

全数字化多功能焊接电源平台

沙德尚¹, 廖晓钟¹, 单立军², 鲍云杰²

(1. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081;

2. 北京时代科技股份有限公司, 北京 100085)

摘 要: 建立了包括焊条电弧焊、氩弧、短路过渡、单脉冲和双脉冲在内的五种工艺的焊接电源平台, 该平台由焊接电源本体、送丝电机及冷却水箱构成。分析了它的工作原理并阐述了主要功能。重点讨论了短路过渡、单脉冲和双脉冲 MIG/MAG 焊的工艺全数字实现原理及过程, 进行了额定 400 A 的焊接电源平台试验。结果表明, 采用全数字控制方法实现多种气体保护焊接工艺是完全可行的, 在不改变硬件电路情况下, 仅仅改变软件就可以满足不同焊接工艺需求, 且焊接性能优良。

关键词: 焊接电源; 全数字控制; 气体保护焊

中图分类号: TG434 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2009)08-0025-04



沙德尚

0 序 言

逆变焊机控制策略主要分为以下三种: (1) 专用 PWM(脉冲宽度调制) 芯片; (2) MCU(微控制器) + 专用 PWM 芯片; (3) 全数字化控制。方法(3)之所以称为全数字控制, 因为 DSP(数字信号处理器)可以完成以下功能: 输出电压和电流采样、焊接工艺数字化实现、数字化 PWM、送丝电机控制数字化、人机交互数字化和数字化通信等。采用全数字化控制以后, 具有以下优点: (1) 多功能; (2) 提高焊接工艺, 控制策略灵活, 更加精确控制熔滴过渡能量; (3) 焊接材料可扩充性; (4) 参数一致性好; (5) 智能化, 一元化调整方便, 实现焊机“傻瓜化”操作。

世界上主要焊机厂商都推出了自己的全数字焊接电源, 如 Fronius 公司 TPS 系列, Kemppi 公司的 PRO 系列, ESAB 的 Aristol 系列等。其中 Fronius 的 TPS 系列电源主控为 Simenses 的 C167 单片机和 AD 的 DSP, 送丝机为单片机控制, 各种焊接工艺包括 PWM 都是采用数字实现。主要缺点是 DSP 的主频较低, 所以四个微处理器, 电路构成复杂, 面板没有考虑焊接材料扩充需求。Kemppi 的 PRO 采用 80C196 分别控制送丝电机和电源, 面板与送丝电机控制板直接连接, 调节比较方便, 但是不适合遥控,

硬件平台略显陈旧。国内的全数字化多功能焊接电源的研究处于起步阶段, 功能、数据库数量和焊接适应性和国外相比, 还有一定差距。有的以单片机作为控制核心, 完成给定切换, PWM 仍采用模拟控制^[1]。虽然有的电源部分采用全数字控制, 电机部分还采用模拟实现, 焊接功能单一^[2,3]。大部分国内企业在低端市场打价格战, 不注重基础研发。国内高端焊接电源市场一直被国外产品所垄断, 尤其是在军工制造、航空航天、高速列车制造等高性能金属连接场合, 因此设计具有自主知识产权的全数字化多功能焊接电源非常迫切。

1 平台构成及工作原理

采用两个高速 DSP 和一片 MCU 组成全数字化焊接电源控制系统, 其中一块 DSP 完成焊接电源主电路即 DC/DC 的全数字软开关控制, 另一片 DSP 完成送丝电机的全数字控制, 而 MCU 用于人机界面管理。三个微处理器采用数字通信, 组成一焊接电源平台, 平台由四个部分组成, 即焊接电源、全数字控制送丝电机、人机界面和水箱。

其中焊接电源采用 DSP 控制, 其主要功能如下: 输出电压和电流的数字化采样, 数字化软开关 PWM、数字化 PI 运算、各种焊接工艺模块的数字化实现、数字化采样保护和故障显示。送丝电机采用另外一个 DSP 进行全数字化控制。传统气保焊的送丝电机采用端电压负反馈和电枢电流的正反馈控

制, 调速精度、参数一致性差。一元化协同控制中, 采用送丝速度优先, 数据库中的参数要和送丝速度匹配, 而精确的送丝速度是实现一元化控制的重要前提^[4]。所提出的多功能焊接电源中, 采用高精度编码器实时反馈送丝电机速度, 编码器输出两路相差 90° 的高频脉冲方波, 该方波频率与转速成正比, 转速方向由两路信号的相位决定。DSP 捕获端中断得到送丝电机的转速的大小和方向。根据设定速度, 构成数字调节转速闭环, 为了增加调速系统动态响应能力, 加入电流闭环, 这样控制中自动限制了送丝机的电流, 保护了电机不被烧毁。人机界面主要完成焊接工艺选择、材料、丝径、焊接工艺参数、2/4 步参数选择, 其中显示采用 OLED+LED 的混合。为了方便用户使用, 该平台还具有 99 个可以存储和调用的焊接通道, 用户可以建立自己个性化的焊接参数。同时在焊接过程中显示实际焊接电压、电流和故障信息。面板的水箱冷却气保焊枪, 它和电源之间相互通信, 电源在焊枪温度高时启动水冷, 同时水箱的工作和故障状态传给电源主控制, 一旦出现故障, 焊接电源发出指令, 停止水箱运行。平台主体为焊接电源、送丝电机和人机界面三个部分, 每一个部分都独立地采用一个微处理器进行独立控制, 它们之间采用数字通信, 共享信息, 其中主电源为主机, 其它两个部分为从机, 构成主从通信架构。

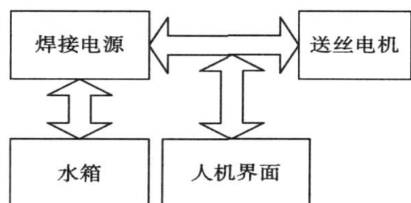


图 1 焊接电源平台构成

Fig. 1 Configuration of welding power platform

多功能焊接电源之所以能够在同一个焊接硬件平台上实现, 其原因在于虽然焊接工艺方法不同, 但从控制的角度, 确是相通的。焊条电弧焊和氩弧焊是恒流特性, 只有一个电流单环控制就可以了。而短路过渡、单脉冲和双脉冲焊为准恒压特性, 在电流环的基础上增加恒压环。之所以称之为恒压, 是因为: (1) 气体保护焊输出电压和电流波形中含有丰富的交流成分; (2) 从输出电压的平均值来看, 也不是完全恒压的, 溶滴的过渡频率和瞬态波形时刻变化。但是气体保护焊控制环节的最内环, 都是恒流环, 这是在同一个硬件平台上实现多功能化的重要前提。开关型变换器无论恒压还是恒流, 其本质是不断地调节占空比以实现系统的稳定闭环。为了降低

焊接电源全桥 DC-DC 的开关损耗, 提高系统变换效率和可靠性, 采用全数字移相软开关技术, 直接采用 DSP 的事件管理器, 通过适当的中断控制, 产生四路移相全桥 PWM 信号, 不需要专用的 PWM 芯片。数字调节器采用改进的数字 PID 控制, 在误差比较大的时候, 加大比例作用, 提高系统动态性能, 误差比较小的时候, 削弱积分作用, 抑制超调。

2 气保焊工艺的全数字化实现

所有的控制算法均采用 TI 的 TMS320F2407 型 DSP 完成, 在设计的全数字化多功能焊接电源平台 Synergic400 上进行了焊接试验。焊条电弧焊和氩弧焊工艺过程非常简单, 都是恒流特性, 氩弧焊的给定电流根据起弧、焊接和收弧过程要有所不同, 而焊条电弧焊要对输出电压进行判断, 短路时, 加大电流推力给定, 强行退出短路状态。下面重点讨论短路过渡、单脉冲和双脉冲的数字化工艺实现过程。

短路过渡工艺目前主要问题: 飞溅大、成形差。目前无论是采用模拟控制还是数字控制多采用电压外环—电流内环的双闭环控制结构^[1-6], 多数的控制方法是在短路阶段采用恒流控制, 而在燃弧阶段采用电压电流双闭环控制。在短路阶段为了抑制小桥爆断所产生的飞溅, 多采用多折线的方式给定。这些方法, 人为地割裂了熔滴的过渡过程, 首先对于短路瞬间和燃弧瞬间进行判断, 然后实施不同的控制策略。在系统外界环境如干深长变化, 人手抖动的情况下, 系统容易不稳定^[5,9]。对于飞溅的控制, 目前主要集中在短路初期和缩径期的能量抑制, 而在试验中发现, 不能完全抛开燃弧段的能量控制而仅仅在短路期间采用给定电流抑制手段去减小飞溅, 短路过渡本质上是一种被动能量控制, 被动能量控制是无法提前预知熔滴何时短路, 何时燃弧。因为短路过渡过程中, 溶池的波动、干伸长变化、母材高低不平等情况非常复杂, 短路过渡的随机性很大。根据短路过渡的特点, 提出了类全程恒压的新形波控思路, 即不在人为地区分短路和燃弧状态以施加恒压或恒流的控制策略。采用数字策略, 可以实现恒压运算的变参数控制, 在短路期间, 电压调节器的调节速度放慢, 实现调节器输出的缓慢变化, 在燃弧期间采用另外一组调节器, 调节速度加快, 实现弧长闭环控制。调节示意图如图 2 所示, 随着送丝速度增加, 短路期间电压环调节作用也逐渐加强, 如果调节作用弱, 即 di/dt 太小, 如图 2 中的曲线 C 所示, 短路峰值电流过小, 没有足够的峰值电流促使形成短路小桥, 会造成焊丝固体短路而破坏焊接过程。

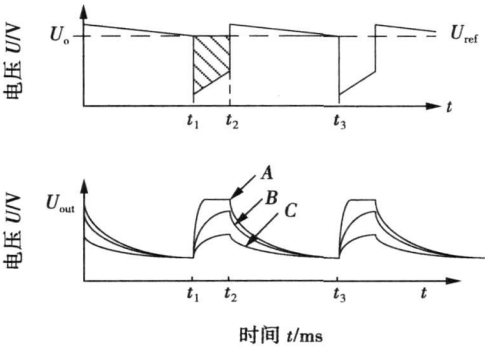


图 2 短路过渡波控思路

Fig 2 Waveform control strategy of short circuiting transfer

对于熔化极脉冲及双脉冲焊,采用 U/I 和 I/I 混合模式调节方法. 在小电流时采用 I/I 控制模式,也就是脉冲峰值和基值电流均采用恒流控制,以提高小电流下熔滴过渡的均匀性和稳定性. 为了实现恒定弧长控制,采用了实时干伸长补偿技术,即根据实际电流和设定焊接电流相比,得到干伸长变化趋势,如果干伸长增加,则反映弧长变化的电压给定增加,反之亦然. 而在中、大电流时采用峰值电压恒定控制方法,以实现等弧长控制. 双脉冲本质上是在单脉冲焊基础上实现低频调制,所以送丝电机要周期性地变速送丝,焊接电流平均值和送丝速度同步变化,单脉冲的弧长调节思路同样应用于双脉冲.

3 气保焊工艺的全数字化实现

根据以上提出的思路,搭建了全数字化多功能焊接电源平台 synergic400. 具体如图 3 所示,中间部分为焊接电源,焊接电源的上面为人机界面和送丝电机系统,下面为冷却水箱. 其中显示为 OLED 和 LED 混合,该平台已于 2007 年上海和 2008 年北京埃森焊接展览会中展出并进行实际焊接表演.



图 3 全数字化焊接电源平台 synergic400

Fig. 3 Full digital welding platform synergic400

试验结果如图 4~图 6 所示,图 4a 为短路过渡焊接电压和电流波形,其中保护气体为 100%CO₂,焊丝为 1.2 mm 碳钢,送丝速度为 3.2 m/min,焊接平均电流和电压分别是 135 A 和 18.5 V. 由该图可知,燃弧电流的最小值也大于 100 A,而爆断的峰值电流最大也就 260 A,短路瞬间的初期电流也得到了有效抑制. 采用所提出的准恒压控制思路,形成了在小电流焊接下的自然双折线过渡形式,其中转折点系统自动调整,不需系统开环给出. 图 4b 为焊接该参数下焊缝外观,焊接过程中飞溅小,焊道熔合良好. 图 5a 为单脉冲焊波形,送丝速度为 3.5 m/min,焊丝为 1.2 mm 铝镁合金 5356,焊接时平均输出电流和电压为 59 A/16.8 V,脉冲频率 36 Hz 左右. 焊接试验结果如图 5b 所示,焊缝纹理清晰、致密、边沿齐整、飞溅小,熔合良好. 图 6 为双脉冲焊试验结果,其中保护气体为 100%Ar,板厚为 2 mm,焊丝同样为 1.2 mm 铝镁 5356,在低频率脉冲区间,电机速度为 3.0 m/min,而在高频脉冲段,电机速度为 4.8 m/min,低频脉动频率为 2 Hz. 不需任何摆动,焊缝自动成鱼鳞纹,焊缝周围没有飞溅,焊接过程稳定.

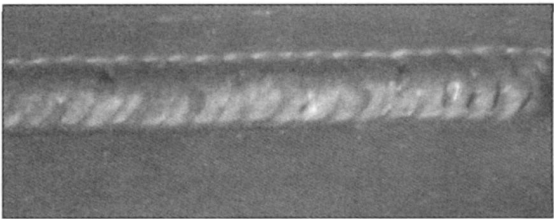
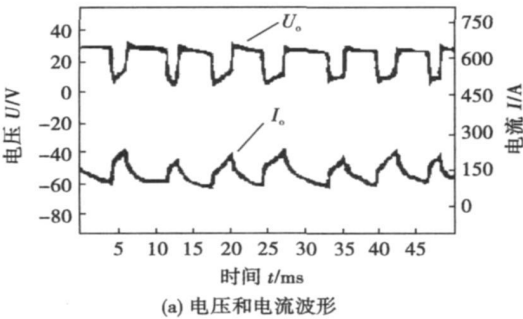


图 4 短路过渡试验结果

Fig 4 Experimental results of short circuit transfer welding

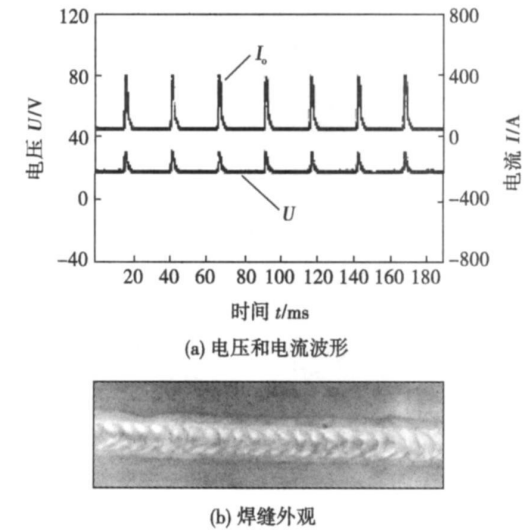


图 5 单脉冲焊试验结果

Fig 5 Experimental results of single pulse welding

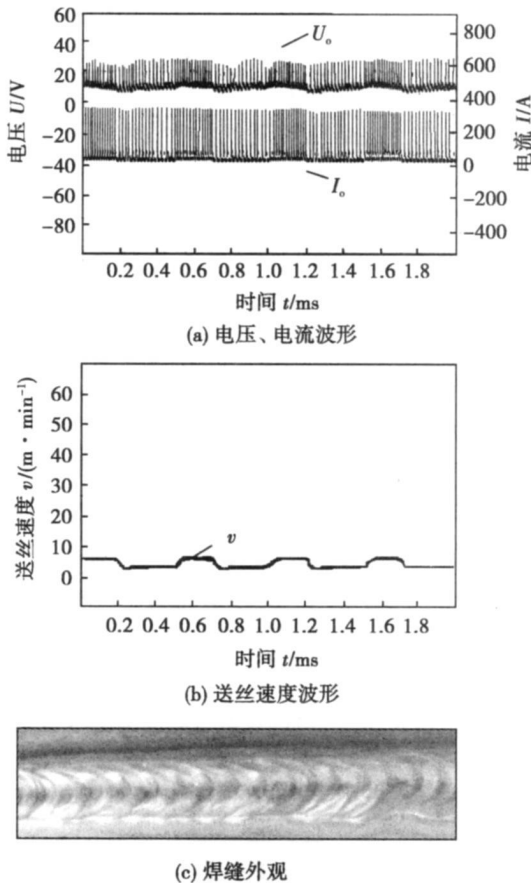


图 6 双脉冲焊试验

Fig. 6 Experimental results of double pulse welding

熔滴能量控制精确.

4 结 论

(1) 在一个平台上可以实现五种不同的焊接工艺, 不改变硬件, 通过修改软件可以改变焊接电源输出外特性以满足不同焊接工艺熔滴过渡的需求, 全数字控制非常灵活.

(2) 采用数字化波形控制, 短路过渡熔滴过渡均匀, 熔深好, 脉冲焊时焊缝成形美观.

参考文献:

[1] 丁京柱, 黄鹏飞, 殷树言, 等. 双闭环单片机波控 CO₂ 焊机系统 [J]. 焊接学报, 2000 21(3): 47—50.
Ding Jingzhu, Huang Pengfei, Yin Shunyan, *et al.* Double closed loop inverter CO₂ welding system with microprocessor based waveform control [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 47—50.

[2] 孙 广, 何建萍, 白日晖, 等. DSP 波控逆变 CO₂ 焊接电源 [J]. 焊接学报, 2004, 25(4): 87—89.
Sun Guang, He Jianping, Bai Rihui, *et al.* Inverter CO₂ arc welding power source with DSP-based waveform control [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2004, 25(3): 87—89.

[3] 冯曰海, 卢振洋, 刘 嘉, 等. 全数字控制 CO₂ 焊 Matlab/Simulink 焊建模与仿真 [J]. 焊接学报, 2005, 26(7): 27—32.
Feng Yuehai, Lu Zhenyang, Liu Jia, *et al.* Modelling and Simulation of full digital controlled CO₂ arc welding system based on Matlab/Simulink [J]. Transaction of the China Welding Institution, 2005, 26 (7): 27—32.

[4] Gho J S, Chae Y M, Kim K S, *et al.* A study on the effect of wire feeding controller in inverter arc welding machine [C] // IEEE PEDS' 99, July Hongkong: 394—398.

[5] Chae Y M, Jang Y, Jovanovic M M, *et al.* A novel mixed current and voltage control scheme for inverter arc welding machines [C] // IEEE — APEC, Anaheim Canada, 2001: 308—313.

[6] Chae Y M, Gho J S, Mok H S, *et al.* A new instantaneous output current control method for inverter arc welding machine [C] // IEEE — PESC, Charlston, USA, 1999: 521—526.

作者简介: 沙德尚, 男, 1977 年出生, 博士, 讲师. 主要从事电力电子与电机控制技术在工业中的应用研究. 已发表论文 20 余篇.

Email: shadeshang@hit.edu.cn

na, Taiyuan 030051, China). p 17—20

Abstract: The metal transfer behavior of meso-spray transfer is studied under self-adapting control of meso-spray in pulse MIG welding of aluminum. The main acting forces against a droplet and the important role of surface tension are analyzed by the waves testing and high speed camera of short circuit meso-spray and spray from different parameters in pulse MIG welding. The results of experiment demonstrate that a self-adapting process should be accurately controlled for the narrow working range of meso-spray transfer in pulse MIG welding of aluminum, and the proposed control parameters can make the arc running within the narrow range and the special droplet transfer process stable.

Key words: aluminum; pulse MIG welding; self-adapting control; droplet transfer; high speed camera

Pre-processing software for three dimensional simulation and prediction of weld solidification cracks DONG Zhibo¹, ZHAN Xiaohong², WEI Yanhong^{1,2}, LU Yafeng³, GUO Ping³, YANG Yongfu³ (1. State Key Laboratory of Advanced Welding Technology Production, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Department of Material Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Titanium Alloy Institute, Northwest Institute For Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China). p 21—24

Abstract: A software consisted of pre-processing, post-processing and solidification cracks predicting subsystems is developed, which can simulate and predict the weld solidification cracks with three dimensional FEM. The pre-processing helps users to choose the workpiece, to input the thermal-mechanical properties of materials and welding parameters, to set boundary conditions, and to automatically generate command streams of MSC.Marc to create process files for final FEM calculation. Furthermore, system can transfer the process files to software package of MSC.Marc to complete the calculation of thermal, strain and stress distributions in background. Therefore, the simulated results are prepared for the post-processing.

Key words: solidification cracking; pre-processing; simulation and prediction

Full digitalized welding power platform with multi-function purposes SHA Deshang¹, LIAO Xiaozhong¹, SHAN Lijun², BAO Yunjie² (1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Beijing Time Technology Company Ltd, Beijing 100085, China). p 25—28

Abstract: A welding platform used in shielded metal arc welding, TIG, CO₂ short-circuit GMAW, single pulsed MIG/MAG and double pulsed MIG/MAG welding is established. The platform is composed of welding power, wire feeder and water cooler, which operation principles and main function are analyzed. The full digital control theories of short circuiting transfer, single pulsed and double pulsed MIG/MAG are explained in detail. Experimental results of a 400 A prototype show that it is feasible to apply different welding

methods only by changing software and without changing any hardware, and the welding performance is also perfect.

Key words: welding power; full digital control; gas metal arc welding

Influence of nano-Al₂O₃ suspension concentration on forming of plasma spraying coating FAN Xiangfang, QIU Changjun, CHEN Yong (College of Mechanical Engineering, Nanhua University, Hengyang 421001, China). p 29—32

Abstract: The nano-alumina coating was prepared by suspension plasma spraying under atmospheric conditions, and the effect of nano-Al₂O₃ suspension concentration on forming of plasma spraying coating was studied by scanning electron microscopy and theory analyses. The results show that the concentration of nano-Al₂O₃ suspension has a significant influence on the size of droplet, the enthalpy needed for spraying suspension, the roughness of coatings surface and the microstructure of coatings. Low concentration of the suspension is beneficial for fine nanostructures coatings, which means low spraying efficiency. The optimized concentration of nano-alumina suspension is between 5% (wt) and 10% (wt).

Key words: nano-alumina; suspension concentration; plasma spraying; coating forming

Effect of alloying elements on intermediate temperature filler metal in stepped welding of 6063 aluminum alloy ZHU hong^{1,2}, XUE Songbai¹, SHENG Zhong¹ (1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. The 14th Research Institute, China Electronic Technology Group Corporation, Nanjing 210013, China). p 33—36

Abstract: The contents of Si, Cu, Ni and RE are changed by using orthogonal test in order to study the effect of the content changes on the melting points, spreading property and shear strength of Al-Si-Cu-Ni-RE, and the microstructure of filler metal is analyzed by SEM and EDS. It is indicated that the spreading area is mainly affected by the composition of filler metal and temperature; the DSC results show that Cu has the most important influence on the melting points filler metal, which decreases sharply with the Cu content increasing, and then Ni, Si and RE come second; the black brittle phase θ (CuAl₂) and the macrosegregation flocculent phase go against the performance of joint, but the matrix phase α (Al) with face-centered cubic solid solution and the Si phase with conglobulation make the performance of joint better.

Key words: orthogonal test; spreading property; melting point; microstructure

Effect of zinc coating on arc heating behavior for joining Al and zinc coated steel by welding-brazing process ZHANG Hongtao¹, FENG Jicai², HE Peng², ZHAO Hongyun¹ (1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China; 2. School of Materials Science and