

基于 DSP 的 GMAW—P 焊数字化控制系统

吴开源， 黄石生， 李星林， 柯利涛
(华南理工大学 机械工程学院, 广州 510640)



吴开源

摘 要: 针对 GMAW—P 焊的脉冲波形调制, 采用 16 位定点数字信号处理器 TMS320LF2407A 建立了基于 DSP 的 GMAW—P 焊数字化控制系统。利用 DSP 内部集成的 PWM 产生模块, 通过选择合适的工作方式实现了 PWM 信号的直接数字化控制, 从而实现了 GMAW—P 焊高频逆变和低频脉冲波形调制, 提高了控制系统的工作稳定性和可靠性, 阐述了控制系统的软件设计。结果表明, 所设计的数字化控制系统能实现良好的 GMAW—P 焊接工艺, 焊接过程稳定, 获得的焊缝质量好, 成形美观, 充分显示了 DSP 数字化控制的优点。

关键词: 数字信号处理器 DSP; GMAW—P 焊; 数字化控制

中图分类号: TG434.5 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2007)11—041—04

0 序 言

弧焊逆变电源采用高频逆变技术, 具有体积小、重量轻、高效节能、控制周期短、整机动态响应快、能够进行精确控制等优势, 逆变技术的应用实现了电源主电路的数字化, 由此使弧焊电源的性能发生革命性的进步^[1,2]。但弧焊逆变电源的上述优势在模拟控制系统或单片机控制系统中没能得到充分的发挥。近年来, 随着数字信号处理器 DSP (digital signal processor) 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、单片机控制系统发展到以 DSP 为核心的数字化控制系统, 实现控制系统的数字化。国内外弧焊电源的最新技术趋势是逆变技术和数字化控制技术相结合, 即弧焊逆变电源的数字化控制技术, 使原有的弧焊逆变电源更可靠, 性能更好, 功能更全。GMAW—P 焊 (脉冲 MIG/MAG 焊) 技术集高效优质和自动化于一体, 在生产上愈来愈受到重视, 特别是对焊接质量和精度要求比较高的机器人焊接场合更是如此。GMAW—P 焊传统的控制方式主要以模拟电路或单片机为主, 它们存在的固有缺点限制了 GMAW—P 焊的进一步发展。根据目前 GMAW—P 焊电源及其控制存在的问题, 针对 GMAW—P 焊脉冲波形调制, 结合数字化控制技术,

提出了基于 DSP 的 GMAW—P 焊数字化控制系统。

1 GMAW—P 焊脉冲波形调制

GMAW—P 焊参数主要包括峰值电流 I_p 、基值电流 I_b 、峰值时间 T_p 和基值时间 T_b 等, 如图 1 所示^[3]。

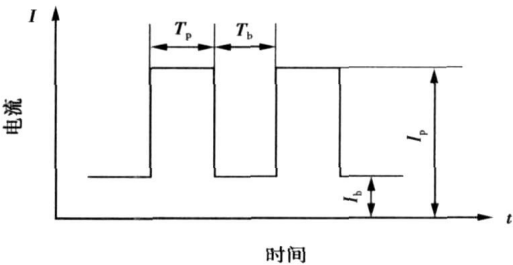


图 1 GMAW—P 焊的脉冲参数
Fig 1 Pulsed parameter of GMAW-P

图 2 为中低频脉冲波形调制示意图。其脉冲波形的调制机理为: 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。从本质上来说,

收稿日期: 2007—01—25
基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20060400745); 国家自然科学基金资助项目(50375054)

它是对输出固有频率为 20~30 kHz 的脉冲宽度进行调制,即用较低频率的信号,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^[4]。

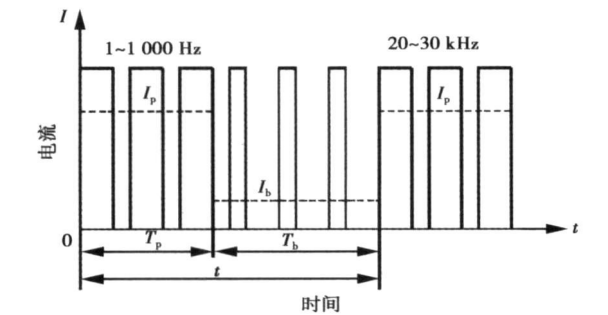


图 2 脉冲波形调制示意图

Fig 2 Block diagram of pulsed waveform modulation

其输出电流、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 为电流有效值; U_f 为电压有效值; T 为脉冲周期(脉冲频率 $f = 1/T$); $i(t)$ 为电流瞬时值; $u(t)$ 为电压瞬时值。

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

式中: $i_p(t)$ 为峰值电流瞬时值; $i_b(t)$ 为基值电流瞬时值。

占空比 $\delta = T_p / T$ (T_p 为脉冲峰值时间), 得出

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

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

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

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 和基值电压 U_b 有关, 而且还与脉冲占空比有关。

2 DSP 数字化控制系统

数字化控制系统以 DSP 作为控制核心, 主要由 DSP 最小应用系统及外围电路、IGBT 驱动电路、送丝系统、电流电压反馈电路、故障保护电路、参数给定、显示电路和通讯接口等组成, 如图 3 所示。

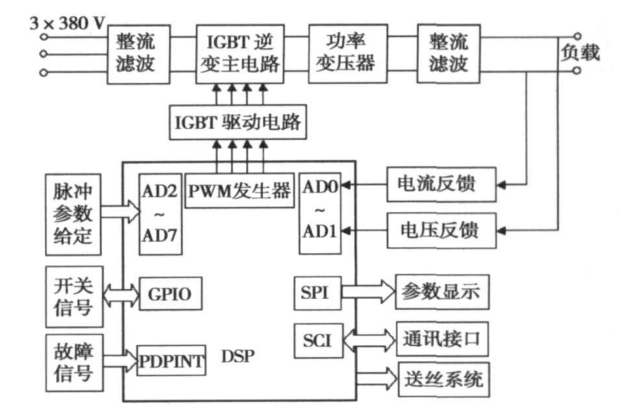


图 3 DSP 数字化控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of DSP based digital control system

所构建的基于 DSP 的 GMAW - P 焊数字化控制系统以美国 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。应用 DSP 内部集成的 AD 转换模块和 PWM 模块用软件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、运算处理和控制算法, 实现了 GMAW - P 焊的脉冲波形调制输出控制。

2.1 基于 DSP 的数字 PWM 信号生成

DSP 要实现 GMAW - P 焊的数字化控制, 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 PWM 控制器, 如 SG3525, UC3879; 另一种是数字 PWM 控制器。模拟 PWM 是基于硬件用三角波和控制信号进行比较产生 PWM, 而数字 PWM 控制器则在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。

TMS320LF2407A 包括两个事件管理器模块 EVA 和 EVB, 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, 每个全比较单元可输出 2 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 PWM 周期内和以后可根据需要改变 PWM 的占空比, 通过设置定时器 1 或 3 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。

当定时器工作在连续增计数模式时可产生非对称 PWM 波形, 非对称 PWM 波形生成原理如图 4a 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。

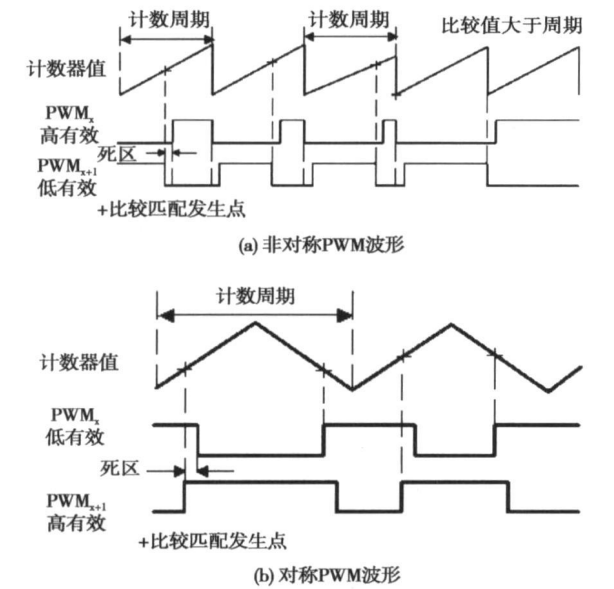


图 4 数字 PWM 波形的产生原理

Fig. 4 Block diagram of digital PWM waveform generation

当定时器工作在连续增/减计数模式时可产生对称 PWM 波形, 对称 PWM 波形生成原理如图 4b 所示, 其高频载波为对称三角波。对称 PWM 的产生原理是: 定时器从 0 开始递增计数到周期值, 接着从周期值递减计数到 0, 然后开始下一个周期。对于高有效的一路 PWM 输出口, 当计数值上升到比较值时输出高电平, 当计数值下降到比较值时, 则输出低电平; 低有效的另一路与之互补, 这样就产生了适用于全桥弧焊逆变的 PWM 信号。

在同样的开关频率条件下, 非对称数字 PWM 的分辨率高于对称数字 PWM 的分辨率, 因此逆变电源控制采用了更高分辨率的非对称数字 PWM。

DSP 产生的两路互补相差 180° 数字 PWM 如图 5 所示。图 5a 表示 PWM 占空比从小变大, 对应脉冲波形调制的基值到峰值阶段的切换; 图 5b 表示 PWM 占空比从大变小, 对应脉冲波形调制的峰值到基值阶段的切换, 从而完成了脉冲波形的调制。PWM 的频率为 20 kHz。PWM 信号经 IGBT 驱动电路后用于驱动全桥逆变的 4 个 IGBT 开关管。

2.2 控制系统软件设计

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

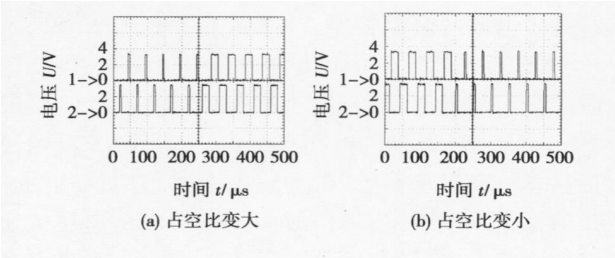


图 5 DSP 产生的 PWM 波形
Fig. 5 PWM waveform based on DSP

的支持下可以充分发挥软件的编程灵活、升级方便、维护简单、实现容易的特长, 通过更改软件可以很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 接口可以直接对 DSP 的 FLASH 存储器更改程序, 充分体现了数字化控制的优越性。

控制系统的软件采用模块化程序设计, 软件部分要完成电弧电压、焊接电流、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以及焊接参数的动态显示, 对焊接时序进行设置等功能。根据这些功能要求, 控制系统软件主要由四大部分, 即焊前准备部分、引弧部分、焊接过程实时控制部分以及收弧部分。每一大部分里根据实际功能要求又可分成几小部分, 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, 整个控制系统的软件主要包括系统初始化程序、主程序、中断服务子程序和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定时器 T1 和 T2 的周期中断服务子程序和故障处理子程序。故障处理中断服务子程序采用优先级最高的 INT1 中断, T1 周期中断服务子程序用于弧压的采集和 A/D 转换器的启动, 属于 INT2 中断, T2 周期中断服务子程序主要用于峰值时间和基值时间的定时, 属于 INT3 中断。

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和电流电压信号处理子程序。

基于 DSP 的 GMAW—P 焊数字化控制系统程序的工作原理为: 系统初始化后并允许焊接时, 程序进入引弧程序, 它包括时序控制 (送气、送丝等), 慢速送丝引弧, 当电流大于一定值, 并延长一段时间后, 程序进入基值和峰值脉冲循环阶段, 在基值阶段进

行基值电流的恒流控制,当基值时间到或者基值电压小于基值给定电压阈值时转向峰值阶段;在峰值阶段进行峰值电流的恒流控制,在进入峰值阶段 2.5 ms后将采集到的峰值弧压与给定值比较,通过控制算法求出基值时间,通过改变基值时间达到弧长的稳定性控制,当峰值时间到或者峰值电压大于峰值给定电压阈值时又进入基值阶段。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,程序进入收弧控制阶段,最后停止焊接并循环等待新的焊枪开关信号。

3 试验结果

试验所采用的焊接工艺参数为 2 mm 低碳钢板堆焊,焊接速度 70 cm/min,送丝速度 5.0 m/min,焊丝 H08Mn2SiA,直径 $\phi 1.2$ mm,保护气体为 80% Ar+20%CO₂,气体流量 20 L/min,峰值电流 320 A,峰值电压 32 V,峰值时间 7.5 ms,基值电流 40 A,基值电压 24 V,基值时间 12.5 ms,脉冲频率 50 Hz,脉冲占空比 37.5%。图 6 为试验中测得的电流、电压波形图。

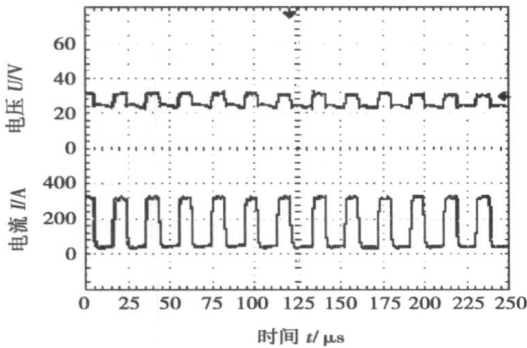


图 6 GMAW - P 焊输出电流电压波形
Fig 6 Waveform of current and voltage for GMAW-P

波形是反映焊接过程稳定性和熔滴过渡过程的重要标志。从图 6 可知焊接时波形比较整齐规则。焊接过程中无短路、断弧现象,焊接过程稳定,声音

柔和。图 7 为相应的焊缝外观图,焊缝成形良好。

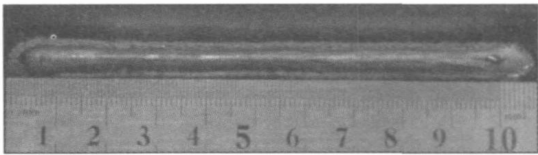


图 7 焊缝外观形貌
Fig 7 Photograph of weld

4 结 论

- (1) 利用 DSP 内部集成的 PWM 模块,可以方便可靠地实现用于全桥逆变的数字 PWM 直接数字化调制和控制。
- (2) DSP 的应用大大简化了控制系统的硬件设计。控制方案集中体现在程序软件上,硬件资源配置确定后,只需要通过修改软件,可实时、在线更换不同的控制算法软件。
- (3) 所设计的基于 DSP 的 GMAW - P 焊数字化控制系统能很好地实现稳定的 GMAW - P 焊接过程,焊缝成形良好。

参考文献:

[1] 黄石生. 新型弧焊电源及其智能控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[2] 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.

[3] Pan Jiluan, Ou Zhiming, Wu Zhiqiang, *et al.* Pulsed inert gas metal arc welding with feed back control[J]. Schweissen und Schneiden, 1985, 37(4): 54—55.

[4] 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.

作者简介: 吴开源, 男, 1978 年出生, 博士。主要从事机电一体化技术、弧焊逆变电源及其数字化智能控制的研究工作。发表论文 16 篇。
Email: wuky@scut.edu.cn

hardness of laser cladding layer is within 600—700 HV0.2 and much higher than that of the matrix.

Key words: $\text{Ti}(\text{C}_{0.3}\text{N}_{0.7})$ particle; TiN particle; in-situ reaction; laser cladding

Soldering technique of bronzes excavated from Jiuliandun tomb in Hubei province JIN Pujun¹, QIN Yin¹, HU Yali², WANG Changsun³ (1. Department of Scientific and Technical History and Archaeology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Museum of Hubei Province, Wuhan 430060, China; 3. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). p37—40

Abstract: The soldering technique of Bronzes Excavated from Jiuliandun Tomb of Warring States in Chinese Hubei Province was investigated. According to naked-eye observation, it was concluded the welded splice used mortise-tenons with smooth and crinkly soldered joint by thermal processing and that the pouring gates were designed at the bottom or the side wall. The solders were investigated using diffraction, X-ray fluorescence, scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray detection and differential scanning calorimetry. Results show that solders were composed of Pb-Sn alloys with average mixture ratio about Pb73 and Sn27 by XRF analysis and the phase was as-cast microstructure observed by SEM, which indicated ancient people poured melting solder to connect different bronze parts, and the melting point of some solders existing in 180—186 °C by DSC, which meant they had low work temperature and the aim to produce them just were used as bronze sacrificial ware.

Key words: solder; soldering history; Pb-Sn alloy; traditional craft

DSP based digital control system for GMAW-P WU Kaiyuan, HUANG Shisheng, LI Xinglin, KE Litao (School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China). p41—44

Abstract: For the pulsed waveform modulation of GMAW-P (gas metal arc welding-pulsed arc), a novel DSP based digital control system for GMAW-P was presented, which was established based on 16-bit fixed point digital signal processor (DSP) TMS320LF2407A. By adopting the PWM generation modules integrated in DSP and selecting their reasonable working mode, the digital control of PWM signal was realized, so the high frequency inverter and low frequency pulsed waveform modulation of GMAW-P were realized, and the stability and reliability of control system were improved. The design of software to the control system was also discussed. Experimental results show that the developed digital control system has the ability to accomplish the excellent welding process and appearance of the weld is good, the merit of DSP based digital control system is fully demonstrated.

Key words: digital signal processor; gas metal arc welding-pulsed arc; digital control

Inverse design of spot welding nugget sizes and current parameters TANG Xinxin, SHAN Ping, LUO Zhen, YE Mao (College of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin

300072, China). p45—48

Abstract: In order to made the physical dimension of nuggets meet the needs of mechanical properties, the inverse design of welded joint is introduced. Based on the mechanical properties, the qualified nugget sizes are determined. According to these, the numerical model is created. Through simulated calculation, the current parameters can be determined. Three kinds of regular shape nugget are used to research the relation between the mechanical properties and nugget sizes. Based on the stress graph, the diameter of nugget and the penetration rate varying with the tension stress, the nugget shapes are evaluated, the one which the stress distribution is the most evenly and the stress concentration is the most little is selected. According to the physical dimension of the nugget, the current parameter curve used for forming nugget is simulated by finite element simulate method.

Key words: resistant spot welding; nugget design; numerical simulation

Diode laser soldering for chip resistor component HAN Zongjie¹, XUE Songbai¹, ZHANG Xin¹, WANG Jianxin¹, FEI Xiaojian^{1,2}, YU Shenglin^{1,3} (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Guangzhou CSSC-Ocean-Gws Marine Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510727, China; 3. The 14th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China). p49—52

Abstract: Diode soldering experiments of rectangular chip resistor components were carried out using Sn-Ag-Cu lead-free solder, the mechanical properties of the micro-joints were studied by STR-1000 micro-joints tester. The results indicate that as the laser soldering time is fixed, the shear force of chip resistor micro-joints becomes larger with the increase of laser output power, and the shear force is the largest at a optimum power. With the increase of laser soldering time, the optimum power decrease, and 1s is the best laser soldering time. Competitive experiments results show mechanical properties of chip resistor micro-joints soldered with laser soldering system is better than that of chip resistor micro-joints soldered with IR reflow soldering method.

Key words: rectangular chip resistor; Sn-Ag-Cu lead-free solder; diode laser soldering; mechanical properties of micro-joints

Transition behavior of welding HAZ microstructure of 2205 duplex stainless steel XIONG Qingren¹, HUO Chunyong¹, LI Weiwei¹, ZHANG Jianxun² (1. Tubular Goods Research Center of CNPC, Xi'an 710065, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710043, China). p53—57

Abstract: Thermal simulation technology and modern material microstructure analysis method are adopted to research the effect of cooling time $t_{8/5}$ and $t_{12/8}$ on the simulated HAZ (heat-affected zone) microstructure transition in 2205 duplex stainless steel. The results indicate that keeping $t_{12/8}$ constant and changing $t_{8/5}$, the simulated HAZ microstructure and phase proportion almost keep same. So it is not suitable to this material to use $t_{8/5}$ as the parameter to investigate