

摘要

人工智能和数字化信息处理技术的发展,推动弧焊技术向着焊接工艺高效化,焊接电源控制数字化、焊接质量智能化方向发展。由于模拟弧焊电源控制电路复杂,可靠性低,可移植性差,对电子元器件的精度和稳定性过于依赖,造成成本高、控制困难,不容易实现弧焊电源的精确控制,柔性化更无从谈起。为此,本文研究弧焊逆变电源的数字化控制系统,通过数字控制的方式,达到满足脉冲 MIG/MAG 焊逆变电源控制应用需要。为进一步提高逆变焊机的性能,本文引入了基于 DSP 和 CPLD 的全数字化控制技术,对数字化控制的脉冲 MIG/MAG 焊控制逆变电源进行了初步研究。

本文结合当前 DSP 技术和嵌入式系统发展的最新成果,选用 TMS320F2812、EPM7064 和 AT89S8252 单片机设计了脉冲 MIG/MAG 焊逆变电源的全数字控制系统,建立了脉冲 MIG/MAG 焊全数字控制系统的研究平台。其中, DSP TMS320F2812 负责电源的整体管理与控制; CPLD EPM7064 负责数字化 PWM、数字化保护电路和数字化滤波电路;单片机负责人机接口交互系统的控制,单片机和 DSP 之间采用 RS232 通讯协议进行数据的交互。

本文在完成所设计的脉冲 MIG/MAG 焊全数字控制系统经调试后,实现了如下功能:首先,在 CPLD 上编写软件以硬件电路的方式实现了数字 PWM,数字保护电路和数字滤波,并在负载实验中得到验证;其次,编写软件实现了电源的恒流闭环控制,通过变阻箱负载实验研究了该电源的电流、电压的动态响应性能;最后,编写新型压频转换控制软件实现了弧压闭环控制的功能,并在变阻箱负载下进行算法验证试验。实验结果表明,本文所研制的脉冲 MIG/MAG 焊逆变电源能实现精确的电流波形控制和弧压闭环控制,达到了最初设定的研究目标。

此外,针对本焊机的研究提出了进一步的完善意见,为今后开展全数字化控制逆变焊机的研究奠定了良好的基础。

关键词: 脉冲 MIG/MAG 焊; DSP TMS320F2812; CPLD EPM7064; 弧压闭环控制

Abstract

The development of artificial intelligence and digital signal processing technology will be an important driving force for arc welding technique development heading for high efficiency, digitization and intelligence. It is hard for analog arc welding power supply to realize precise and flexible control, because of its weakness such as complex circuit, low reliability, poor planted ability and high precision requirements for analog electron parts. Therefore, this paper studies digital inverter controller to meet the need of welding inverter applications, by designing the digital control strategy. The research presented here is concentrating on digitization welding inverter based on DSP and CPLD used for PMIG welding, aiming at improving the performance of welding power source.

In this paper, we develop a full-digital control system for PMIG using TMS320F2812, EPM7064 and AT89S8252, and establish a full-digital control welding inverter study platform, on the basis of the development of DSP technology and embedded application. In this system, DSP is responsible for the whole management and control for the inverter. CPLD EPM7064 realizes the function of digitizing PWM circuit, digitizing protection circuit and filter circuit. MCU is in charge of the control of the man-machine interface system. The communication between DSP and MCU is established by RS-232 protocols.

The PMIG welding inverter designed in this paper is capable of performing functions as follows: load testing and adjusting. First of all, realize PWM digitization, protection and filter circuit digitization by programming software on CPLD and load testing. Second, performs good external static characteristic and dynamic step response characteristic by programming current closed loop control software for PMIG inverter and load testing. At last, realizes arc-voltage closed loop arithmetic verification by programming the new voltage/frequency changing program and load testing. The simulated load test is also made here. The experiment proved that the welding inverter can control the current waveforms precisely and average arc-voltage constantly, and meet the design requirements.

Some advices on future research of the welding power source are given, and they would make a found ground for the subsequent study of full-digital controlled welding inverter.

KEYWORDS: PMIG/PMAG welding; DSP TMS320F2812; CPLD EPM7064; Arc-voltage closed loop control

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京工业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。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了谢意。

签名： 王金柱 日期： 2007.6.7

关于论文使用授权的说明

本人完全了解北京工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签名： 王金柱 导师签名： 张洋 日期： 2007.6.7

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

人工智能技术、计算机视觉技术、数字化信息处理技术、机器人技术的发展,推动弧焊技术向着焊接工艺高效化,焊接电源控制数字化、焊接质量智能化以及生产过程机器人化方向发展。21世纪制造业趋于全球化、网络化、集成化、虚拟化、异地化、数字化,计算机、信息技术的快速发展将促进制造领域逐渐与其融合,焊接技术也正在与信息技术紧密结合。由于焊接过程的多变性和复杂性,利用数字化技术,使焊接设备从简单的机电产品变成一种精密加工仪器,将是焊接设备发展方向。

同时,由于采用了数字化控制技术,焊接电源已不再是单纯的焊接能量提供源,还应具有数字操作系统平台、多特性适应调整、送丝驱动外设及接口、焊接参数动态自适应调整、保护及自诊断提示以及远程网络监控、生产质量管理等功能,焊接电源的概念实际上已拓宽为焊接电源系统。因此,在学术水平和使用价值方面都具有重要意义。数字化焊机在国内的研究还处于起步阶段,但数字化焊机凭借无与伦比的强大优势,必将成为焊接设备的主流,是未来之星。

该课题产生的背景正是来自于焊接电源的全数字化控制属于当今焊接技术发展的大趋势。

1.1.2 研究的意义

数字化弧焊逆变电源是当今焊接技术的重要发展方向。随着焊接技术应用领域的不断拓宽,对弧焊设备的工艺性能也提出了更高的要求。

与传统模拟控制系统相比较,数字化弧焊电源具有以下显著特点^[1~5]:

①拓宽功能。电源外特性软件灵活控制,容易实现一机多用,对于自动焊机,可以增加焊接参数预置、记忆与再现等功能。利用精确的数字控制,采用电子电抗器和波形控制等技术能实现高效气体保护焊,包括高速焊接和高熔敷率焊接。

②适应性强。利用计算机的存储功能和高速、高精度数字信号处理技术,可以使焊机向多功能化和智能化发展,便于在焊机中引入自适应控制、模糊控制、神经网络控制等现代控制方法,进行焊接参数的优化、焊接质量的控制等。

③操作性好。利用单片机及专用数字信号处理器的高速计算能力和丰富的外部接口与通讯能力,在引入模糊控制等智能控制技术的基础上可以实现简单的焊

接参数一元化调整,实现逆变焊机的“傻瓜式”操作。

④便于升级。同一类型的焊机,功能的改进可以只通过软件设计来实现,对现今技术更新特别快的时代,可以大大提高焊机的使用寿命和使用范围。在为焊接专机配套时,可以灵活改变焊机的性能,便于实现专机专配。

从焊机的工艺效果来看,数字化焊机由于控制策略调整灵活,功能强大,控制精度高,控制参数稳定性好,数字化焊机具有更好的工艺稳定性和更好的工艺效果^[1]。首先,逆变技术与弧焊电源的结合使得对焊接电弧行为的控制周期从3.3ms缩短到50us(20KHz逆变频率),焊接电源的动特性大幅度提高,对电弧有更强的控制能力。其次,数字信息处理技术的融入使得弧焊工艺控制柔性化,更加精确地控制焊接工艺过程,实现新的工艺控制思想提高焊接性。由于数字化弧焊逆变电源的控制信号流是数字编码的,控制效果稳定,不受模拟器件参数分散、温度变化和环境影响,因此产品的一致性、稳定性易于保证。

从技术发展的角度来看,数字化焊机研究的时机是成熟的。首先,数字信号处理理论和计算机技术的发展、完善,为弧焊领域的数字化控制技术的应用提供了坚实的理论基础,积累了宝贵的经验。其次,数字化控制所涉及的元器件丰富,种类齐全,并且容易获得。

总之,随着高速数字信号处理器DSP和高档单片机MCU的出现和广泛应用,为突破传统工艺控制方案,为进一步提高焊接工艺性能成为可能。

1.2 数字化焊接电源的研究概况

1.2.1 国际研究概况

1998年奥地利Fronius公司研制出世界上第一台全数字化焊机,之后国外众多焊接设备公司纷纷推出基于DSP数字控制的焊接电源并大量投放市场,奥地利Fronius公司生产的TRANSPLUS SYNERGIC系列TPS2700/4000/5000全数字化焊接电源,该焊机的操作界面友好,一台数字化焊机上实现了脉冲MIG、直流MIG、手弧焊、TIG焊等多种工艺方法、不同材质、不同焊丝直径的焊接功能,多功能性可见一斑。同时,参数的给定旋钮只有1个,这样极大的方便了操作者。其控制采用“MCU+DSP”相结合的控制技术,实现了焊机程序的软件升级、焊接工艺规范优化、多功能、多种焊接材料的适用性以及焊接工艺参数的离线处理等。它的核心部分是一个数字信号处理器(DSP),实现了逆变弧焊电源的电流调节的数字闭环控制,集中处理所有焊接数据,检测和控制整个焊接过程,焊机具有引弧、精确控制电弧、专家系统、一机多功能、焊接数据接口和评价系统等功能,使得数字控制的优势得以充分体现^[6-8]。

又如,德国EWM公司生产的INTEGRAL系列数字化焊接电源,数字处理系

统处理所有焊接数据，控制整个焊接过程，同样具有专家系统、一机多用、计算机或网络通讯、模块化设计、焊接数据的存储和分析系统等功能。澳大利亚的WOLLONG大学利用美国TI公司生产的TMS320C32数字信号处理器高速采样率控制GMAW焊接过程。

1.2.2 国内研究概况

目前国内一些研究单位和企业也推出了不同类型的数字化焊机，电焊机的数字化已成为我国焊机行业的研究热点之一。从目前掌握的情况，高校数字化焊机的研究主要有北京工业大学、上海交通大学和哈尔滨工业大学等单位，目前已经有几种数字电源产品投入市场。上海交通大学焊接研究所1999年提出了“数字化焊接电源”的研究课题，使用DSP芯片作为控制系统的核心，主要应用于熔化极气保护焊接电源系统的研究，以开发12相可控硅焊接电源为主，如图1-2所示。

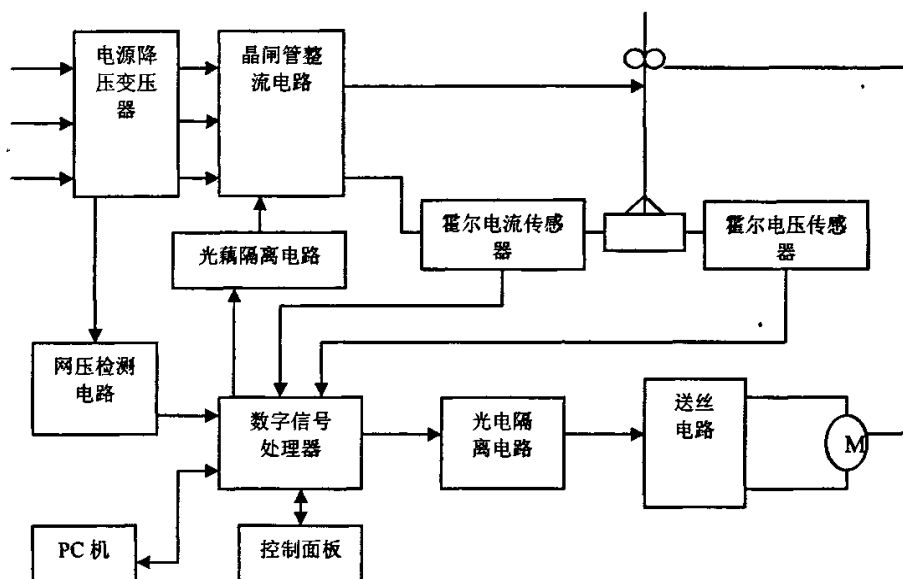


图1-2 DSP控制的数字化焊接电源结构图^[8]

Fig.1-2 Structue diagram of digital welding power based on DSP^[8]

北京工业大学分析了数字化焊接电源的特征，提出了“全数字化控制焊接电源的方案”，重点开发“MCU+DSP”双处理器控制系统^[2, 6]。单片机(MCU)根据不同的送丝速度按照一定的规则计算出相应的焊接电弧电压及电流参数等，同时负责系统的总体管理；驱动PWM以可编程逻辑器件CPLD为载体实现；控制算法如PI控制以及非线性接口算法等均由DSP实现。

我国在全数字化焊接电源的制造和科研技术水平上还落后于世界发达国家，大部分企业技术创新能力薄弱，不少关键技术及设备仍然依赖国外进口。

1.2.3 脉冲 MIG 的研究现状和存在的不足

由文献[9]可知,1978年 P.Drews.Schulle-Fricling hans等提出了四种切换静态外特性获得脉冲电弧的方案。陡—平(I-U)外特性表示维弧电流采用恒流外特性,脉冲电流采用恒压外特性,它的特点在于:自身调节能力强,脉冲期弧压稳定,维弧期间电流恒定,不会因弧压波动导致电流过小而熄弧。平—陡(U-I)外特性即维弧电流采用恒压外特性,脉冲电流采用恒流外特性,其特点在于:能抗弧长干扰而脉冲电流不变以进行较为稳定的喷射过渡;缺点在于:自动调节能力差。平—平(U-U)外特性即维弧与脉冲电流均采用恒压外特性。特点在于:自身调节能力强,缺点在于脉冲电流不稳定,必影响熔滴过渡。陡—陡(I-I)外特性,即脉冲、维弧电流均采用恒流外特性,其特点在于能得到稳定的熔滴过渡并且可对熔滴过渡进行精确控制,在维弧期电流稳定不易熄弧,它的缺点在于弧压波动大,维弧期间会因弧长波动造成短路。如果在这种方法的基础上加上一些特殊的控制法来稳定弧长,则可以扬长避短。

本文所设计的全数字控制逆变脉冲焊机拟采用 I-I 模式,以保证脉冲期间电流稳定,可对熔滴过渡进行精确控制,获得稳定的熔滴过渡,在维弧期电流稳定不易熄弧,另加稳定弧长的控制设计。由于恒流(I-I)外特性电源的优点,目前包括 Fronius、OTC 等知名公司的脉冲焊设备均采用 I-I 外特性,弧长发生波动时也大多采用调节基值时间的方法^[10, 11]。从控制的角度,恒流外特性脉冲焊电源研究存在如下问题:

①脉冲电流波形控制。大多数逆变焊机及大多数单片机控制的PMIG/PMAG焊机,其电流控制部分大多采用模拟芯片,如脉宽调制芯片SG3525。由于基值、峰值电流闭环控制共用一片SG3525,很难兼顾这两个阶段的静、动性能指标,也就很难获得灵活的、控制较为精确的波形效果。以往单片机主要用于焊接时序控制和焊接参数预处理等,这方面技术已成熟。但单片机很少用于脉冲电流波形控制,包括OTC的 DigitalPulse,即便有应用,由于单片机不具备DSP的优异性能,仍有提高空间。当然脉冲电流波形控制部分采用模拟控制,只有电弧控制部分采用单片机控制,极大的降低了恒流特性(I-I)脉冲焊电源的控制系统设计和实现难度,但是很难获得较为精确、灵活的波形控制效果。针对这一情况,采用数字信号处理器DSP,实现逆变弧焊电源的电流调节的数字闭环控制,才能较为精确、灵活的控制脉冲电流波形,获得控制较为稳定、精确的熔滴过渡,同时薄板铝焊电流较低(此时基值电流较低)时也能获得好的效果,使得数字控制的优势得以充分体现^[12, 13]。

②脉冲焊电弧控制。从熔化极气体保护焊的特点来看,由于熔滴过渡过程弧长是变化的,所以任何企图控制瞬时弧长不变的做法都是与其特点相违背的。因此,脉冲焊弧长闭环控制系统只对电弧的平均弧长进行控制。

采用I-I外特性的脉冲焊电源一般采用弧压反馈闭环控制法来稳定弧长^[10]。这种控制法就是实时检测弧压,并将其与给定值相比较,得到差值,根据这一差值在依据一定的控制算法(多为PI或PID),对脉冲参数进行调节,一般以调节基值时间(即脉冲频率)居多,实时改变熔化速度使弧长保持稳定。目前,很多脉冲焊弧长控制系统是基于单片机设计的。与一般离散采样系统不同,在基于单片机的弧长控制系统中,送丝速度不同时或弧长发生变化后的调节过程中脉冲频率会发生变化,这将导致与脉冲频率同步工作的弧压采样器变成了多速率采样器,使解决离散问题的有利工具Z变换无法在此应用,无法通过Z变换来利用离散控制系统分析法对脉冲 MIG/MAG 电弧控制系统动态调节过程进行分析,在加上脉冲电弧模型难于确定,控制器参数很难确定。即使确定了该参数也很难在全电流范围内获得理想的调节特性。脉冲焊脉冲频率变化范围很广,为保证在最低频率下系统不发生振荡,需对电弧电压信号加入具有较大时间常数的滤波或积分环节,这就是传统闭环弧长控制系统动态品质通常较差的原因。

针对弧长控制所面临的上述问题,目前主要有以下三种解决措施^[12]:

1) 数学模型法,由于很难建立准确的数学模型,实用价值不是很大^[1]。

2) 有研究为了在很宽的平均电流范围内保持脉冲频率变化较小,避免低速送丝时脉冲频率过低,弧长采样周期过长,影响弧长调节的动态响应,送丝速度不同时,调整峰值电流;弧长发生变化时综合调节脉冲峰值时间和基值时间,使得在一定的送丝速度下,电流脉冲趋向于较高的频率这样就缩短了弧长调节周期,使系统具有良好的动态响应^[14~16]。总之,就是在不过分追求一脉一滴的前提下,为获得好的焊接工艺性能,在不同送丝速度和弧长发生变化时,尽量保证脉冲周期变化不大,以使系统在全电流范围内始终有好的动态响应性能。

3) 由于控制对象一脉一脉冲电弧的传递函数无法求出,故只能在实验中不断改变弧压控制器的参数,视其效果不断调整^[17, 18]。这种方法尽管在一定范围内是有效的,但其对自动化焊接的适应程度有限^[19~21]。综上,需要提出一种改进的弧长控制算法,以实现全电流范围内对弧长的快速稳定调节,并且能保证熔滴的过渡形式。

1.3 本课题的来源及主要研究内容

本课题来源于北京市自然科学基金项目。

发展和完善全数字化弧焊逆变焊接电源,是数字化控制技术在焊接领域广泛应用的关键。本课题主要是进行基于 DSP TMS320F2812、CPLD EPM7064 和单片机控制,实现脉冲 MIG/MAG 焊逆变电源全数字化控制系统的研制工作。要求逆变电源实现 PWM 和保护电路数字化,通过弧压闭环控制算法和 PI 算法恒流控制实现一脉一滴的电流波形控制和电弧平均电压控制,通过面板可以实现焊接

参数数字调节和通信，且能实现脉冲 MIG/MAG 焊的功能。

本课题的主要研究内容分为以下几个部分：

1. 硬件系统设计

设计系统硬件总体方案，以 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 为核心控制芯片构造弧焊逆变焊机的主控制系统；设计基于 CPLD EPM7064 的数字 PWM 控制电路，DSP 的 8 位控制信号输入接口和保护信号接口电路；构建单片机 AT89S8252 和 SD7218A 智能键盘/显示驱动芯片为控制核心的人机接口交互系统，使用 RS-232 串口总线接口实现二模块之间的数据传输。

2. 软件系统设计

设计软件总体方案，在 TMS320F2812DSP 主控系统上编写条件控制 PI 算法和压频转换控制算法，编写软件实现数字化控制系统的整体管理；在 CPLD EPM7064 上编写软件，实现数字 PWM，数字 PWM 算法要实现死区算法和两路 PWM 信号任意时刻同步，实现对 DSP 的输入数据信号和 PWM 输出信号进行滤波处理，提高系统的稳定性和可靠性，同时实现保护电路数字化。

3. 试验及调试

组装和调试脉冲 MIG/MAG 焊全数字化控制平台。通过实验验证数字 PWM 系统设计的正确性和设计的合理性，测试焊接电源的恒流外特性，对静特性结果进行分析，调节 PI 控制参数使系统动态性能满足使用要求，并对动态特性结果进行分析。

第 2 章 系统方案设计

2.1 功能要求

本系统设计研制一套基于“DSP + MCU + CPLD”的脉冲MIG/MAG焊接全数字控制系统。采用全桥IGBT逆变主电路，控制电路主要实现以下功能：

- ① 在 CPLD EPM7064 芯片上，实现数字 PWM 和其保护控制；
- ② 在 DSP TMS320F2812 上，实现数字 PI 算法控制；
- ③ 对采集到的焊接电压和电流信号进行处理，提取有用信号特征量；
- ④ 具备显示和参数调节功能，实现和 DSP 之间的数据通信；
- ⑤ 在 DSP TMS320F2812 上，实现脉冲 MIG 闭环弧压控制算法。

2.2 系统主要技术参数指标确定

本系统的技术参数主要包括PI调节时间、AD转换精度。

1) PI调节时间的确定。本系统采用焊接电流闭环控制，主电路的逆变频率是20KHz，PWM信号的周期为50 μ s。为了单周期实现对焊接电流进行PI调节，PI算法的调节时间应小于50 μ s；

2) AD采样精度的确定。参考现有的脉冲MIG焊接电源的控制精度，焊接电压和焊接电流的AD采样精度应不低于10位精度，本系统采用DSP TMS320F2812内部AD转换器，为12位AD转换精度，满足设计要求。

2.3 系统方案及模块方案的确定

从功能上分，本系统主要包括主电路、控制电路、送丝电路、显示电路和驱动电路五个部分。

方案 1：主电路采用 IGBT 全桥逆变电路，采用电流和电压传感器获得实际焊接电压和电流，通过 DSP 自身 AD 转换模块；控制电路部分由 DSP TMS320F2812 实现 PI 算法和弧长控制，由数模转换芯片 DAC7625 和 SG3526 实现 PWM 控制输出，实现焊接电压和焊接电流的双闭环控制；显示面板由单片机控制实时显示和调节焊接参数，焊接参数通过串口送给 DSP。DSP 通过 DAC7625 输出控制送丝速度。

方案 2：主电路、显示电路和驱动电路与方案 1 相同，控制电路和 PWM 及其保护的实现方式与方案 1 不同。控制电路部分由 CPLD EPM7064、DSP TMS320F2812 构成，DSP 不经过 DA 转换和 SG3526 产生 PWM 控制信号，而是

由 DSP 产生的控制数据直接经过 CPLD EPM7064 产生两路 PWM 控制信号和保护, 由 DSP 产生一路 PWM 信号控制送丝速度。

其总体控制思路如下:

①显示面板实现焊接电压和焊接电流的实时显示、焊接参数的调节及与 DSP 通过串口通讯;

②主控电路上, 通过 DSP TMS320F2812 进行焊接电流和焊接电压采样和 AD 转换, 通过 DSP 上的软件数字 PI 算法, 实现焊接电流在一个脉宽调节周期内完成一次 PI 调节;

③DSP 上编写弧长控制算法, 实现脉冲 MIG 一脉一滴控制;

④CPLD EPM7064 实现对 DSP 输出的数据信号线性地转换成产生两路互差 180 度相位的 PWM 信号, 并实现数据信号滤波及 PWM 的过流、过压和过热保护和报警控制;

⑤CPLD 的 PWM 信号通过驱动电路, 控制主电路的 IGBT 通断, DSP 的 PWM 信号通过送丝板来控制送丝速度。

在以上 2 种方案中, 第一种方案是我们最熟悉的, 系统 PWM 控制信号是通过模拟电路实现的。经过 PI 运算和弧长控制计算得到控制数据, 通过数模转换、运算放大器后与 SG3526 的三角波比较得到 PWM 控制信号。本方案的缺点: ①电路复杂, 可靠性差, 成本高; ②PWM 频率由 RC 值决定, 市场上的电容和电阻精度不高, 导致 PWM 信号频率很难实现精确控制; ③SG3526 产生三角波易于振荡, 进一步导致 PWM 信号的不稳定。④DAC7625 的数模转换时间最大为 10 μ s, 为此产生 PWM 信号频率受限制。优点: 技术成熟。

在第二种方案中, 在第一种方案的基础上, 进一步实现了 PWM 和保护电路的数字化, 同时在数据信号输入端和 PWM 信号输出端加入了数字滤波算法, 消除了毛刺, 使 PWM 信号更稳定、更可靠。具体的实现方法是: DSP 输出的数据信号直接经过 CPLD EPM7064 转换成两路互差 180 度相位的 PWM 信号, PWM 信号的频率由有源晶振的频率决定, 有源晶振运行稳定可靠而且精度很高, 不存在振荡问题。由于本方案与第一种方案相比较, 缺省了 DAC7625、运算放大器和 SG3526 等器件, 只由一片 EPM7064 来完成, 电路简单可靠, 成本低, PWM 信号频率精确。缺点是实现难度大。

经过以上分析, 从系统可靠性、稳定性、先进性、成本等各方面分析, 我们选择用“MCU+DSP+CPLD”的方案来实现系统功能。

2.3.1 数据处理芯片的选择

目前最常用的完成信号处理功能的 CPU 为数字信号处理器, 即 DSP。通用 DSP 的生产厂家中最有影响的是美国德州仪器公司 (TI 公司)、AD 公司、AT&T 公司

和Motorola公司,其中TI和AD公司的DSP产品系列最全,市场占有率最高。其中应用最为普及的是TI公司的TMS320系列产品和美国AD公司的ADSP21XX系列产品^[22]。ADSP21XX系列产品在开发环境和编程效率上都要比TI公司TMS320系列的产品要好,但是其开发套件却非常昂贵。目前TI公司的DSP芯片在我国的市场占有主导地位,国内有多家公司致力于TI公司DSP产品的推广工作,并推出了国产化的TMS320系列DSP开发套件,为开发者提供良好的技术支持,可大大加快DSP产品的开发速度。

TMS320系列主流DSP中,定点DSP有TMS320C24系列、TMS320C54系列和TMS320C620系列等^[23,24],浮点DSP有TMS320C3X/4X/8X和TMS320C67XX系列,一般浮点DSP处理器动态范围大,运算精度高,但价格也较贵,通常用于性能要求非常高的实时信号处理中,本课题中需要进行的信号处理为一般的信号预处理,所以采用定点的DSP就能满足要求。而且TMS320系列定点DSP通过转换数据格式,也具有浮点运算的功能。

在TMS320系列DSP中,2000系列主要侧重于机电控制领域。6000系列属于高端的DSP,侧重于有较高的应用要求的领域,如图像处理,无线通讯等。5000系列则主要侧重于信号分析,且5000和6000系列的集成开发环境带有DSP/BIOS操作系统,可实现多任务开发。

经过上述分析,系统选择TI公司2000系列的DSP作为本系统的数字信号处理器。从功能、成本、供货量等方面分析,最终选择TMS320F2812作为本系统的数字信号处理器,其主频可以达到150MHz,属于32位处理器,具有12位的AD转换模块。

2.3.2 CPLD 芯片选择

现在CPLD的应用越来越广,有很多系统直接用CPLD来完成非常复杂的功能,如协议编码等。Altera公司提供了强大而易于使用的软件开发工具MAX PLUS II,使得该公司的产品不仅具有PLD的一般优点,而且还有更高性能、高集成度、价格合理、开发周期较短以及有利于在线编程的优势。其产品中的MAX7000系列是工业界中速度最快的高集成度可编程逻辑器件系列,它的集成度为600~5000可用门,有32~256个宏单元和36~155个用户I/O引脚。这些基于EEPROM的器件能够提供组合传输延迟快至5.0ns,16位计数器的频率为178MHz。此外,它们的输入寄存器的建立时间非常短,能提供多个系统时钟且有可编程的速度/功率控制。MAX7000E器件具有最高集成度,是MAX7000系列的增强型,MAX7000S器件也具有MAX7000E器件的增强特性,是通过上业标准4引脚JTAG接口实现在线可编程的^[25]。

经以上分析我们采用Altera公司具有MAX7000S系列CPLD芯片

EPM7064SLC44作为该系统的主控芯片。

2.3.3 单片机的选择

单片机的发展迅速，而且针对不同的应用领域种类很多，其中ATMEL公司生产AT89S51单片机占有很高的市场份额，价钱低廉，具有ISP在线编程功能。AT89S51内部自带4k的FLASH，还有看门狗定时器^[26]，完全可以满足我们目前用作显示面板控制芯片的使用要求，所以选用ATMEL公司的AT89S51芯片。

2.4 总体控制方案设计

本设计的全数字控制逆变焊机系统中，主电路采用全桥逆变形式，逆变频率为19KHz。控制电路部分由单片机（MCU）、可编程逻辑器件（CPLD）和数字信号处理器（DSP）。图2-1所示，为系统总体控制框图。

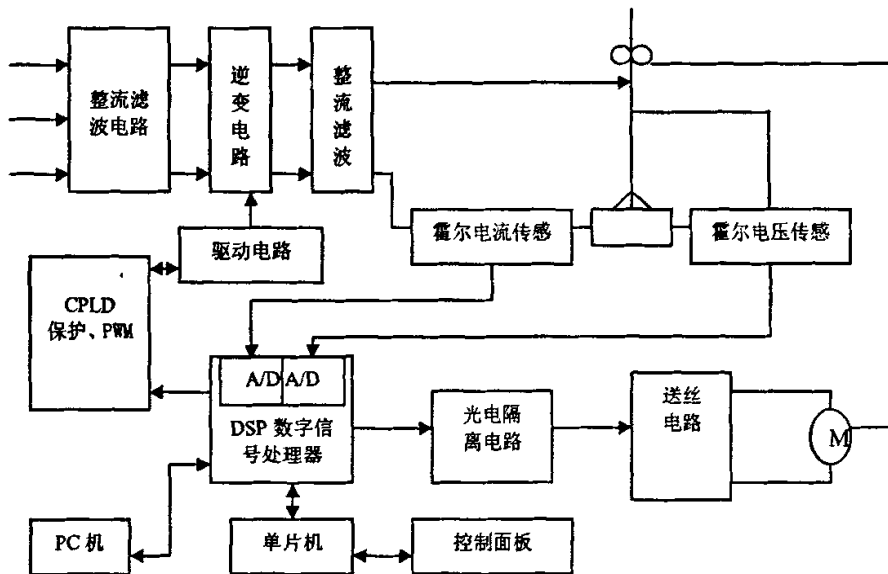


图 2-1 系统总体控制框图

Fig.2-1 The whole frame of the system

2.5 本章小结

本章阐述了脉冲MIG焊数字化控制系统的功能要求，通过分析论证确定了系统的“MCU+DSP+CPLD”总体方案，并且介绍了各部分功能模块的方案设计及芯片选型，最后提出了系统的硬件构架，并对信号流程进行了介绍。

第3章 硬件电路设计

根据图2-1可以看出本系统包括焊接电源主电路、主控制电路、PWM控制电路、驱动电路、送丝电路、显示电路等部分，下面就详细介绍各部分硬件电路的设计。

3.1 焊接电源主电路设计

焊接电源主回路采用全桥式逆变结构，绝缘栅双极晶体管IGBT为主要功率开关器件，其主电路如图3-1所示。

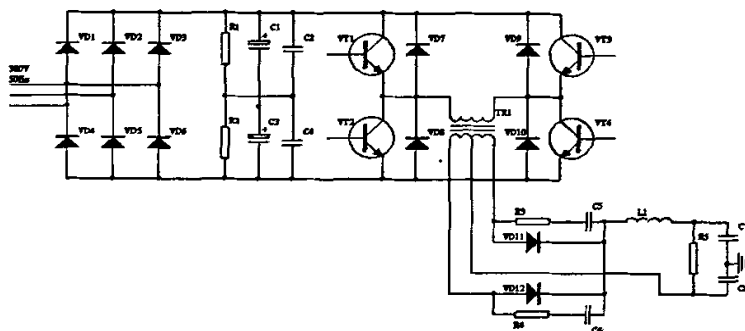


图 3-1 逆变主电路结构图

Fig.3-1 Main circuit schematic of inverter

由图3-1可见，焊接主电路一般采用AC-DC-AC-DC形式，三相工频交流380V电网电压经过整流电路和滤波电路，得到大约540V的直流电压。该直流电压施加到由功率开关管IGBT和大约20kHz中频变压器组成的逆变器上。四个功率开关管组成全桥电路的四臂，中频变压器连接在它们中间，对角上的两对功率开关管由栅极驱动电路以PWM脉冲方式激励而交替地通断，将直流电压变换成20kHz的中频交变电压，中频变压器同时将540V电压降为70V左右的电压，然后经输出整流器整流滤波，直流输出。

3.2 PWM 控制电路设计

本课题采用 CPLD 实现的 PWM 脉冲宽度调制电路，用于控制功率变换器的输出电路。针对基 DSP TMS320F2812 控制的数字化脉冲 MIG 焊接电源，在 CPLD 器件中选择 EPM7064SLC-10 作为核心控制芯片，采用 DSP+CPLD 方式，设计了数字化脉冲 MIG 焊接电源数字脉宽调节控制系统，脉宽调节以下简称

PWM。其主要实现的功能如下：

- 1) 算法编程实现对 DSPTMS320F2812 运算输入的数据信号进行实时、线性地转化为两路互差 180 度相位的 PWM 信号；
- 2) 输出两路 PWM 信号随着 DSP 输入信号高频变化同步；
- 3) PWM 信号的频率可大范围内调节设定，本系统设定为 20KHz，即主电路逆变频率；
- 4) PWM 信号进行软件数字算法滤波，消除毛刺干扰信号；
- 5) 当主电路开关管 IGBT 过流、过压和过热时，迅速关闭 PWM 信号，实现对开关管 IGBT 的可靠保护。

3.2.1 硬件电路设计

本课题采用 Altera 公司的 CPLD EPM7064 作为数字 PWM 产生和控制芯片，将 TMS320F2812 产生的 8 位数据输入信号线性地转换成两路 PWM 信号。DSP 的数据输出信号和主电路 IGBT 过流、过压和过热保护信号直接给 CPLD 输入端口，CPLD 输出两路互差 180 度相位的 PWM 信号，通过 IGBT 驱动电路来实现对主电路 4 个 IGBT 的控制和保护。图 3-2 为硬件电路图：

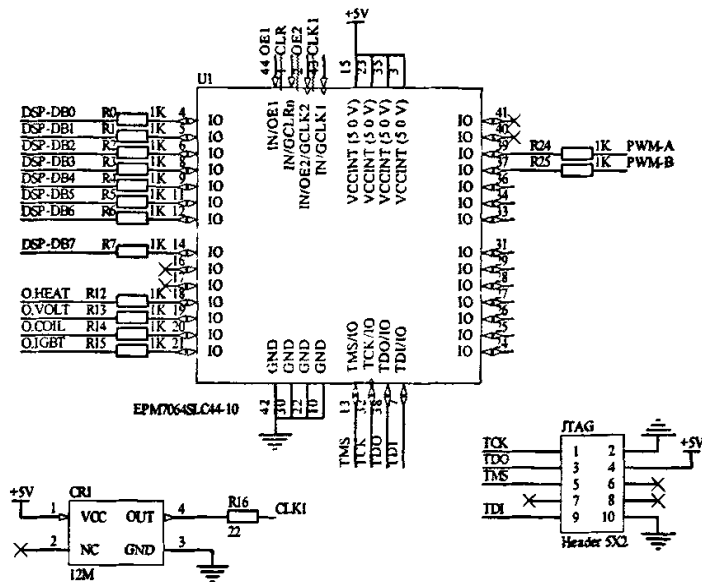


图 3-2 硬件电路图

Fig.3-2 Hardware diagram

3.2.2 可靠性设计

由于焊接环境比较恶劣以及电弧本身的干扰，需要在软件上提高系统的抗干

扰性和可靠性。为保证焊接电源主电路 IGBT 稳定可靠地工作,采取了 PWM 数字滤波和 PWM 保护手段。首先,由于电弧的干扰产生 CPLD 输入数据信号的意外波动,以及 CPLD 内部由于竞争产生的冒险问题,造成 PWM 信号在没有数字滤波之前带有很多毛刺。这样会带来 IGBT 不正常的关断造成系统不稳定,要保证 PWM 的高频不失真和实时性能采用模拟电路滤波是行不通的,采用数字滤波的方式进行处理比较合理。经过数字滤波的 PWM 信号具有高频不失真性和实时性能,去除了毛刺信号,很好地解决了 CPLD 冒险的问题,提高了 IGBT 工作的抗干扰性和可靠性。其次,在焊接电源的调试和焊接过程中,不可避免地在出现 IGBT 流过的电流过大,系统输入电压过大或过热。如果没有有效可靠的保护,会造成 IGBT 或焊接电源严重损坏。本软件设计,当过压和过热保护检测电路出现保护信号时,CPLD 迅速关闭 PWM 信号输出,解决保护问题之后,断电重启系统保护信号消失,PWM 信号正常输出;当 IGBT 过流保护信号出现时,经过 CPLD 软件滤波消除干扰信号,如果确定是过流保护信号,则迅速关闭 PWM 信号。当 IGBT 过流保护信号消失后,不需要重启系统 PWM 信号自动正常输出。这样既可以有效快速实现对焊接电源系统进行保护,也不会因外界干扰造成误保护动作,提高了系统的可靠性。复杂可编程逻辑器件 CPLD 是以 VHDL 语言设计硬件电路的方式实现 PWM 功能,不存在程序跑飞问题,与单片机或数字信号处理器相比具有不可比拟的抗电磁干扰能力。

3.3 DSP 控制系统硬件设计

本文以 TMS320F2812 数字信号处理器为核心的中心 DSP 控制电路,用于焊接电流恒定输出的 PI 数字算法控制和实现焊接过程中一脉一滴的弧长控制算法调节,以及焊接时序的控制。

3.3.1 系统硬件设计

DSP 控制电路由以下几部分组成: DSP 最小系统、A/D 采样电路和 I/O 接口电路。图 3-2 为 DSP 控制电路的结构框图。该电路以 TMS320F2812 为核心,通过 RS232 与单片机控制显示面板通讯,发送/接收焊接参数,如发送实际焊接电流和电压,接收脉冲 MIG 的脉冲电流峰值时间、平均电压、脉冲峰值电流、基值电流等参数。DSP 运算控制数据信号,通过 CPLD EPM7064 线性地转换成 2 路互差 180 度的 PWM 信号。当 DSP 判断焊枪开关闭合时,从其 I/O 口输出信号依次开通电磁气阀、PWM 控制输出、送丝电路,按工艺所要求的焊接时序来完成整个焊接过程。

下面简要介绍一下这几部分的功能:

1) TMS320F2812最小系统, 是DSP控制系统的核心部分, 通过程序的运行使它与外围芯片交换信息, 实现焊接控制功能。

2) A/D转换接口电路, 是焊接电流和电压信号通过电流和电压传感器线性地转换成0-3V的电压信号, 经过DSP内部12位AD模块变成数字信号。其电压采样电路, 焊接电压经传感器滤波模块转化成0-5V电压信号, 然后经过2阶低通滤波器去除高频信号和干扰信号, 3.3V稳压关把采样信号控制在3.3V以下, 保护DSP的A/D转化模块。如图3-3所示。

3) I/O接口电路, 实现DSP的输入输出控制, 并使DSP数字电路和其控制对象隔离开来, 增强DSP的抗干扰能力。

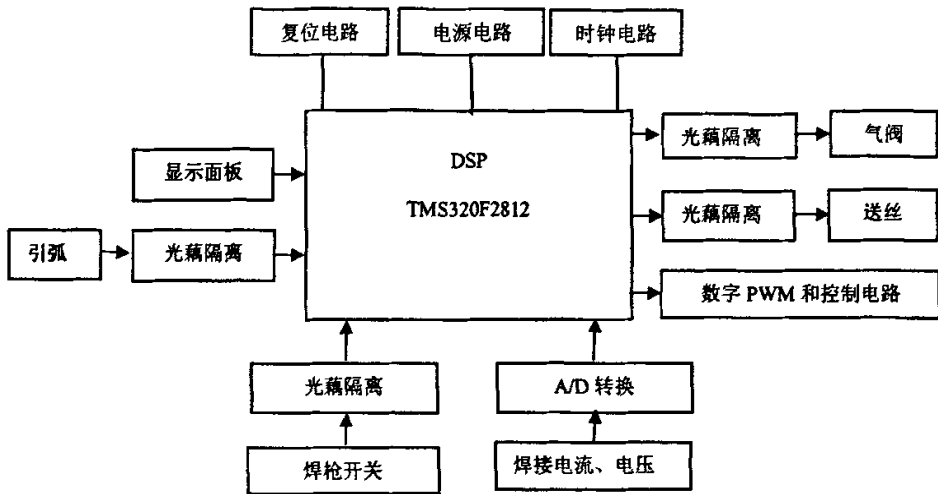


图 3-3 DSP 控制电路的结构框图

Fig.3-3 Structure diagram of DSP control circuit

3.3.2 DSP 最小系统

DSP 最小系统是逆变电源控制系统的核心组成部分, 它不仅要完成电源的整体管理, 同时也直接参与了电源的控制, 其性能的好坏直接影响逆变电源的整体性能。为了保证控制系统的可靠性和提高开发效率, 我们直接选用了瑞泰公司提供的 TMS320F2812 Demo 板, 在此基础上进行全数字控制系统的开发。Demo 板是 TMS320F2812 DSP 的最小系统板, 主要包括晶振、电源管理及引脚外接接口等基本部分, 要完成电源的控制, 还需要进行外围器件的扩展。DSP 板, 一方面需要把焊机输出的电流、电压波形信号的模拟量转化为数字量; 另一方面, 数字 PWM 控制部分需要 DSP 输出的数据控制信号, 调节和控制 PWM 信号, 同时, DSP 输出 PWM 信号控制送丝机。对于前者采用 TMS320F2812 DSP 内部集成的

12 位 A/D 转换器来实现模拟量到数字量的转换^[27]，而对于后者则是通过 DSP 的 GPIO 口输出数据控制信号，和 PWM 信号控制送丝机。此外，还要利用 DSP 的 I/O 口接收焊枪开关、电弧引燃信号以及实现对 CPLD 数字 PWM 使能、气阀、送丝的控制。DSP 具体硬件资源配置见图 3-4 所示。

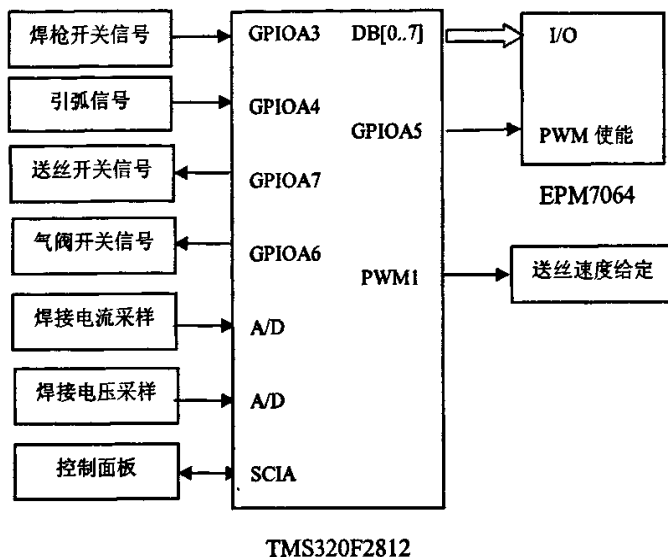


图 3-4 DSP 资源配置图

Fig.3-4 Distribution diagram of DSP's resources

3.3.3 采样及滤波电路设计

电源控制部分采用基于电流、电压环的双闭环控制系统，所以需要获取电流和电压两个信号，根据采样精度和采样时间要求，分别采用霍尔电流和霍尔电压传感器进行采样。霍尔传感器是根据霍尔效应发展起来的一种多品种、多规格的磁传感器产品，具有精度高、线性好、频带宽、响应快、过载能力强和不损失测量电路能量等优点广泛应用于电力、电子、交流变频调速、逆变装置、电子测量和开关电源等诸多领域以及逆变焊机，发电及输变电设备，电气传动，数控机床等工业产品上。

霍尔电流传感器的使用比较简单方便，只需要外接正负直流电源，被测电流母线从传感器中穿过，副边端子再做简单连接，即可完成主电路与控制电路的隔离检测，该器件输出信号为电流形式，若需要取电压输出方式，只需在 M 端与电源地之间根据所取电压大小外接取样电阻（手册中有推荐数值，一般为几十到几百欧姆），阻值上限由下式决定：

$$R_{\max} = \frac{V_c - V_{CE} - R_i I_s}{I_s} \quad (3-1)$$

式中 V_C ——电源电压
 V_{CE} ——晶体管饱和压降
 I_S ——输出电流
 R_i ——传感器电阻

磁补偿式电流传感器有三个接线端子：正端：正电源输入端；负端：负电源输入端；M端：信号输出端。使用示意图如图 3-5 所示。

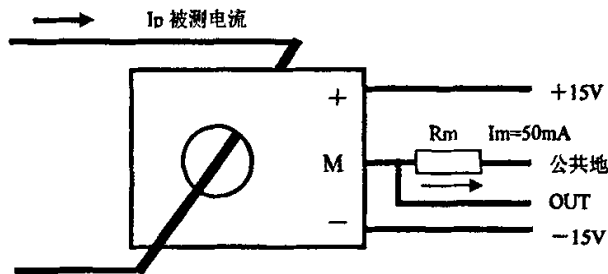


图 3-5 磁补偿式电流传感器示意图
 Fig.3-5 Schematic of magnetic compensated current sensor

在本电源系统中，电源额定输出电流为 500A，脉冲峰值电流最大为 450A，而 TMS320F0812 DSP 内置的 12 位 A/D 转换最高输入电压为 3V，因此设计中选取 CH-500 的电流传感器和 200:1 的采样比例，即 1V 的采样电压代表 200A 的电流，根据式 3-1 计算可知，需要采用 25Ω 的采样电阻。

电压传感器有五只接线端子。其中两只为原边端子：被测电压输入端+、被测电压输入端-。另外三只为副边端子：+端：电源+15V；负端：电源-15V；M端：信号输出端。其连接方法如图 3-6 所示。

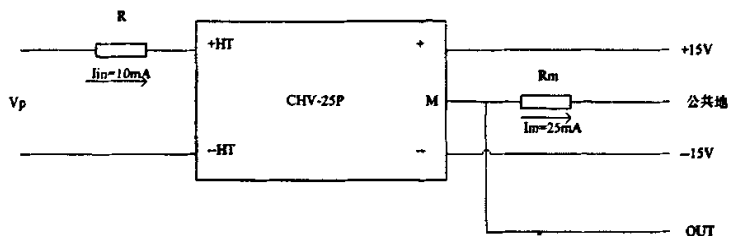


图 3-6 电压传感器示意图
 Fig.3-6 Schematic of voltage sensor

根据所测电压的大小，须将被测电压串接一只电阻 R 后再接到传感器原边端子，串接电阻 R 由下式决定：

$$R = \frac{V_p}{I_{in}} - R_{in} \quad (3-2)$$

式中 R ——串联电阻;
 V_p ——被测电压;
 I_{in} ——额定输入电流 (一般额定电压下取 10mA);
 R_{in} ——传感器原边内阻

电压传感器的输出部分的设计与霍尔电流传感器相同,在此,取额定输入电压等于空载电压 72V,根据上式计算可知, $R=7.2k\Omega$,采样比例取 30:1,即 1V 的采样电压对应实际电压为 30V,由此可知,采样电阻 $R_m=100\Omega$ 。

焊机的使用环境复杂多变且其本身就是一个很强的干扰源,因此需要对采样信号进行低通滤波处理后再进行 A/D 转换,本系统采用二阶压控电压源低通滤波器,该滤波器具有元件少、增益稳定和频带宽等特点且负载大小不影响滤波特性。其电路原理图如图 3-7 所示^[28, 29],其中,电阻 R2 和电容 C1 构成反馈网络,但是实际用电路中,常把运算放大器接成电压跟随器形式,这样其在通带内其增益为 1,这样既引入了负反馈,又引入了正反馈。当信号频率趋于零时,由于 C1 电抗趋于无穷大,因而正反馈很弱;当信号频率趋于无穷大时,由于 C2 的电抗趋于零,因而 $U_p(s)$ 趋于零。只要正反馈引入得当,就既可能在 $f=f_0$ 时电压放大倍数数值增大,又不会因正反馈过强而产生自激振荡。采样滤波后的电压和电流信号进入 DSP 内部 A/D 转换模块的输入端,由 A/D 转换模块把模拟电压、电流信号转换成数字量进而参与电源的控制。本文设计的低通滤波器截止频率为 5kHz。

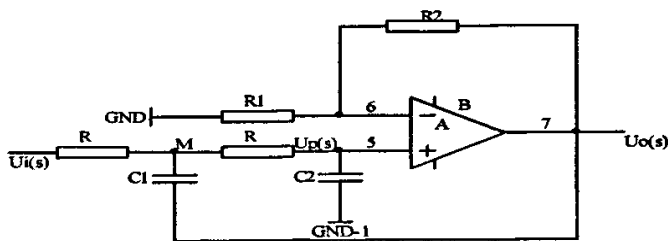


图 3-7 低通滤波电路原理图
 Fig.3-7 Schematic of low-pass filter

3.4 驱动电路

驱动电路的作用主要是对驱动信号进行功率放大,并保证一定的脉冲前沿、后沿陡度,使 IGBT 饱和导通。同时,驱动电路通过光耦 TP521 与主控电路电气隔离输出 IGBT 过流信号,主电路 PWM 信号经隔离后给 IGBT 驱动芯片。

由于采用全桥逆变主电路,一共四个 IGBT 开关管共需要四套驱动电路。主电路图 3-8 所示,对角 IGBT 为一组,共两组,这两组驱动信号互差 180 度相位。

图3-8所示为设计的一路EXB841驱动电路，该驱动电路以富士公司的IGBT的专用厚膜集成电路EXB841为核心，驱动信号经EXB841内部通过光耦隔离，推挽放大输出。在有脉冲时，EXB841输出+15V信号，使IGBT饱和导通。无脉冲时，由EXB841内部5V稳压管的箝位作用，输出-5V信号，使IGBT可靠关断。图3-9所示为最大占空比情况下的一组PWM驱动波形。

电阻3R3是栅极驱动电阻，电容3C6起对驱动信号进行微分的作用，增强驱动脉冲前沿陡度。电容3C7和3C3、3C5和3C4分别起到驱动电压源和-5V反抽电源的低频和高频率波作用。22V交流输入信号由整流桥3BR1、电容3C3、电容3C1和三端集成稳压芯片AN7820，分别进行整流、滤波和稳压输出，为EXB841提供直流20V电源。EXB841内部的过流保护电路通过稳压管3ZD3、快速恢复二极管3D1对开通时的IGBT集电极电压进行采样，当超过保护电路阈值是，EXB841的5脚电平变低，光耦3U3开通，与非门3U5A输出高电平信号，送入控制板的过流保护电路。3ZD3起到降低过流保护阈值的作用，提高过流检测的灵敏度。

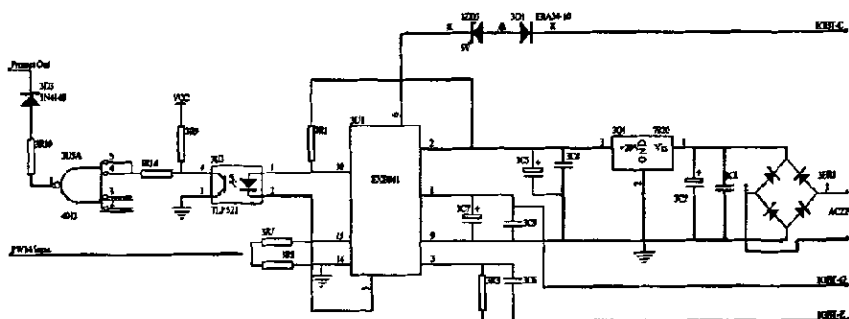


图3-8 单路EXB841驱动电路

Fig.3-8 Schematic circuit diagram of single EXB841

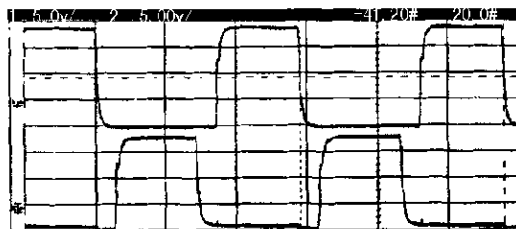


图3-9 最大占空比情况下的EXB841驱动波形

Fig.3-9 IGBT driver waveshape with full duty

3.5 显示面板电路设计

针对基 DSP TMS320F2812 控制的数字化脉冲 MIG 焊接电源，选择 ATMEL AT89S8252 单片机和 SD7218A 智能键盘显示控制芯片，采用 DSP+MCU 通讯的方式，设计了数字化脉冲 MIG 焊接电源人机交互系统。其主要实现的功能如

下:

- 1) 用数码编码器实现焊接基值电流、峰值电流、EN 比率、基值电流时间、峰值电流时间、送丝速度等参数的设定。
- 2) 采用按键、数码管、发光二极管配合来指示和选择要设定的参数。
- 3) 实现焊接电流、电压参数的实时显示。
- 4) 所有设定参数可以即时保存, 实现开机后的最近保存参数调用及掉电保护。同时具有在线调整焊接参数的功能。
- 5) 典型焊接规范参数的保存及调用。

3.5.1 显示面板电路设计

控制面板主控芯片采用 AT89S8252 单片机, 具有 8K 字节在系统可编程的 Flash 存储器, 2K 字节 EEPROM。可方便的实现焊接参数的存储和调用功能。键盘/显示智能控制芯片采用 SD7218A, SD7218A 是一片具有两线式串行接口的、可同时驱动 8 位共阴式数码管(或 64 只独立 LED)、100Bytes 静态 RAM 的智能显示驱动芯片, 采用模拟 I2C 的方式和单片机进行通讯。

AT89S8252 单片机内核基于 80C51 单片机, 指令系统及硬件结构与 51 系列兼容, 且功能有较大增强, 内部集成有 8KB 非易失性 FLASH 程序存储器、256KB 的静态 RAM、2KB 的 EEPROM、3 个 16 位的定时器/计数器、9 个中断源以及可编程的看门狗定时器^[20]。且其 FLASH 程序存储器具有 ISP (在线系统编程) 功能, 这样不需要将单片机从系统中移出, 用一条专用的下载电缆就可以实现焊接软件的更新, 极大方便了软件的调试与升级。图 3-10 是单片机主要硬件资源的配置图。

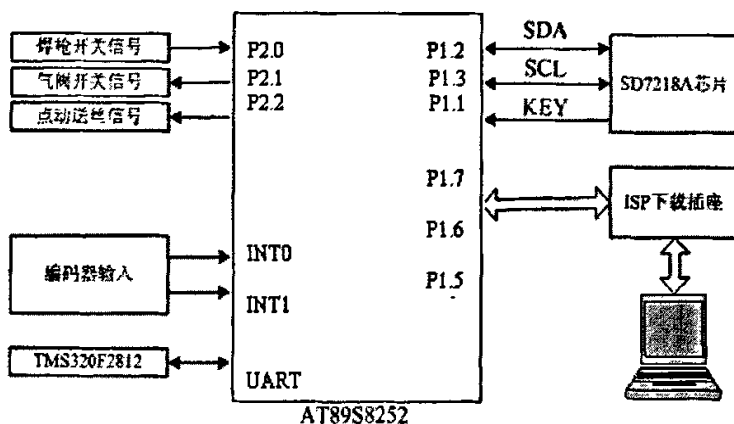


图 3-10 单片机硬件资源配置图

Fig.3-10 Hardware resource distribution diagram of MCU

单片机 AT89S8252 控制的键盘显示电路, 采用 SD7218A 和 74LS244 双芯片驱

动8个8位数码管，该电路实验证明，数码管显示亮度完全达到了实际的需要，通过串口和DSP通信实现了焊接参数传递。具体电路见附录3单片机控制键盘显示电路图。

3.5.2 数字脉冲编码器设计

数字编码器^[30]可以很方便的实现参数的设置，我们选用 3315 系列编码器，当编码器旋转时输出 90° 固定相移和可变频率的两个脉冲序列，如图 3-11 所示。逆时针旋转时 A 通道超前 B 通道 90° ，顺时针旋转时 B 通道超前 A 通道 90° 。

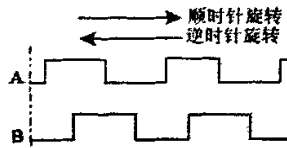


图 3-11 编码器输出波形

Fig.3-11 Output waveshape of decoder

在本文的设计中，对数字编码器的输出做了鉴相处理，当顺时针旋转时，B 通道输出脉冲信号，A 通道输出低电平；当逆时针旋转时，A 通道输出脉冲信号，B 通道输出低电平。将处理后的两路信号分别连接到 AT89S8252 单片机的外部中断口 INT0 和 INT1 的输入引脚。数字脉冲编码器电路，见图 3-12 所示。

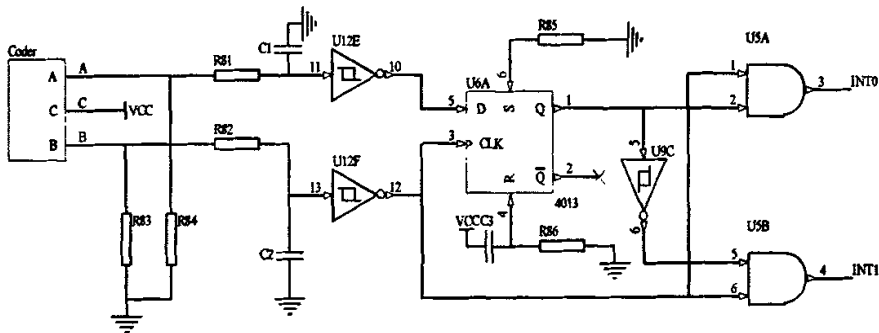


图 3-12 编码器电路图

Fig.3-12 Coder circuit diagram

3.5.3 数码管驱动电路设计

由于键盘显示芯片 SD7218A 的最大驱动电流为 100mA，本显示电路一共 8 个 2 英寸数码管，用 SD7218A 驱动实验结果可以看到数码管亮度不够，表明 SD7218A 的驱动能力不够。为了解决这个问题，采用集成电路双驱动方式，采用 2 片

74LS245驱动8个2英寸数码管,详细的电路图请见附录2。实验证明这种方式电流驱动能力强,电路简单可靠,数码管的亮度满足实际需求。

3.6 双机串口通讯电路设计

所设计的逆变电源控制系统从功能上主要分为两大模块,即人机接口交互系统模块和电源控制系统模块,二模块之间通过数据通讯的方式来传递数据流。并行通讯是最快的通讯方式,但其抗干扰能力差,且不容易进行远距离通讯。串行通信因为有着传输距离远、接口设计简单、价格低廉等优点,在工业上获得了广泛地应用,所以本系统选择串行通讯作为二模块之间的通讯方式。

RS-323C 标准是美国 EIA(电子工业联合会)与 BELL 等公司一起开发的 1969 年公布的串口通信协议,适合于数据传输速率在 0~20000b/s 范围内的通信。它描述了在终端和通信设备之间信息交换的方式和功能,是目前使用较广泛的串行通信标准^[31~33]。对于本系统来讲,焊接前单片机把设定的参数及模式选择发送给 DSP,在焊接过程中则要接收 DSP 传送过来的焊接电流和焊接电压数据并实时显示出来。二者之间传输的数据量不大,对传输速度要求不高且相距较近,因此本系统采用 RS-232 协议进行数据传送完全能满足要求。

设计采用 MAX232 芯片作为串口通讯接口芯片。该芯片是 MAXIM 公司生产的低功耗、单电源双 RS232 发送/接收器,适用于各种 EIA-232E 和 V.28/V.24 的通信接口。芯片内部有一个电源电压变换器,可以把输入的+5V 源变换成 RS-232C 输出电平所需±10V 电压,所以采用此芯片接口的串行通信系统只要单一的+5V 电源就可以工作。

采用 MAX232 接口的硬件接口电路如图 3-13 所示,由于 TMS320F2812 采用+3.3V 供电,所以在 MAX232 与 TMS320F2812 之间加了 TI 公司提供的典型电平匹配电路,整个接口电路简单、可靠性高^[27, 34]。

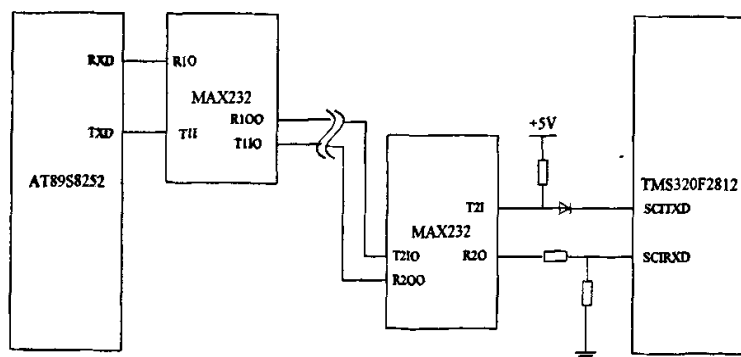


图 3-13 串口通讯接口电路

Fig.3-13 Interface circuit of serial communication

3.7 本章小结

本章结合第二章提出的系统总体结构框图,分模块介绍了系统主要硬件部分的电路设计。

本章介绍了脉冲MIG焊接电源的主电路、DSP主控制系统、PWM硬件电路、驱动电路、键盘显示电路和串口通讯电路等主要部分的硬件电路设计,介绍了各部分电路系统的具体构成及实现,给出部分电路图。

第4章 数字PWM控制系统软件设计

PWM控制信号是用来控制主电路开关管IGBT的导通时间,从而对焊接电流和焊接电压起到控制和调节作用。PWM信号的产生和控制是整个焊接电源控制系统的核心技术,其性能直接影响到焊接电源主电路的稳定性和可靠性。本课题成功研出了基于CPLD的数字PWM控制技术,从而代替模拟PWM控制技术。由于模拟电路实现PWM控制的电路复杂、精度低、可靠性差、成本高,为此本课题对PWM控制技术改进,实现数字PWM控制,该技术电路简单,控制精度高,可靠性好,成本低廉,很好地解决了模拟PWM控制存在的问题,同时又实现了数字PWM控制的优势。

CPLD EPM7064是数字PWM控制的核心控制芯片,主要实现两路互差180度相位的数字PWM信号,实现过流、过压保护和过热保护关闭PWM信号,同时实现对CPLD的输入信号进行数字滤波。开发环境为Altera公司的MAX +plus II v10.0软件,该软件提供了可编程片上系统(SOPC)设计的一个综合开发环境,包括系统级设计、软件开发、可编程逻辑器件(PLD)设计、综合、布局布线和验证仿真等功能。

4.1 软件总体设计

本课题采用Altera公司的CPLD EPM7064作为数字PWM产生和控制芯片,采用VHDL语言作为软件编程语言,开发环境为Altera公司的MAX +plus II软件。MAX +plus II提供了强大的验证仿真功能,仿真的效果与实际的效果具有完全一致性,这样为CPLD的程序设计提供了强大的验证手段。

VHDL是一种硬件描述语言,诞生于1982年。硬件描述语言使数字电路设计工作接近于软件算法的实现(Implementation)。在1987年底,VHDL被IEEE和美国国防部确认为标准硬件描述语言。VHDL具有出色的组合逻辑综合,在设计复杂大规模逻辑电路时性能优越,为此本课题选择VHDL语言作为编程语言。

软件系统主要包括数字PWM程序、时钟分频程序、数字滤波程序和PWM保护程序。下面简要介绍一下各部分的功能:

①数字PWM程序,实现输入数据信号线性地转换成两路占空比实时调节的PWM信号。PWM信号的频率可以通过改变输入时钟信号的频率进行调节;

②时钟分频程序,将高频输入时钟信号转变成低频率时钟信号,为数字PWM保护程序提供时钟信号;

③数字滤波程序,一方面,可以消除输入数据信号中的高频扰动信号;另一方面,可以消除PWM输出信号中因电路竞争而产生的毛刺信号;

④PWM 保护程序, 但过热、过压、线圈原边过流保护信号出现实时, PWM 信号立即关闭, 保护信号消失后 PWM 信号恢复输出; 当 IGBT 过流信号出现并大于 $3\mu\text{s}$ 时, PWM 信号立即停止输出, 直到过流信号消除后下次上电时才能恢复。如图 4-1 所示, 为数字 PWM 软件设计系统结构框图。

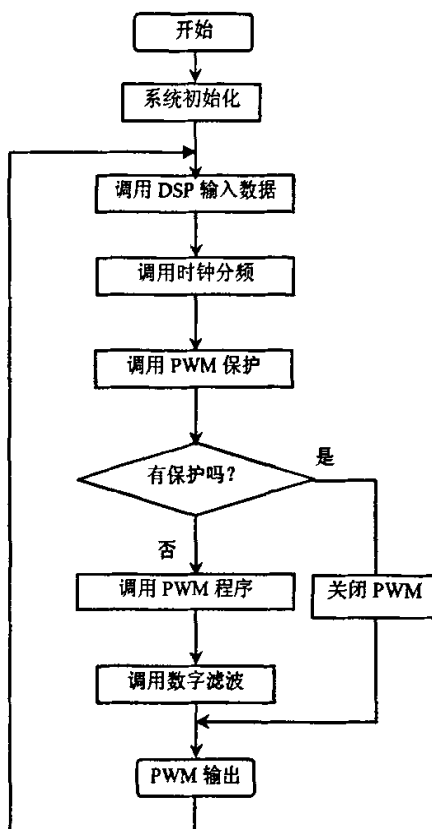


图4-1 系统结构框图

Fig. 4-1 System frame diagram

4.2 数字滤波电路设计

数字电路在设计的过程中, 经常因竞争冒险而产生毛刺。在本课题中, 毛刺将直接导致两组 IGBT 直通短路, 进而造成严重的后果。本课题, 通过设计同步整形数字滤波方式消除了因竞争而产生的毛刺信号, 有效地避免了冒险的发生。为此, 必须消除因数字电路竞争而产生的毛刺信号。

4.2.1 毛刺的产生机理分析

在组合逻辑中, 由于门的输入信号通路中经过了不同的延时, 导致到达该门

的时间不一致，达到电路中某一会合点的时间有先后之分，这叫竞争^[35]。竞争是不可避免的。因为竞争，数字电路的设计中产生了毛刺。由于竞争使电路输出发生瞬时错误，这就产生了冒险。图4-2，是由于竞争产生的毛刺波形仿真图。

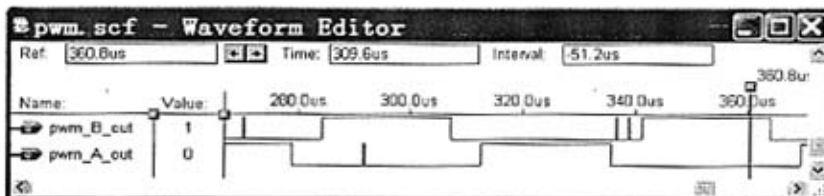


图4-2 带毛刺的PWM仿真波形
Fig.4-2 PWM simulating waveshape with burr

4.2.2 数字滤波程序设计

PWM信号中的毛刺如果没有消除，就会造成很严重的后果。本课题采用同步整形电路有效地去除了毛刺。图4-3所示，是同步整形滤波程序流程图。

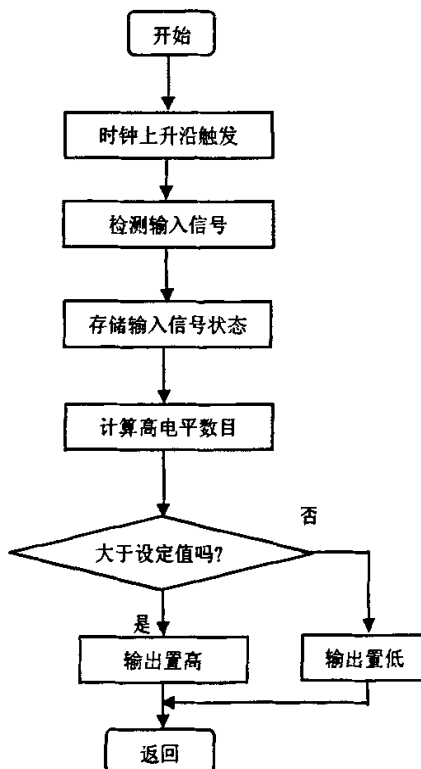


图4-3 同步整形滤波程序流程图
Fig.4-3 Flow diagram of synchronous filter program

PWM信号经过软件同步整形滤波后，消除了毛刺，同时增强PWM信号的抗干扰能力。下面图4-4，是经过同步整形滤波后的仿真波形。

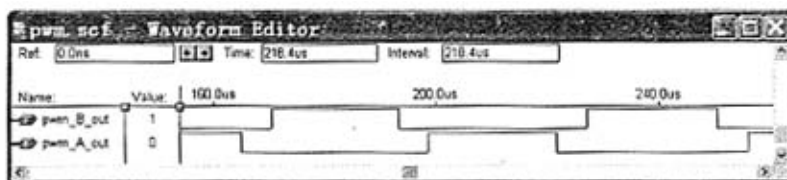


图4-4 同步整形滤波后PWM仿真波形

Fig. 4-4 PWM simulating wavsshape after synchronous filter program

4.3 数字时钟分频程序设计

EPM7064 控制电路的系统输入时钟 12MHz，数字保护电路程序中需要的时钟频率是比较小，需要对系统时钟进行分频设计。分频电路程序流程图见图 4-5。

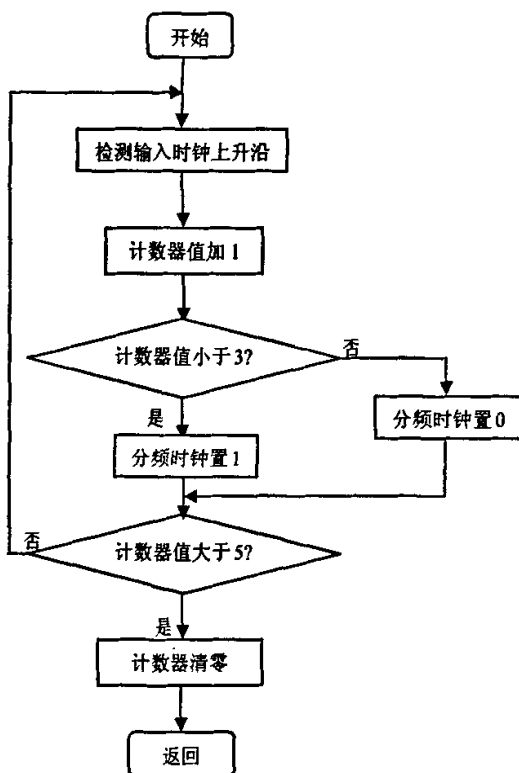


图4-5 分频电路程序流程图

Fig. 4-5 Flow diagram of dividen circuit

图4-6，是系统时钟分频程序设计仿真波形。clk2是PWM系统输入时钟

12MHz, out_clk是12MHz的5分频输出时钟。由图4-6可见,本程序设计正确。

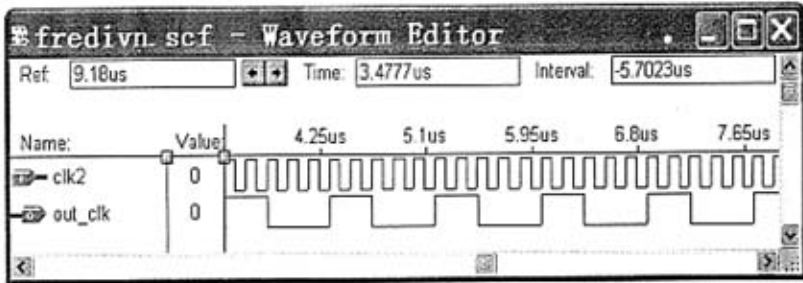


图4-6 系统时钟分频程序仿真波形

Fig.4-6 Simulating waveshape of system clock dividing program

4.4 数字保护电路程序设计

在脉冲MIG焊接电源中,保护电路可分为过压保护、过热保护、变压器原边过流保护和IGBT过流保护。当系统供电电压过高或过低、IGBT温度高、变压器原边电流过大,或者IGBT电流过大时,给出报警信号并关闭IGBT的PWM驱动信号。

保护信号的处理技术要求:当过/欠压保护、过热保护和变压器原边过流保护信号出现时立即关闭PWM信号输出,保护信号消失后PWM信号自动恢复;当过流信号出现并判断过流信号的持续时间,超过3us则立即关闭PWM信号,否则忽略,只有在消除过流信号并系统重新上电复位时PWM信号才能恢复输出。

下面图4-7和图4-8,分别是过/欠压保护和IGBT过流保护出现时,PWM保护电路程序仿真波形。如图4-7所示,当过/欠压保护信号出现时PWM立即关闭,当保护消除时,PWM立即恢复。

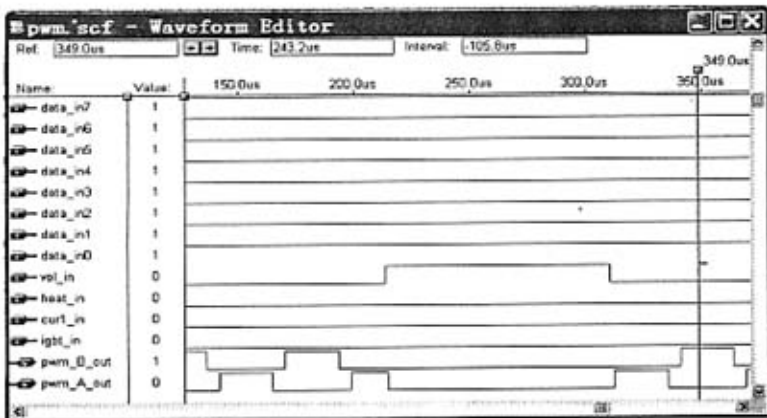


图4-7 过压保护仿真波形

Fig.4-7 Simulating waveshape of over-voltage

如图4-8所示，当IGBT过流保护信号出现时PWM立即关闭，当保护消失时，PWM也不可恢复。只有关机解决IGBT过流保护出现的问题后，重新开机后PWM才能正常输出。

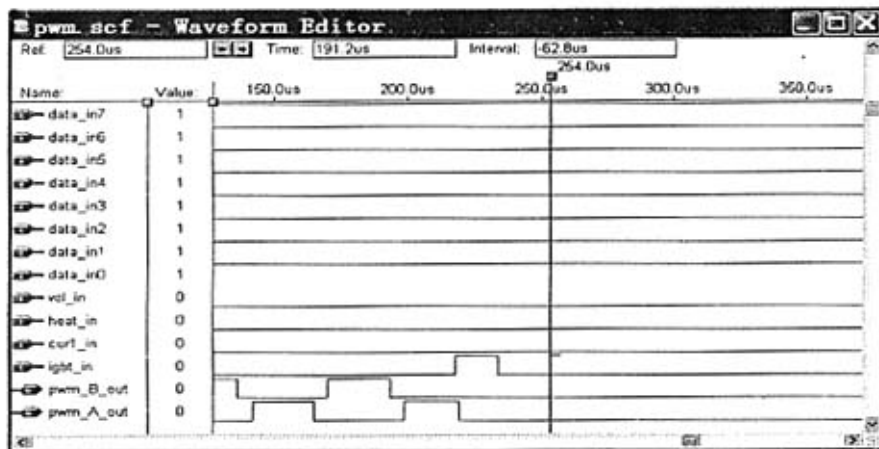


图4-8 IGBT过流保护程序仿真波形

Fig.4-8 Simulating waveshape of IGBT over-current program

4.5 数字 PWM 电路程序设计

数字PWM算法的基本原理，是输入数据信号和通过算法产生的数字三角波比较得到两路PWM信号。数字PWM程序设计最大的难点，设置死区和在输入信号高频振荡的时候两路数字PWM实现输出同步。下面图4-9，是输入数据信号高频振荡时的PWM输出波形。该波形表明：两路PWM信号在任意时刻同步，PWM信号的死区为5us，PWM信号的工作频率为19KHz。

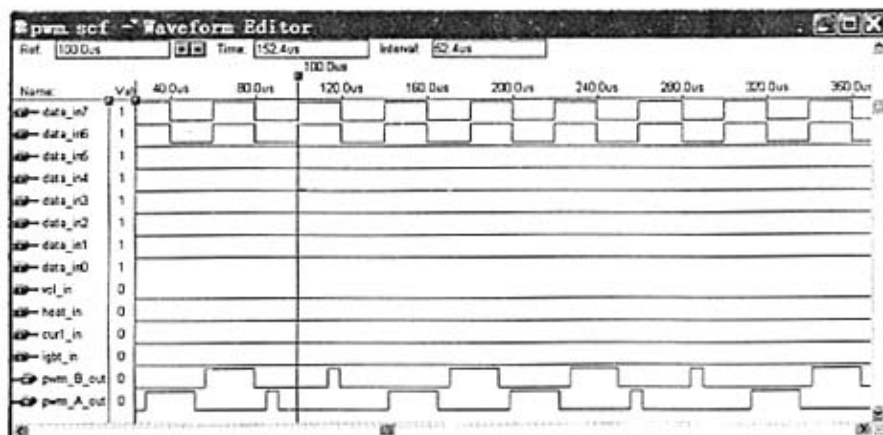


图4-9 数字PWM程序仿真波形

Fig.4-9 Simulating waveshape of PWM program

4.6 数字PWM实测波形分析

图4-10, 是在DSP输入数据信号最大时, CPLD输出的两路PWM实测波形。实测PWM信号的频率是19KHz, 最大占空比41%, PWM的实际死区时间是5 μ s。与MAX + plus II软件设计仿真的结果完全一致, 达到设计要求。

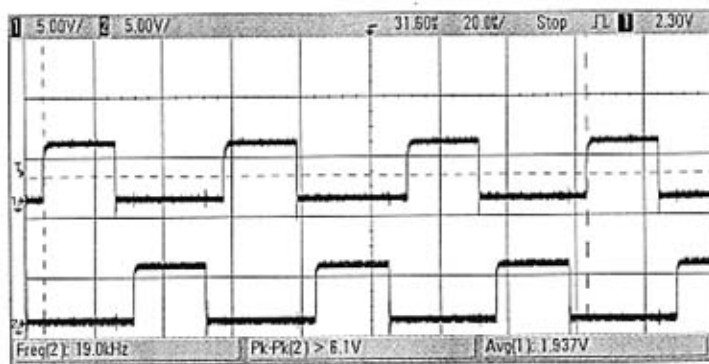


图4-10 实测CPLD输出PWM波形

Fig.4-10 Practical PWM waveshape of CPLD

图4-11, 是CPLD输出PWM信号在最大脉宽的情况下, 给EXB841输出的最大占空比41%的实测驱动波形。由以往的经验可知, 该波形完全满足实际应用要求。由此可以验证, 数字PWM程序和电路设计的正确性和合理性。

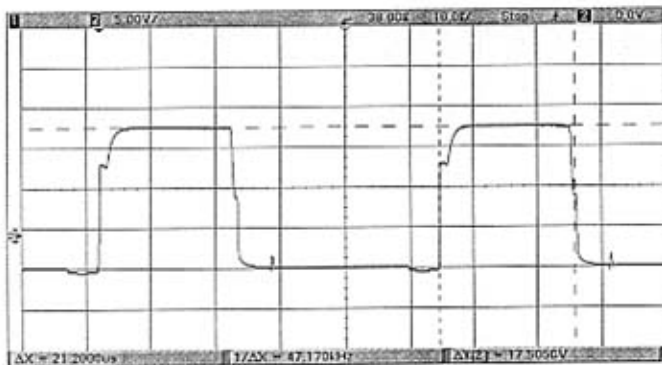


图4-11 EXB841驱动波形

Fig.4-11 Driver waveform of EXB841

4.7 本章小结

本章阐述了基于CPLD EPM7064的数字PWM控制系统软件设计。本文分别讲述了数字PWM程序、时钟分频程序、数字滤波程序和PWM保护程序的软件设

计, 然后通过MAX + plus II软件编译, 给出数字电路仿真波形分析, 验证软件设计思路的正确性。最后, 通过硬件实验, 验证了数字PWM设计的正确性和合理性, 满足实际应用要求。

第5章 DSP 控制系统软件设计

焊机所要实现的功能有参数调节与显示、电源的时序控制、整体管理及输出波形控制等。要实现这样功能,就要求控制系统软件结构合理、可靠性高、功能强、可维护性好。本文所设计的控制软件按功能来分主要有三部分,第一部分是基于EPM7064 CPLD的数字PWM控制软件,第二部分是基于TMS320F2812 DSP的电源控制软件,第三部分就是基于AT89S8252单片机的人机接口交互系统控制软件。第一部分是采用VHDL语言编写,本文在第四章已经详细论述。第二部分是采用C语言编写,是本章论述的重点。第三部分是由实验室同学协作完成,不做论述。DSP在本系统中实现的功能是数字PI算法调解、脉冲MIG压频转换算法调解和总体控制功能,本文主要介绍DSP的数字PI算法和压频转换算法,实现恒流调节和一个脉冲一个熔滴控制。

5.1 DSP 控制系统主程序设计

DSP 控制系统的设计,一个重要的步骤就是软件的开发调试。软件的开发需要一套完整的软、硬件开发工具,本文所用开发工具为 TI 公司提供的 DSP 集成开发环境 CCS V2.21 软件和合众达公司生产的 XDSusb2.0 仿真器,CCS2.21 软件是 TI 公司 DSP 集成开发环境的较新版本,完全支持 TMS320F2812DSP 的软件开发^[36],XDSusb2.0 仿真器采用 USB 接口,不用外接电源且支持热插拔。另外,要实现对 TMS320F2812 DSP 内部的 FLASH 进行烧写,还需要安装专门的烧写插件,该软件的下载、安装及具体使用方法参见文献[37, 38]。

5.1.1 开发工具和软件

DSP控制系统的设计,一个重要的步骤就是软件的开发调试。软件的开发需要一套完整的软、硬件开发工具,本文所用开发工具为TI公司提供的DSP集成开发环境CCS V2.21软件和合众达公司生产的XDSusb2.0仿真器,CCS2.21软件是TI公司DSP集成开发环境的较新版本,完全支持TMS320F2812DSP的软件开发,XDSusb2.0仿真器采用USB接口,不用外接电源且支持热插拔。另外;要实现对TMS320F2812 DSP内部的FLASH进行烧写,还需要安装专门的烧写插件,该软件的下载、安装及具体使用方法参见文献[39]。

开发软件采用 CCS V2.21。CCS (Code Composer Studio Version 2.21) 是美国德州仪器公司推出的针对 TMS320 系列 DSP 控制系统的集成开发环境^[40, 41],它包括源代码编辑工具、可执行代码生成工具和实时分析工具。CCS 所包含功

能有：(1) 集成可视化代码编辑界面，可直接编写 C、汇编、.H 文件、.cmd 文件；(2) 集成代码生成工具，包括汇编器、优化 C 编译器、连接器等；(3) 基本调试工具，如装入执行代码(.out 文件)，查看寄存器窗口，存储器窗口，反汇编窗口，变量窗口等，支持 C 源代码级调试等等^[42, 43]。

TI 公司为 TMS320F28xx 系列 DSP 提供了优化的 C/C++ 编译器以方便用户使用高级语言进行开发，效率可以达到手工汇编的 90% 甚至更高^[44~47]，因此，本文采用 C 语言编写 DSP 控制程序。

5.1.2 主程序流程图设计

控制软件整体结构采用传统的前/后台模式，即主程序为一超循环结构，对实时性要求高的部分放在中断服务子程序中执行。主程序通过中断服务子程序和调用功能模块子程序，实现对电源的整体管理、PI 算法控制、A/D 转换和脉冲 MIG 弧压闭环控制。

DSP 主程序流程图，如图 5-1 所示。系统上电后首先执行初始化子程序，设置相应寄存器和 I/O 口状态并开启中断使能标志位，然后接收单片机发送过来的数据，接着判断焊接开关状态，如有焊接开始信号则进入焊接子程序，否则处于参数设置状态，接收改变后的参数。

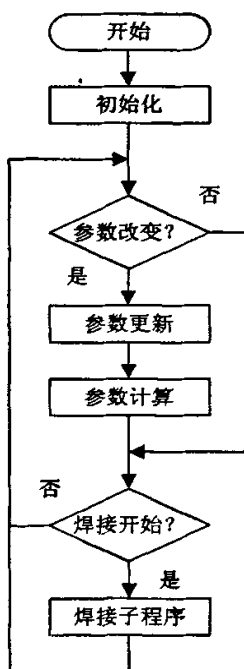


图 5-1 DSP 主程序流程图

Fig5-1 Main flowchart of DSP

5.1.3 主程序软件设计

控制软件是脉冲 MIG 焊波形控制系统的核心，在前面介绍的硬件系统的基础上，它要完成以下几方面的任务^[48~51]：

- 1) 焊接之前接收单片机发送过来的参数设定值，在焊接过程中把焊接电流值和电压值发送给人机接口交互系统；
- 2) 严格控制焊接过程的时序，使之按照预定要求进行；
- 3) 完成焊接过程中电源电流和电压的采样，并直接参与电源的控制；
- 4) PI 算法实现恒流调节，压频转换算法实现脉冲 MIG 焊一脉一滴的控制要求；
- 5) 引弧、正常焊接、收弧等功能程序；
- 6) 送出送丝机的速度给定值。

DSP 主程序框图 5-2 所示。

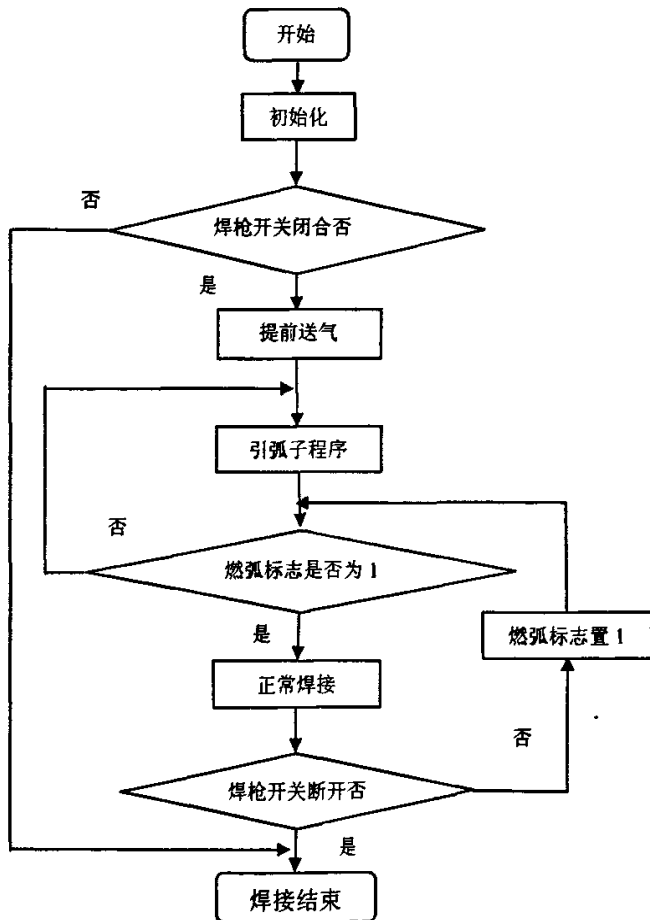


图 5-2 DSP 焊接子程序流程图

Fig.5-2 Welding subprogram flow diagram of DSP

焊接过程控制分为两种方式，即二拍模式和四拍模式。本文采用二拍模式，首先判断焊枪开关闭合后，送气、延时一段时间后进入引弧子程序。引弧成功后，延时一定时间就进入正常焊接程序。焊枪第一次松开，对于二拍模式就表示焊接过程结束，进入收弧子程序，然后退出焊接过程^[52]。

5.2 条件控制 PI 算法程序设计

5.2.1 条件控制 PI 算法

本设计通过在 DSP 上实现条件控制 PI 算法，来实现焊接电流的闭环调节和控制。条件控制 PI 算法是根据经典 PID 控制技术的基础上，去掉微分环节，加上条件控制得到的。根据焊接条件，进入相应的 PI 算法程序，在引弧成功之前进入限制脉宽 PI 算法，引弧成功后进入燃弧 PI 算法程序。

在脉冲 MIG 焊中，脉冲电流的峰值和基值在数值上差别比较大，如果同时用一个 PI 控制参数进行调节的时候，往往会顾此失彼，所以引入变 PI 参数算法控制，当焊机处于不同的焊接状态时，设计不同的基值电流、峰值电流 PI 控制器参数，使得变参数数字 PI 控制得以实现。

5.2.2 经典 PID 算法

PID 控制技术是最成熟的一种控制方法，该方法原理简单、实现方便，并且适应性广、鲁棒性强，其控制品质对被控对象特性的变化不是很敏感，因此在工业控制中应用十分广泛，常规 PID 控制系统有模拟 PID 控制器和被控对象组成，其原理框图如图 5-3 所示。

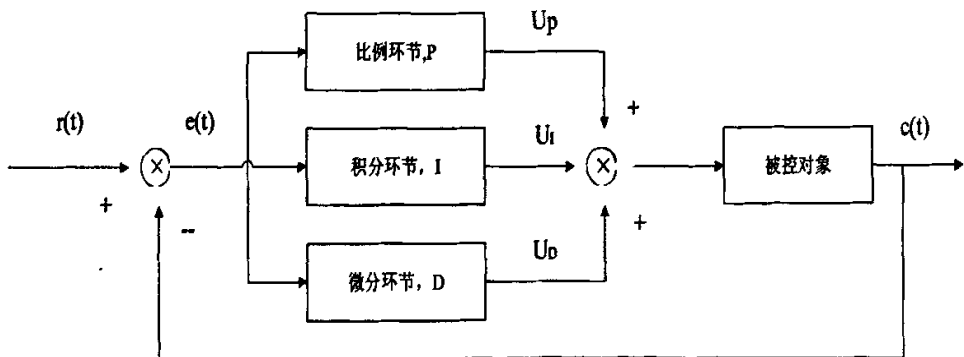


图 5-3 PID 控制系统原理框图^[53]

Fig.5-3 Schematic diagram of PID control system^[53]

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值 $r(t)$ 和实际输出值 $c(t)$ 构成控制

偏差 $e(t)=r(t)-r(t)$ ，将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，其控制规律为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5-1)$$

其中： K_p ——比例系数， T_i ——积分时间常数， T_d ——微分时间常数。

PID 控制器各校正环节的作用如下：

1) 比例环节：及时成比例的反映控制系统的偏差信号 $e(t)$ ，偏差信号一旦产生，控制器立即产生作用，以减少偏差。

2) 积分环节：主要用于消除静差，提高系统的控制精度。积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i ， T_i 越大，积分速度越慢，积分作用越弱，反之则越强。

3) 微分环节：能反映偏差信号的变化趋势，并能在偏差信号值变的太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而减少调节时间。

在 DSP 控制系统中需要采用数字 PI 控制方法，其算法通常分为位置式 PI 和增量式 PI 控制算法。对于逆变电源控制来讲，执行机构需要的不是控制量的绝对数值，而是控制量的增量，因此适合采用后一种算法。

将式(3-4)在时域内离散化，可得：

$$\begin{aligned} u(kT) &= u(kT-T) + K_p \left\{ [e(kT) - e(kT-T)] + \frac{T}{T_i} e(kT) + \frac{T_d}{T} [\Delta e(kT) - \Delta e(kT-T)] \right\} \\ &= u(kT-T) + K_p [e(kT) - e(kT-T)] \\ &\quad + K_i e(kT) + K_d [e(kT) - 2e(kT-T) + e(kT-2T)] \end{aligned} \quad (5-2)$$

式中 $K_i = K_p \frac{T}{T_i}$ ——积分系数；

$K_d = K_p \frac{T_d}{T}$ ——微分系数

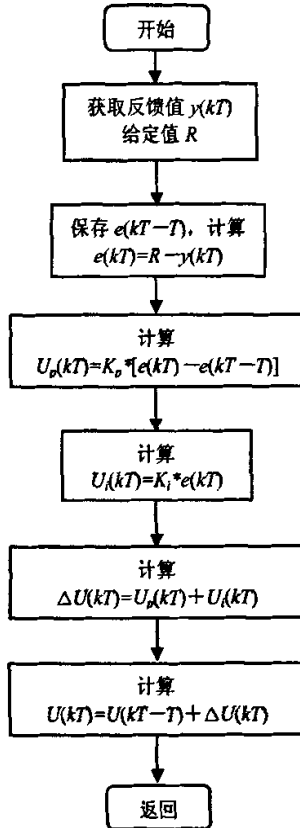
由于微分项的加入在某些场合可以提高系统的动态品质，但不适于干扰比较大的场合。焊接的过程中有较强的干扰，如果加入微分调节，很难实现稳定控制效果，因此本控制系统采用 PI 控制。其控制规律为：

$$u(kT) = u(kT-T) + K_p [e(kT) - e(kT-T)] + K_i e(kT) \quad (5-3)$$

其中 K_p 、 K_i 的大小是通过大量实验整定后确定的。增量式数字 PI 算法程序流程图如图 5-4 所示。

5.3 弧压反馈闭环控制算法

本文所设计的全数字控制逆变脉冲焊机采用 I-I 外特性，以保证脉冲期间电流稳定，可对熔滴过渡进行精确控制，获得稳定的熔滴过渡，在维弧期电流

图 5-4 增量式 PI 算法程序流程图^[54]Fig.5-4 Algorithm flowchart of incremental PI^[54]

稳定不易熄弧。为了克服这种控制方法弧压波动大，维弧期间会因弧长波动造成短路的缺点，在这种方法的基础上需另加稳定弧长的控制设计。由于恒流（I-I）外特性电源的优点，目前包括 Fronius、OTC 等知名公司的脉冲焊设备均采用 I-I 外特性^[10, 11]，弧长发生波动时也大多采用调节基值时间的方法。

为了保持弧长稳定，一般选取电弧电压作为表征电弧长度的物理量。通过采样反馈电压，计算脉冲频率，以压频转换的方式，调节输出电压的平均值保持稳定，从而稳定弧长。

5.3.1 压频转换基本原理

本设计的采样频率是10kHz，而熔滴脉冲频率小于300Hz，在该采样速率下，电弧长度的信息可在平均电压中充分反映。从每一个脉冲的初始时刻开始，采样并计算电弧电压的平均值。在脉冲电流峰值期间，采样电弧电压的平均值会大于平均电压的设定值，接下来，在脉冲电流基值期间，平均值会随之降低，当该值

与设定的平均电压值相同时，给出下一个电流脉冲信号。由上可知，只有当前一个周期的平均电压同设定平均电压相同时，才给出脉冲电流信号，进入下一个周期开始。为此，电弧电压的平均值在任意周期内，总是保持为同设定电压相同，电弧长度只在一个很小范围内波动^[10]。

5.3.2 压频转换程序设计

软件实现压频转换算法，主要通过脉冲峰值电流实现熔滴过渡，动态调节基质电流时间进而控制平均弧压稳定，从而稳定弧长的功能。首先，根据经验值设定脉冲电流峰值 I_p 、峰值时间 T_p 、脉冲电流基值 I_b 、电弧电压平均值 U_s 。设 U_i 为在 T_i 时刻的电弧电压采样计算平均值， I_g 为焊接电流给定值。压频转换程序流程图5-5如下：

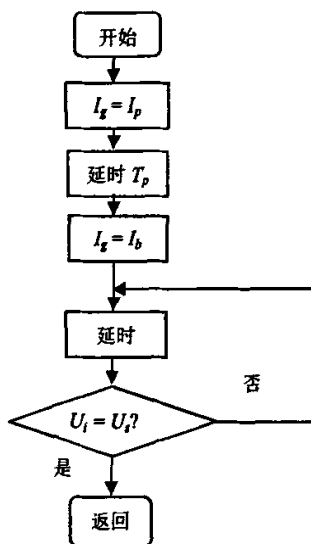


图5-5 压频转换程序流程图

Fig.5-5 Algorithm flowchart of V/F change

5.4 本章小结

1. 针对脉冲 MIG 焊的特点，分析了电源 DSP 数字控制软件的功能，介绍了 DSP TMS320F2812 开发方法，并采用 C 语言和模块化的设计方法编写控制软件，实现对电源的有效控制；

2. 通过分析 PID 算法的机理，设计软件实现条件控制变参数 PI 控制器算法，根据脉冲 MIG 焊的 I-I 外特性的控制特点，实现对脉冲峰值电流和基值电流的恒流精确调节。

3. 分析了弧压闭环控制实现脉冲 MIG 焊的机理, 并进行了压频转换算法程序设计, 实现焊接过程熔滴过渡的数字控制功能。通过采样反馈电压, 计算脉冲频率, 以压频转换的方式, 调节输出弧压的平均值保持稳定, 从而稳定弧长。

第6章 试验方案设计与试验结果分析

通过前面几章的论述,本文建立了一个基于 DSP、CPLD 和单片机控制的全数字 IGBT 逆变电源系统。图 6-1 所示,即为本文所设计的 MIG/MAG 焊全数字控制逆变电源实验平台。

为检验系统是否达到设计要求,对所设计的系统进行了测试,并对测试过程中发现的软、硬件问题进行了及时的改进。从整体上来讲,系统测试主要分为两部分,一是基于 CPLD 的数字 PWM 控制系统测试,另外一部分就是电源整机测试。

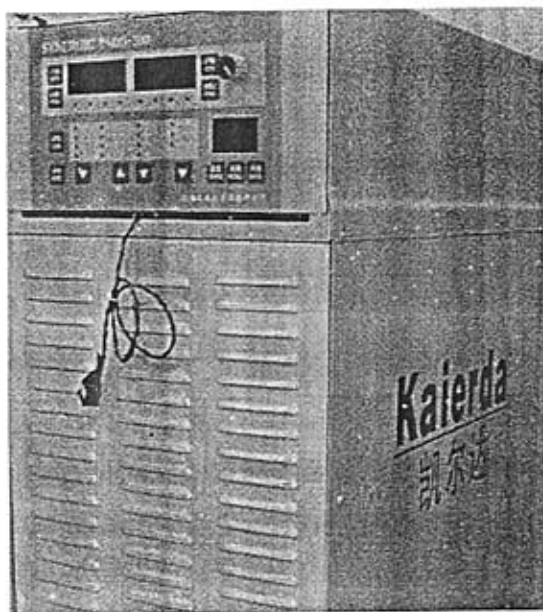


图 6-1 脉冲 MIG/MAG 焊全数字控制逆变电源

Fig.6-1 PMIG/PMAG welding inverter based on full-digital control

6.1 试验准备

对所设计的控制系统(包括硬件和软件)进行调试使之达到设计要求是进行科学研究和产品开发至关重要的环节。要完成系统的调试则需要一定的测试设备和工具,本实验过程用到的实验设备主要有数字示波器、万用表、稳压电源、调压器、变阻箱等。

对于控制系统来讲,主要通过测试其引脚电平、输出信号及时序逻辑以验证它是否达到设计要求。

对整体电源来讲,主要测试其恒流特性、电源输出特性及电源动特性,并在电阻箱作为负载的情况下,测试脉冲 MIG 控制的输出电流、电压波形。

6.2 IGBT 波形测试

6.2.1 EXB841 驱动波形测试

为保证所设计的控制电路和控制软件的正确性,首先对电源控制系统进行脱机调试,即主电路暂不通电,IGBT 不工作,电源无功率输出,只对控制部分的电路进行测试,如显示是否正常、焊枪开关输入是否正确、保护电路是否工作及焊接动作时序是否和设计吻合等等。

首先把控制板、驱动板、显示板固定在相应的位置上,并连接好它们之间的连线,此外还要将驱动板与 IGBT 的驱动端连接好,然后断开主电路,仅给控制电路供电。

由于 IGBT 的驱动波形是由 CPLD 在 DSP 的控制下给出的,为此 CPLD 输出 PWM 波形的正确与否是 IGBT 可靠安全工作的关键。在上主电之前首先测试 CPLD 输出的 PWM 信号是否正确,要测试死区时间和 PWM 频率。如图 4-10 实测 CPLD 输出波形所示, DSP 输出数据是 0xFF 时, CPLD 输出为最大脉宽时的 PWM 输出信号波形,实测得死区时间约为 5 μ s, PWM 的频率为 19kHz, 占空比是 41%, 由此可知此驱动完全符合设计要求。

在电源上电到焊接开关闭合期间,由于 PI 调节 PWM 输出控制信号已经达到最大值,对应最大 PWM 脉宽。在本设计中,采用 CPLD 输出数字 PWM 信号,而不是采用模拟芯片 SG3526 输出的 PWM 信号,在模拟芯片 SG3526 中 PWM 信号是软使能的,这样就避免了主电路变压器瞬间过流偏磁产生严重后果,而在 CPLD 的 PWM 输出信号使能过程是在几个 ns 时间内 PWM 信号达到最大脉宽输出,从而可以给主电路带来和严重的后果。为了避免主电路变压器偏磁,首先,在 PWM 信号使能前设电流给定值是 0x00,焊接开关闭合之前 PI 调节后 DSP 输出的控制信号是 0x00,这样在焊枪开关闭合后通过 PI 调节使 PWM 缓慢展到最大脉宽;其次,在 DSP 程序上设置没有引弧前的 PI 调节最大 DSP 输出值是 0x7F,对应 PWM 信号占空比是 20.5%。通过以上处理后,可以保证 PWM 在上电使能过程是安区可靠的。上述工作完成并确保无误后接通电源,按下焊枪开关,测试 PWM 波形,焊枪开关闭合后,通过示波器观察引弧前的 EXB841 驱动波形,分析该部分是否正常工作。

控制系统输出的驱动波形是否正常是焊机能否正常工作的关键,实测 EXB841 驱动波形如图 6-3 所示。由图 6-3 可以看出,驱动脉冲电平为+14V,输出负偏压为-5V,两路驱动信号互差 180° 相位,表明 EXB841 驱动信号工作正常。

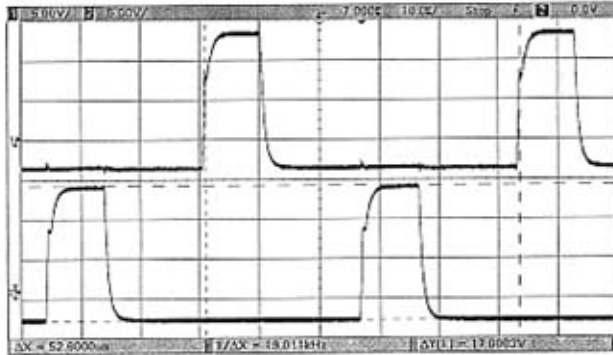


图 6-3 占空比为 20.5%的 EXB841 驱动输出波形
Fig.6-3 Driver waveform of EXB841 duty by 20.5%

图 6-4 为空载情况下，PWM 信号为最大脉宽输出，占空比为 41%，实际测得死区时间约为 5 μ s，由以往的经验可知，该部分完全符合设计要求。

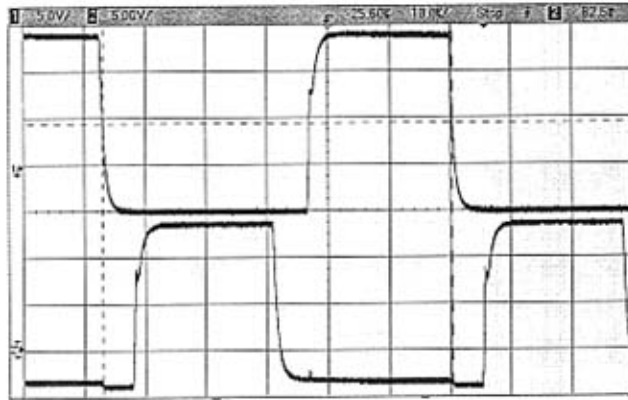


图 6-4 占空比为 41%的 EXB841 驱动输出波形
Fig.6-4 Driver waveform of EXB841 duty by 41%

6.2.2 保护信号测试

为了保证 IGBT 的安全，必须在上主电之前确保保护电路能正常工作，因此在脱机调试时需要模拟保护信号以测试所设计的保护电路动作是否与设计一致。由前面的介绍可知，电压保护分为过压、欠压和缺相三种情况，欠压和缺相表现出来的特征都是电压低于正常值，所以二者保护电路是共用的。调整稳压器输出用以模拟过压信号或欠压信号，并分别将该信号加入到电压保护电路的输入端，然后观察保护电路的动作，一旦产生电压保护信号，电压指示灯就会亮，并且 PWM 输出也会关闭。过流保护信号来自于驱动板，拔掉 IGBT 的驱动信号线就会产生过流信号，通过这种方法就可以调试过流保护电路。本系统使用的温度继电器为常开触点，用导线把该触点闭合就模拟出过温保护信号。

采用以上的方法对保护电路进行调试,发现控制系统的保护动作与设定动作完全吻合,说明该部分工作正常。

6.2.3 IGBT 波形测试

为保证 IGBT 的安全,先把主电路的输入接到调压器上,通过调压器逐步增加电源的交流输入电压,同时用示波器观察 IGBT 的管压降波形,一旦出现异常情况立即降低或关闭调压器输入,否则逐渐提高电路的输入电压直到额定电压。然后,通过电阻箱再逐渐增大负载,观察 IGBT 的管压降波形。图 6-5 所示,为最大占空比时的 IGBT 管压降实测波形。

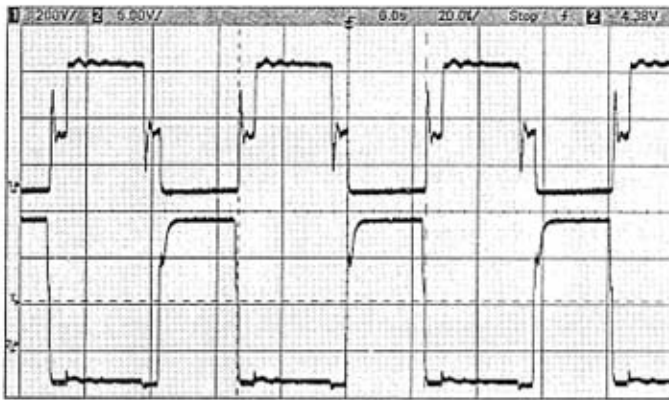


图 6-5 最大占空比时的 IGBT 管压降波形和驱动波形
Fig.6-4 Tube voltage drop and drive pulse waveform of IGBT with full duty

图 6-6 所示,为焊接电流为 200A 时的 IGBT 管压降波形。



图 6-6 焊接电流 200A 时的 IGBT 管压降波形
Fig.6-5 Waveform of IGBT when welding current is 200A

由图 6-5 和图 6-6 中可以看出,主电路交流输入电压已达到额定电压 380V,且管压降波形完全符合设计要求。在焊接电流为 200A 时,测得 EXB841 的驱动波形,如图 6-7 所示。对比图 6-6 和图 6-7,驱动波形和 IGBT 管压降波形的占空比一致都是 27%,时序控制一致,从而说明电源主电路部分工作正常。

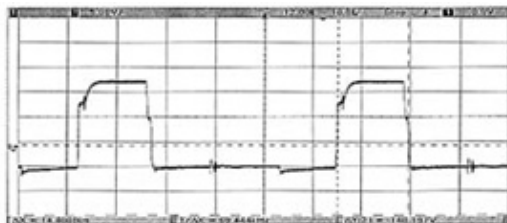


图 6-7 焊接电流 200A 时的 EXB841 驱动输出波形
Fig.6-7 Driver waveform of EXB841 output when welding current is 200A

6.3 恒流外特性实验及结果分析

通过上述测试已证明电源主电路及控制电路均能正常工作,接下来以电阻箱作为负载,进行恒流特性测试实验。表 6-1 所示,为测试记录的试验数据。

表 6-1 恒流外特性试验数据
Table 6-1 Data of constant-current experiment

电压 (V)	72.2	59.0	46.8	32.9	22.8	13.2	7.2
电流 (A)	0	28.9	47.3	47.5	47.5	47.5	47.5
电压 (V)	72.2	59.2	49.1	38.1	26.9	17.2	10.0
电流 (A)	0	26.6	98.2	100.1	100.1	100.1	100.1
电压 (V)	72.2	56.4	52.8	48.7	38.5	29.2	13.5
电流 (A)	0	55.8	140.5	200.2	200.2	200.2	200.2
电压 (V)	72.2	56.9	53.4	48.9	42.8	29.5	15.1
电流 (A)	0	90.8	172.8	303.2	303.2	303.2	303.2

图 6-8 所示,为该电源的恒流外特性曲线,从图上可以看出,该电源空载输出电压为 72.2V,输出特性为恒流特性,满足脉冲 MIG/MAG 焊电源外特性的要

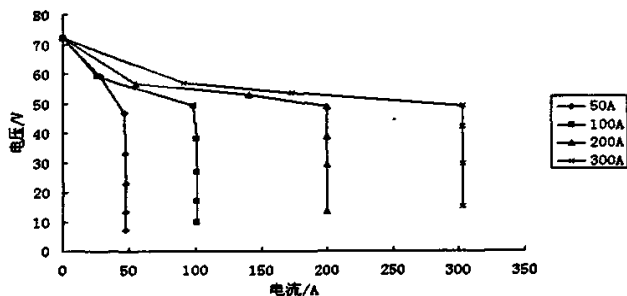


图 6-8 恒流外特性曲线
Fig.6-8 Constant-current characteristic curve

求。由于系统存在误差,恒流值存在一定的误差,但误差值在系统正常工作的允许范围之内,只需经过微小的校正后,就能实现对焊接电流的精确控制。

表 6-1 所示,为本逆变电源实现 50A、100A、200A 和 300A 恒流控制时,测得的恒流外特性实验数据。图 6-8 所示,为根据实验数据所画的外特性曲线,四条曲线分别为 50A、100A、200A 和 300A 时的恒流外特性曲线。图 6-8 中的曲线具有相同的特征:①都可以分为两段进行比较,即最大脉宽段和恒流段;②进入恒流段的拐点电压都在 48V 附近。由于实验变阻箱条件所限,尚不能测出弧压接近 0V 时的电流变化曲线。

①最大脉宽段,从空载开始,到进入恒流段为止。此时由于负载电阻太大,尽管 PWM 脉冲的宽度已经最大,但是输出的电流值仍达不到电流设定值。PWM 最大脉冲宽度的大小决定了这一段曲线电压的大小和拐点电压的高低。拐点电压是指恒流时所能达到的最大电压。从图 6-8 可以判断出本文所研制的焊机在恒流时的拐点电压在 48V 左右。

②恒流段。从图 6-8 可见电流的实际恒定值为 47.5A、100.1A、200.2A 和 303.2A,除了 47.5A 与理论设定值 50A 有 5%的偏差外,其余的误差都小于 1%。在理论设定经过校正后,电流控制精度完全都可以控制在 1%之内,实现了数字脉冲焊接电源的精确控制。

误差存在的原因是电流值被 DSP 采用和运算处理之前,需要经过两个环节:电流 LEM 采样和二阶低通滤波。电流 LEM 和采样电阻产生的偏差,很小作为系统误差,对实验试结果影响很小可以不予考虑。由于主电路采用 20KHz 硬开关逆变电路,通过示波器可以测得 AD 采样前有 40KHz 的开关干扰信号,为此系统对 40KHz 的干扰信号的处理能力将是本系统实现高精度控制的主要因素。本设计通过如下措施进行滤波处理:

- ①采用 2 阶低通滤波器硬件滤波使 40KHz 干扰信号得到控制;
- ②在 DSP 内部通过软件滤波消除主要的正弦波干扰信号;
- ③通过 CPLD 数字滤波使控制信号 PWM 稳定输出。

实验表明,通过采用一系列软硬件抗干扰措施,解决了高频干扰信号对控制系统的干扰问题,实现了对焊接电流的精确控制。

6.4 动态特性实验及结果分析

脉冲 MIG/MAG 焊一般采用一脉一滴的过渡形式,这就使得弧焊电源常在空载、大负载、小负载之间转换,因此它对电源动特性有较高要求。

电流峰值的大小和稳态的过渡时间除了与回路的电感和电阻相关外,更多地取决于 PI 控制器的性能。一个性能好的 PI 控制器应使电流峰值尽可能小,同时稳态的过渡时间尽可能短。对于不同的系统,其合适的 PI 参数并不一样,因此

需要针对不同的系统进行实验整定, 寻找较好的 PI 参数, 使系统性能达到最优 [65]。

为了测试逆变电源的电流输出特性, 减小了电源的信号采集滤波部分的滤波电容, 使控制系统的阻尼兼通过编写软件实现电流输出由 100A 到 200A 的突变, 图 6-9 所示, 为 $K_p=1.650$, $K_i=1.425$, $R=0.1\Omega$ ($2\Omega//1\Omega//0.5\Omega//0.4\Omega//0.25\Omega$) 时测得的电流波形。图 6-10 所示, 对 PI 参数优化后, 编写软件实现电流由 40A 到 240A 的突变, $K_p=1.591$, $K_i=1.251$, $R=0.1\Omega$ ($2\Omega//1\Omega//0.5\Omega//0.4\Omega//0.25\Omega$) 时测得的电流波形。

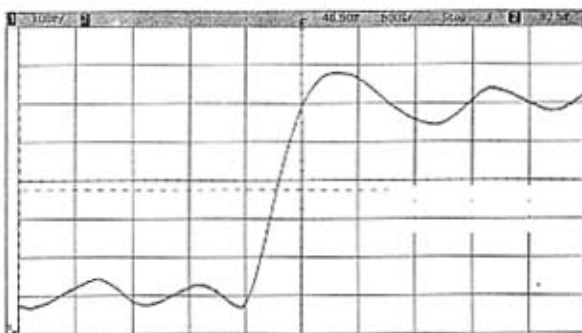


图 6-9 由 100A 到 200A 的电流阶跃响应曲线
Fig.6-9 Current Step Response from 100A to 200A

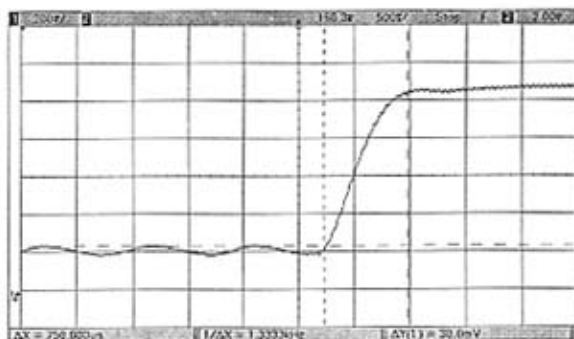


图 6-10 由 40A 到 240A 的电流阶跃响应曲线
Fig.6-10 Current Step Response from 40A to 240A

图 6-9 所示, 为本设计在负载电阻 $R=0.1\Omega$ 时测得的电流由 100A 到 200A 的过渡过程。图 6-10 所示, 为减小比例参数, 增大积分时间参数后的电流阶跃响应曲线, 图示过渡过程不存在超调, 属于过阻尼系统。图 6-10 表明, 电流上升时间 $t_r=750\mu s$ 。根据以往的经验表明, 该动态性能可以满足脉冲 MIG/MAG 焊的控制要求。

由图 6-10 所示, 可以这样理解, 当电流给定出现突变后, PWM 输出最大脉冲宽度, 这时电流的上升速度取决于回路的电感和负载电阻(回路电阻基本为零)。电流峰值的大小和稳态的过渡时间除了与回路的电感和电阻相关外, 还取

决于 PI 控制器的性能。一个性能好的 PI 控制器应使超调量尽可能小，同时稳态的过渡时间尽可能短。

6.5 弧压闭环控制算法验证试验

通过上述试验已证明电源主电路及控制电路均能正常工作，电源的动态特性和静态特性都能满足脉冲 MIG/MAG 焊的要求，接下来以电阻箱作为负载，进行弧压闭环控制算法验证实验。本实验为双闭环控制，内环为电流恒定闭环控制，外环是平均电压恒定闭环控制。表 6-2 所示，为测试记录的试验数据。

表 6-2 平均电压恒定外特性试验数据
Table 6-2 Data of average-voltage experiment

电压 (V)	72.2	56.1	33.8	18.1	18.2	18.1
电流 (A)	0	35	52.8	62.5	100.3	189.6
电压 (V)	72.2	55.6	31.5	20.1	20.2	20.3
电流 (A)	0	35.1	51.9	70.9	115.4	201.3
电压 (V)	72.2	55.3	32.4	22.2	22.1	22.0
电流 (A)	0	35.2	52.6	75.3	124.3	195.4

图 6-11 所示，为该电源的平均电压恒定外特性曲线，从图上可以看出，该电源空载输出电压为 72.2V，输出特性为恒压特性，满足脉冲 MIG/MAG 焊电源稳定平均电压恒定外特性的要求。

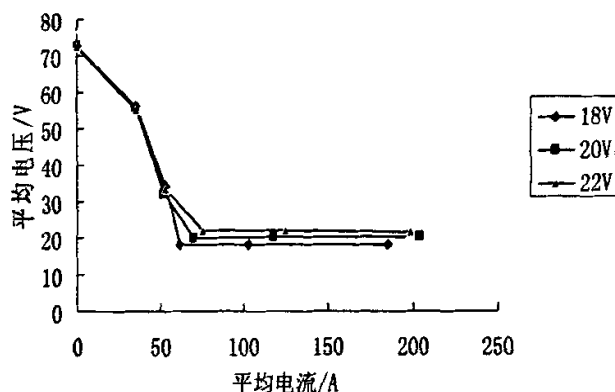


图 6-11 平均电压恒定外特性曲线

Fig.6-11 Average-voltage characteristic curve

在 DSP TMS320F2812 上编写弧压闭环控制压频转换算法软件，平均电压设定值为 18V，在变阻箱负载下，用示波器测得电源输出的脉冲电压和脉冲电流波

形, 如图 6-12 所示, a) 为 $R = 0.17\Omega$ ($2\Omega // 1\Omega // 0.5\Omega // 0.4\Omega$), b) 为 $R = 0.1\Omega$ ($2\Omega // 1\Omega // 0.5\Omega // 0.4\Omega // 0.25\Omega$) 时测得的电流、电压脉冲波形。信号 1 是脉冲电流波形, 信号 2 是电压波形。

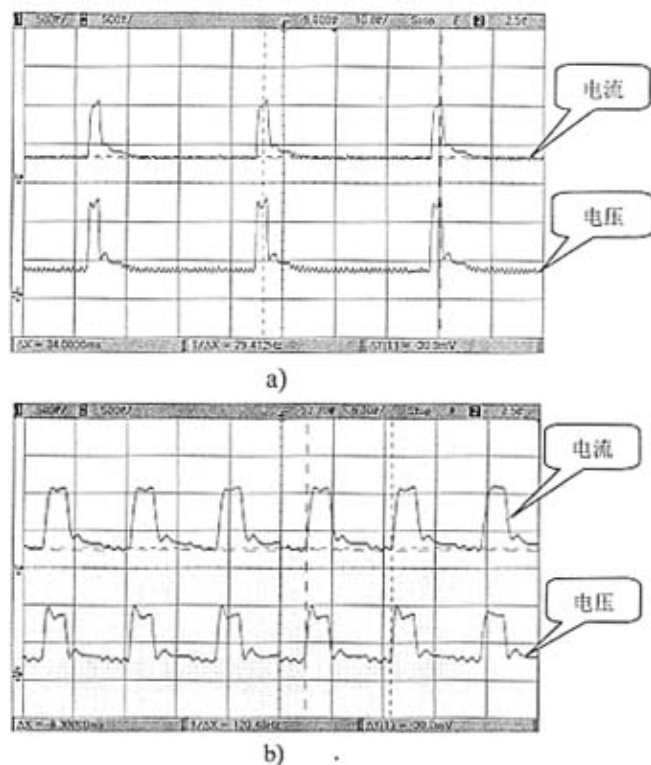


图 6-12 不同负载下的电压、电流控制波形

Fig6-11 Waveform of voltage and circuit control using simulator as load

由图 6-12 所示的电压波形, 根据采样电压值与实际电压值之间的对应关系可知, 脉冲峰值电压阶段和平均电压所构成的面积, 与脉冲基值电压阶段和平均电压所构成的面积相等, 平均电压值在不同的负载下恒定不变。当变阻箱负载为 $R = 0.17\Omega$ 时, 脉冲频率为 29.4Hz, 当变阻箱负载为 $R = 0.1\Omega$ 时, 脉冲频率为 120.4Hz, 在单个脉冲周期中维持平均电压基本恒定, 符合脉冲 MIG 弧长闭环控制算法理论。当负载条件一定时, 平均电压越高, 脉冲频率越大, 当平均电压超出临界值时, 输出电流不再是脉冲形式, 而是一条纹波均匀的直线。当平均电压一定时, 负载越大, 输出脉冲频率越大, 当负载超出临界值时, 输出电流不再是脉冲电流形式, 而是一条纹波均匀的直线。

6.6 系统评价和完善意见

通过上面的论述, 本文建立了基于 TMS320F2812 DSP、CPLD EPM7064 和

AT89S8252 单片机控制的脉冲 MIG/MAG 全数字化控制平台,该焊机控制系统柔性好,在不更改系统硬件的情况下,仅通过更改控制程序就可以完成控制参数的更新和系统软件的升级,为后续的焊接工艺研究提供了一个良好的全数字化平台。另外在本焊机中可以采用软件的方式在不同焊接规范区间内选用不同的 PI 参数和 A/D 转换校正系数以获得较高的控制精度。

降低焊接飞溅和改善焊缝成型是进行全数字化控制脉冲 MIG/MAG 逆变焊机研究的最终目的,本文是该课题的初步研究阶段,仅建立了脉冲 MIG/MAG 焊接电源的全数字控制系统,并对该系统的可行性进行了验证,但由于时间关系并没有进行实际焊接工艺试验。

作为一台焊接设备,它不仅要输出参数可控的电压、电流波形,还必须能够获得良好的焊接工艺和焊接接头,这就需要通过一定的工艺试验,寻求合适的控制参数,由于时间关系本文仅设计出了脉冲 MIG/MAG 逆变电源的全数字控制系统,但对电源参数的优化部分并没有涉及,因此需要在该电源的基础上进行实际焊接工艺试验,根据试验结果优化电源控制参数,并把优化后的参数固化在系统中。

6.7 本章小结

1. 脱机调试所设计的控制电路,找出控制电路中存在的问题并加以改进,使之达到设计要求;
2. 采用变阻箱作为负载,测试了电源恒流特性、动特性,结果表明,电源输出特性符合设计要求,能满足脉冲 MIG/MAG 焊的工艺要求;
3. 使用变阻箱设备作为负载,测试电源恒流外特性和动态特性,结果表明电源能输出参数可调的适于脉冲 MIG 焊接的电流波形,为以后实际的焊接工艺试验提供了一的理论和实践基础。

结论

1、研制了基于 TMS320F2812 DSP 的逆变电源控制系统，通过软件编程实现了 I-I 模式脉冲电流闭环恒流调节和弧压平均值恒定双闭环控制和 PWM 软启动等功能；

2、研制了基于 CPLD EPM7064 数字 PWM 控制系统软硬件平台，实现了 DSP TMS320F2812 输出的 8 位数据控制信号线性地转化成两路互差 180 度的 PWM 信号，同时实现了数字控制 IGBT 过流保护、变压器原边过流保护、过/欠压缺相保护和过热保护功能；

3、组装了逆变焊机，经过调试和试验，验证了全数字化控制系统软硬件设计的合理性和正确性。试验表明本文研制的基于 DSP 的脉冲 MIG 焊全数字化控制系统具有良好的恒流输出、静态特性和弧压闭环控制特性，达到了设计要求，为进一步优化焊接工艺参数，进行脉冲 MIG/MAG 焊接工艺研究提供了一个良好的完全数字化控制平台。

本文还存在一些不足之处，需要进一步完善。改善焊缝成型是进行全数字化控制脉冲 MIG/MAG 逆变焊机研究的最终目的，本文是该课题的初步研究阶段，仅建立了脉冲 MIG/MAG 焊接电源的全数字控制系统，并对该系统的可行性进行了验证，但由于时间关系并没有进行实际焊接工艺试验。需要在该电源的基础上进行实际焊接工艺试验，根据试验结果优化电源控制参数，并把优化后的参数固化在系统中。另外，建议在本系统基础上扩充控制程序，以实现诸如 CO₂、TIG 焊和手弧焊等多种焊接工艺的集成，达到一机多用的目的。

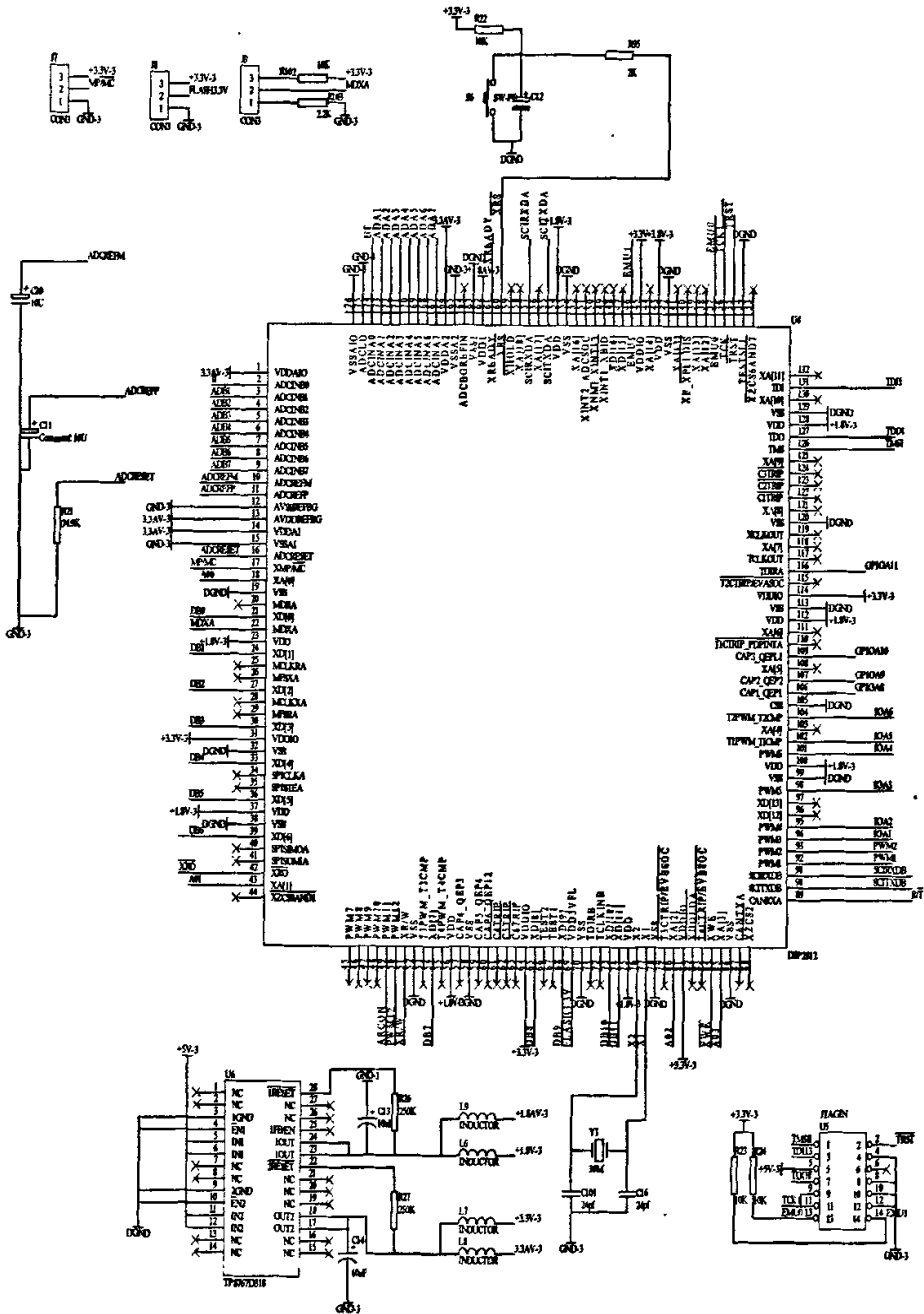
参考文献

- 1 王伟明, 逆变式 GMA 单脉冲和双脉冲焊机数字控制系统研究. 北京工业大学博士学位文, 2004:1~30
- 2 刘嘉. 弧焊逆变电源控制系统的研究. 北京工业大学博士学位论文, 2002:105~108
- 3 H. Yamamoto. Improved current control makes inverters the power source of choice. *Welding Journal*. 1997, (1): 47~50
- 4 Tokuji Maruyama, etal. , Current Waveform Control in Gas Shield Arc Welding for Robotic Systems, *Kobelco Technology Review*, 1995,18(4): 24~28
- 5 Elliott K. Stava. A new, Low-spatter Arc Welding Machine, *Welding Journal*. 1993, 72(1): 25~29
- 6 Elliott K. Stava. New GMAW Power Source Designed to Reduced Spatter and Smoke. *The Fabricator*, 1994,24(2): 26~29
- 7 E.K. Stava. The Surface-Tension-Transfer Power Source: A New Low-Spatter Arc Welding Machine. *Welding Journal*,1993,72(1): 25~29
- 8 李芳. 全数字 IGBT 逆变脉冲 MIG/MAG 焊接电源的研究. 兰州理工大学硕士学位论文. 2004:54~55
- 9 P.Drews. Schulle-Fricling hans, United States Patent, 1980: 4, 427, 875
- 10 黄鹏飞, 卢振洋, 吕耀辉, 殷树言. 熔化极脉冲氩弧焊弧长动态调节性能研究. *机械工业学报*, 2005,01: 194~197
- 11 黄鹏飞等. IGBT 逆变熔化极脉冲氩弧焊机研制. *焊接技术*. 第 30 卷, 增刊 2001.12:36~37
- 12 王伟明, 刘嘉, 马德, 王三良, 殷树言基于 DSP 的单脉冲焊及双脉冲焊全数字控制系统的研究. *电焊机*, 2004,34(3):41~44
- 13 W.Lucas. Computers in Arc Welding-the Next Industrial Revolution. Part3: Instrumentation and Process Analysis. *Metal Construction*, 1985,17(7):23~28
- 14 K.Weman, New Potential with Modern Welding Power Sources. *Welding Review International*, 1995,14(2):18~20
- 15 Masao Vshio. Recent advances in welding power systems for automated welding. *Welding in the world*. 1994, (34) : 185~191
- 16 M. J. Kang, Y. Kim, S. Ahn, S. Rhee. Spatter Rate Estimation in the of GMAW: A study shows the optimal model forestimating spatter rate using an artificial neural network in the short circuit transfer region ofGMAW. *Welding Journal*. 2003, 82: 238~247
- 17 刘嘉, 卢振洋, 殷树言, 丁京柱. 电焊机的数字化. *焊接学报*, 2002,23(2):88~92
- 18 卜华全. MM-350 焊机电路分析及微机控制 Synergic 电源的研制, 哈工大硕士学位论文, 1989:40~41
- 19 王克鸿, 徐越兰等. 微机 PMIG 焊机动态调节过程试验研究. *南京理工大学学报*. Vol.21,No.3 Jun.1997: 213~216
- 20 上山智之等. 微机数控电流波形脉冲 MIG 焊机的控制方法及焊接性能. *焊接*. 2000(5):33~38
- 21 Gary Dean. A versatile experimental test rig for GMA weld research.

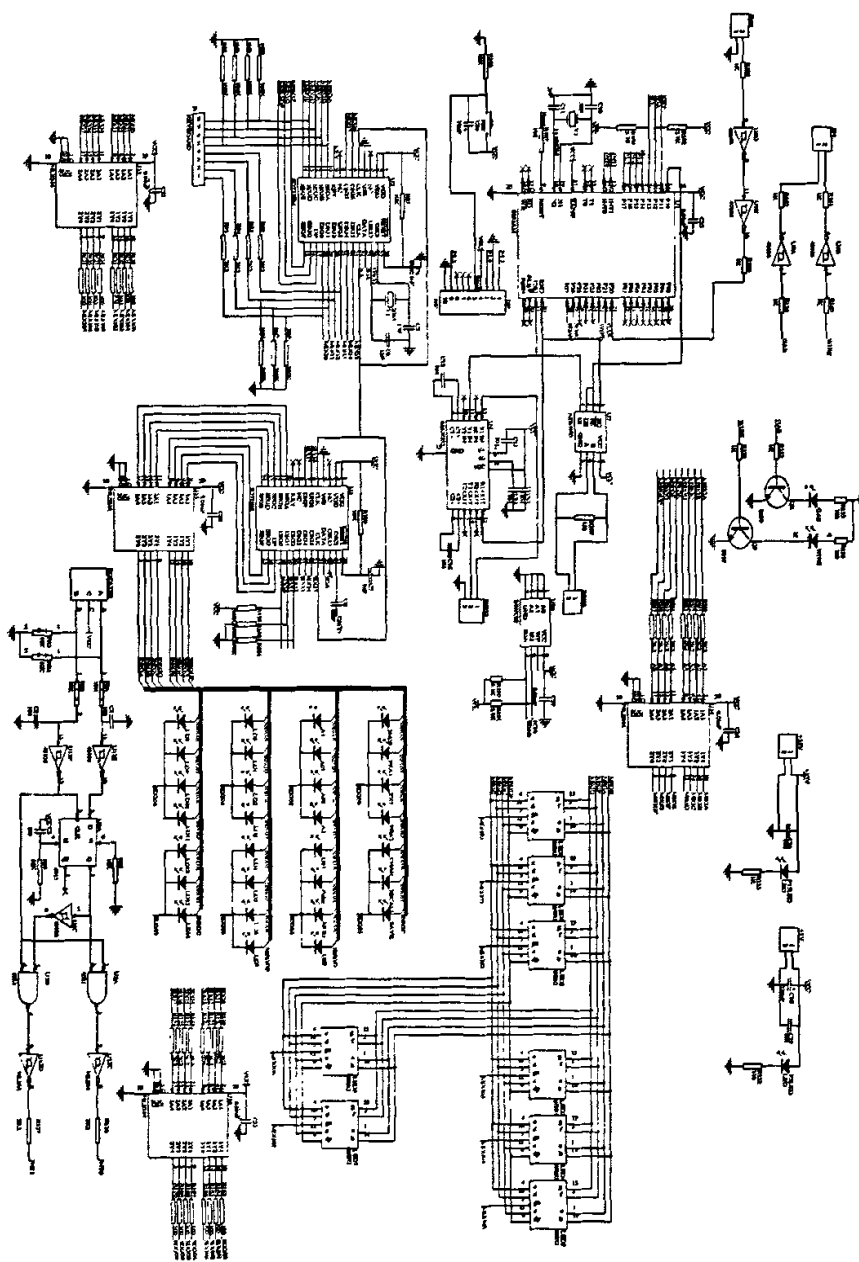
- Australasian Welding, 2001, 46(3): 33~38
- 22 TMS320C6000 Code Composer Studio Getting Started Guide. Texas Instruments. Aug, 2003: 1~12
- 23 Texas Instruments. TMS320C28x DSP Event Manager (EV) Reference Guide. Rev. November 2003: 4~48
- 24 TMS320F2810/F2812 Alpha Flash Programming Utilities, Alpha Release 1.0. Spectrum Digital Inc. www.spectrumdigital.com
- 25 廖日坤, CPLD/FPGA 嵌入式应用开发技术白金手册, 中国电力出版社, 2005: 182~297
- 26 孙育才, 王荣兴, 孙华芳. ATME1 新型 AT89S52 系列单片机及其应用. 清华大学出版社, 2005: 65~85
- 27 苏奎峰, 吕强, 耿庆峰等. TMS320F2812 原理与开发. 电子工业出版社, 2005: 1~18
- 28 (美) Donald A. Neamen 著, 赵桂钦, 卜艳萍译. 电子电路分析与设计. 电子工业出版社, 2003: 742~745
- 29 Dennis Klingman. Learning to use new GTAW technology. Welding Journal. 1998, (9): 41~45
- 30 B. Millier Using Rotary Encoders as Input Devices. Circuit Cellar, March, 2003: 1~6
- 31 +5V-Powered, Multi channel RS-232 Drivers/Receivers. MAXIM, Nov, 1999: 20~35
- 32 李朝青. PC 机及单片机数据通信技术. 北京航空航天大学出版社, 1999: 95~99, 100~102
- 33 Jan Axeison. Serial Port Complete: Programming and Circuits for RS-232 and RS-485 Links and Networks. Independent Publishers Group. 2001, (1): 115~123
- 34 王幸之, 王雷, 翟成等. 单片机应用系统抗干扰技术. 北京航空航天大学出版社, 2000: 52~56
- 35 任勇峰, 庄新敏, VHDL 与硬件实现速成. 国防工业出版社. 2005: 45~60
- 36 吴开源. 基于 DSP 的弧焊逆变电源数字化控制系统. 电子设计应用, 2002, 1(11): 71~73
- 37 TMS320F28x Analog to Digital Converter (ADC) Reference Guide. Texas Instruments, 2004: 12~21
- 38 刘和平, 王维俊, 江渝等. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用. 北京航空航天大学出版社, 2003: 236~238
- 39 Flash28x 烧写指导. 闻亭公司. www.dspchina.com
- 40 张雄伟. DSP 芯片的原理与开发应用. 电子工业出版社, 1997: 2~10
- 41 彭启琮, 管庆等. DSP 集成开发环境——CCS 及 DSP/BIOS 的原理与应用. 电子工业出版社, 2004: 1~104
- 42 [美] Texas Instruments Incorporated 著, 张卫宁编译. TMS320C28X 系列 DSP 的 CPU 与外设(上). 北京: 清华大学出版社, 2004: 13~15
- 43 扈宏杰. DSP 控制系统的设计与实现. 机械工业出版社, 2004: 68~72
- 44 Texas Instruments. TMS320C28x DSP CPU and Instruction Set Reference Guide Rev. 2004: 1~12
- 45 TMS320 F2812 DEMO Board User's Manual, SEED Nov, 2003: 1~20
- 46 Texas Instruments. DSP Selection Guide. Rev. 2002: 1~25
- 47 赵宇萍, 谢拴勤, 郭晓康. TMS320C28x 模数转换器的精度校正. 单片机与嵌入式

- 系统, 2005, (8):75~77
- 48 陈裕川, 全数字控制逆变式弧焊电源. 上海焊接通讯, 2001, (12):13~19
- 49 李焰. 脉冲 MIG 电弧焊电源控制系统的研究, 清华大学博士论文, 1988:30~31
- 50 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源. 北京:机械工业出版社, 1995: 9~10
- 51 汪安民, 程昱. DSP 应用开发实用子程序. 人民邮电出版社, 2005: 362~364
- 52 华学明, 吴毅雄, 焦馥杰, 张勇, 李铸国, 于乾波. 以数字信号为基控制的可控硅焊机的数字触发. 焊接学报, 2002,23(2):72-74
- 53 李正军. 计算机测控系统设计与应用. 机械工业出版社, 2004: 307
- 54 王克鸿. MC-PMIG 焊机的研制及其性能的改善. 哈工大硕士学位论文, 1991:5~10
- 55 Subramaniam.S. etal. Experiment approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW. Welding Journal. 1999:166~172

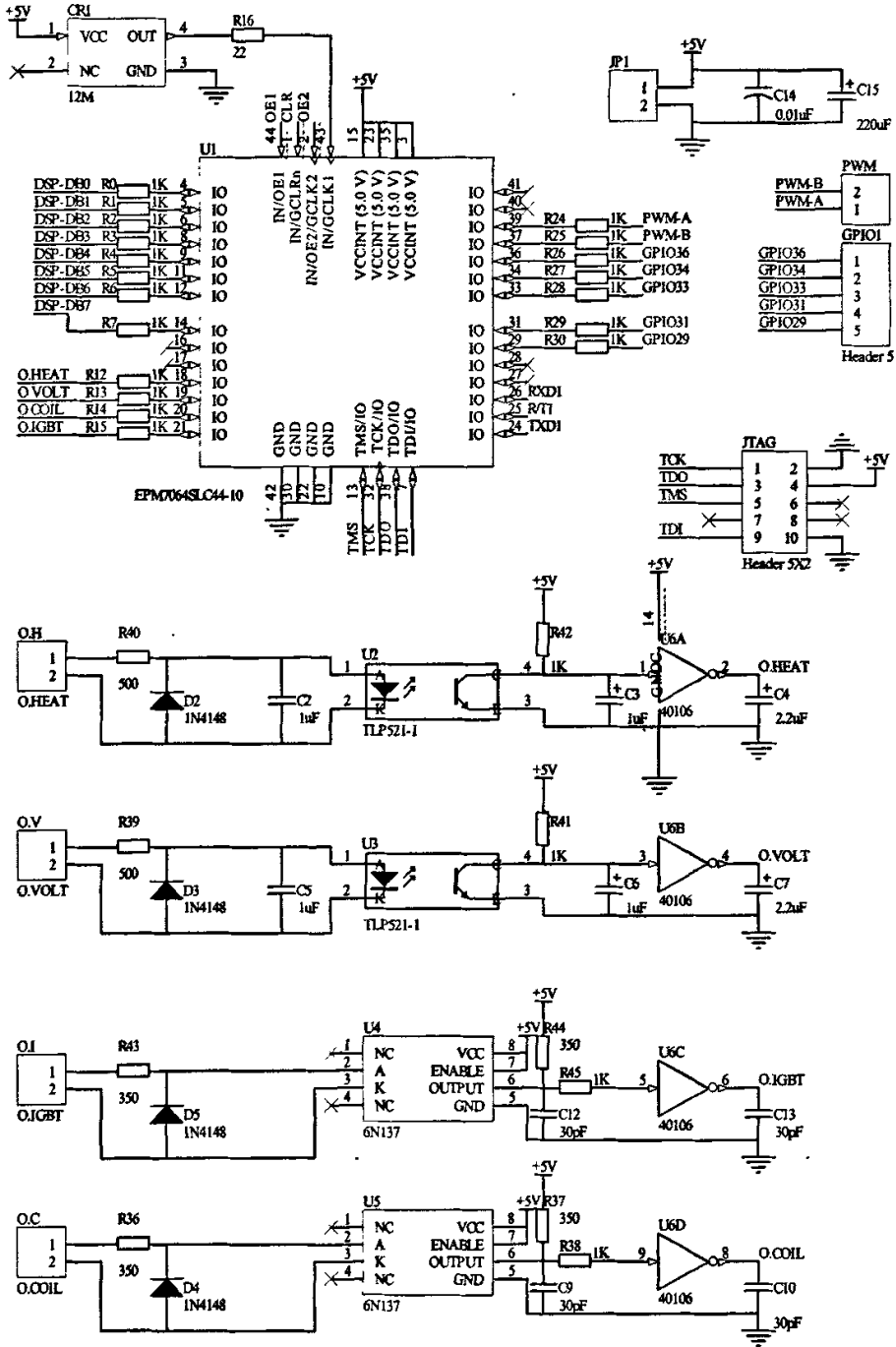
附录 1 DSP 控制电路图



附录 2 单片机控制键盘显示电路图



附录 3 数字 PWM 控制电路图



攻读硕士学位期间发表的学术论文

- 1 卢振洋, 王金柱, 黄鹏飞. 基于 CPLD 的数字 PWM 控制软件 V1.0, 2006 (登记号: 2006SRBJ2354)
- 2 薛令河, 黄鹏飞, 殷树言, 张学强, 王金柱. 基于 AT98S8252 单片机的逆变焊机控制器的设计. 2005 年全国单片机与嵌入式系统学术交流会论文集. 深圳市计算机行业协会, 北京航空航天大学出版社, 2005: 347~351

致 谢

本论文是在卢振洋教授和黄鹏飞副教授的悉心指导下完成的，导师渊博的学识、严谨的治学态度、忘我的敬业精神、丰富的实践经验使我受益匪浅。导师的言传身教不但培养了我勤奋、求真、务实的治学态度，更教会了我做人的道理，在论文付梓之际，谨向恩师致以崇高的敬意和诚挚的谢意！

在做课题期间，得到了殷树言教授、宋永伦教授、陈树君教授、李西恭副教授、白韶军副教授、刘嘉副教授、陈志翔副教授、张军博士、白立来高工等多位老师的热心帮助和指导，并为本论文的完成提供了许多便利条件，在此对各位老师表示深深的谢意。

本实验室杨帅博士、廖平博士、张撼鹏博士、古金茂博士为本论文的完成提供了许多有价值的意见和指导；师兄薛令河、高兴周、将观军在论文的完成过程中给予了许多帮助；硕士研究生欧特伦、杨骏营、刘凤刚、李春福、谭本刚、张学强、白利军、张云、闫璋、吉俊文、曾军辉、张瑞平、朱燕丛、高文宁、李艳等同学对本文的实验工作提供了大量无私的帮助，在此一并表示衷心的感谢！

感谢电控学院电工实验中心主任王铁流教授、电控学院刘红云副教授、机电学院杨建武教授、范晋伟教授、伍良生教授的关心和支持。

感谢三年硕士学习期间所有关心和帮助过我的老师、同学和朋友们。

最后衷心感谢我的父母、家人对我学业上的支持和生活上的关心。