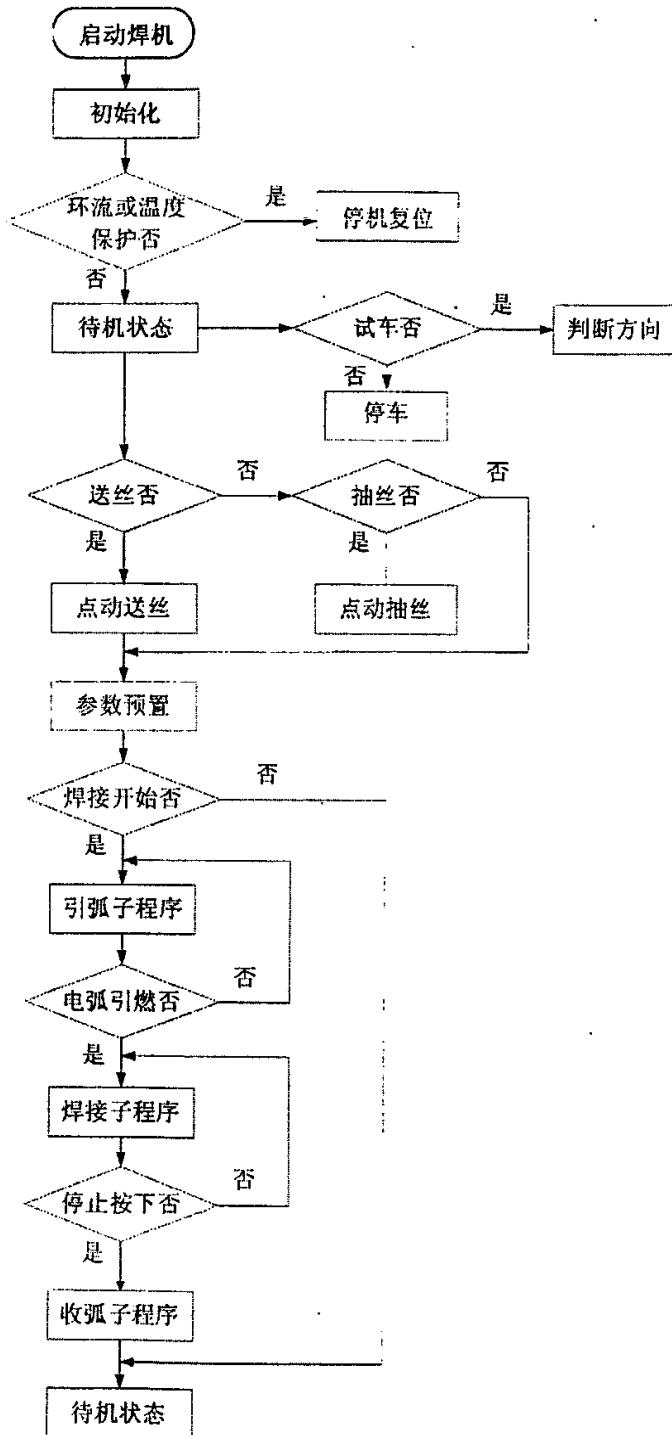


图4.2 埋弧焊接过程主流程图

速度以及更新焊接参数显示。当“停止”键按下后，执行焊接收弧程序，焊接过程完成。焊接过程主流程图如图4.3所示。

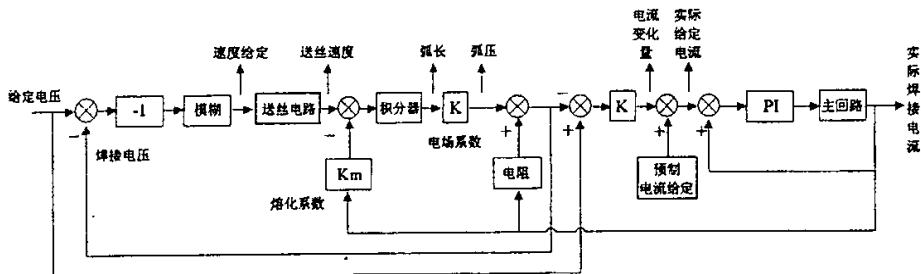


图4.3 实际焊接电流形成示意图

#### 4.2 基于FPGA的模糊控制器的设计<sup>[37-39]</sup>

模糊控制是智能控制发展较早且应用比较成熟的一个分支，我国的模糊控制理论研究处于世界领先地位，但是应用水平比较落后。国外焊接专家学者早已认识到模糊控制在焊接过程中有着广阔的应用前景，积极将模糊控制用于焊缝跟踪、焊接质量、焊接设备的控制中。模糊控制器具有以下特点：

- (1) 模糊控制器不依赖于被控对象精确的数学模型，善于对不确定性系统进行控制；
- (2) 模糊控制器是一种易于掌握、易于控制的比较理想的非线性控制器，是一种基于语言的控制器；
- (3) 模糊控制器抗干扰能力强，响应速度快，对系统变化具有很好的鲁棒性。

由于埋弧焊动态过程控制的高度非线性、时变性和不确定性，以及送丝系统的多重非线性，导致整个焊接系统是一个非线性、时变的多变量耦合的复杂系统。而造成送丝系统非线性的原因主要有以下几个方面：

1. 送丝系统是由送丝电机和减速机构，送丝轮压紧机构和送丝导管组成，由于齿轮传动机构存在间隙，使得送丝轮传动部件和电机电压信号之间出现非线性关系。
2. 焊丝送进是靠送丝轮和焊丝表面摩擦力推动实现的，不可避免的会出现打滑现象。
3. 由于送丝导管比焊丝直径大，焊丝在送丝导管中成弯曲形状，送丝阻力会经常变化，导电嘴送丝速度与送丝轮转动速度成非线性关系。

因此，基于精确模型的反馈控制方法在埋弧焊送丝过程中很难取得令人满意的效果，因此本文专门设计了模糊控制控制器用于送丝速度的控制，以确保焊接过程的稳定性，提高焊接质量和自动化水平<sup>[40]</sup>。

#### 4.2.1 模糊控制器的设计步骤

模糊控制器分为模糊输入接口、模糊推理判决机构和模糊输出接口三部分，它们构成了模糊控制器的控制机理和算法结构。模糊控制器的设计通常包括以下几个步骤：

##### (1) 模糊控制器结构的确立

常用的模糊控制器一般采用双输入单输出的二维结构。本文采用的模糊控制系统方框图如图 4.4 所示， $U_g$  为电压给定， $U_f$  为电弧电压反馈，控制器的输入量为误差  $e$  和误差变化率  $c$ ，输出量为周期内导通时间的变化量  $u$ ，Fuzzy Logic Toolbox 中的模型如图 4.5 所示。

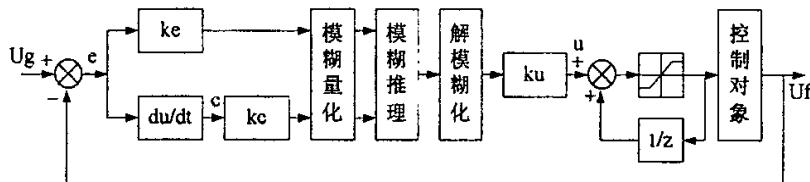


图 4.4 模糊控制系统方框图

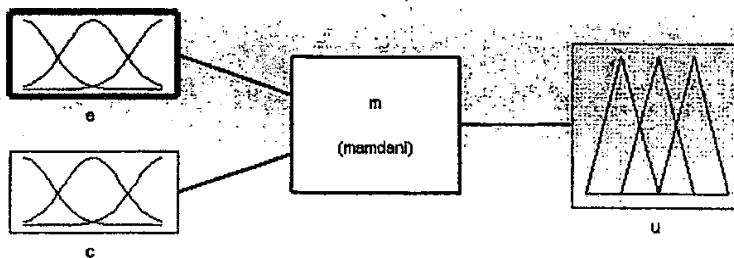


图 4.5 Fuzzy Logic Toolbox 中二维模糊控制器模型

##### (2) 输入变量与输出变量及其模糊状态的确定

系统的分辨率过高，会引起系统剧烈变化导致系统振荡；如果系统分辨率太低，则会导致系统动态性能差，反应速度慢。从实际出发，综合考虑把误差  $E$ ，误差变化  $C$  和导通时间的变化量  $U$  划分为七个模糊子集，分别用 NB（负大）、NM（负中）、NS（负小）、Z0（零）、PS（正小）、PM（正中）、PB（正大）表示。即

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

$$C = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

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

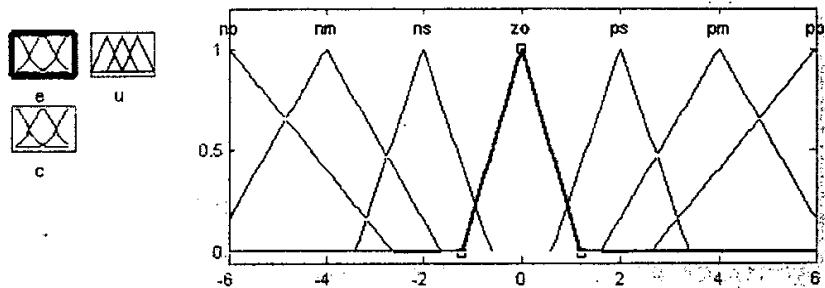
把它们的论域分为如下 13 个档次:

$$e: x = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

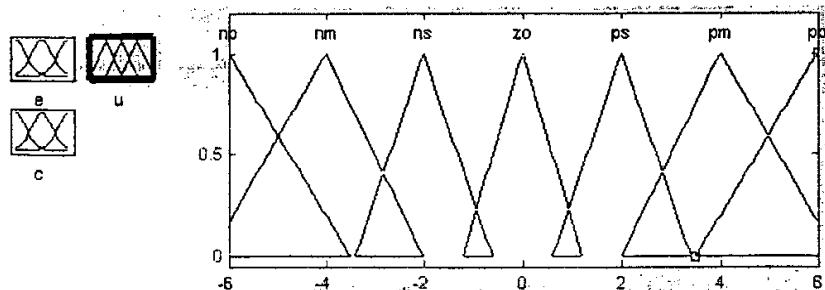
$$c: y = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$u: z = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

控制器的特性与隶属度函数的形状有关, 通常情况下, 隶属度函数曲线形状平缓, 则控制特性也比较平缓, 系统的稳定性较好; 隶属度函数曲线形状较尖, 则分辨率较高, 控制灵敏度也较高。本文采用三角函数作为 E、C 和 U 的隶属度函数, 如图 4.6 所示 (由 MATLAB 中的 FUZZY 工具箱生成)。



E、C 的隶属度函数曲线



U 的隶属度函数曲线

图 4.6 E、C 和 U 的隶属度函数

根据本系统的特点和实际的操作经验, 把 e、c 和 u 的实际变化范围定为:

$e = [-3, 3]$  伏;  $c = [-2, 2]$  伏/秒;  $u = [-2, 2]$ 。因此:

误差的量化因子:  $K_e = 6/3 = 2$ ;

误差变化率量化因子:  $K_c = 6/2 = 3$ ;

比例因子： $K_u=2/6=1/3$ 。

### (3) 模糊控制规则的建立

模糊控制规则是模糊控制器的关键，直接影响模糊控制器的性能。它是依据专家经验、控制工程知识和操作人员的实际控制过程建立的，它应该具有完备性和一致性，任何输入至少有一个可适用的规则，而且不能出现互相矛盾的情况<sup>[42]</sup>。

模糊控制的基本思想：首先考虑误差为负的情况，当误差为负大时，即反馈值远大于给定值，且误差有增大的趋势，为了尽快消除已有的负大误差并抑制误差变大，所以控制量的变化取负大。

当误差为负而误差变化为正时，系统本身已有减少误差的趋势，所以为尽快消除误差且又不超调，应取得较小的控制量。

当误差为负中时，控制量的变化应该使误差尽快消除，基于此原则控制量的变化选取同误差为负大时相同。

当误差为负小时，系统接近稳定，若误差变化为负时，选取控制量变化为负中以抑制误差向负方向变化；若误差变化为正时，系统本身有减少误差的趋势，选取控制量变化为负小即可。

以上选取控制量变化的原则是：当误差大或者较大时选取控制量以尽快消除误差为主；而当误差较小时，选择控制量应注意防止超调，以系统稳定性为出发点。

误差为正时与误差为负时类同，只是相应的符号发生变化。因此建立的控制规则表如表 4.1 所示：

$U \backslash E$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
C	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PB	PB	PB

表 4.1 模糊控制规则表

## (4) 模糊控制查询表的生成

确立了输入和输出变量的隶属度函数，建立了模糊控制规则表后，控制量可以从 MATLAB 模糊逻辑工具箱中直接提取，图 4.7 所示为误差等于 1，误差变化率为 0 时的控制量为 2，改变误差和误差变化率的值可得到所有情况下的控制量，最终生成的模糊控制查询表如表 4.2 所示，其中，模糊关系运算、合成运算和解模糊化分别采用模糊蕴含最小运算法、最大—最小合成法和重心法。

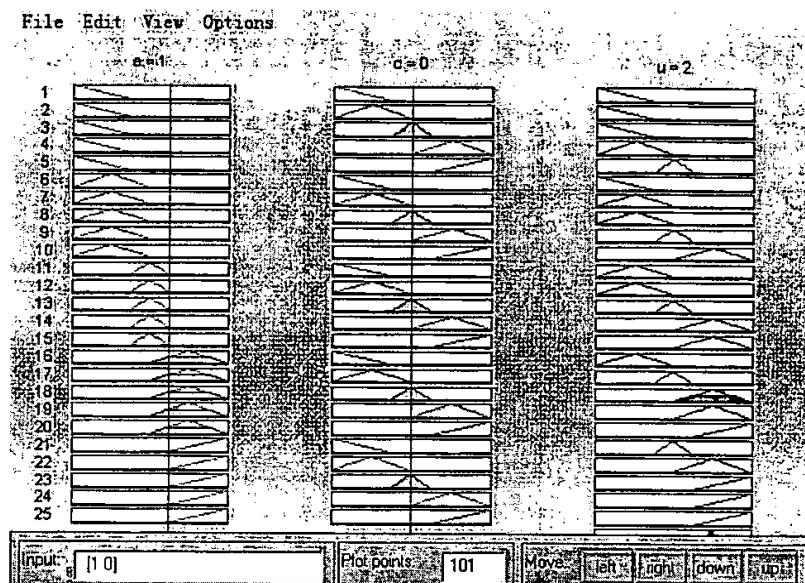


图 4.7 控制量的提取

$u_e \backslash e$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6.0	-5.5	-6.0	-5.3	-6.0	-4.8	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0
-5	-5.5	-5.5	-5.5	-5.3	-5.5	-4.2	-4.0	-2.0	-2.0	-1.0	-2.0	0.0	0.0
-4	-6.0	-5.5	-6.0	-5.3	-4.0	-4.2	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0	2.0	2.0
-3	-5.3	-5.3	-5.3	-5.3	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0	1.0	2.0
-2	-6.0	-5.5	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	4.0	4.0
-1	-4.8	-4.2	-4.2	-4.0	-2.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0	2.0	3.4	3.4	4.0
0	-6.0	-5.5	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	0.0	2.0	2.0	4.0	4.0	5.5	6.0
1	-4.0	-3.4	-3.4	-2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.2	4.2	4.8
2	-4.0	-4.0	-2.0	-2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	5.5	6.0
3	-2.0	-1.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.0	5.3	5.3	5.3	5.3
4	-2.0	-2.0	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	4.2	4.0	5.3	6.0	5.5	6.0
5	0.0	0.0	2.0	1.0	2.0	2.0	4.0	4.2	5.5	5.3	5.5	5.5	5.5
6	0.0	0.0	2.0	2.0	2.0	2.0	4.0	4.8	6.0	5.3	6.0	5.5	6.0

表 4.2 模糊控制查询表

#### 4.2.2 模糊算法流程

模糊控制器的控制算法是由计算机的程序实现的。一般包含两个部分，一个是离线计算查询表的程序，属于模糊矩阵运算；另一个是计算机在模糊控制过程中在线计算输入变量（误差、误差变化率），并进行模糊量化处理，查找查询表后再作输出处理的程序。但是考虑到 FPGA 内存容量的限制以及运算速度问题，为使处理过程简单、快捷，模糊控制表的计算采用离线计算的方式，存入 FPGA 内。其算法流程如图 4.8 所示。

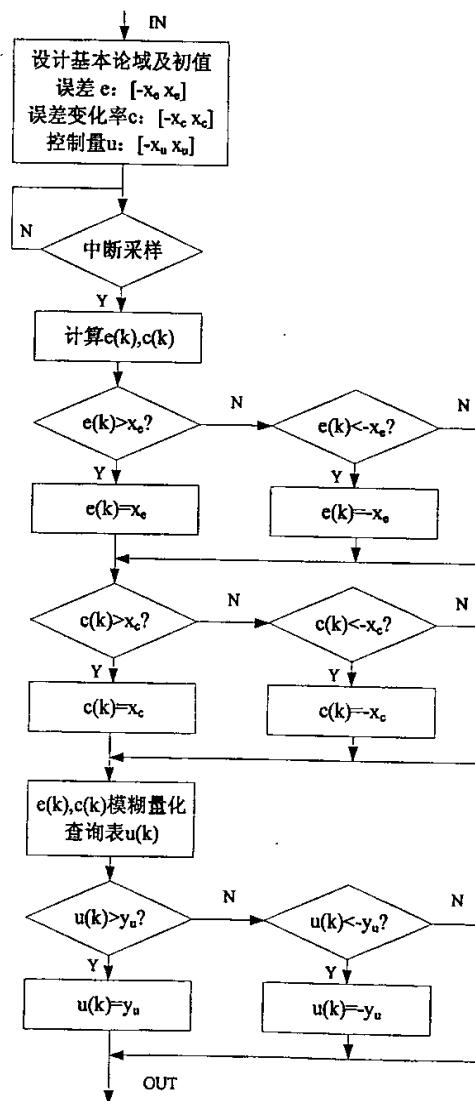


图 4.8 模糊控制算法流程图

#### 4.2.3 模糊控制器的 VHDL 语言实现

##### (1) 硬件描述语言介绍<sup>[43]</sup>

目前最通用的硬件描述语言 (HDL, Hardware Description Language) 有 VHDL 与 Verilog 两种。1982 年美国国防部的一个分支专案要求所有的数字电路必须用 VHDL 语言设计。1983 年 IBM 及 TI 等公司在此专案规划下, 开发了 VHDL。VHDL 的英文全名是 Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language, 其设计层面可分为: 系统层 (System)、算法层 (Algorithm)、寄存器传输层 (Register-Transfer)、逻辑层 (Logic) 以及电路层 (Circuit)。另一种硬件描述语言是 Verilog, 其建模能力可以涵盖所有范围。本文所采用的硬件描述语言为 VHDL 语言。

VHDL 语言可描述一个数字电路的输入、输出以及相互间的行为与功能。而其硬件关联性的语法与形式随类似于一般程序语言, 但是涵盖许多与硬件关联的语法构造。其特有的层次性——由上而下的结构式语法结构适合大型设计项目的团队合作。在主要的系统结构、组建及相互间的连接方式决定以后, 就能将工作分包下去, 各自独立进行, 例如使用主程序外的组件 (Component)、函数 (Function) 以及程序内的块 (Block) 程序。从抽象的层次而言, VHDL 的语句分为以下 4 个大类:

###### 1. 行为式 (Behavior)

采用语言逻辑方式直接描述硬件电路的工作, 表示一个设计的功能或算法, 描述 IC 内部电路行为。在结构定义中可以同时包含并行描述与顺序描述。

###### 2. 数据流 (Data flow)

从数据输入输出的观点, 大部分的并行语句都用于数据转换工作。

###### 3. 结构式 (Structural)

允许设计者以树状形式调用内置电路组件。通常以引脚图方式调用并连接。从硬件的角度说, 调用组件就像在组合与连接电路元器件一样。

###### 4. 寄存器传输式 (Register transfer logic)

VHDL 是一种类型化的语言, 一种数据类型的数据内容不能指定给其他类型的数据, 而且不同数据类型的数据需经过转换才能互相运算。每一个电路的 VHDL 码都是实体 (Entity) 与结构 (Architecture) 的成对组合, 先用实体来定义一

个 IC 电路引脚规格及基本参数，然后再用结构定义 IC 内部电路的功能运作，即构成一个完整的电路模块。

## (2) VHDL 程序设计<sup>[44-48]</sup>

FPGA 设计经过 4 个基本阶段：设计输入、设计编译、设计验证和器件编程。首先，根据系统的逻辑功能生成顶层结构图。然后，分成几个小模块进行下一级设计。由此由上而下分析其逻辑功能，从底层进行设计编译，每一级都进行波形验证。当最后顶层模块的逻辑功能在波形仿真中满足系统时序要求时，才可进行器件编程。

在以模拟电路为主的控制系统中，主要采用双闭环系统，外环采用位置反馈，内环采用电机电压反馈，由于抗干扰能力差，故其控制精度较低，可靠性不高。当使用 CPLD/FPGA 控制器时，则采用数字式调节，把给定值和反馈值的数字信号同步输入到控制器，由控制器进行电机电压的 PWM 调制。其系统原理框图如图 4.9 所示。

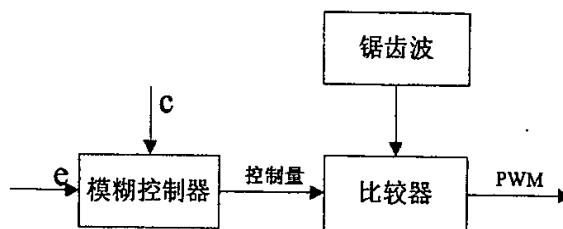


图 4.9 系统原理框图

根据该电路特点，利用 VHDL(超高速集成电路硬件描述语言)语言，编写了无符号加法器、减法器等元件。由无符号位的加法器、减法器实现的模糊控制器可以方便地对伺服系统进行控制，做出实时响应。伺服控制模块如图 4.10 所示。

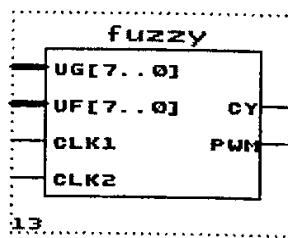


图 4.10 利用 VHDL 语言生成的控制器模块

图 4.10 中, CLK1 和 CLK2 为时钟信号, UG[7..0] 为给定信号输入端口, UF[7..0] 为反馈信号的输入端口, CY 为选择控制端口。PWM 为 PWM 波形输出端口。其顶层文件原理图如图 4.11 下。

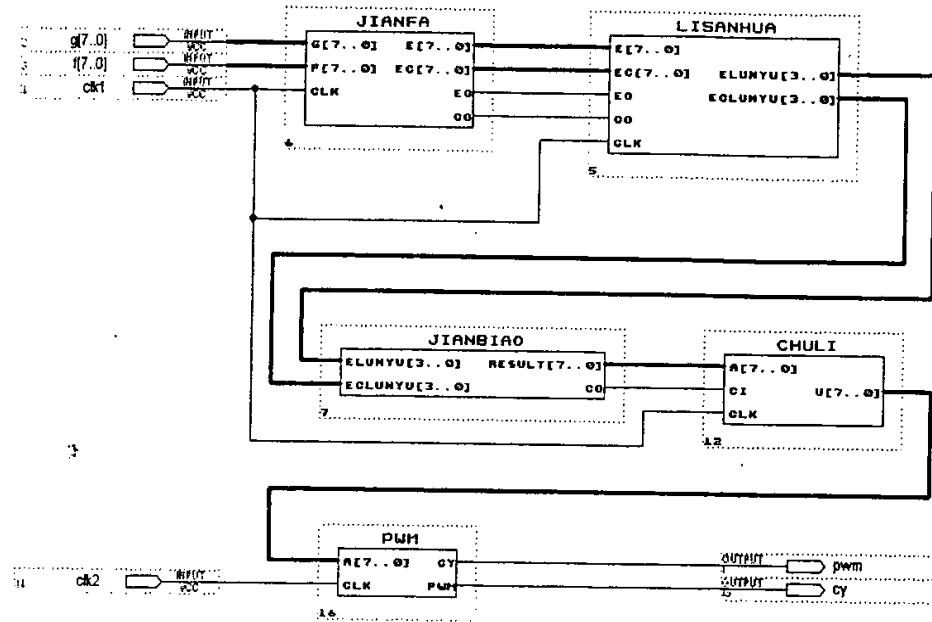


图 4.11 伺服控制模块顶层文件原理图

### 1. 减法器的设计

JIANFA 模块的主要功能是对采样值  $g[7..0]$  和  $f[7..0]$  进行运算, 得到误差和误差变化率。在进行减法运算时, 数值大的作为被减数, 数值小的作为减数, 正负号分别由  $eo$  和  $co$  标识, 运算过程中不需要考虑溢出和借位等问题。如图 4.12 所示,  $E[7..0]$  为误差,  $EC[7..0]$  为误差变化率。

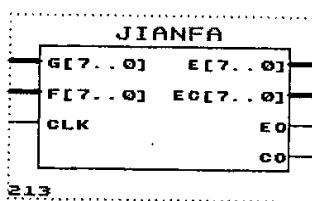


图 4.12 利用 VHDL 语言生成的减法器模块

仿真结果如图 4.13 所示：

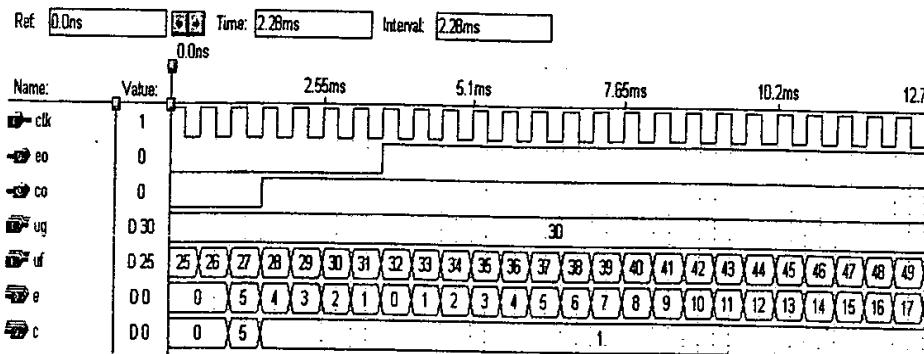


图 4.13 减法器仿真输出

## 2. 离散化过程的实现

LISANHUA 模块的作用是把 JIANFA 模块得到的误差  $e$  和误差变化率  $c$  在各自的论域范围内进行离散化处理。此模块的作用相当于把  $e$  和  $c$  分别乘上量化因子  $K_e$  和  $K_c$ ，而且可以根据具体情况调节量化因子的大小，离散处理模块如下所示：

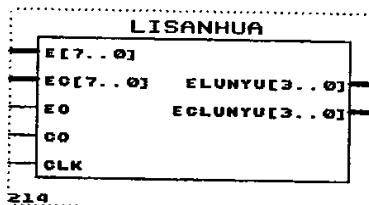


图 4.14 离散处理模块

仿真结果如图 4.15 所示：

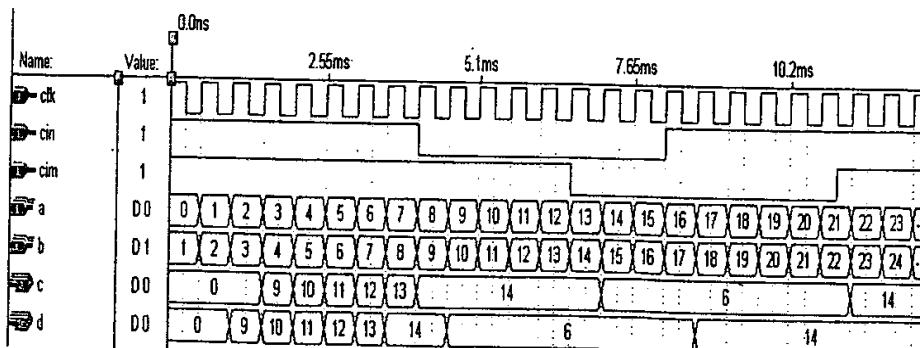


图 4.15 离散处理结果仿真

## 3. 控制表的生成

JIANBIAO 模块的作用是把控制总表用 VHDL 语言的形式描述，此控制表是模

糊控制量乘上比例因子 Ku 后的实际控制表，其模块如图 4.16 所示，其中 ELUNYU[3..0] 和 ECLUNYU[3..0] 分别为离散后的误差和误差变化率，RESULT[7..0] 为控制变化量。

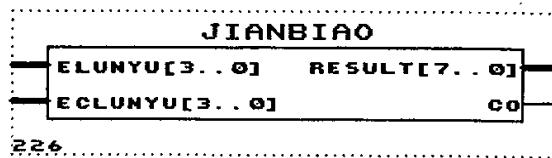


图 4.16 控制表模块

仿真结果如图 4.17 所示：

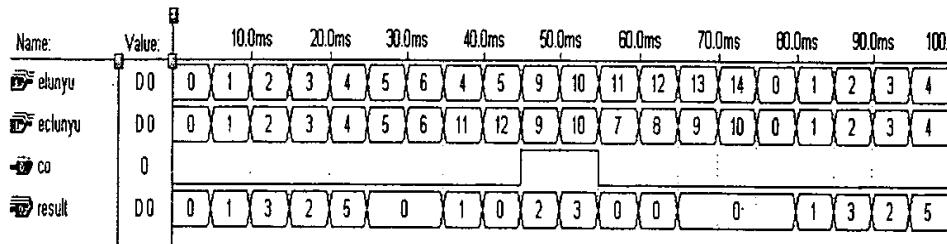


图 4.17 控制表仿真结果

#### 4. 控制量的得出

由于控制表中的数值是当前控制的变化量，不能直接作用于被控对象，需要得到当前的控制量。CHULI 模块的作用就是根据当前控制变化量，在前一次控制量的基础上进行运算得到当前的控制量。同时规定控制量的上下限，上限根据具体情况而定，下限是零。其 VHDL 语言模块如下所示：

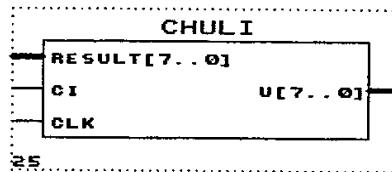


图 4.18 控制量生成模块

#### 5. PWM 发生器的设计<sup>[49-51]</sup>

将输入的控制数据进行调整经由 PWM 波形产生模块产生出 PWM 波形。PWM 发生器电路原理图，如图 4.19 所示。

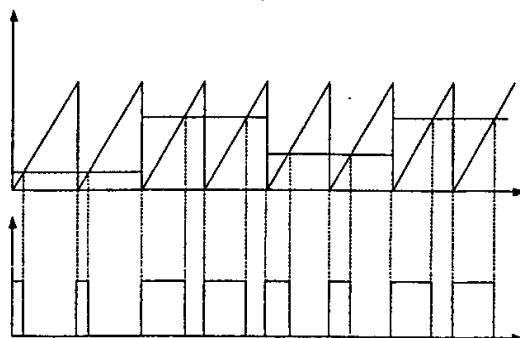


图 4.19 PWM 产生器电路原理示意图

采样数据与产生的数字锯齿波相比较, 利用比较输出和计数器产生的周期信号分别确定 PWM 的脉宽。PWM 模块如下图所示。

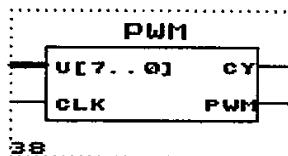


图 4.20 PWM 产生器模块

其仿真波形如图 4.21 所示:

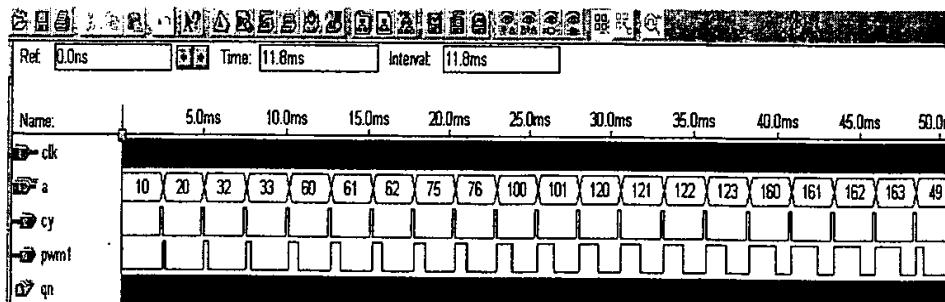


图 4.21 PWM 仿真波形

图中显示, 在给定相同的情况下, 随着反馈数据的不同, PWM 波形不断调整占空比。

## 6. 伺服控制器的完成

在完成模糊控制器与 PWM 发生器的同时, 该伺服控制器也较容易的构成了。图 4.10 即为用 VHDL 语言生成的伺服控制器模块。图 4.22 为该伺服控制器输出 PWM 的仿真波形。

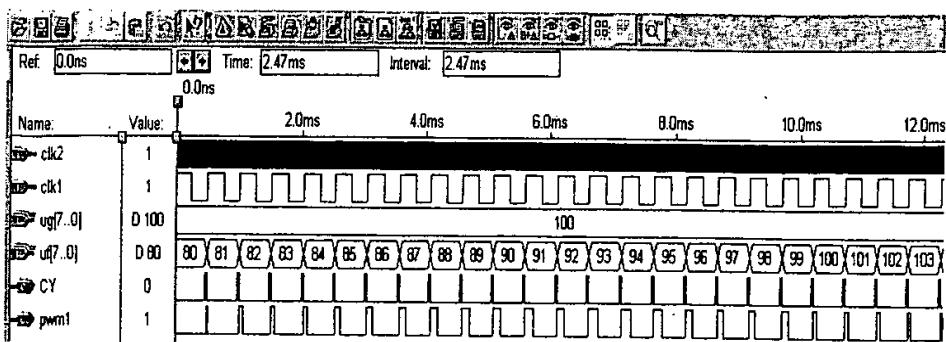


图 4.22 伺服控制器输出波形的仿真

从图 4.22 中可以看到，根据运算结果的不同，PWM 波形的脉宽不断变化的情况。

#### 4.2.4 模糊控制器的 MATLAB 仿真

##### (1) 仿真模型的建立

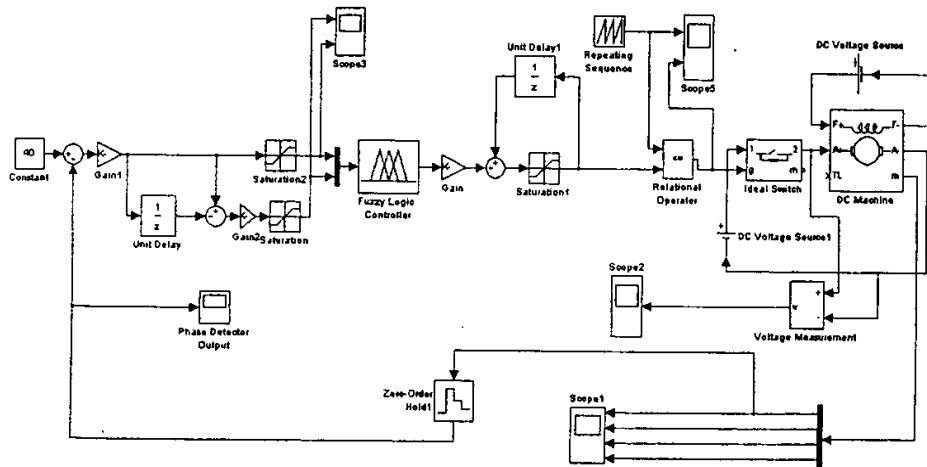
图 4.23 为本文设计的模糊控制系统用于直流电机转速控制的仿真模型<sup>[52]</sup>。

图 4.23 模糊控制系统仿真模型

##### (2) 仿真结果

图 4.24 所示即为给定值等于 40rad/s，采样周期为 0.01s 时的直流电机模糊控制系统的仿真波形。

由仿真结果可知，该直流电动机模糊控制系统具有调节速度快、动态性能好、无超调、稳态时静差小等特点；同时，模糊控制系统鲁棒性好，对于被控对象的参数变化不是很敏感，用在送丝电机调速系统可取得满意的控制效果。

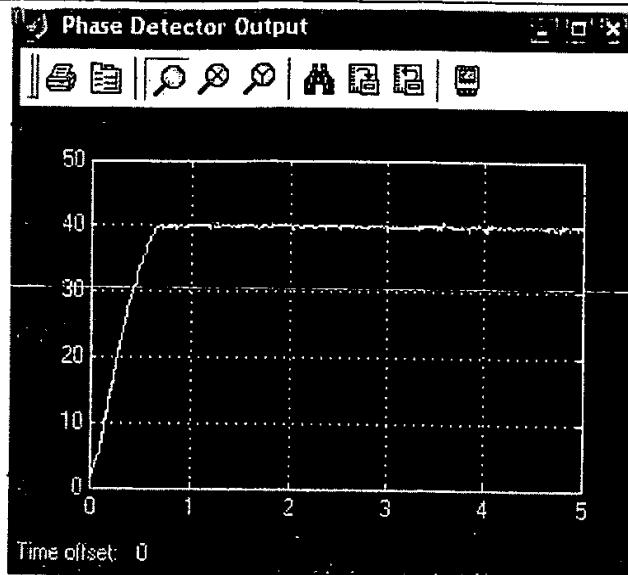


图 4.24 模糊控制系统的仿真波形

(横轴:  $t$  (s), 纵轴:  $n$  (rad/s) )

### 4.3 PI 控制算法

由于小车行走速度的稳定性直接影响到焊接质量的好坏,本文设计了脉宽调制型小车调速系统,调速系统的PWM脉冲由FPGA产生,采用行车电机反电动势反馈的调节原理,采用数字PI控制算法,实现行车速度的闭环控制,以保持小车行走速度的稳定。

#### 4.3.1 数字 PID 控制算法

在计算机控制系统中,使用的是数字 PID 控制器,数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式控制算法<sup>[53,54]</sup>。

##### (1) 位置式 PID 算法

模拟 PID 控制器的控制规律为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] + u_0 \quad (4-1)$$

式中  $K_p$  ——比例系数;

$T_i$  ——积分常数;

$T_D$  ——微分常数;

$u_0$ ——控制常量。

由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量，因此式(4-1)中的积分和微分项不能直接使用，需要进行离散化处理。按模拟PID控制算法的算式(4-1)，现以一系列的采样时刻点 $kT$ 代表连续时间t，以和式代替积分，以增量代替微分，则可作如下近似变换：

$$\left. \begin{aligned} t &\approx kT \quad (k=0,1,2,\dots) \\ \int e(t)dt &\approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e_j \\ \frac{de(t)}{dt} &\approx \frac{e(kT) - e[(k-1)]}{T} = \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \end{aligned} \right\} \quad (4-2)$$

上式中，为了表示方便，将类似于 $e(kT)$ 简化成 $e_k$ 等。

将式(4-2)代入式(4-1)，就可得到离散的PID表达式为

$$u_k = K_p [e_k + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^k e_j + \frac{T_D}{T} (e_k - e_{k-1})] + u_0 \quad (4-3)$$

或

$$u_k = K_p e_k + K_I \sum_{j=0}^k e_j + K_D (e_k - e_{k-1}) + u_0 \quad (4-4)$$

式中  $k$ ——采样序号， $k=0, 1, 2, \dots$ ；

$u_k$ ——第 $k$ 次采样时刻的计算机输出值；

$e_k$ ——第 $k$ 次采样时刻输入的偏差值；

$e_{k-1}$ ——第 $k-1$ 次采样时刻输入的偏差值；

$K_I$ ——积分系数， $K_I = K_p T / T_I$ ；

$K_D$ ——微分系数， $K_D = K_p T_D / T$

$u_0$ ——开始进行PID控制时的原始初值。

如果采样周期取得足够小，则式(4-3)或式(4-4)的近似计算可获得足够

精确的结果，离散控制过程与连续控制过程十分接近。

式(4-3)和式(4-4)表示的控制算法是直接按式(4-1)所给出的PID控制规律定义进行计算的，所以它给出了全部控制量的大小，因此被称为全量式或位置式PID控制算法。

位置式PID控制系统如图所示。

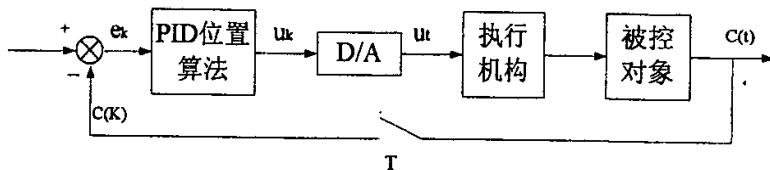


图4.25 位置式PID控制系统

这种算法的缺点是：由于全量输出，所以每次输出均与过去状态有关，计算时要对 $e_k$ 进行累加，工作量大；并且，因为计算机输出的 $u_k$ 对应的是执行机构的实际位置，如果计算机出现故障，输出的 $u_k$ 将大幅度变化，会引起执行机构的大幅度变化，有可能因此造成严重的生产事故，这在生产实际中是不允许的。增量式PID控制算法可以避免这种现象发生。

## (2) 增量式PID控制算法

所谓的增量式的PID是指数字控制器的输出值是控制量的增量 $\Delta u_k$ ，给执行机构输出的是增量，而不是位置量的绝对数值。

增量式PID控制系统如图所示。

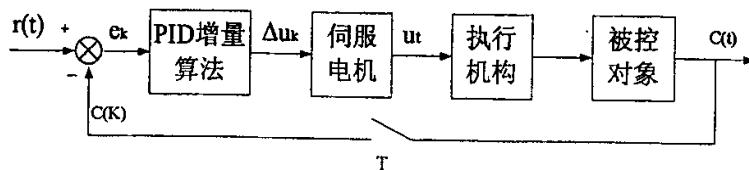


图4.26 增量式PID控制系统框图

增量式PID控制算法可通过式(4-3)推导出。由式(4-3)可得控制器在第 $k-1$ 个采样时刻的输出值为

$$u_{k-1} = K_p [e_{k-1} + \frac{T}{T_I} \sum_{j=0}^{k-1} e_j + \frac{T_D}{T} (e_{k-1} - e_{k-2})] + u_0 \quad (4-5)$$

将式(4-3)与式(4-5)相减，并整理，就可以得到增量式PID控制算法公式为

$$\begin{aligned}\Delta u_k = u_k - u_{k-1} &= K_p [e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_I} e_k + \frac{T_D}{T} (e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})] = \\ K_p (1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}) e_k - K_p (1 + 2\frac{T_D}{T}) e_{k-1} + K_p \frac{T_D}{T} e_{k-2} &= \\ Ae_k + Be_{k-1} + Ce_{k-2} \end{aligned}\quad (4-6)$$

式中  $A = K_p (1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T})$ ;

$$B = -K_p (1 + 2\frac{T_D}{T})$$

$$C = K_p \frac{T_D}{T}$$

或者上式中的 $\Delta u_k$ 还可以写成下面的形式

$$\begin{aligned}\Delta u_k &= K_p (\Delta e_k + \frac{T}{T_I} e_k + \frac{T_D}{T} \Delta^2 e_k) = \\ K_p (\Delta e_k + I e_k + D \Delta^2 e_k) \end{aligned}\quad (4-7)$$

式中  $\Delta e_k = e_k - e_{k-1}$ ;

$$\Delta^2 e_k = e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2} = \Delta e_k - \Delta e_{k-1}$$

$$I = \frac{T}{T_I}$$

$$D = \frac{T_D}{T}$$

由式(4-6)可以看出，如果计算机控制系统采用恒定的采样周期 $T$ ，一旦确定了 $A$ 、 $B$ 、 $C$ ，只要使用前后3次测量制的偏差，就可以由式(4-6)求出控制增量。

由图4.25和图4.26可以看出，就整个系统而言，位置式与增量式控制算法并无本质区别，增量式控制虽然只是在算法上作了一点改进，却带来了不少优点：

(1) 由于数字控制器输出增量，所以误动作时影响小，必要时可用逻辑判

断的方法去掉。

(2) 手动/自动切换时冲击小，便于实现无扰动切换。此外，当控制器发生故障时，由于输出通道或执行装置具有信号的锁存作用，故能仍然保持原值。

(3) 算式中不需要累加。控制增量  $\Delta u_k$  的确定仅与最近  $k$  次的采样值有关，所以较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

增量式控制也有不足之处：积分截断效应大，有静态误差；溢出的影响大。因此在选择时，要根据系统的要求来确定控制算法的选用。

埋弧焊机工作的环境是强噪声环境，所以行车电机控制系统中没有采用微分。在本文的控制芯片中集成的算法为增量式 PI 控制算法。PI 算法可由式(4-6)推得：

$$\begin{aligned}\Delta u_k = u_k - u_{k-1} &= K_p [e_k - e_{k-1} + \frac{T}{T_I} e_k] = \\ K_p (1 + \frac{T}{T_I}) e_k - K_p e_{k-1} &= \\ Ae_k + Be_{k-1} &\end{aligned}\quad (4-8)$$

式中  $A = K_p (1 + \frac{T}{T_I})$ ;

$B = -K_p$ 。

#### 4.3.2 PI 参数获得及调试

计算机仿真作为一种低成本的实验手段，在科研、生产中得到广泛应用。本文所做系统仿真是使用 MATLAB 中的 Simulink 工具箱，对直流调速系统进行了仿真，以确定 PI 控制参数。

##### (1) 系统的建模

如图 4.27 所示，该仿真系统为单闭环电压反馈模型。在该系统中，根据实际系统，来设置各个模块的参数，可以对 PI 控制系统参数设置起到较好的参考作用。

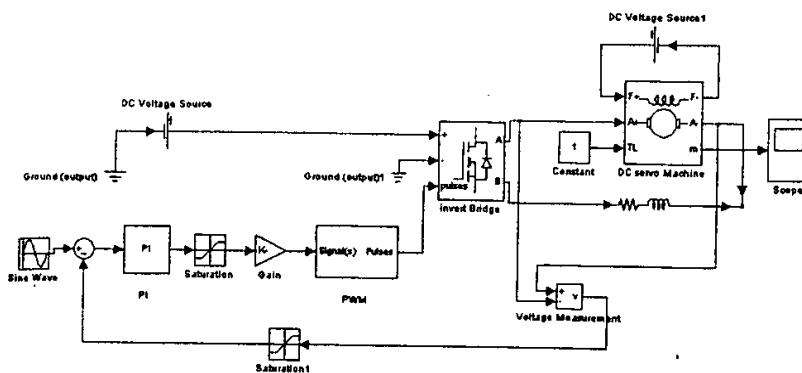


图 4.27 PWM 调速系统仿真模型

## (2) PI 参数的确定

在仿真过程中采用广泛使用的扩充临界比例度法。先把调节器设置成比例调节器，然后做调节系统的临界试验。将比例系数由小逐渐变大，但调节系统出现等幅振荡时，即此时的临界比例系数为  $K_r$ ，振荡的两个峰值之间的时间就是临界振荡周期  $T_r$ ，然后根据表 4.3 列举的 Ziegler-Nichols 经验公式确定 PI 控制器的控制参数。

控制制度	控制规律	$T/T_r$	$K_p/K_r$	$T_I/T_r$
1.05	PI	0.030	0.55	0.88
1.20	PI	0.050	0.49	0.91
1.50	PI	0.140	0.42	0.99
2.00	PI	0.220	0.36	1.05

表 4.3 扩充临界比例度法选 PI 控制器参数

应用扩充临界比例度法时，首先要确定控制制度。控制制度公式如下：

$$\text{控制制度} = \frac{\left[ \int_0^{\infty} e^2 dt \right]_D}{\left[ \int_0^{\infty} e^2 dt \right]_A} \quad (4-9)$$

其中，分母为数字 PI 控制误差平方积，分子为模拟 PI 控制误差平方积。据此，可以方便的得出 PI 控制器的参数<sup>[55]</sup>。

### 4.3.3 PI 控制器的 VHDL 语言实现

根据该电路特点，利用 VHDL(超高速集成电路硬件描述语言)语言，编写了带符号位的乘法器、加法器、减法器等元件。由带符号位的乘法器、加法器、减法器实现的 PI 控制器可方便地对伺服系统进行控制，做出实时响应。伺服控制模块如图 4.28 所示，仿真波形为图 4.29 所示。

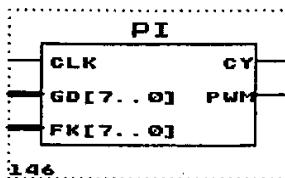


图 4.28 利用 VHDL 语言生成的 PI 调节器模块

图 4.30 中，GD[7..0]、FK[7..0] 分别为给定值和反馈值输入端口，CY 为信号控制端，PWM 为 PI 控制器脉冲输出端。

仿真波形如图 4.30 所示：

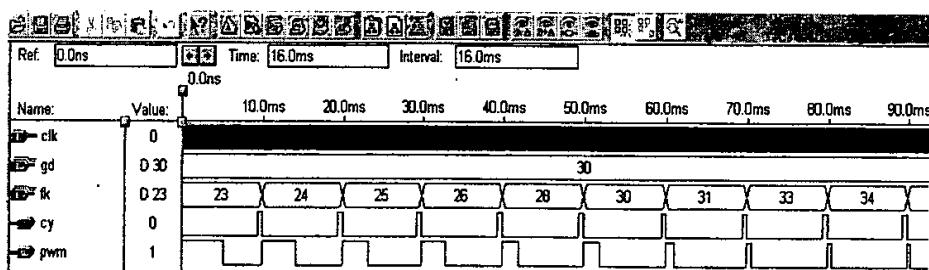


图 4.29 PI 调节器输出波形仿真

### 4.4 软件抗干扰措施

尽管已经采取了硬件抗干扰措施，但是由于干扰信号产生的原因错综复杂，而且具有很大的随机性，很难保证系统完全不受干扰。因此，需要在硬件抗干扰措施的基础上，采取软件抗干扰技术加以补充，作为硬件抗干扰措施的辅助手段。

#### 4.4.1 数字滤波

在接收反馈信号时，为了消除通道中的干扰信号，在硬件措施上常采取有源或无源RLC网络，构成模拟滤波器对信号实现频率滤波。同样，运用CPU的运算、控制功能也可以实现频率滤波，完成模拟滤波器类似的功能这就是数字滤波。数字滤波的算法灵活，可选择权限参数，其效果往往是硬件滤波电路无法达到的。

通常采用以下简便有效的方法<sup>[56]</sup>:

- (1) 算术平均值法。对一点数据连续采样多次(一般取3~5次),计算其平均值,以其平均值作为该点采样结果。这种方法可以减少系统的随机干扰对采集结果的影响。
- (2) 比较取舍法。当控制系统测量结果的个别数据存在偏差时,为了剔除个别错误数据,可采用比较取舍法,即对每个采样点采样多次,根据所采数据的变化规律,确定舍取办法来剔除偏差数据。
- (3) 中值法。根据干扰造成采样数据偏大或偏小的情况,对一个采样点连续采集多个信号,并对这些采样值进行比较,取中值作为该点的采样结果。
- (4) 一阶递推数字滤波法。这种方法是利用软件完成RC低通滤波器的算法,实现软件方法代替硬件RC滤波器。
- (5) 在FPGA内部对复位、回零等影响系统工作的信号,要经过几级触发器(级数由系统敏感性决定)后,再对各级触发器信号进行与或逻辑进行组合,然后再引到系统内部,可有效降低这些信号的输入敏感性。

#### 4.4.2 输入和输出数据的处理

输入信号的干扰是叠加在有效电平信号上的一系列离散尖脉冲,作用时间很短。当控制系统存在输入干扰,又不能用硬件加以有效抑制时,可用软件重复检测的方法,达到“去伪存真”的目的,直到连续两次或连续两次以上的采集结果完全一致时方为有效。若信号总是变化不定,在达到最高次数限额时,则可给出报警信号。对于来自各类开类型传感器的信号,如限位开关、行程开关、操作按钮等,都可采用这种输入方式。如果在连续采集数据之间插入延时,则能够对付较宽的干扰。

开关量输出软件抗干扰设计,主要是采取重复输出的方法,这是一种提高输出接口抗干扰性能的有效措施。对于那些用锁存器输出的控制信号,这些措施很有必要。在尽可能短的周期内,将数据重复输出,受干扰影响的设备在还没有来得及响应时,正确的信息又到来,这样就可以及时防止误动作的产生。在程序结构的安排上,可为输出数据建立一个数据缓冲区,在程序的周期性循环体内将数据输出。对于增量控制型设备不能这样重复送数,只有通过检测通道,从设备的反馈信息中判断数据传输的正确与否。在执行重复输出功能时,对于可编程接口

芯片，工作方式控制字与输出状态字一并重复设置，使输出模块可靠地工作。

#### 4.5 本章小结

- (1) 对埋弧焊焊接过程进行分析，确定焊接流程，对焊接系统软件进行总体设计。
- (2) 设计了基于 FPGA 的模糊控制器，并用 VHDL 语言加以实现，并对模糊控制器进行仿真。
- (3) 设计了基于 FPGA 的数字 PI 调节器，并对 PI 参数选择进行分析。
- (4) 介绍了一些主要的软件抗干扰措施。

## 第五章 焊接实验

在埋弧焊数字化控制系统的硬件设计和软件编程完成之后，对改进后的焊机进行了焊接实验，通过实验结果来检验控制系统的工作情况，并对焊接过程中的电压和电流波形进行分析。

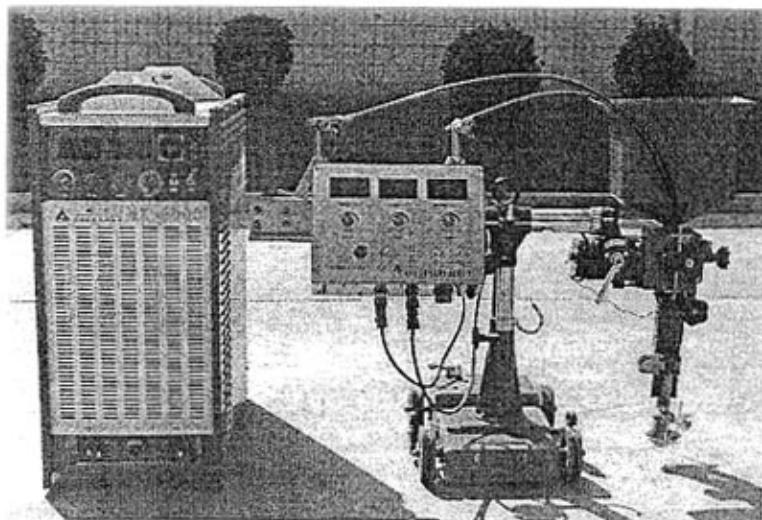


图5.1 埋弧焊机实物图

焊机基本参数如下：

电源电压/频率：三相380V±10%/50HZ

空载电压：埋弧焊 90V

手弧焊 67V

额定输出功率：44KW

额定输入电流：83A

额定焊接电压：44V

负载持续率：100%

满载效率：92%

满载功率因数：0.88

焊丝直径：3-6mm

焊接电流调节范围：60-1000A

## 5.1 波形分析

进行焊接实验时系统的初始条件为：电压为38V，电流为600A；焊丝直径为3mm，焊接速度为30m/h。当系统进入稳态后的电弧电压、电流波形如图5.2和图5.3所示。

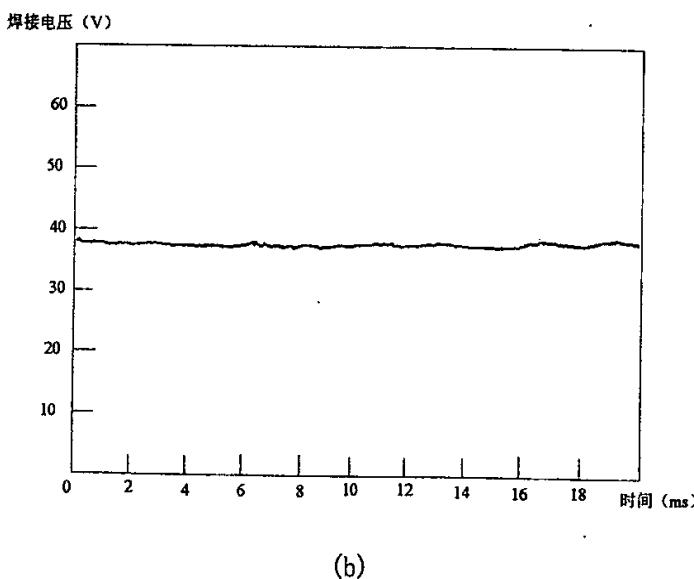
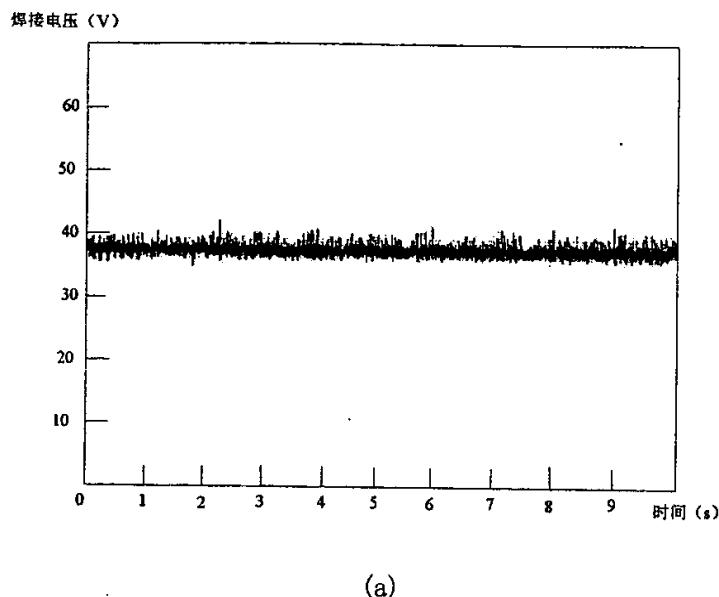


图5.2 电弧电压波形

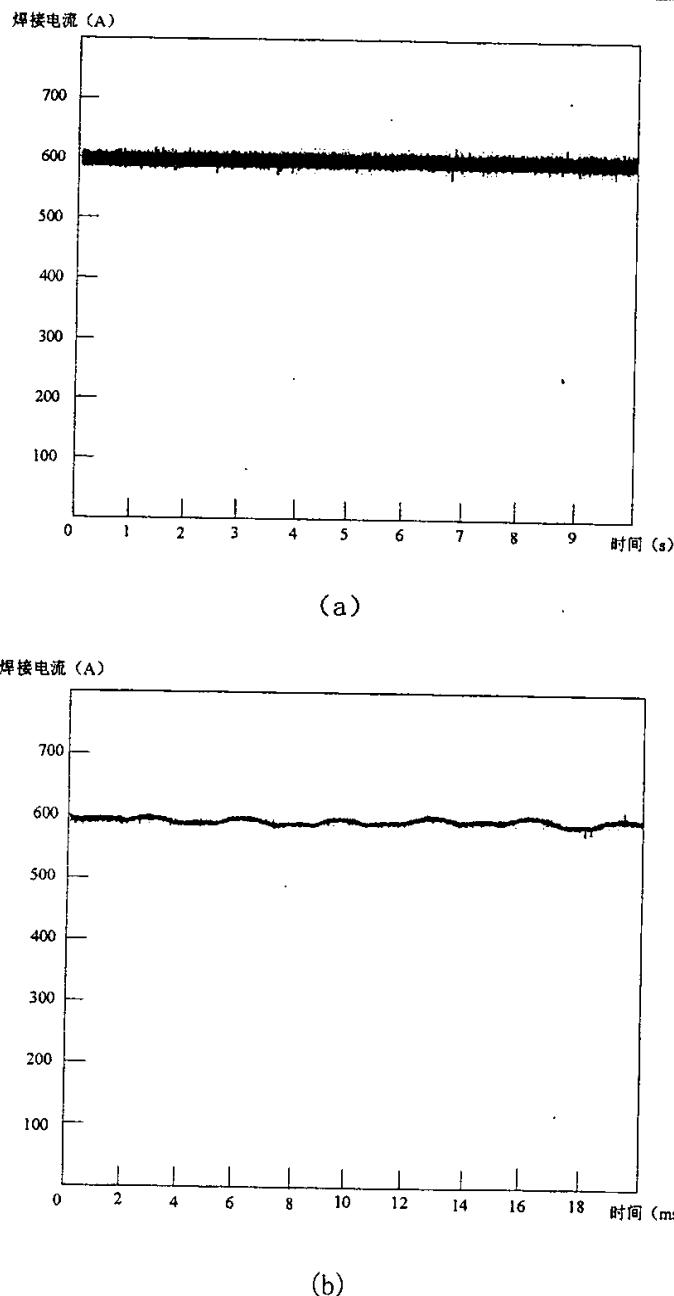


图5.3 焊接电流波形

图5.3(a)为时间单位为(s), 电压单位为(V)时的电压波形, 从图中可以看出电压值约为38V, 大约有3V波动, 尖峰处为5V波动。将波形展开后, 时间单位为(ms), 电压单位为(V)时的波形如图5.4(b)所示。图5.4(a)为时间单位为(s), 电流单位为(A)时的电流波形, 从图中可以看出电流值约为600A, 波动在20A以内。

将电流波形展开后，时间单位为(ms)，电流单位为(A)时的波形如图5.4(b)所示。电压波动和电流波动均在焊接规范允许的范围内，波形能够满足客户提出的技术要求。

## 5.2 焊缝分析

采用上述参数进行焊接实验时，所形成的焊缝如图5.4所示。

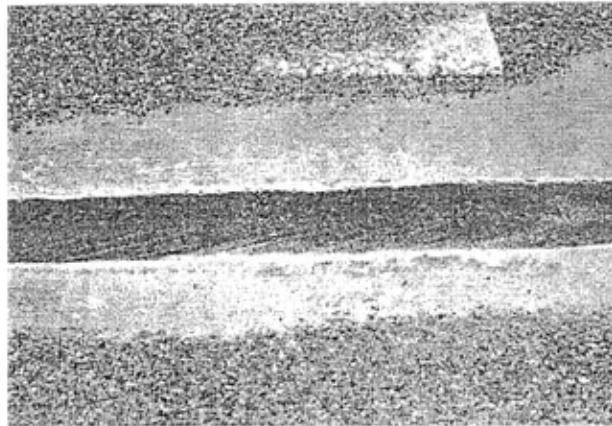


图5.4 焊缝成型图片

由图中可以看出，焊缝的堆高、熔深和熔宽都很均匀。焊缝成型美观、平坦，并且脱渣容易，焊缝质量较高，满足焊接要求。

## 5.3 本章小结

通过对焊接电压和电流波形的分析表明：焊接过程中系统送丝均匀，小车行走速度稳定；电弧稳定，无断弧；而且焊接开始时起弧容易，焊缝成型优良；焊机声音稳定，无震荡现象发生。因此所设计的控制系统满足埋弧焊接要求。

## 第六章 结论

本文主要介绍了基于单片机和FPGA的埋弧焊控制系统的软硬件设计，其中重点设计了基于FPGA模糊控制系统用于送丝速度的控制。本课题从选题到在实验室试验，历时一年多时间，期间进行了多种尝试和探索。仿真和实验的结果表明该方案可行，各部分软硬件设计控制达到预期效果。

(1) 通过调研数字化焊接技术和逆变埋弧焊控制系统的研究与发展现状，发现传统的单片机系统可以完成参数给定和程序管理功能，但是很难完成控制系统所需的PI控制和PWM信号的产生，采用单片机和FPGA的数字化控制系统可以完成埋弧焊机的整体控制。

(2) 以单片机ATmega16和可编程逻辑门阵列EPF10K10LC84-4为核心，设计了逆变埋弧焊机的数字化控制系统。与传统的模拟控制系统和单片机控制系统相比，数字化控制系统的硬件电路大大简化，可靠性、灵活性和控制精度得到很大提高。

(3) 本文所设计的送丝和小车行走调速系统采用MOSFET高频开关调速，PWM脉冲直接由FPGA产生。该调速系统具有优良的动、静态品质，并且结构简单，运行平稳、可靠。

(4) 数字化控制系统完成后，进行了焊接实验，结果证明整个控制系统设计方案是可行的，系统各个部分的控制电路和软件程序达到了焊接要求，焊接过程的稳定性和焊接质量都比较高。

本控制系统还有许多不足之处，由于运算速度问题，系统的恒流特性由硬件PI实现。模糊和PI控制器也有许多可以改进的地方，比如进一步优化控制器中的运算器，提高系统的响应速度；采用智能和PI相结合控制算法，进一步加强系统性能；增大数据位宽，提高系统精度等。

## 参考文献

- [1] 周昭伟等. 焊工手册 [M]. 机械工业出版社, 1998, 第一版: 1-2.
- [2] 李亚江、称茂爱、孙俊生. 实用焊接技术手册 [M]. 河北科学技术出版社, 2002, 83—84.
- [3] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊 [M]. 北京: 机械工业出版社出版, 1995, 30-32.
- [4] 中国机械工程学会焊接学会编. 焊接手册第一版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [5] 胡特生. 电弧焊 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [6] 黄石生. 新型逆变电源及其智能控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000, 4-9.
- [7] 华学明等. 数字化焊接电源系统的特征 [J]. 焊接技术, 2002(2), 6-7.
- [8] 刘嘉、殷树言、丁京柱. 数字化焊机及其特点 [J]. 电焊机, 2001(6), 8-10.
- [9] 刘嘉. 弧焊逆变电源数字化控制 [D]. 北京工业大学博士学位论文, 2002, 4.
- [10] 郑湘蒙. 单片机控制TIG焊机的研制 [D]. 北京工业大学硕士学位论文, 2001, 5.
- [11] 李鹤岐、徐德进等. 脉冲MIG焊机数字化控制设计 [J]. 电焊机, 2002(8), 1-4.
- [12] 刘嘉、卢振洋等. 电焊机数字化 [J]. 焊接学报, 2002, 23(1).
- [13] 曲智明. 逆变焊接电源的现状和发展 [J]. 电焊机, Vol. 30, 2000, 2-4.
- [14] 褚振勇. FPGA设计及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.
- [15] 何景山、杨春利等. 埋弧焊图像法焊缝自动跟踪传感系统. 焊接, 1999.
- [16] 黄石生、王秀媛等. 埋弧焊跟踪控制系统及发展. 焊接, 2001.
- [17] Kottilingam. s, Aee. R. H, et al. Infrared sensing techniques for penetration depth control of the submerged arc welding process, Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1-3), 228-233.
- [18] Tusek, J. Narrow-gap submerged-arc welding with a multiple-wire electrode, Faculty of Metallurgy, 2002, 41(2): 83-88.
- [19] 马跃洲、梁卫东等. 数字控制的埋弧自动焊机研制 [J]. 电焊机, 2002(8), 11-12
- [20] 陈祝年. 焊接工程师手册 [M]. 机械工业出版社, 2002, 2(1).
- [21] 胡特生. 电弧焊 [M]. 机械工业出版社, 1993, 1.
- [22] 潘际銮. 现代弧焊控制 [M]. 机械工业出版社, 2000, 56-58.

- [23] 中国机械工程学会焊接学会等编. 焊接手册(第二版)第一卷 焊接方法及设备[M]. 北京: 机械工业出版社. 1998. 10.
- [24] 雷环利、计丹、黄光明、叶苏孙. 基于FPGA的核物理实验定标器的设计与实现[J]. 单片机与嵌入式系统应用.
- [25] 刘扬超、孙慎言、李巍巍. Atmega16在开关磁阻电机调速系统中的应用[J]. 国外电子元器件. 2005, 6.
- [26] 王福瑞等. 单片机测控系统设计大全[M]. 北京, 北京航天大学出版社. 1998.
- [27] 骆德阳、宋彬、方培泉. 开关型送丝电源的研制[J]. 电焊机. 1997(2): 9-110.
- [28] 李鹤岐, 吴荣, 路广. 单片机控制 IGBT 逆变埋弧焊机设计[J]. 电焊机. 2004, 34 (10): 2-3.
- [29] 尹红、唐煜. 单片机RS-485通讯的实现. 电子在线编程.
- [30] 李朝青等. PC机及单片机数据通信技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 1999, 8-12.
- [31] 龚建伟. 接口技术的基础知识[J]. 中国工控网.
- [32] 陈红伟. 微型计算机基本原理与接口技术[M]. 北京: 科学出版社. 2003.
- [33] 刘振安. 微型机应用系统抗干扰技术[M]. 北京: 人民邮电出版社. 1991. 8.
- [34] 苟彦新. 无线电抗干扰通信原理及应用[M]. 西安电子科技大学出版社. 2005, 1-10.
- [35] 诸邦田. 电子电路实用抗干扰设计技术[M]. 北京: 人民邮电出版社. 1994. 4.
- [36] 滕旭、胡志昂. 电子系统抗干扰实用技术[M]. 北京: 国防工业出版社. 2004
- [37] Daniel G. Schwartz, George J. Klir, Senior Member, IEEE, Harold W. Lewis III, and Yoshinori Ezawa, Member, IEEE, Applications of Fuzzy Sets and Approximate Reasoning, PROCEEDING OF THE IEEE, VOL. 82, NO. 4, APRIL 1994.
- [38] 李士勇. 模糊控制和智能控制理论与应用[M]. 哈尔滨工业大学出版社 . 1990. 12.
- [39] Gilberto C. D. Sousa, Student Member, IEEE, and Bimal K. Bose, Fellow, IEEE, "A Fuzzy Set Theory Based Control of a Phase-Controlled Converter DC Machine Drive", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 30, NO. 1, JANUARY 1994.
- [40] 黄石生, 李迪. 焊接过程的神经网络建模及控制研究[J]. 机械工程学报,

1994, 30(3) : 24-30.

- [41] 闻信等. MATLAB模糊逻辑工具箱分析与应用[M]. 北京: 科学出版社. 2001. 04
- [42] 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智慧控制理论与技术[M]. 清华大学出版社. 广西科学技术出版社, 1997.
- [43] Guo, H.-J.; Shiroishi, Y.; Ichinokura, O.; Digital PI controller for high frequency switching DC/DC converters based on FPGA[J]. Telecommunications Energy Conference, 2003. INTELEC '03. The 25th International 19-23 Oct. 2003 Page(s): 536 - 541.
- [44] 卢毅、赖杰. VHDL与数字电路设计[M]. 北京科学出版社. 2001. 04.
- [45] 东方华人等. MAX+PLUS II入门与提高[M]. 北京: 清华大学出版社. 2004.
- [46] 高书莉、罗朝霞. 可编程逻辑技术及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2001
- [47] 冯涛、王程. 可编程逻辑开发技术[M]. 北京: 人民邮电出版社. 2002.
- [48] 辛春艳. VHDL硬件描述语言[M]. 北京: 国防工业出版社. 2002. 01.
- [49] 王伟东、段可博等. 基于CPLD的直流电动机PWM驱动器设计[J]. 计算机测量与控制, 2003, 第10期: 793-795.
- [50] 冯小林、张林等. 一种基于CPLD实现的数字化 PWM 波形发生器[J]. 现代电子技术, 2003年, 第3期: 71-72.
- [51] 熊承义、孙奉娄. 一种基于CPLD的宽可调PWM信号发生器[J]. 中南民族学院学报, 2001, 第3期: 9-11.
- [52] 周渊深, 等. 交流调速系统与 MATLAB 仿真[M]. 中国电力出版社, 2003.
- [53] 陶永华、尹怡欣、葛芦生. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998, 第一版, 1-7.
- [54] 仇慎谦. PID 调节规律和过程控制[M]. 江苏科学出版社, 1986, 35-62.
- [55] 陈传硕、田丽华. PID 控制参数的整定方法[J]. 长春邮电学院学报, 1994, 第1期: 9-16.
- [56] 王幸之、王雷、翟成. 单片机应用系统抗干扰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.

## 致谢

值此论文完成之际，首先向我的导师—尊敬的尹海副教授表示衷心的感谢，感谢尹老师在学习、科研和生活上给予的指导和帮助。

三年来，导师渊博的学识、严谨的治学态度和务实的工作作风激励着我努力学习、踏实工作、不断进取。

在攻读硕士学位期间，张光先副教授给予我很大的支持和关心，在此表示最衷心的感谢。

另外，我要特别感谢奥太电气有限公司三年来在本课题的研究过程中所提供的良好的实验设备和丰富的国内焊机行业信息和资料；感谢奥太电气有限公司研发部的所有同仁，尤其是孙润生、万刚、邓伟、昌晶等朋友，感谢他们几年来在各方面的关心和帮助；感谢师兄孔德杰，师妹韩晓敏、段海雁的大力帮助！

最后，再次向三年来所有支持和帮助我的老师、同学和亲友表示衷心的感谢！

### 攻读学位期间发表的学术论文目录

1. 杨绍辉, 尹海, 张光先. 《基于 FPGA/CPLD 的直流电机转速模糊控制》. 兵工自动化, 总第 87 期, 2006 年第 52 卷 1 期. 71—72.
2. 荣晓飞, 张光先, 杨绍辉. 《基于 VHDL 语言模糊控制器的设计》. 山东大学学报, 第 40 卷 增刊 2, 2005 年 10 月. 32—35.