



实现高效焊接的松下全数字脉冲MIG/MAG焊机GL4的开发与应用

王伟

【摘要】随着国民经济的飞速发展，各行各业都在消耗大量的能源及资源，全球资源减少的同时污染日益严重。我们国家已经认识到了一些问题的严重性，中央已明确提出各行业要节能减排，要求从源头做起。对于钢铁使用单位都必须减少用钢量，减少用钢量的有效途径是提高钢的强度，所以高强度钢会很快被广泛应用到制造业的各个领域。由于现代电力电子技术和计算机控制技术的迅速发展，采用数字信号处理器DSP控制的逆变焊机成为焊接电源的发展方向，它不仅大大简化硬件控制电路，而且易于实现焊机的多功能化和智能化。本文采用数字信号处理器DSP作为控制器件，建立了以DSP为核心的焊接过程控制平台。对基于DSP控制的全数字脉冲MIG逆变焊机进行了开发。针对市场特殊需求，开发了焊接功能扩展应用软件，丰富了焊机的功能，得到了用户的欢迎和认可。

阐述了焊接系统的总体结构，提出了基于全桥拓扑结构的主回路控制平台，采用双核DSP作为核心控制器，实现时序控制和波形的高速运算。系统控制软件采用模块化的设计思想，以焊接时序为主线、以功能任务为基础进行划分，大大减少了软件开发的周期，提升了软件的品质。

本文最后简要介绍了焊接数据的取得方法，并列举了两个应用实例。

关键词：数字脉冲MIG焊机；数字信号处理器DSP

1. 概述

基于逆变焊机的高速可控性，依靠对焊接电流的精密控制，采用脉冲控制技术，研制无飞溅、成形美观的逆变式脉冲MIG焊机，有利于促进MIG焊的推广应用。全数字MIG焊机是在逆变电源基础上，结合计算机技术，采用数字信号处理器（DSP或MCU），通过微处理器的精确运算来控制焊机的各项性能及工作全过程，控制电路高度集成、简化。通常的模拟焊机每增加一项功能都要靠增加相应的控

制电路等硬件来实现，而全数字焊机只需升级软件就可以实现。因此，电子元器件减少了，体积、质量减小的同时，故障率大大降低。最重要的是通过软件来控制电弧特性使我们得到了想象不到的焊接性能，由于摒弃了与温度漂移有关的模拟元器件，使焊接控制精确度和可重复性得到了很大的提高。

2. 全数字脉冲MIG逆变焊接电源硬件系统

全数字脉冲MIG逆变焊机的硬件系统包括电源和控制系统两

部分，电源采用基于移相PWM控制的IGBT逆变式弧焊电源，而控制系统则采用具有较强抗干扰能力的工业级DSP作为主控制器。DSP控制系统的建立是本章的重点，输入输出接口的设计考虑适用脉冲MIG气体保护电弧焊的情况。

(1) 系统总体结构 目前常用的逆变焊机的闭环控制系统有两种基本方式，一种为全数字化单闭环控制（见图1），微机系统根据给定和反馈信号的闭环运算直接产生PWM控制脉冲，经

功放后对逆变器进行驱动。这种全数字化控制简化了硬件电路，控制功能强，目前国内许多微机控制逆变焊机采用这种方式。

另一种控制方式（见图2），它是既有模拟信号内环（逆变环节）控制电路，又有微机多功能外环控制电路的双闭环控制系统。开关元件的PWM控制脉冲仍由以集成电路为主的模拟电路产生，控制系统数字电路只是对模拟部分的PWM进行控制。这种方式下系统的抗干扰性强，工作稳定性好，易于实现外特性控制和焊接工艺的开发。

应用微机控制是实现逆变焊机智能化与多功能化的有效途径，综合考虑各种因素，逆变式多功能焊机以采用数字化微机控制方式为宜。

由于脉冲MIG焊接要对焊机的输出电流进行高速、精密控制，所以对电源的动态特性要求较高，提高电源的动态特性成为实现脉冲MIG焊接的关键。

电源动特性的提高可从两个途径着手：

第一，提高逆变器的开关频率，本焊接电源的逆变频率设计为40kHz，为提升控制系统的实时性控制奠定基础。

第二，提高控制系统的运算速度，为提高运算速度，采用32位DSP作为核心控制器件，控制系统采用双核DSP来完成焊接参数设置及接口功能和焊接过程的管理，其中一个核用于时序和通信控制，另一个核用于波形计算和驱动信号的生产，实现数字化驱动，减小控制的离散性，实现控制的高速化。

（2）移相控制全桥功率变换电路 全桥式逆变焊机可靠性较好，是目前比较实用的主电路。全桥逆变基本电路如图3中所示。其控制方式为在PWM恒频控制的基础上，采用方波移相控制以实现功率器件的开关切换。在全桥变换电路中，四个开关管在恒定的频率下以略小于50%的占空比持续运行，通过调节桥臂驱动脉冲的相位来调整功率输出。

在图3中，Q1、Q2为功率开关管模块（IGBT），分为两个

桥臂，超前臂Q1和滞后臂Q2。

由于所设计焊机的额定输入电源电压为三相AC 380V，经整流滤波后得到近540V的直流电压，故IGBT按照两倍的电源电压关系进行选择，即选择耐压为1200V的IGBT。根据实际试验，选取的IGBT规格为100A/1200V。

在额定输入电源电压升高20%，即456V的条件下，将焊接电源的输出设定为最大，测试IGBT关断时两端的最大电压 $V_{ce(max)}=988V$ ，开通时流过IGBT

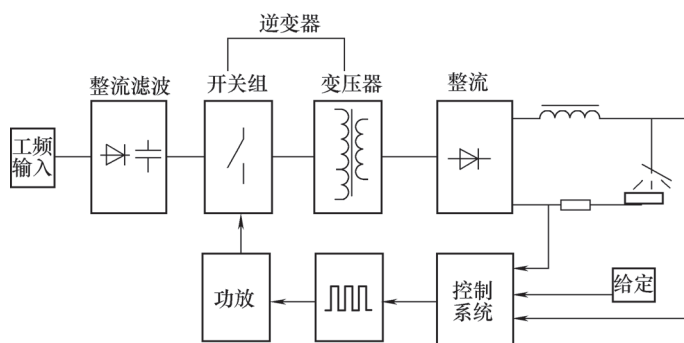


图1 全数字化微机控制逆变焊机

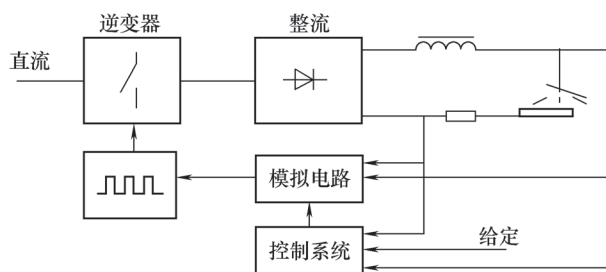


图2 混合型微机-PWM控制逆变焊机

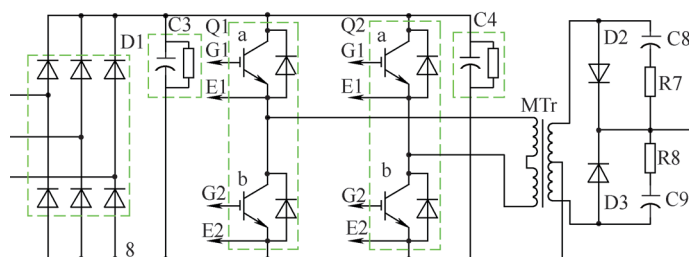


图3 功率变换电路结构

电流的最大值 $I_{c(max)}=78A$ ，均小于所选用的IGBT的允许值。

(3) 输入输出接口设计 主控DSP的接口电路如图4所示，主控DSP负责整个系统的运行，也是整个系统的核心控制中心，在通信上要与MCU（人机交互控制器）保持通信联系，从而获得设定和显示数据，还要根据设定数据进行IGBT等器件的状态控制，从而得合适的输出波形。

对于外部器件的控制，全部采用光偶进行隔离处理，以确保不受外电路的干扰，这样系统的抗干扰性能得到了较大的提高。

系统采用了双CPU的控制，当系统出现故障时，增加了判断难度，为使故障诊断容易，在主控DSP电路上增加LED显示功能，利用此LED，DSP可以显示自己的运行状态，帮助分析系统的故障。

控制系统首先要实现输入信号的采集和控制信号的输出。DSP的接口基本上都可以作为I/O接口使用。其中部分接口可作为12位高速AD接口使用，用于接收电流、电压的预制信号输入和反馈电流、电压信号的输入；具备3个串行通信口可以与操作控制MCU、机器人和电脑进行通信；两组PWM接口用于产生IGBT和送丝电动机的驱动波形。人机界面的交互机MCU采用的是—款瑞萨的16位MCU，因人机界面的交互不需较高的速度，软件也不需太大，但因其负责外部设定数据的读入，因此抗干扰问题是一个不可忽视的内容，如果受到外部干扰，将导致

焊接设定的突变，进而导致输出的变化，为此将其与外部连接的接口加入电容进行滤波处理。在采用上述硬件抗干扰措施的基础上，软件采用数字滤波的方式进行抗干扰处理，进一步增强抗干扰性能。

MIG焊接电源一般要求电流、电压同时显示，而且在焊接过程中要尽快响应焊接真实数据，在显示方案中采用六个数码管，每三个为一组分别显示焊接电流和焊接电压，如果采用靠MCU轮流进行数据刷新而没有锁存数据的方式，将会出现数字的闪烁现象。为了消除此现象并保障数据的实时性，每个LED均采用数据锁存器的方式进行控制，这样既保障了数据的实时性，又能够确保显示数据的稳

定，且提高了显示亮度。

因DSP与MCU随时保持数据通信，因此通信数据的准确性也是关键环节，如果通信数据收到干扰，那么也会影响焊接输出的正确性，在硬件电路上如果增加电容进行滤波还会影响数据通信波形的上升以及下降速度，也就是会影响数据通信，因此抗干扰措施主要考虑软件抗干扰，采用类似TCP/IP的通信协议，每一次通信都进行数据的校验，以确保数据的正确性。

3. 脉冲MIG焊机的软件控制系统

在数字化的控制系统中，MCU或DSP成为了控制的核心，因此设计性能优越的软件系统是—整个系统成功的关键因素之一，针对前文所述硬件系统结构，充

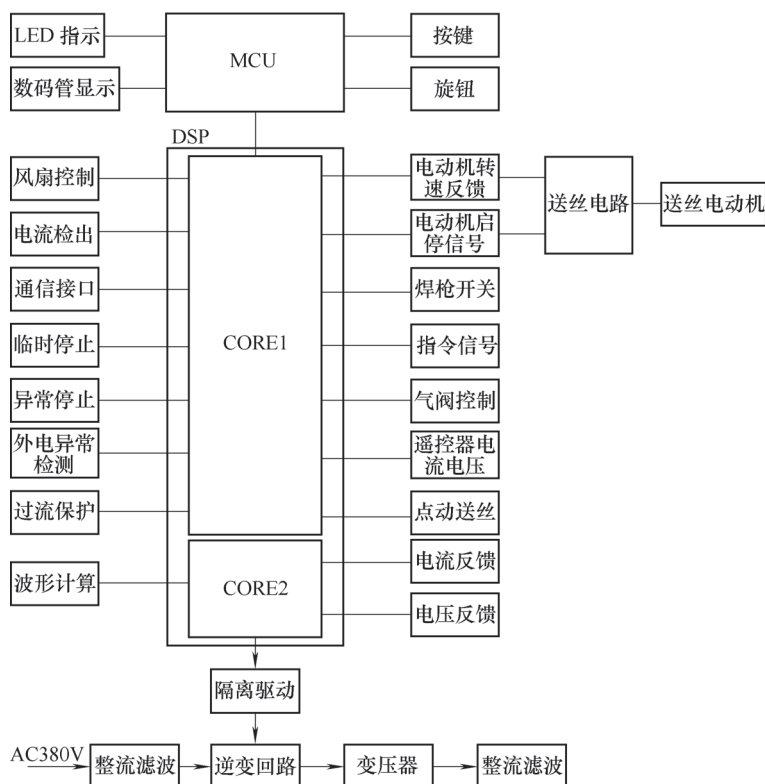


图4 焊机整体控制系统功能框图

分考虑到将来的软件升级以及焊机的功能扩展需要,采用完全模块化的软件系统架构。按照目前主从双MCU系统的设计理念,一般主MCU主要实现用户交互系统和焊接事务管理,而从MCU主要实现具体波形计算和实现PWM输出。

软件的设计是以一定的方法为基础的,面对越来越复杂的软件开发任务,人们提出了各种软件设计的模型。从用户需求和系统要实现的任务功能出发,把大型的软件划分为相对较小的模块。为了减少模块与模块之间的关联性,模块之间的逻辑结构相对独立,无函数的交叉调用,数据传递由指针变量完成,这就是模块化设计的基本思想。模块化设计的核心是模块的独立性,主要包括功能独立性和结构独立性,这使得软件开发的分工易于实现。软件测试是软件开发中的关键环节,基于模块化设计的软件测试模型简单,查错和纠错都易于实现。

考虑到以上内容以及焊机自身的特点,采用模块化的软件设计,以焊接时序为主线划分软件模块功能。其他非焊接时序软件则按照模块功能进行划分、设计,这样软件容易维护,也能被其他焊接设备的开发所共用。

4. 焊接试验

为取得准确的焊接数据,采用机器人进行的实际焊接,在脉冲数据取得完成后,找有经验的焊接技师进行焊接,再一次进行焊接效果的确认和焊接数据的修正,以确保脉冲数据适和手工半自动焊接,焊接波形如图5所示。

脉冲波形图5中,上面的波形是焊接电压,下面的波形是焊接电流,当设定的焊接电流不同时,脉冲波形也会不同。

不锈钢焊接试件如图6所示,所用焊接参数如表1所示。

碳钢焊接试件如图7所示,所用的焊接如表2所示。

由图7可见,焊缝成形美

观,焊缝周围无飞溅颗粒。如果使用短路过渡方法进行焊接,焊缝成形以及飞溅均达不到此效果。这也是近几年脉冲焊机需求增加的主要原因。

5. 应用实例

(1) 空调压缩机“三点焊”工艺 某企业的空调压缩机生产线的焊接工艺采用专机流水

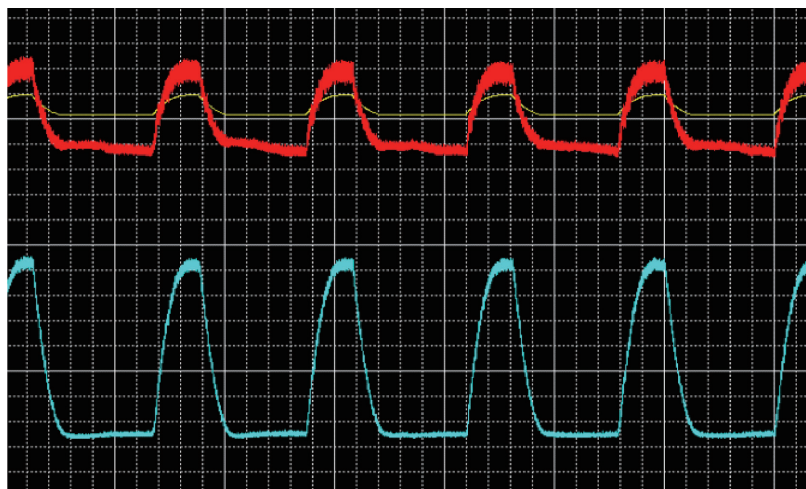


图5 脉冲波形

表1 焊接参数

母材 /mm	焊丝材质 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	干伸长度 /mm	保护气体
SUS304 3.0	SUS308 ϕ 1.2	160	20.2	50	16	98%Ar+2%O ₂

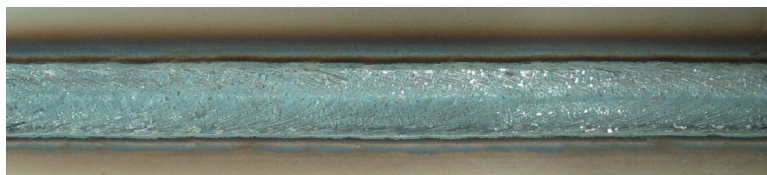


图6 焊接试件(不锈钢)

表2 焊接参数

母材 /mm	焊丝材质 /mm	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /cm·min ⁻¹	干伸长度 /mm	保护气体
4.5	神钢50-6 ϕ 1.2	200	25.2	50	18	80%Ar+20%O ₂

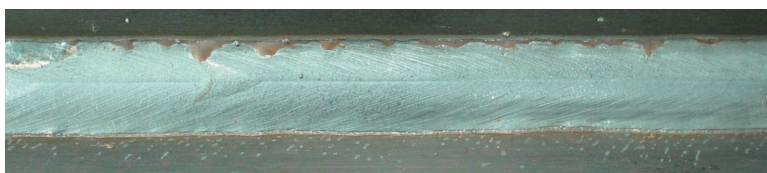


图7 焊接试件(碳钢)

线, MAG气体, 金桥 $\phi 1.2\text{mm}$ 焊丝, 脉冲有, 收弧无。工艺要求焊点熔深为 $1.2\sim 1.8\text{mm}$ 、直径为 $13\sim 15\text{mm}$ 、余高为 $(2\pm 1)\text{mm}$, 工件表面无飞溅, 三台焊机需同时起弧, 允许两次点焊但总计焊接时间不能超过 1s 。

本工艺中的难点是要控制熔深、气孔和废品率问题。在旧工艺中, 采用的是先钻孔之后再焊接, 由三台钻孔机在压缩机外罩上钻 $\phi 5\text{mm}$ 的孔直到内部的定子上, 然后进行焊接。采用这种方法, 虽然起弧成功率高但效率较低, 熔深不一致。在新工艺中, 采用YD-350GL4HGE焊机进行焊接, 先在压缩机外罩(壁厚 4mm)提前冲三个 $\phi 6\text{mm}$ 的孔, 而后直接穿过冲孔在定子(铸铁进行铣加工, 表面光滑有油污)上起弧, 虽然最大程度上提高了效率, 但工艺难度很大。通过新工艺的改进, 产品质量有了很大

的提升, 废品率成功控制住 1% 以内, 产品质量如图8所示。

(2) 高强钢焊接工艺 随着轻量化发展趋势, 高强钢在工程机械、钢结构、船舶及海工等行业得到越来越多的应用, 但高强钢焊接中的电弧参数、MUP(脉冲+直流)特殊工艺开发是焊接难点。在船舶制造业中, 我们采用YD-500GL4HGE(水冷一体机)对不同厚度、不同焊接位置的板材进行手工焊或自动小车、MAG($80\%\text{Ar}+20\%\text{CO}_2$)试验, 考察焊接气孔、夹渣、未

焊透、裂缝、咬边、未熔合等缺陷情况, 试验工艺及结果如表3所示。

6. 结语

采用双核DSP+MCU的控制系统, 使脉冲波形的控制和外部数据的读入分开处理, 提高了系统控制的速度。在双核DSP控制系统的CORE1上, 开发了数字化控制焊接电源系统的整机控制、管理系统, 实现了数字化焊接系统的模块化开发和管理。完成了多参数设置、界面友好的人机交互系统, 实现了整机工作状态的

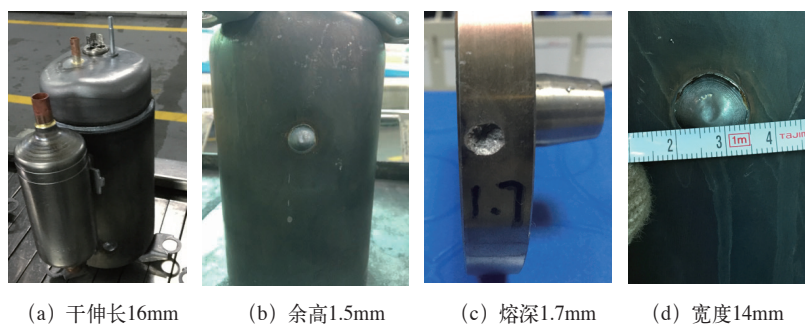


图 8

表3 试验工艺及结果

焊接工艺	板厚/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接极性	焊接速度/ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	焊丝直径/mm	坡口或焊点尺寸	保护气体	效果图
对接立焊	12	120	17.2	直流	0.3	1.2	单边 45°	80%Ar+20%CO ₂	
对接立焊	22	130	18.8	脉冲	0.3	1.2	V形 45° 3mm间隙		
自动平角焊	12	240	26.5	脉冲	0.4~0.5	1.2	焊脚尺寸: 5~6mm		
MUP立角焊	6	90	19.6	MUP频率: 1.3Hz/ 占空比: 48%	—	1.0	焊脚尺寸: 5~6mm		

有效监控，以及系统资源优化配置等。

对脉冲MIG焊接的特点进行了试验、研究，通过软件的实时控制实现了对焊接过程的脉冲波形控制，为了提高响应速度，将焊接参数以数据表的形式存储在MCU中，减少了设备对焊接作业人员的较高要求。

参考文献：

- [1] 姜焕中. 电弧焊及电渣焊[M]. 北京：机械工业出版社，1985.
- [2] 林和明. 基于DSP波控CO₂弧焊电源控制系统的研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2005.

[3] 朱思君. 脉冲MIG软开关逆变焊接电源的研制[J]. 电焊机，2008（5）：26-30.

[4] 韩成功. CO₂焊逆变电源波控的影响因素[J]. 电焊机，2008（5）：34-37.

[5] 李思奇，等. 弧焊电源的智能输入专家系统设计[J]. 电焊机，2011，41(7)：19-22.

[6] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2002.

[7] 张光先. 逆变焊机及数字化控制技术的发展与应用 [J/OL]. <http://xianhan.weldinfo.net/show.phpitemid=1>，2011，（28）：14-18.

[8] 汤兵勇，路林吉. 模糊控制理论与应用技术[M]. 北京：清华大学出版社，2002.

[9] 王锦标. 过程计算机控制[M]. 北京：清华大学出版社，1992.

[10] 王宝，宋永伦. 焊接电弧现象与焊接材料工艺性[M]. 北京：机械工业出版社，2012.

作者简介：王伟，中级工程师。2004年获南开大学电子信息科学与技术专业工学学士学位。2012年获清华大学机械工程系统工程硕士学位。现任唐山松下产业机器有限公司技术部主任工程师。

MW 20170521

唐山松下产业机器有限公司

松下“超级 Active TAWERS” 焊接机器人

TAWERS系列机器人及其最新进化的超级机器人，以汽车制造为主要目标行业，兼顾其他领域，是实现高品质焊接的高端弧焊机器人。它的硬件和软件持续升级进化，可以根据实际需求进行个性开发定制，其集成了松下先进焊接工艺工法、技术和经验。

松下“超级 Active TAWERS” 焊接机器人具备独有的特点：①升级的伺服焊枪：新型伺服焊枪，搭载新型伺服电动机，配合改进的风冷系统，具有更高的负载率，同时更加小巧精确。②短路次数翻倍：改进的波形控制技术，使短路次数增加1倍，电弧更短，焊接速度更快，焊道更加美观。③追求极致的飞溅抑制能力：CO₂ 焊接（焊接速度：100 cm/min），飞溅降低98%；MAG 焊接（焊接速度：100 cm/min），飞溅降低99%；MIG-SUS 焊接（焊接速度：100 cm/min），飞溅降低96%；起

The Arc Welding Robot System
TAWERS



唐山松下产业机器有限公司

弧飞溅大幅降低。④松下超级机器人的HBC工法（热输入平衡技术）HBC 工法是超级机器人新开发的软件，进一步扩大了焊接速度和间隙对应能力，特别适于针对薄板高强钢的焊接。

展位号：N4402

查询编号：1307