

DOI: 10.3901/JME.2008.09.134

基于数字信号处理器的双丝高速焊 数字化协同控制系统*

吴开源 黄石生 李星林 吴水锋
(华南理工大学机械工程学院 广州 510640)

摘要: 为解决双丝高速焊两路脉冲同步、交替、随机三种输出形式的协同控制问题,采用数字信号处理器(Digital signal processor, DSP)建立了基于DSP的双丝高速焊数字化协同控制系统。利用DSP内部集成的脉宽调制(Pulse width modulation, PWM)模块,以软件方式实现了主、从机两台逆变电源PWM信号的直接数字化控制,从而实现主、从机的高频逆变和低频脉冲波形调制。利用单一DSP芯片实现了双丝高速焊同步、交替、随机三种脉冲相位输出形式。阐述数字化协同控制系统的软硬件设计。双丝高速焊试验结果表明,所设计的数字化协同控制系统满足设计要求,焊接过程稳定、焊接速度快、飞溅小、焊缝成型美观,能实现良好的双丝高速焊工艺。

关键词: 数字信号处理器 双丝高速焊 数字化控制 协同控制

中图分类号: TG434.1

DSP Based Digital Synchronic Control System for Twin-wire High Speed Welding

WU Kaiyuan HUANG Shisheng LI Xinglin WU Shuifeng

(School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract: To overcome three different phase status for the waveform output in twin-wire high speed welding process, including synchronization, alternation and random, a DSP based digital synchronic control system for twin-wire high speed welding is presented. By adopting the PWM generation modules integrated in DSP, the digital control of the PWM signal is realized in software mode, so the high frequency inverter and low frequency pulsed waveform modulation of master and slave power supplies are realized. The three different phase status for the waveform output is realized in single chip DSP. The design of hardware and software to the digital synchronic control system is also discussed. The results of welding experiment demonstrate that the developed digital synchronic control system meets the design requirements, and the merits of the twin-wire high speed welding are stable welding process, high welding speed, less splash and perfect weld seam formation.

Key words: Digital signal processor Twin-wire high speed welding Digital control Synchronic control

0 前言

高效焊接技术工艺和装备创新是焊接技术创新的重要支撑之一。为提高焊接速度和生产效率,近年来国外研制和生产了双丝高速焊装备^[1-4]。双丝高速焊两根焊丝的电弧在同一个熔池上燃烧,提高了总的焊接电流,改变了热量分布特点,能向熔池的两侧供应充足的热量和铁水;加之双丝之间又有相互的热作用以及第一根焊丝电弧的热效应和预热

作用,可使第二根焊丝电弧供电节减约30%,从而在焊速较高时,能避免气孔、咬边等缺陷,得到更好的焊接质量。双丝高速焊与普通焊接工艺相比成本减少10%~15%,焊速提高3~5倍(单丝焊速0.3~0.5 m/min),应用前景非常看好。双丝高速焊作为目前最新的一种高效焊接工艺,尤其是与自动化程度非常高的机器人相结合,将对整个制造业起着不可估量的作用。国内在双丝高速焊方面的研究尚处于起步阶段,未有相关产品面市^[5-8]。

弧焊逆变电源采用高频逆变技术,具有体积小、质量轻、高效节能、整机动态响应快,且能够进行精确控制等优点。逆变技术的应用实现了电源

* 国家自然科学基金(50375054)和中国博士后科学基金(20060400745)资助项目。20070829收到初稿,20080509收到修改稿

主电路的数字化,使弧焊电源的性能发生革命性的进步^[9-10]。近年来,随着数字信号处理器(Digital signal processor, DSP)的发展,弧焊电源的控制系统已经由过去的分立元件、模拟集成电路及单片机控制发展为以 DSP 为核心的数字化控制系统,实现了控制系统的数字化^[11]。本文针对双丝高速焊装备,结合逆变技术和 DSP 数字化控制技术,成功研制了基于 DSP 的双丝高速焊数字化协同控制系统。双丝高速焊试验结果表明,该系统满足设计要求,能实现良好的双丝高速焊工艺。

1 双丝高速焊两路脉冲的相位关系

双丝高速焊采用脉冲电弧可以有效降低电弧对熔滴过渡的影响。两路脉冲之间的相位有同步相位、交替相位和随机相位三种相位模式,如图 1 所示。

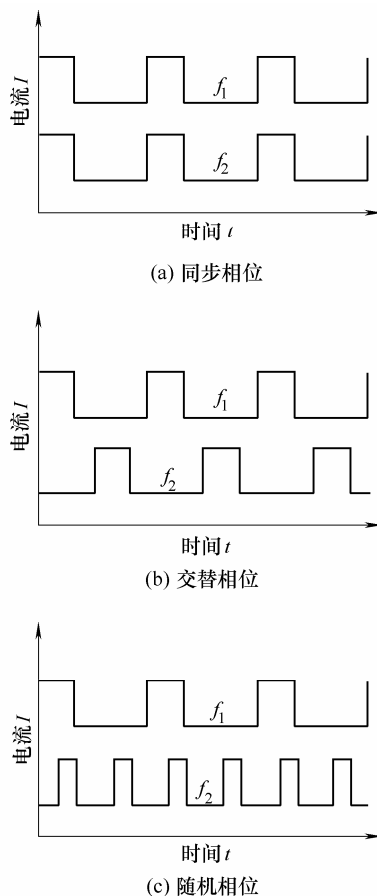


图 1 双丝高速焊脉冲波形的相位关系

(1) 同步相位。电流波形如图 1a 所示,两个电弧同时达到最大值,有利于形成较大的熔深,但飞溅大,仅适于低碳钢的焊接。

(2) 交替相位。电流波形如图 1b 所示,电流波

形相差 180° ,即在某一时刻只有一个电弧处于燃烧状态。当焊接参数设置最佳时,脉冲电弧无短路、无飞溅、实现一脉一滴过渡,每个熔滴大小几乎与焊丝直径相同,焊接过程稳定,减少了合金元素的烧损,电弧的相互作用力只有普通焊接时的 $1/4$ 甚至更低,对熔滴过渡的影响较小,能显著减少焊接飞溅。

(3) 随机相位。电流波形如图 1c 所示,由于脉冲电流到达峰值的时间不同,既能显著降低电弧的作用力,减少飞溅,又能实现较大的熔深,焊接碳钢等较重金属时可以获得更快的焊接速度。

双丝高速焊协同控制系统主要实现上述两路脉冲三种相位输出形式的协同控制。

2 DSP 数字化协同控制系统组成

双丝高速焊由两套脉冲焊接系统经过协同控制组合而成。所设计的双丝高速焊数字化协同控制系统中两台逆变焊接电源设定为主从模式,主机电弧在前,从机电弧在后。主、从机采用脉冲输出方式,采用脉冲电弧可以有效地降低主、从机两电弧对熔滴过渡的影响。主、从机两电源都采用峰值阶段恒流和基值阶段恒流($I-I$ 方式)外特性。峰值阶段电流恒定能得到稳定的喷射过渡并可对熔滴过渡进行精确控制,基值阶段电流恒定不易熄弧。两个焊丝之间的距离为 7 mm ,采用两个相互绝缘的导电嘴,前丝导电嘴保持垂直,后丝导电嘴与前丝导电嘴的夹角为 9° 。后丝导电嘴略微前倾能使熔深减小,熔宽增大,对熔池前方母材的预热增大,这对主机电弧是有利的。

2.1 双丝高速焊主电路高频逆变拓扑

主、从机的主电路采用全桥逆变拓扑,如图 2 所示。图 2 中, $VT_1 \sim VT_4$ 为绝缘栅双极晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT), $VD_1 \sim VD_4$ 为反并联二极管, $C_1 \sim C_4$ 为并联电容, T_1 为高频逆变主变压器, VD_5, VD_6 为次级整流二极管, L_o 为次级输出滤波电感, U_d 为三相整流后的直流电压源, R_o 为输出负载。主电路工作原理为:三相交流 380 V 工频电压经整流滤波后成低纹波的直流电压,然后提供给由 IGBT 和变压器 T_1 组成的逆变电源; VT_1, VT_4 和 VT_2, VT_3 由控制电路提供 PWM 驱动波形而交替导通,再经变压器 T_1 降压后,在变压器 T_1 的次级得到交变的电压;然后再由 VD_5, VD_6 组成的整流电路整流成直流电,经输出电抗器 L_o 滤波提供给负载 R_o 。

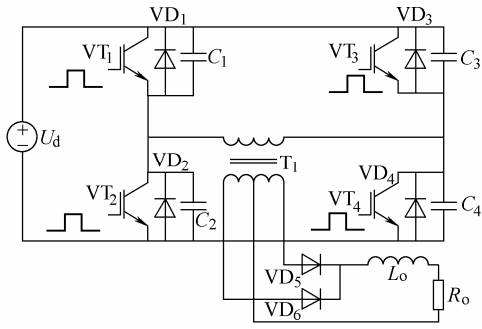


图 2 主电路全桥逆变拓扑原理图

2.2 主、从机低频脉冲波形调制

图 3 为双丝高速焊主、从机低频脉冲波形调制示意图。调制机理如下：三相交流工频 50~60 Hz 经整流滤波变成直流后，借助大功率 IGBT 的开关作用，把直流变成逆变频率为 20~30 kHz 的交流方波，经高频变压器降压后再经过肖特基快速二极管整流输出加以中低频调制而获得 1~1 000 Hz 的矩形波脉冲。中频的调制信号由控制系统提供。即对输出固有频率为 20~30 kHz 的脉冲宽度进行调制，用较低频率的信号，使其脉冲宽度出现一段宽，一段窄。宽的一段为较低频率的脉冲峰值电流，窄的一段为脉冲基值电流^[11]。

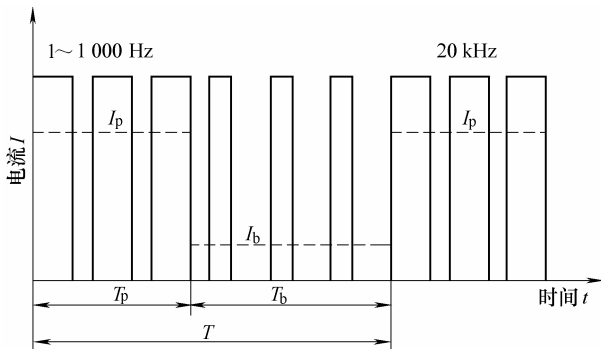


图 3 脉冲波形调制示意图

输出电流、电压有效值为

$$I_f^2 = (1/T) \int_0^T i^2(t) dt \tag{1}$$

$$U_f^2 = (1/T) \int_0^T u^2(t) dt \tag{2}$$

式中 I_f —— 电流有效值
 U_f —— 电压有效值
 T —— 脉冲周期
 $i(t)$ —— 电流瞬时值
 $u(t)$ —— 电压瞬时值

$$I_f^2 = (1/T) \int_0^T i^2(t) dt = (1/T) \int_0^{t_p} i_p^2(t) dt + (1/T) \int_{t_p}^T i_b^2(t) dt = (1/T) [I_p^2 t_p + I_b^2 (T - t_p)] \tag{3}$$

又因占空比 $\delta = t_p/T$ ，其中 t_p 为脉冲峰值时间。则

$$I_f^2 = I_p^2 \delta + I_b^2 (1 - \delta) \tag{4}$$

$$I_f = \sqrt{(I_p^2 - I_b^2) \delta + I_b^2} \tag{5}$$

$$U_f = \sqrt{(U_p^2 - U_b^2) \delta + U_b^2} \tag{6}$$

由此可见，输出电流、电压不仅与脉冲峰值电流 I_p 、峰值电压 U_p 、基值电流 I_b 、基值电压 U_b 有关，而且还与脉冲占空比 δ 有关。

2.3 数字化协同控制系统硬件组成

本文构建的基于 DSP 的双丝高速焊数字化协同控制系统，以美国 TI 公司专门为数字化控制而推出的 16 位定点数字信号处理器 TMS320LF2407A 为核心控制芯片^[12]。应用单块 DSP 芯片内部集成的 16 路 10 位模数转换 (Analog to digital converter, ADC) 模块和 16 路脉宽调制 (Pulse width modulation, PWM) 模块实现了直接脉冲宽度的数字化调制，配合有效的输出信号检测、运算处理和算法，实现双丝高速焊主、从机两路脉冲波形调制输出和两路之间的相位控制，如图 4 所示。

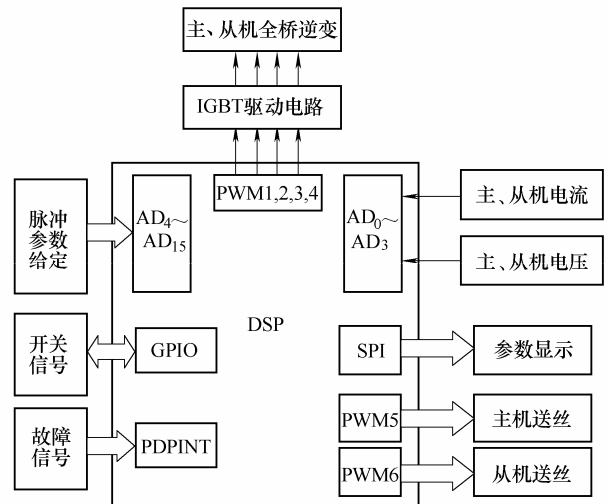


图 4 双丝高速焊 DSP 控制系统框图

图 4 中，AD₀~AD₃ 用于主、从机的电流电压反馈信号模数转换输入，AD₄~AD₁₅ 用于主、从机脉冲参数的给定信号模数转换输入，4 路 PWM 用于主、从机全桥逆变主回路，通用输入/输出接口 (General purpose input/output, GPIO) 用于焊枪开关、送丝开关、送气开关等开关量信号输入，串行外设接口 (Serial peripheral interface, SPI) 用于焊接参数的实时显示，另外两路 PWM 信号用于主、从机送丝机构的送丝调速控制，PDPINT 引脚用于过流、过压、欠压及过热保护故障信号的输入。

2.4 数字化协同控制系统软件组成

软件设计是实现控制系统的核心。基于 DSP 的

数字化控制系统的优势之一就是其软件设计的灵活性和更改的方便性。在相同硬件的支持下可以充分发挥软件编程灵活、升级方便、维护简单、易于实现的特长,通过更改软件可以方便地实现各种特性的输出,以满足不同的焊接工艺要求,通过 DSP 上的 JTAG 接口可直接对 DSP 的 Flash 存储器更改程序,充分体现了数字化控制的优越性。

2.4.1 基于软件方式的数字 PWM 信号生成

DSP 要实现对双丝高速焊的数字化协同控制,关键是解决数字 PWM 的生成。PWM 控制器有两种:一种是传统的模拟控制器,如 SG3525、UC3879;另一种是数字控制器。传统的模拟控制器是基于硬件用三角波和控制信号进行比较产生 PWM,而数字控制器则是在软件程序里采用定时器和数字比较器实现 PWM,其中定时器用来产生锯齿波或对称三角波,数字比较器决定输出信号的高低电平,数字 PWM 有其独特之处。

DSP 的 PWM 产生可在程序里采用定时器和数字比较器实现,其中定时器用来产生锯齿波或对称三角波,数字比较器决定输出信号的高低电平。

TMS320LF2407A 包括两组事件管理器(Event manager, EV) EVA 和 EVB 模块,每个事件管理器模块有 3 个全比较单元,每个全比较单元带有可编程死区发生器,每个全比较单元以定时器 1(EVA 模块)或 3(EVB 模块)为时基,可输出 6 路带可编程死区时间的 PWM 脉冲,对 PWM 频率的变动可根据需要改变 PWM 的载波频率,在每个周期内和以后可根据需要改变占空比,通过将定时器 1 或 3 设置为不同计数模式,可选择全比较单元输出非对称 PWM 波形、对称 PWM 波形或空间矢量 PWM 波形^[13]。

当定时器工作在连续增计数模式时可产生非对称 PWM 波形,产生原理如图 5 所示,其高频载波为锯齿波。非对称 PWM 的产生原理是:定时器从 0 开始递增计数到设定的计数周期,然后重新从 0 开始计数,如此反复。在 DSP 程序里设定一个比较值,当定时器的计数值和比较值相等时,设定为高有效的 PWM 口输出高电平,设定为低有效的 PWM 口输出低电平;当定时器计数到周期值时,高有效的一路输出低电平,低有效的一路输出高电平。这样就产生了适用于全桥弧焊逆变电源的 PWM 信号。另外,主、从机送丝机构的两路送丝调速控制信号也由相同方式产生。

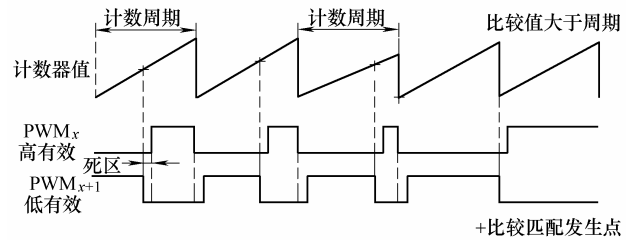


图 5 数字 PWM 波形的产生原理

为了避免全桥逆变电源同一桥臂上下管的同时导通,两路互补的 PWM 信号必须设置死区时间,死区时间被插入到一个功率器件关闭和另一个功率器件开启之间。通过设置 DSP 的死区控制寄存器实现 0~16 μs 的死区时间。PWM 频率由定时器的定时周期和计数模式决定,计算公式如下

$$f_c = \frac{1}{nT_c k} \quad (7)$$

式中, n 为周期寄存器的时间常数, T_c 为计时器时基周期, k 在连续增计数模式时取 1。

DSP 产生用于主、从机全桥逆变的 20 kHz PWM 波形如图 6 所示(图 6 中为 35% 占空比)。最大占空比为 45%, 死区时间为 2.5 μs。

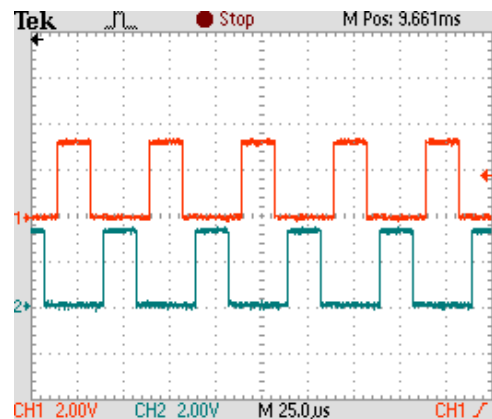


图 6 DSP 产生的 PWM 波形

2.4.2 数字化协同控制系统软件设计

协同控制系统的软件采用模块化程序设计,根据控制系统完成的功能,分为不同的功能模块。软件部分要完成主、从机两台电源之间的协同控制及各自的焊接电流、电弧电压、峰值时间、基值时间以及送丝速度等焊接参数的设定,实现对反馈采样信号的处理,对焊接过程的实时监控、焊接参数的动态显示以及对焊接时序进行设置等功能。

根据以上要求,本软件主要包括四大部分,即主、从机的焊前准备部分,引弧部分,焊接过程实时控制部分以及收弧部分。主、从机的各部分程序通过协同控制实现时序控制。每一大部分里根据实际功能又可分成几个小部分,如焊接过程控制又分为电流 PI 控制、电弧电压的控制等。综上所述,软

件主要包括系统初始化程序、主程序、中断服务子程序、控制算法子程序组成。

系统初始化程序包括 DSP 系统初始化子程序、A/D 初始化子程序、定时器初始化子程序、I/O 口初始化子程序、PWM 初始化子程序。主程序主要由引弧段、基值段、峰值段和收弧段四部分组成。中断服务子程序主要是 TMS320LF2407A 的定时器 T_2 和 T_4 的周期中断服务子程序和故障处理子程序。 T_2 周期中断服务子程序用于主机峰值时间和基值时间的定时, T_4 周期中断服务子程序用于从机峰值时间和基值时间的定时。 T_4 周期中断子程序根据双丝高速焊两路脉冲同步相位、交替相位和随机相位三种相位模式切换的要求, 通过以 T_2 计数为参考点对 T_4 延时启动计数实现从机与主机之间的相位调节, 达到主、从机数字化协同控制的目的。故障处理中断服务子程序采用优先级最高的中断, 当过流、过压、欠压、过热等故障发生时立即进入故障中断处理。控制算法程序包括电流 PI 控制算法子程序、电压控制算法子程序、电流电压信号处理子程序。

实际上, 双丝高速焊过程中除了两台电源输出脉冲电流之间需要协同控制之外, 在引弧、收弧以及焊接过程中, 两个焊接系统的送丝机构、焊接行走平台和送气等都需要协同控制。

基于 DSP 的双丝高速焊数字化协同控制系统程序工作原理为: 系统初始化后并允许焊接时, 进入引弧程序, 本文双丝高速焊设计成主、从机同时引弧方式, 它包括时序控制(送气、送丝等)、慢速送丝引弧。引弧成功后进入正常的焊接过程。由协同控制保证主、从机两路脉冲输出之间的同步、交替、随机三种相位输出, 同时程序进入主、从机基值和峰值脉冲循环阶段: 在基值阶段进行基值电流恒流控制, 当基值时间到时转向峰值阶段; 在峰值阶段进行峰值电流恒流控制, 当峰值时间到时又进入基值阶段。在脉冲循环过程中, 不断检查焊接停止信号, 一旦接到停焊指令, 程序进入收弧阶段。本文主、从机是同时进行收弧控制, 最后主、从机停止焊接并循环等待新的焊接开始信号。

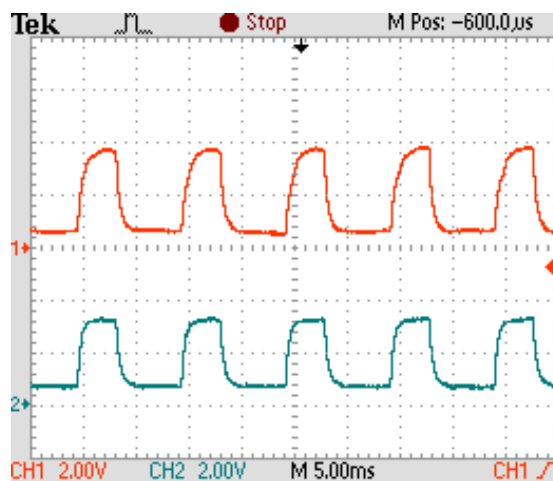
3 双丝高速焊试验结果

双丝高速焊试验所采用的焊接条件为: 4 mm 低碳钢板, 堆焊, 焊丝 H08Mn2SiA, 焊丝直径 1.2 mm, 保护气 80%Ar+20%CO₂, 气流量 25 L/min, 焊接速度 2 m/min。

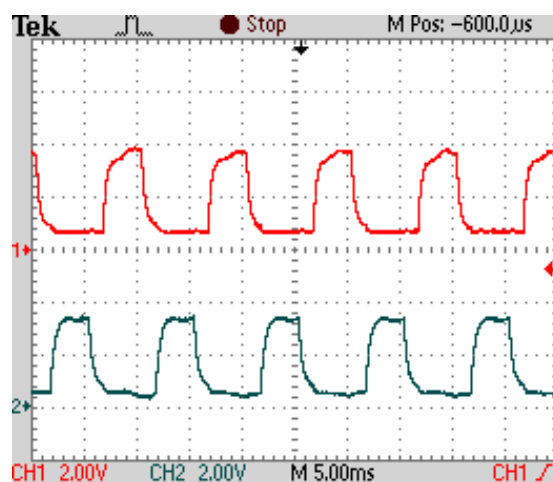
图 7a 为同步相位输出的主、从机焊接电流波形, 焊接参数见表 1。

图 7b 为交替相位输出的主、从机焊接电流波形, 焊接参数见表 2。

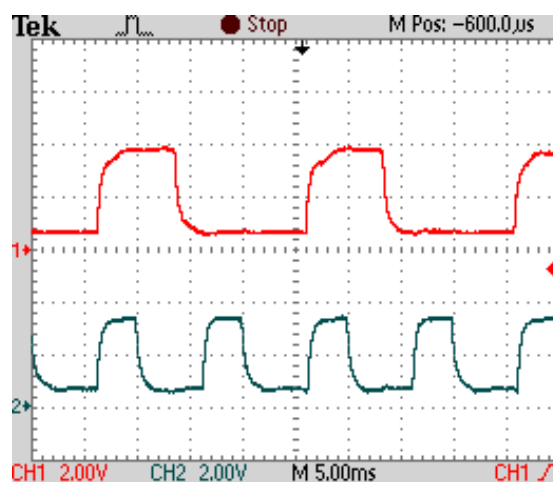
图 7c 为随机相位输出的主、从机焊接电流波形, 焊接参数见表 3。



(a) 同步相位输出的主、从机电流波形



(b) 交替相位输出的主、从机电流波形



(c) 随机相位输出的主、从机电流波形

图 7 三种相位关系输出电流波形

表1 同步相位焊接参数表

参数	峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	频率 f/Hz	占空比 $\delta/\%$	实测电流 I/A	实测电压 U/V
主机	380	70	100	40	193	23.8
从机	340	70	100	40	176	22.7

表2 交替相位焊接参数表

参数	峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	频率 f/Hz	占空比 $\delta/\%$	实测电流 I/A	实测电压 U/V
主机	380	70	100	40	195	23.8
从机	340	70	100	40	177	22.6

表3 随机相位焊接参数表

参数	峰值电流 I_p/A	基值电流 I_b/A	频率 f/Hz	占空比 $\delta/\%$	实测电流 I/A	实测电压 U/V
主机	380	70	50	40	194	23.9
从机	340	70	100	40	179	22.9

图7中波形1为主机电流波形, 波形2为从机电流波形。三种相位输出主、从机的实测电流和实测电压值与式(5)、(6)理论计算值相近。

波形是反映焊接过程稳定性和熔滴过渡过程的重要标志。图7所示焊接时波形比较整齐规则。说明焊接过程中无短路、断弧现象, 焊接过程稳定, 声音柔和, 焊接速度快、飞溅小。由此可知, 基于DSP的双丝高速焊数字化协同控制系统很好地实现了双丝高速焊过程中主、从机同步、交替和随机三种相位模式的协同控制。

图8为三种相位输出对应的堆焊焊缝实物图, 从图8中可以看出焊缝成型良好。



(a) 同步相位输出 (28 cm)



(b) 交替相位输出 (39 cm)



(c) 随机相位输出 (46 cm)

图8 三种相位关系输出堆焊焊缝实物图

4 结论

(1) DSP的应用大大简化了双丝高速焊控制系统的硬件设计, 可通过软件实现同步、交替和随机三种脉冲相位的切换输出。

(2) 应用所研制的双丝高速焊装备进行双丝高速焊试验, 试验结果表明DSP数字化控制性能满足双丝高速焊的控制要求, 焊接过程稳定、焊接速度快、熔敷率高, 焊缝成型良好。

参 考 文 献

- [1] KEN Michine, STEPHEN Blackman. Twin-wire GMAW: Process characteristics and applications[J]. Welding Journal, 1999, 78 (5): 31-34.
- [2] NADZAM J. Tandem GMAW offers quality weld deposits, high travel speeds[J]. Welding Design and Fabrication, 2003, 71 (11): 28-31.
- [3] HIMMELBAUER K. Time twin digital: top deposition rate thanks to two wire electrodes[EB/OL]. [2003205202]. http://www.fronius.com.
- [4] HACKL H. Faster with two wire electrode: metal inert-gas welding of aluminum materials [C]//Exploiting Advances in Arc Welding Technology. Abington, Cambridge, UK: TWI, 1998: 201-208.
- [5] 陈强. 弧焊技术发展现状[C]//中国机械工程学会焊接学会, 高效化国际论坛论文集. 北京: 北京工业大学出版社, 2002: 109-110.
CHEN Qiang. Recent progress in arc welding technology [C]//Chinese Welding Society of CMES, Proceedings of High-productivity Welding Forum. Beijing: Beijing Polytechnic University Press, 2002: 109-110.
- [6] 孟庆国, 方洪渊, 徐文立, 等. 双丝焊热源模型[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 110-113.
MENG Qingguo, FANG Hongyuan, XU Wenli, et al. Heat source model for twin wire welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 110-113.
- [7] 黄石生, 蒋晓明, 薛家祥, 等. 双丝高速软开关脉冲MAG焊装备[J]. 焊接学报, 2007, 28(3): 5-8.
HUANG Shisheng, JIANG Xiaoming, XUE Jiexiang, et al. High-speed soft-switching twin-wire pulsed MAG welding equipment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(3): 5-8.
- [8] 李桓, 梁秀娟, 李幸呈, 等. 高效双丝MIG/MAG脉冲焊系统及工艺. 焊接, 2005, 51(10): 24-27.
LI Huan, LIANG Xiujuan, LI Xingcheng, et al. The system and technology of high efficiency double wire MIG/MAG pulse welding[J]. Welding & Joining, 2005, 51(10): 24-27.
- [9] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

- HUANG Shisheng. Arc welding power source and its digital control[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [10] 刘嘉, 卢振洋, 殷树言, 等. 电焊机的数字化[J]. 焊接学报, 2002, 23(1): 88-92.
- LIU Jia, LU Zhenyang, YIN Shuyan, et al. The digitalization of welding inverter[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 88-92.
- [11] 吴开源. 基于 DSP 的 GMAW-P 焊逆变电源数字化智能控制系统的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- WU Kaiyuan. Study on DSP based digital intelligent control system for GMAW-P inverter[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005.
- [12] TMS320LF/LC240xA DSP controllers system and peripherals reference guide (Rev.C) [R]. Texas Instruments Inc. , 2006.
- [13] Generating a PWM signal modulated by an analog input using the TMS320F240 EVM[R]. Texas Instruments Inc. , 2000.
-
- 作者简介: 吴开源, 男, 1978 年出生, 博士后。主要研究方向为机电一体化技术、弧焊逆变电源及其数字化智能控制。发表论文 18 篇。
E-mail: wuky@scut.edu.cn