

# 脉冲变极性弧焊逆变电源数字化控制系统

朱志明, 周雪珍, 符策健, 纪圣儒

(清华大学先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 在采用数字信号处理器(DSP)DSP56F805 构建基于双 DSP 的脉冲变极性弧焊逆变电源全数字化控制系统的基础上, 针对数字化脉宽调制(PWM)控制脉冲存在的脉冲宽度保持和延迟对电源输出动态响应和稳态精度等控制性能的影响, 提出了基于电源输出电感电阻(LR)负载模型的电流预估计算法, 进而对简单数字比例积分微分(PID)控制算法进行了修正。同时, 系统通过对电流/电压检测信号的预处理、A/D 采样与 PWM 同步、数字滤波等措施有效地提高了系统的抗干扰性能。脉冲变极性输出特性控制试验验证了基于电流预估计的数字 PID 控制算法的正确性和有效性。

**关键词:** 弧焊逆变电源; 数字信号处理器; 数字比例积分微分控制; 电流预估计; 脉冲变极性输出

中图分类号: TG434 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)07-005-05



朱志明

## 0 序 言

随着铝镁合金在航空航天、船舶和汽车等领域的广泛应用, 其焊接技术受到越来越多的关注, 并获得了长足的发展。基于逆变控制的变极性方波 TIG 焊接技术在保证阴极清理效果的同时, 可有效降低钨极烧损, 提高焊接效率。为了保证变极性焊接电弧的稳定性, 提高电源系统的效率, 研究工作者对电流的换向特性<sup>[1]</sup>、功率变换电路拓扑<sup>[2,3]</sup>和稳弧措施<sup>[3,4]</sup>等进行了深入研究。同时, 基于微控制器(MCU)和数字信号处理器(DSP)的数字化控制技术<sup>[5-7]</sup>也得到了越来越多的应用。将变极性电流波形进一步进行低频脉冲调制不仅可以减少气孔, 控制焊缝成形, 提高焊缝的抗拉强度和断后伸长率<sup>[8]</sup>, 而且可以适应铝镁合金薄板的焊接, 拓展其适用范围。

反馈信号处理技术是控制系统构成的核心, 其性能的优劣直接影响电源系统的动态响应、稳态精度和工作稳定性。基于 MCU 或 DSP 的数字化控制技术便于实现弧焊逆变电源的柔性 and 复杂输出控制, 但与模拟控制相比, 其实时性稍逊一筹, 存在数字化脉宽调制(PWM)控制脉冲的保持和延迟问题, 从而影响电源系统的动态响应性能和稳态精度。

作者对以数字信号处理器 DSP56F805 为核心构建的脉冲变极性弧焊逆变电源数字化控制系统, 在

采用合理的电压/电流信号检测与处理技术、保证电源系统工作稳定可靠的基础上, 提出了基于电源输出电感电阻(LR)负载模型, 通过电流预估计实现电源输出特性控制的数字比例积分微分(PID)控制算法, 以克服数字 PWM 控制脉冲的保持和延迟对电源输出的影响, 并与低频脉冲调制和变极性控制配合实现电源的脉冲变极性输出。

## 1 系统总体结构

脉冲变极性弧焊逆变电源系统的总体结构如图 1 所示。其功率变换由输入整流滤波、一次全桥逆变和二次半桥逆变等电路组成, 数字化控制的核心为基于数字信号处理器 DSP56F805 的双 DSP 系统。其中, DSP1 为主控制芯片, 用于实现人机交互(键盘输入和液晶显示)、高频引弧控制和焊枪状态检测等; DSP2 为从控制芯片, 主要对输出电压/电流信号进行采集, 根据用户设定的焊接参数进行数字化 PID 控制算法的运算, 实现电源的脉冲变极性输出控制, 并实时监控电源的工作状态。DSP1 与 DSP2 之间的数据交换通过双口随机存储器(RAM) IDT70V261S35 实现。

## 2 反馈控制算法

一般来说, 弧焊电源的输出滤波电容很小, 主要用于维持稳定的空载电压, 在电弧燃烧的过程中, 电

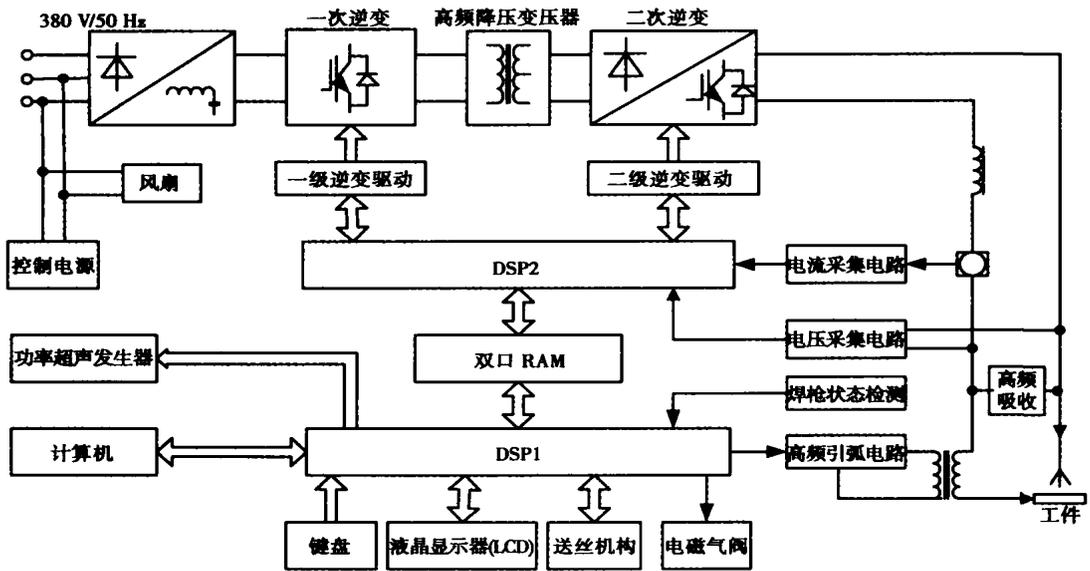


图 1 系统总体结构

Fig. 1 General system configuration

容的影响可忽略, 输出回路可简化为简单的电感滤波, 其传递函数为  $R_L / (L_S + R_L)$ , 其中,  $R_L$  为等效输出负载;  $L_S$  为输出滤波电感。考虑到数字 PWM 控制脉冲存在脉冲保持和一个周期的延迟, 因此其控制系统框图如图 2 所示。图中, PWM 单元为零阶保持器;  $H_u(s)$  为电压反馈通道传递函数;  $H_i(s)$  为电流反馈通道传递函数。输出电流 / 电压经过  $H_i(s)$ ,  $H_u(s)$  变换后, 经 A/D 采样分别得到离散电流 / 电压信号; 将离散电流 / 电压信号和输出电流给定值送入基于电流预估计的数字 PID 控制器, 然后将其运算结果送入 PWM 单元, 从而得到所需的 PWM 控制脉冲。

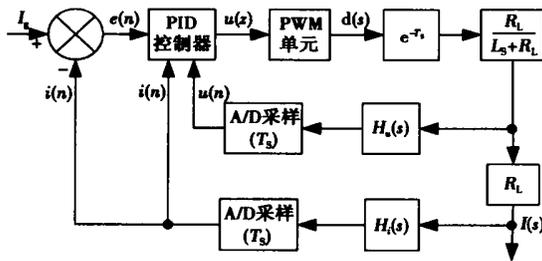


图 2 数字控制系统

Fig. 2 Digital control system

文中采用增量式数字 PID 控制算法, 即

$$\begin{cases} \Delta u_n = K_P(e_n - e_{n-1}) + K_I e_n + K_D(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}), \\ u_n = \Delta u_n + u_{n-1}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_n$  为第  $n$  个控制周期的输出;  $e_n$  为第  $n$  个控制周期的误差;  $K_P$  为比例系数;  $K_I$  为积分系数;  $K_D$  为微分系数。

增量式数字 PID 无积分饱和问题, 具有良好的鲁棒性和控制精度。但在数字 PWM 模式中, 根据当前的采样值, 由数字 PID 控制算法确定的 PWM 脉冲宽度要延迟到下一个 PWM 重载时机才能在数字 PWM 中输出, 也就是当前的 PWM 脉冲宽度在下一个重载时机之前保持不变。因此, 控制上存在零阶保持和一个 PWM 控制周期的延迟, 它将影响控制系统的动态特性和稳态精度。若采用简单的增量式数字 PID 控制算法, 则不能克服由数字 PWM 模式引入的时间延迟问题。因此, 作者基于简化的输出 LR 负载模型, 从克服脉冲延迟影响的角度, 提出了通过对输出电流进行预估计的方法, 来修正时间延迟对输出控制精度的影响。

图 3 所示为输出电流预估计原理图。图中, 电流处于上升而趋于稳定的过程, 细实线表示实际的输出电流, 粗实线表示 DSP 的采样电流。该方法的基本思想为, 利用当前占空比  $D_{n-1}$ , 电流  $i_{n-1}$ , 电压  $u_{n-1}$  估计出下一个控制周期的电流  $i_n$  大小, 并将它

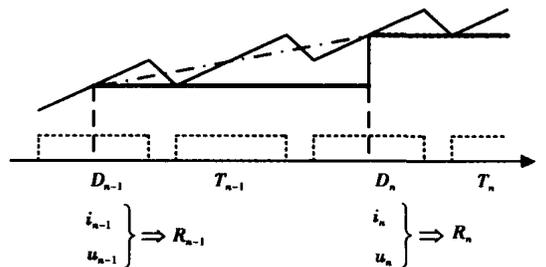


图 3 输出电流预估计原理

Fig. 3 Pre-estimating principle of output current

作为数字 PID 控制算法的测量值计算误差, 从而实现数字 PWM 时间延迟的补偿控制。

假设第  $n$  个控制周期  $T_n$  期间的等效输出负载为  $R_n = u_n / i_n \approx R_{n-1} = u_{n-1} / i_{n-1}$ , 功率降压变压器二次侧的输出方波交流峰值电压为  $U_S$ 。已知  $T_{n-1}$  周期的参数  $D_{n-1}$ ,  $u_{n-1}$  和  $i_{n-1}$ , 则  $T_n$  周期的电流  $i_n$  可表示为  $f(D_{n-1}, u_{n-1}, i_{n-1})$ 。

周期  $T_n$  期间的平均电流变化满足

$$L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R_{n-1} = D_{n-1}U_S, \quad i_0 = i_{n-1}. \quad (2)$$

求解微分方程(2), 并令  $t = T_s$ , 则

$$i_n = \frac{D_{n-1}U_S}{R_{n-1}} + (i_{n-1} - \frac{D_{n-1}U_S}{R_{n-1}})e^{-\frac{R_{n-1}}{L}T_s}. \quad (3)$$

对  $e^{-\frac{R_{n-1}}{L}T_s}$  进行傅里叶展开, 并取一阶近似, 即  $e^{-\frac{R_{n-1}}{L}T_s} \approx 1 - \frac{R_{n-1}}{L}T_s$  那么第  $n$  个控制周期的电流大小为

$$i_n = i_{n-1} + \frac{(D_{n-1}U_S - u_{n-1})T_s}{L} - \frac{D_{n-1}U_S}{R_{n-1}}. \quad (4)$$

由此可以确定计算第  $n$  个控制周期的脉冲宽度时的电流误差信号  $e_n = I_g - i_n$ , 从而减小数字 PWM 时间延迟对输出控制精度的影响。其程序实现流程如图 4 所示, 在计算等效输出负载时, 电压、电流采样值通过比例系数  $G_{UAD}$ ,  $G_{IAD}$  转换为实际电压、电流值。

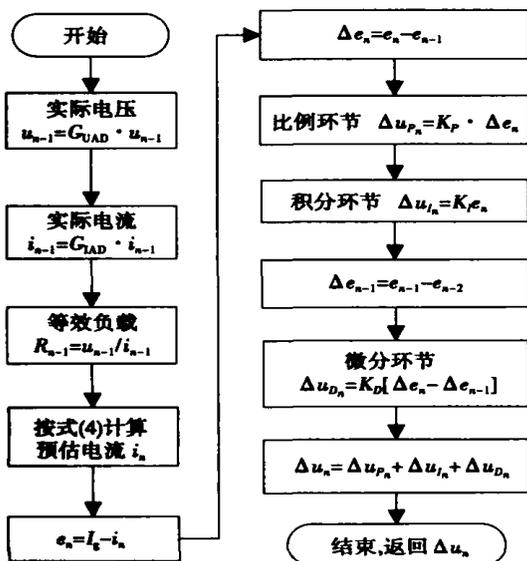


图 4 控制算法实现流程

Fig. 4 Flowchart to realize control algorithm

### 3 反馈控制实现

反馈控制的实现包括输出电压/电流检测与预

处理、A/D 采样与数字滤波和反馈控制算法等。

#### 3.1 电压/电流检测与预处理

图 5 所示为电压/电流反馈通道的硬件框图, 它由电压/电流霍尔传感器、精密整流、线性隔离和二阶跟随滤波等电路组成。

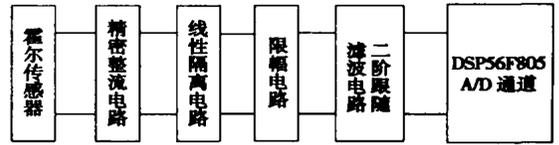


图 5 电压/电流检测与预处理

Fig. 5 Detecting and pretreatment of output voltage and current

由于 DSP56F805 的 A/D 模块只能处理直流信号, 并考虑到采样精度, 采用精密整流电路将霍尔传感器检测的电源输出的交流电压、电流信号转化为直流。线性光耦隔离电路将接口电路与 DSP 系统进行电气隔离, 以抑制共模干扰和保证传递到 DSP 的 A/D 模块的输入引脚的信号具有与输入信号一致的线性。限幅电路保证反馈信号的幅值不超过 A/D 模块的允许值。对于线性隔离后的信号中含有的多种谐波分量, 系统采用二阶跟随滤波从硬件上减少噪声干扰。焊接工艺过程控制要求信号处理具有很强的实时性, 而滤波效果和实时性相互制约, 因此, 二者必须折衷考虑。

#### 3.2 A/D 采样与数字滤波

DSP56F805 的 PWM 模块以独立通道中心对齐模式工作<sup>[7]</sup>。由于 IGBT 在开通与关断过程中将产生很大的  $di/dt$  或  $du/dt$ , 从而使得电源的输出电压、电流存在较大的尖峰。为了防止电压、电流尖峰对 A/D 采样的影响, 以保证系统控制的稳定性, 通过软件控制使 A/D 采样与 PWM 同步, 即在 PWM 的重载时机启动 A/D 采样, 也就是在 PWM 脉冲宽度的中心采样, 从而避开电压、电流尖峰, 如图 6 所示。

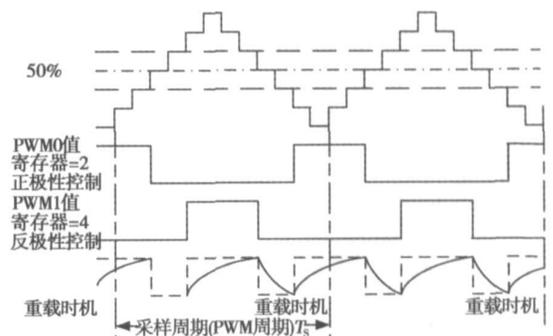


图 6 A/D 采样与 PWM 控制同步

Fig. 6 A/D sampling in phase with PWM control

A/D 采样及中值平均滤波的程序流程如图 7 所示。在每次采样时机到来时, A/D 模块对电压、电流信号同时扫描并转换得到电压、电流各 4 个采样值, 然后清除扫描结束标志位 (EOSI)。由于 A/D 采样与 PWM 同步, 采样点已避开 IGBT 的开通和关断引起的尖峰脉冲, 但是出于检测可靠性的考虑, 进一步采用简单可靠的滤波方法对当前采样获得的电压、电流值进行数字滤波。

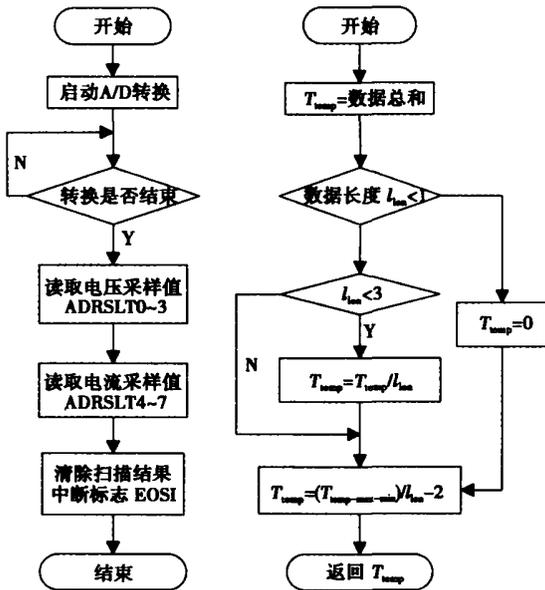


图 7 A/D 采样及中值滤波流程

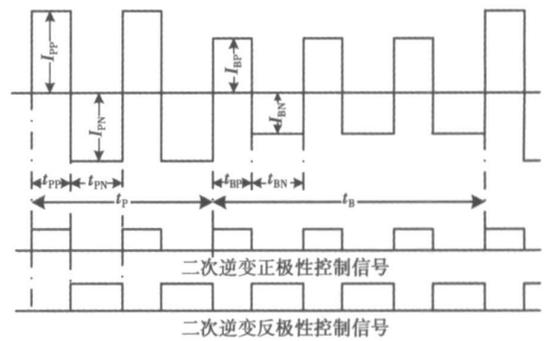
Fig. 7 Flowchart of A/D sampling and filtering

中值平均滤波和移动平均滤波形式简单, 运算量少, 都属于有限冲激响应 (FIR) 滤波器。中值平均滤波从  $N$  个原始数据中去掉最大值和最小值, 然后将其余  $N-2$  个数据进行平均作为滤波值。该方法能够很好地去掉尖峰干扰。移动平均滤波通过构造一个长度为  $N$  的先入先出 (FIFO) 队列, 将当前采样数据放入 FIFO 队列后对其求平均值作为当前的滤波值。该方法也能够消除尖峰脉冲的影响, 但有  $(N-1)/2$  个控制周期的群延迟, 使得控制系统动态性能变差。文中选用中值平均滤波方法以保证系统的快速性。

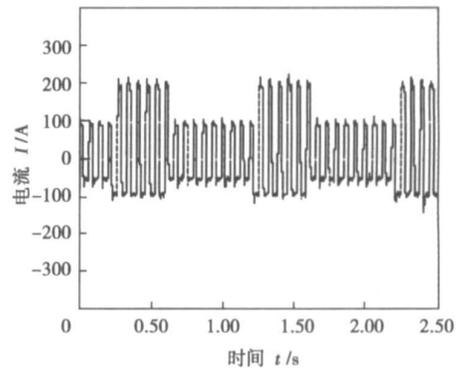
## 4 试验结果

采用上述基于电流估计的数字 PID 控制算法对一次逆变 PWM 控制脉冲宽度进行调制可有效地实现电源的恒流输出特性控制, 而通过二次逆变 IGBT 的交替导通可实现电源的变极性输出。两者有机结合即可实现脉冲变极性输出电流波形。

图 8a 为脉冲变极性输出控制过程示意图, 其中  $t_{PP} = t_{BP}$ ,  $t_{PN} = t_{BN}$ 。在  $t_{PP}$  时段, 输出电流的给定为峰值电流, PID 控制算法对电流给定值和反馈采样值进行运算得到一次逆变的 PWM 脉宽, 实现输出恒流控制, 二次逆变 PWM 模块输出正极性控制信号, 电源输出正极性峰值电流。  $t_{PP}$  时段结束, 控制程序根据  $t_{PP}$  时段二次逆变控制信号的极性确定其在  $t_{PN}$  时段为负极性, 同时修改电流给定值。类似地,  $t_{PN}$  时段结束, 程序根据  $t_{PN}$  时段二次逆变控制信号的极性确定其在  $t_{BP}$  时段为正极性。如此循环, 系统通过软件控制输出电流的大小和极性, 得到脉冲变极性输出。



(a) 示意图



(b) 实测波形

图 8 脉冲变极性输出电流波形

Fig. 8 Current waveform of pulsed variable polarity

图 8b 为脉冲变极性输出的实测电流波形, 图中正极性峰值电流为 200 A, 负极性峰值电流为 100 A, 正极性基值电流为 100 A, 负极性基值电流为 50 A, 脉冲频率为 1 Hz, 脉冲占空比为 40%, 方波交流频率为 15 Hz, 正负半波比为 40%。

## 5 结论

(1) 输出电压/电流检测与预处理、A/D 采样与

[下转第 12 页]

- [3] 王亚荣, 张忠典, 冯吉才, 等. 表面状态对镁合金点焊接头质量的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 27—30.
- [4] 于彦东, 张凯锋, 蒋大鸣, 等. MB15 超塑性镁合金扩散连接试验[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 64—68.
- [5] 张 华, 林三宝, 吴 林, 等. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊接头力学性能[J]. 焊接学报, 2003, 24(5): 65—68.
- [6] 李翠梅. 表面处理对 AZ31B 镁合金板材超声波焊接性的影响[J]. 国外金属热处理, 2003, 24(2): 17—22.
- [7] Takehiko Watanabe. Effect of surface treatment on the ultrasonic weldability of AZ31B magnesium alloy plate[J]. Light Metals, 2001, 51(10): 521—527.
- [8] 阮世勋, 雷运青. 金属超声焊及应用[J]. 热加工技术, 2004

(12): 38—40.

- [9] 张青来, 卢 晨, 朱燕萍, 等. 轧制方式对 AZ31 镁合金薄板组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3): 391—397.
- [10] 杨圣文, 汤 勇. 铜片—铜管的超声波焊接机理研究[J]. 焊管, 2005, 28(5): 28—31.

**作者简介:** 张青来, 男, 1962 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要从事镁合金、球墨铸铁、钛合金、难熔金属材料焊接及成形方面的科研和教学工作。发表论文 40 余篇。

**Email:** qfzhang@sh163.net

[上接第 8 页]

PWM 同步和数字滤波等措施消除了开关过程中电压、电流尖峰对控制系统的影响, 提高了电源系统工作的可靠性和稳定性。

(2) 基于电流预估计的数字 PID 控制算法克服了数字 PWM 控制的延迟效应, 使得电源输出动态响应速度快, 稳态精度高。

(3) 通过一次逆变 PWM 控制和二次逆变变极性开关控制的配合, 实现了复杂脉冲变极性输出电流控制, 扩展了 TIG 焊接工艺的适应范围。

**参考文献:**

- [1] 李中友, 刘秀忠, 陈茂爱, 等. 变极性方波电源的换向与控制[J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 68—71.
- [2] 杜春水, 张承慧, 张光先, 等. 新颖方波交流 TIG 电源二次逆变主回路的研究[J]. 电力电子技术, 2003, 37(2): 56—59.
- [3] 黄继强, 陈树君, 殷树言, 等. 新型方波交流 GTAW 逆变电源

的研制[J]. 电焊机, 2001, 31(2): 20—22.

- [4] 张广军, 耿 正, 李俐群, 等. 方波交流电源的稳弧措施研究[J]. 焊接学报, 1999, 20(4): 1—5.
- [5] 李鹤岐, 李春旭, 高忠林, 等. 基于 DSP—MCU 实现焊接电源系统数字化控制的设计[J]. 焊接学报, 2005, 26(3): 17—20.
- [6] 陈树君, 吴焕荣, 殷树言, 等. 基于 MSP430 单片机的 TIG 焊控制器[J]. 电焊机, 2005, 35(4): 20—23.
- [7] 符策健, 朱志明, 周雪珍, 等. 基于 DSP56F805 的脉冲变极性弧焊逆变电源数字化脉冲宽度调制技术[J]. 焊管, 2006, 29(3): 41—45.
- [8] 陈树君, 张宝良, 殷树言, 等. 双脉冲变极性波形对铝合金 TIG 焊焊接质量的影响[J]. 电焊机, 2006, 36(2): 7—9, 14.

**作者简介:** 朱志明, 男, 1964 年出生, 博士, 教授。清华大学焊接技术研究中心副主任, 中国焊接学会 CAW 专业委员会副主任等。主要从事现代功率电子技术与电能变换系统、焊接工艺过程控制与自动化、人工智能与计算机辅助焊接加工技术等方面的研究与开发工作。获国家教委科技进步二、三等奖 2 项。发表论文 80 余篇。

**Email:** zzm@tsinghua.edu.cn

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

**Microstructure characterization of weld HAZ in 1Cr22Mn15N high nitrogen austenitic stainless steel** DU Wansheng<sup>1</sup>, ZHAO Lin<sup>1,2</sup>, TIAN Zhiling<sup>1</sup>, PENG Yun<sup>1,2</sup>, XIA Mingsheng<sup>1,2</sup> (1. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. Division of Structural Materials, Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China). p1-4

**Abstract:** High-nitrogen austenitic stainless steel (HNS) that has good properties is a kind of structural steel alloyed with the nitrogen replacing nickel. The properties of the welded joint can affect the application of HNS, so the welding technique is considered as one of the key techniques for its application. In order to study the welding technique of HNS, the microstructure and hardness of heat affected zone (HAZ) of HNS were investigated by simulation on a Gleeble-1500 thermal simulator. The experimental results indicate that the microstructure in the HAZ of HNS is austenite and  $\delta$ -ferrite. Under the experimental conditions, the amount of the  $\delta$ -ferrite increases when the cooling rate increases, and it increases while the staying time at the peak temperature increases. The results also show that the hardness of the HAZ is higher than that of the base metal, indicating no softening of the HAZ under appropriate welding conditions.

**Key words:** high-nitrogen austenitic stainless steel; heat affected zone; microstructure; hardness

**Digital control system for inverter controlled arc welding power supply with pulsed variable polarity output** ZHU Zhiming, ZHOU Xuezheng, FU Cejian, JI Shengru (Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China). p5-8, 12

**Abstract:** The full-digitized control system of inverter controlled arc welding power supply with pulsed variable polarity output based on dual DSPs (digital signal processor) is developed by using DSP56F805. To overcome the influence of the pulse width holding and delaying existed in digital PWM (pulse width modulation) control pulse on the output performance, such as the dynamic response and static precision of power supply output, the current pre-estimating algorithm is proposed based on the  $LR$  (inductance and resistance) model of power supply output, and then the straightforward digital PID (proportional integral differential) control algorithm is modified. Meanwhile, the anti-disturbance characteristics of digital control system is improved effectively by pre-treating on the detecting signals of current and voltage. A/D sampling in phase with PWM control pulse, digital filtering, etc. The correctness and effectiveness of digital PID control algorithm based on current pre-estimation is validated by the control experimentations on the pulse variable polarity output of power supply.

**Key words:** inverter-controlled arc welding power supply; digital signal processor; digital proportional integral differential control; current pre-estimation; pulsed variable polarity output

**Effect of surface condition on AZ31B magnesium alloy strip ultrasonic welding** ZHANG Qinglai, WANG Lili, HU Yongxue (School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China). p9-12

**Abstract:** The effects of base material thickness, surface condition and interlayer material on AZ31B magnesium alloy ultrasonic welding were investigated. The result showed the material near the welding contact would be torn in the test of shear strength, and surface bonding strength could achieve about 3-10 MPa. The effect of surface condition on the surface binding strength of the magnesium alloy strip welding was relatively small for ultrasonic welding could break and clean the welding surface. The additive temperature was not needed on ultrasonic welding. And the welding area temperature promotion was inverse proportion to the welding material thickness. The results also showed the choice of interlayer material was useful to the Mg/Mg interface ultrasonic welding.

**Key words:** magnesium alloy; strip; ultrasonic welding; parameters

**Application of an improved watershed algorithm in welding image segmentation** WANG Mingquan, CHAI Li (Key Laboratory for Instrumentation Science and Dynamic Test, The Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China). p13-16

**Abstract:** In view of the present state of welding flaw X-ray test method and open problem, an improved watershed algorithm is proposed. In consideration of the structure information of image, the valley-bottom value produced by noise is very small. However, the minimum valley-bottom of each area will have a very big dynamic value corresponding to real area, which is close to the valley-bottom dynamic value when there is no noise. Hence, the valley-bottom produced by noise can be filtered, thus effectively restraining the over-segmentation, provided that a threshold is simply given based on the dynamic combination rule. Experimental results show that the algorithm can quickly and accurately obtain the segmentation result of flaw image. Furthermore, it has higher ability in resisting noise.

**Key words:** watershed; dynamics combination rule; flaw image

**3-D finite element analysis of residual stress and its creep relaxation at high temperature for stainless steel brazed plate-fin structure** JIANG Wenchun<sup>1</sup>, GONG Jianming<sup>1</sup>, CHEN Hu<sup>1</sup>, TU Shangdong<sup>1,2</sup> (1. School of Mechanical and Power Engineering,