

超音频脉冲 TIG 焊电源的双 DSP 并行全数字控制系统

齐铂金, 黄松涛, 许海鹰, 从保强

(北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京 100191)

摘要:文中采用数字信号处理器 TMS320LF2407 构建共享外部存储器的双 DSP 并行控制系统, 将其用于控制基于 2 套桥式逆变直流主回路并联调制模式的新型大功率超音频直流脉冲 TIG 焊电源。所研制的并行控制系统实现了焊接电源 2 套主回路双端 PWM 控制的冗余备份输出, 同时也实现了 2 套主回路恒流反馈控制系统的并行采样、并行滤波及数字 PID 反馈控制算法的并行运算。焊接试验的超音频直流脉冲电流输出特性验证了 DSP 并行全数字控制系统的有效性。

关键词:超音频脉冲; TIG 焊; 并行控制

中图分类号: TG434.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-1841(2009)10-0102-03

Dual DSP Parallel Processing Digital Control System for Ultra-audio Frequency Pulsed TIG Welding Power

QI Bo-jin, HUANG Song-tao, XU Hai-ying, CONG Bao-qiang

(School of Mechanical Engineering & Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A dual DSP shared external memory parallel processing control system was constructed by using TMS320LF2407. The system was used to control a novel high power ultra-audio frequency pulsed TIG welding power, which was based on the two sets of bridge model inverter DC main circuit parallel modulation mode. Redundancy backup two-terminal PWM output of the two sets main circuits of welding power was realized in the control system. Simultaneously, the parallel sampling, parallel filtering and parallel computing of digital PID feedback controlling algorithm were carried out in the parallel processing control system. The correctness and effectiveness of dual DSPs parallel processing digital control system were confirmed by the welding experiment on the ultra-audio frequency DC pulsed output of the TIG welding power.

Key words: ultra-audio frequency pulse; tungsten inert-gas welding; parallel control

0 引言

超音频直流脉冲电弧具有电弧挺度强、成形好、焊缝晶粒细化使得焊接接头力学性能改善等优点。研制大功率超音频直流脉冲 TIG 焊机已成为可能, 国外已有一些将 20 kHz 左右的大功率高频直流脉冲 TIG 焊机应用于工程实际的报道^[1-3]。

脉冲频率和占空比作为高频脉冲焊接电源的重要参数, 用数字电路实现比用模拟电路具有更好的灵活性。用数字信号处理器 DSP 能方便地产生脉冲频率和占空比可调的波形, 因此在高频脉冲电源设计方案中引入 DSP 已成为趋势。高频大功率脉冲电源一般由 2 套和多套直流回路并联调制而成, 增加了控制系统本身对采样速度、运算精度、运算速度、控制输入和控制输出等多方面的要求, 传统的单片 DSP 构成的系统难以满足其需要。应用共享存储器的双 DSP 并行系统可以将一个任务分成若干子任务, 分别由 2 片 DSP 并行处理, 从而提高了系统的运算速度、采样速度和运算精度, 相应地也可以处理更多的控制输入和控制输出。采用双 DSP 并行全数字化控制方案来实现高频脉冲电源控制是优选方案之一。

文中利用双 DSP 并行控制技术全数字化控制由 IGBT 构成的新型主电路, 研制出大功率超音频直流脉冲 TIG 焊电源。

1 系统总体结构

系统总体方案包括主电路拓扑结构和控制系统结构。

1.1 超音频直流脉冲主电路拓扑结构

由于焊接电流高达几百 A, 要实现大电流超音频方波输出的关键是解决其电流脉冲的上升和下降的变化速率问题。为此, 研制出如图 1 所示的超音频直流脉冲 TIG 焊电源结构。

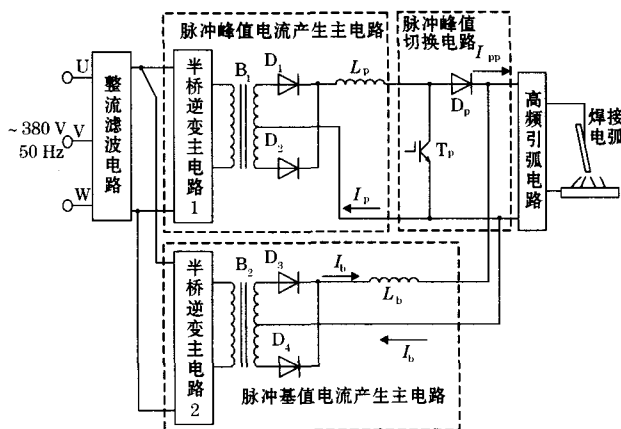


图 1 超音频直流脉冲 TIG 焊电源拓扑

该电源由三相整流滤波电路、脉冲峰值电流产生主电路、超音频脉冲峰值电流切换电路、基值电流产生主电路等部分组成。脉冲峰值电流产生主电路部分由 IGBT 构成的半桥式或全

桥式逆变电路、主变压器 B_1 、整流二极管 D_1 和 D_2 、滤波电感 L_p 等构成,其功能是产生脉冲峰值电流 I_p ,其波形如图 2(a)所示,控制方式为恒流控制。基值电流产生主电路部分由 IGBT 构成的半桥式或全桥式逆变电路、主变压器 B_2 、整流二极管 D_3 和 D_4 、滤波电感 L_b 等构成,其功能是产生基值电流 I_b ,波形如图 2(b)所示,控制方式也为恒流控制。超音频脉冲峰值电流切换电路由 IGBT 模块 T_p 、大功率二极管 D_p 等组成。当 T_p 开通时,峰值电流由 L_p 、 T_p 构成回路,维持稳定的 I_p ;当 T_p 关闭时, I_p 流经 L_p 、 D_p 、焊接电弧,给焊接电弧提供脉冲峰值电流 I_{pp} ,该电流波形如图 2(c)所示。在基值和峰值电流同时输出的情况下,焊接电弧上的电流 I_{po} 波形如图 2(d)所示。采用图 1 所示的拓扑结构,快速切换 T_p 可在电源输出端得到频率 ≥ 20 kHz,峰值高达几百 A 且具有快速的上升沿和下降沿变化速率的方波电流输出,变化速率 $\geq (50 \sim 100)$ A/ μ s。

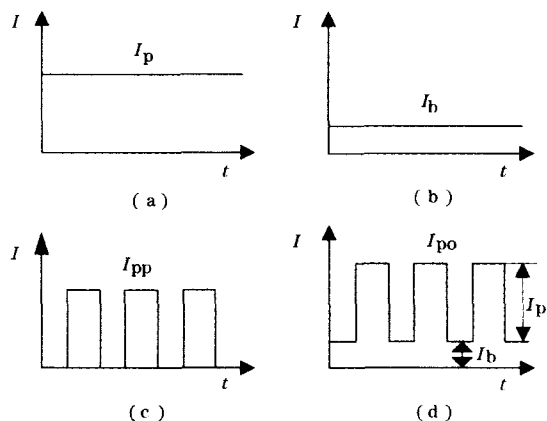


图 2 超音频直流脉冲电源各部分输出电流波形

1.2 双 DSP 并行控制系统总体结构

C2000 系列 DSP 芯片 TMS320LF2407(以下简称 2407)因具有强大的数字 PWM 输出与控制功能,在电力电子技术领域得到了广泛的应用。文中利用 2407 共享外部存储器构成双 DSP 并行控制结构体系,可以使控制系统获得更多的输入输出控制端口和更快的响应速度。并行控制系统如图 3 所示,由 5 块不同功能的电路板模块和实现人机交互功能的液晶触摸屏组合而成。

并行控制系统中的电路板 1、电路板 2 分别为 2 块独立的 DSP 数字控制板通过共享外部存储器构成并行控制系统。电路板 1 或 2 的结构如图 4 所示。电路板 1 和电路板 2 为具有基本相同结构的 DSP 数字控制板。电路板 1 和电路板 2 均由 DSP 核心系统区、电源 PWM 控制 A 区、B 区、C 区 4 个部分构成,且 4 个部分相互隔离以满足可能需要的隔离控制需求。电路板 1 和电路板 2 的 DSP 核心系统区提供双口 RAM 接口、JTAG 接口、串行通讯接口、触摸屏接口和 TFT 液晶接口。电路板 1 和电路板 2 的区别有 2 点:

(1)电路板 1 上具有双口 RAM 器件 CY7C027V 而电路板 2 上没有,当电路板 1 和电路板 2 并行工作时双口 RAM 为共享外部存储器;

(2)电路板 1 上提供的是 RS-232 串口,而电路板 2 上提

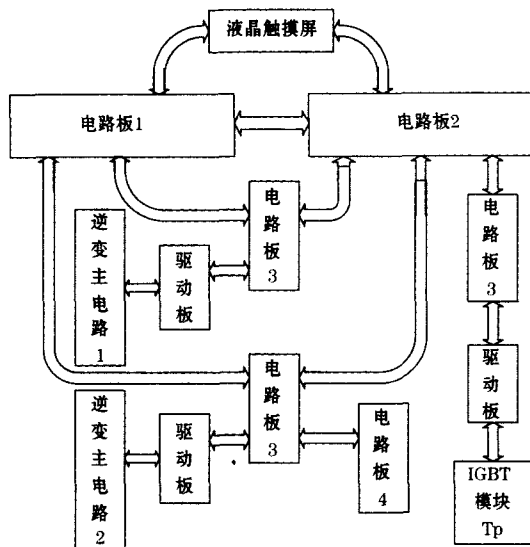


图 3 双 DSP 并行控制总体结构图

供的是 CAN 总线接口,目的是为了满足不同场合的外部串行通讯要求。

并行控制系统中的电路板 3 用来完成对主电路的采样、监测和保护等功能,并将这些信号通过电路板 1 或电路板 2 的 PWM 控制区传送到 DSP 核心控制区。并行控制系统中的电路板 4 主要完成继电器控制,用来控制电源风扇、交流接触器和引弧模块等。

并行控制系统中的双口 RAM 器件 CY7C027V 工作在中断模式,电路板 1 使用的是双口 RAM 的右边端口,而电路板 2 则使用的是双口 RAM 的左边端口。当电路板 1 中的 DSP 往双口 RAM 的左端口中断邮箱地址 0x7FFE 写数据时,将使电路板 2 中的 DSP 进入 XINT1 中断;反之,当电路板 2 中的 DSP 往双口 RAM 的右端口中断邮箱地址 0x7FFF 写数据时,将使电路板 2 中的 DSP 进入 XINT1 中断。CY7C027V 工作在中断模式,可以简化双 DSP 并行采样、并行计算和 PWM 冗余备份输出的算法。

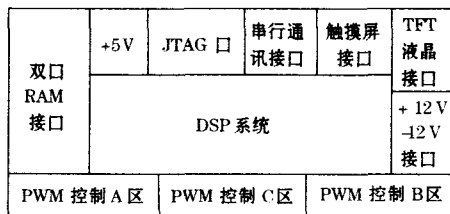


图 4 电路板 1 或电路板 2 的结构示意图

如图 3 所示,电路板 1 和电路板 2 共享外部数据存储器构成并行控制系统来控制超音频直流脉冲 TIG 焊机时,电路板 1 的 PWM 控制 C 区和电路板 2 的 PWM 控制 A 区同时连接到电路板 3,电路板 3 通过驱动板来完成逆变主电路 1 的驱动。电路板 1 和电路板 2 的双 DSP 并行完成逆变主电路 1 的并行采样、闭环控制算法的并行运算和双端 PWM 的冗余备份输出。同理,电路板 1 的 PWM 控制 A 区和电路板 2 的 PWM 控制 C 区同时接电路板 3,电路板 3 通过驱动板来完成逆变主电路 2 的驱动。由此,电路板 1 和电路板 2 的双 DSP 并行完成逆变主电路 2 的并行采样、闭环控制算法的并行运算和双端 PWM 的冗

余备份输出。电路板2的PWM控制C区连接电路板3,电路板3通过驱动板完成IGBT模块 T_p 的驱动。

2 系统控制软件设计

研制的超音频直流脉冲TIG焊机的控制包括基值、峰值电流的恒流反馈控制和IGBT模块TP的开关控制。IGBT模块TP的脉冲频率和占空比控制用2407的任一PWM输出通道就能完成,因此文中重点讨论恒流反馈控制的双DSP并行实现。恒流反馈控制的实现包括输出电流检测与预处理、双DSP并行采样与滤波和反馈控制并行算法的实现。

2.1 电流采样与预处理

图5为电流反馈通道的硬件框图,它由电流霍尔传感器、采样电阻、线性隔离和二阶跟随滤波等电路组成。

线性隔离电路将主电路电流采样电路与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模块输入引脚的信号具有与电流采样信号的线性一致关系。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。滤波效果和实时性相互制约,二者必须折衷考虑。



图5 电流检测与预处理

2.2 双DSP并行采样与数字滤波

图3所示的双DSP并行控制系统中,电路板1的2407和电路板2的2407各有一A/D输入通道对反馈电流进行采样。在每次采样时刻到来时,2个DSP同时对反馈电流进行采样。用双DSP并行采样与相同时间内的单DSP采样相比,可以获得更多的原始数据。为保证电流采样的可靠性,对电流采样值进行数字滤波。数字滤波采用中值平均滤波方式,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。双DSP并行采样后又进行并行中值平均滤波,既能很好地去除尖峰干扰,又能保证系统的快速性。双DSP并行采样与并行中值平均滤波的程序流程如图6所示。图6(a)为主DSP即电路板1上DSP的采样主程序流程,图6(b)为从DSP即电路板2上DSP的XINT1中断中的采样程序流程,图6(c)为主DSP的XINT1中断中的电流反馈值计算程序流程。

2.3 恒流反馈控制并行算法

增量式数字PID算法具有不需累加,控制增量只与最近几次采样有关,即使误动作也对输出影响较小和较容易通过加权处理获得良好控制效果的特点。研制的超音频直流脉冲焊机中的半桥逆变主回路恒流反馈控制均采用增量式数字PID控制算法,即

$$\begin{cases} \Delta u_n = K_p(e_n - e_{n-1}) + K_i e_n + K_d(e_n - 2e_{n-1} + e_{n-2}) \\ u_n = \Delta u_n + u_{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

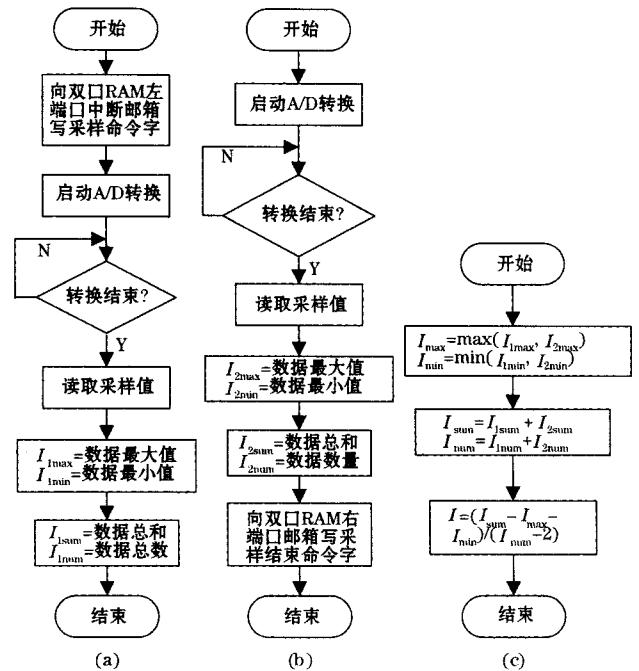


图6 双DSP并行采样与中值滤波程序流程

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。

研制的双DSP并行的数字增量式PID控制并行算法流程如图7所示。图7(a)为并行系统电路板1上DSP完成数字增

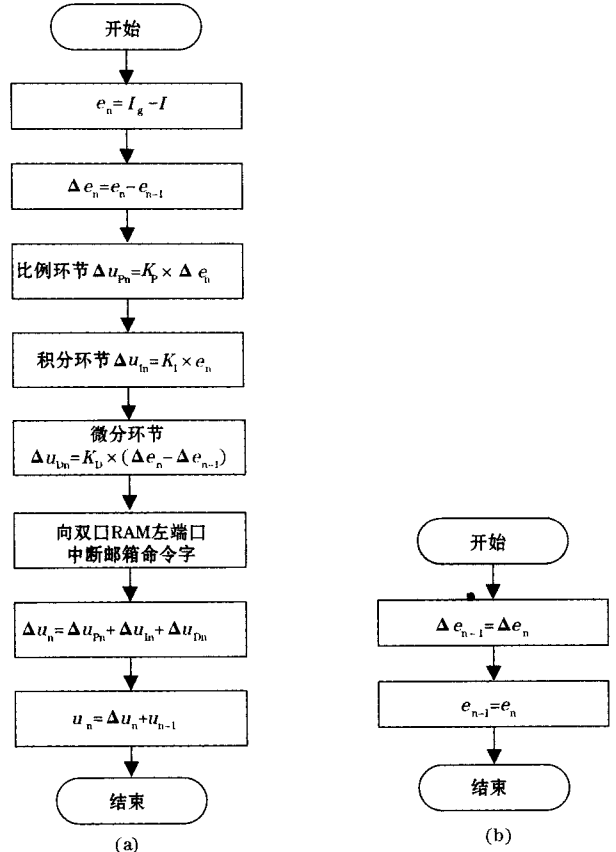
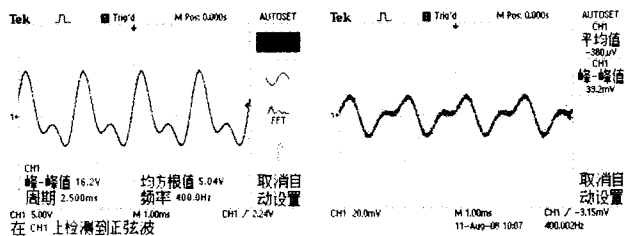


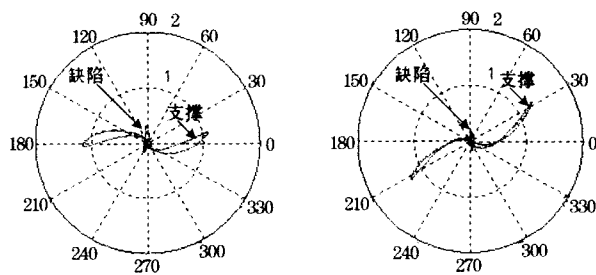
图7 数字增量式PID双DSP并行实现流程

增强缺陷信号。



(a) 电桥激励信号 (b) 电桥输出信号

图 8 电桥输入输出信号波形



(a) 800 Hz 频率信号 (b) 400 Hz 频率信号

图 9 正交锁定放大输出后信号波形(极坐标形式)

6 结束语

基于 DDS 技术的多频涡流检测系统,采取模块化方式进行组合,易于控制和调节。实际涡流检测实验中,设计输出主频

率为 800 Hz,辅助频率为 400 Hz,采用差动线圈进行管道缺陷检测,系统工作稳定,性能可靠,满足多频涡流检测的要求。

参考文献:

- [1] MCINTIRE P, MESTER M. 美国无损检测手册:电磁卷. 美国无损检测手册译审委员会,译. 上海:世界图书出版公司,1999.
- [2] 潘柏英,潘望. 基于 DSP 与 DDS 的数字正交调制器. 仪表技术与传感器,2008(6):76-78.
- [3] 康中尉,罗飞路,陈棣湘. 利用正交型锁相放大器实现三维磁场微弱信号检测. 传感器技术,2004,23(12):69-72.
- [4] 丁士圻. 模拟滤波器. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2004.
- [5] CHADY T, SIKORA R. Optimization of Eddy-Current Sensor for Multi-frequency Systems. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 2003, 39(3):1313-1316.
- [6] 冯婷婷,罗飞路,何赞泽. 双频涡流检测中微弱信号的二维信息提取. 中国测试技术,2008,34(4):59-61.
- [7] 王晓俊,周杏鹏,王毅. 精密阻抗分析仪中数字相敏检波技术研究. 仪器仪表学报,2006,27(6):592-595.
- [8] 林俊明. 声脉冲/多频涡流检测仪的研制. 华北电力技术,2000(5):23-24.
- [9] 李小波,孙志勇,刘春生. 基于 CPLD 和单片机的低频信号源设计. 仪表技术与传感器,2005(11):46-48.

作者简介:高军哲(1980—),博士研究生,主要电磁无损检测理论及其自动检测技术. E-mail: gfkdgz@126.com

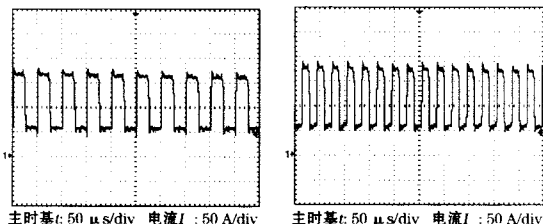
(上接第 104 页)

量式 PID 调节的程序流程,图 7(b)为并行系统电路板 2 上 DSP 的 XINT1 中断中完成数字增量式 PID 调节的程序流程。

3 试验结果

超音频直流脉冲电源可以有效地实现电流高达 500 A,脉冲频率高达 30 kHz 以上的超音频直流脉冲电流输出。

图 8 为超音频直流脉冲电源在钨极直径为 2.6 mm,基值电流 I_b 为 50 A,峰值电流 I_p 为 120 A,占空比为 50% 的情况下,采用直流正接方式焊接 6 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢板时的实测电流波形。图 8(a)是脉冲频率为 20 kHz 时的波形,图 8(b)是脉冲频率为 30 kHz 时的波形,示波器采用 TPS3012 示波器。



(a) 脉冲电流频率 30 kHz (b) 脉冲电流频率 30 kHz

图 8 电源输出脉冲电流波形

从测试结果可见,研制的原理样机可输出超音频脉冲大电流,脉冲电流上升、下降沿的电流变化速率 $d_i/d_f \geq 50 \text{ A}/\mu\text{s}$,能够满足超音频脉冲 TIG 焊大电流焊接的要求。

4 结束语

(1)设计的基于共享外部存储器的双 DSP 并行控制系统使

控制系统获得更多的控制输入和控制输出,最多可实现 3 套独立桥式变换器的双端 PWM 的冗余备份输出。

(2)系统实现了超音频直流脉冲电源 2 套半桥结构逆变回路的电流反馈控制的输出电流并行采样和数字 PID 控制算法的并行运算,实现了电源的超音频直流脉冲输出。

(3)基于双 DSP 并行控制技术全数字化控制由 IGBT 构成的新型主电路,研制了大功率超音频直流脉冲 TIG 焊电源。

参考文献:

- [1] NIHEI M, ONUKI J, FUMANOTO T, et al. Method of high frequency pulse arc welding and apparatus therefore: United States, US 6225598B1. 2001, 5.
- [2] MANNION B. Increasing tube mill welding speed: Examining technology for tube producers. The Tube & Pipe Journal, 2001, 1.
- [3] ONUKI J, ANAZAWA Y, NIHEI M, et al. Development of a new high-frequency, high-peak current power source for high constricted arc formation. Jpn. Appl. Phys, 2002, 41: 5821-5826.
- [4] 齐铂金,许海鹰,黄松涛. 超音频方波直流脉冲弧焊电源装置: 中国, 200710120831. 2.
- [5] 张雷,王宝树,钱亚平. 基于单片机双 CPU 的数字热负荷仪的研制. 仪表技术与传感器, 2007(10): 12-15.
- [6] 张继军,张宁,刘国海. 基于 DSP 的有源电力滤波器数字控制系统. 仪表技术与传感器, 2008(8): 72-74.

作者简介:齐铂金(1963—),教授,博士生导师。主要研究方向为焊接过程计算机控制和新型电源技术及应用。

E-mail: qbj@buaa.edu.cn