

# DSP 模糊控制在 TIG 焊电源中的应用

张 鹏<sup>1</sup>,李春旭<sup>1,2</sup>,王 珊<sup>1</sup>,李鹤岐<sup>1,2</sup>

(1.兰州理工大学 材料科学与工程学院,甘肃 兰州 730050;2.兰州理工大学 有色金属材料先进加工成型技术教育部重点实验室,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**利用 MATLAB 的 Fuzzy 工具箱,离线辅助设计模糊控制器,以及 DSP 的高速度、丰富的片内外设和集成开发系统(CCS),构建了 TIG 电源闭环模糊控制系统。给出了系统软件总流程图和 DSP 模糊控制的流程图。经仿真分析,系统可靠,精度符合要求。

**关键词:**DSP;模糊控制;MATLAB;TIG 电源

**中图分类号:**TG434.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1001-2303(2007)01-0023-04

## Application of fuzzy control system based on DSP in TIG power supply

ZHANG Peng<sup>1</sup>,LI Chun-xu<sup>1,2</sup>,WANG Shan<sup>1</sup>,LI He-qi<sup>1,2</sup>

(1.College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou 730050, China;2.Education Ministry Key Lab. of Advanced Processing Tech. for Non-ferrous Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** This paper applies DSP and fuzzy control technique to constant current control system of TIG power supply. It introduces the design of offline fuzzy control system by Fuzzy Logic box in MATLAB and constructs closed loop control system of TIG power supply by DSP and CCS, which has high speed and abundant external device on chip and so on. The simulation of the system indicates that the fuzzy control system is robust, which satisfies the demands of TIG power supply's accuracy.

**Key words:** DSP; fuzzy control; MATLAB; TIG power supply

钨极氩弧焊(Tungsten Inert Gas Welding,简称 TIG 焊)是焊接有色金属及其合金,如铝、镁及其合金、不锈钢等的理想方法,具有电弧稳定、焊缝成形美观等优点。但是在现场施焊过程中,由于工况不同,电弧受到各种因素的干扰,如:电弧长度的变化,工件的不平度,保护气体的纯度、流量和供电电网的波动等,都会使焊接电流电压偏离稳定工作点。如果焊接电流、电压能快速自动地返回稳定工作点,则电弧可以持续稳定燃烧。由此可见,电源工作的稳定性和可靠性主要依靠控制系统,它是整个电源的核心。

国内外的一些研究机构(如北工大、华南理工、奥地利 Fonius 等)将模糊逻辑应用于弧焊电源控制系统中,主要是基于 MCU;也有学者利用数字信号处理器(DSP)的高运算速度,缩短 PI 运算时间、增

加采样点,提高控制精度。本研究结合模糊控制和 DSP 的优点设计了控制系统,以实现 TIG 焊电流的恒值控制。

## 1 模糊控制系统的结构设计

TIG 焊电源模糊控制系统的主要目的是为了实现在 TIG 焊接工艺要求的恒电流外特性。本研究采用脉宽调制型控制方法(PWM),即电弧电流经霍尔电流传感器检测转变为相应的电压信号,经滤波限幅后进入 DSP 的 A/D 转换通道转换为数字离散值  $I_t$ ,CPU 比较  $I_t$  和预置焊接电流变量  $I_g$ ,得到偏差  $e$  和偏差变化率  $ec$ 。DSP 根据  $e$  和  $ec$  运行模糊控制算法程序,求出为消除  $e$  所需的控制信号  $u$ ,并传递给 DSP 内置的 PWM 模块,直接控制 DSP 输出的 PWM 脉宽。经分频电路后输出两路互不重叠的脉冲信号,这两路脉冲信号经过 IGBT 专用驱动芯片 M57959L 功率放大后,分别驱动两组 IGBT 开关管,使其交替导通来改变输出电压的占空比,从而实现对输出电流的控制。系统的总体结构框图如图 1 所示。

收稿日期:2006-07-20

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(ZS032-B25-001)

作者简介:张 鹏(1979—),男,河南洛阳人,在读硕士,主要从事数字化焊机及智能化焊接的研究工作。

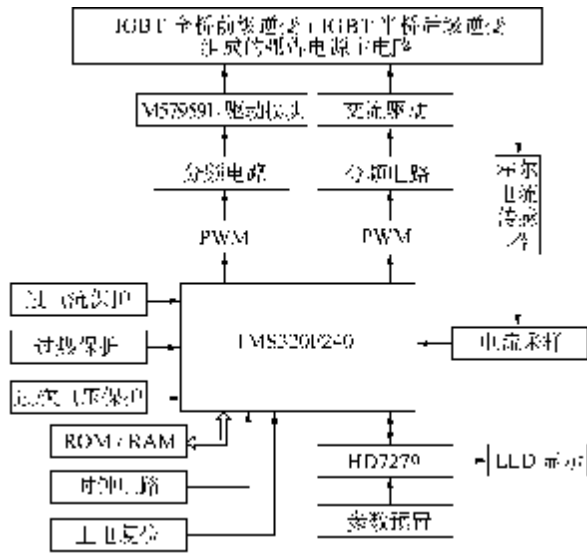


图 1 DSP 控制系统结构

Fig.1 Structure of control system based on DSP

以美国 TI 公司的 TMS320F240 为系统的核心。DSP 与时钟电路、电源电路、复位电路等组成的 DSP 最小系统<sup>[1]</sup>作为核心电路对信号进行控制和 DSP 实时检测过/欠电压、过热、过电流四种故障,如果有上述故障发生时,DSP 首先判断是否真的出现了故障,以排除误报警,如果为真,则彻底封闭 IGBT 的输出,结束焊接过程,除非手工进行复位。电流采样采用霍尔电流传感器;系统参数预置和显示采用 HD2729 芯片,它驱动 LED 和 64 键键盘,通过与 DSP 的 I/O 口连接进行数据通信;M579591 和 TLP250 构成前级/后级驱动脉冲电路。本系统设计的逆变频率为 20 kHz。

## 2 模糊控制器设计

模糊控制器是整个系统的核心,主要完成输入量的模糊化、模糊关系运算、模糊决策以及决策结果的解模糊处理(精确化)等重要过程,由软件编程来实现。本系统由 MATLAB7.0 辅助设计<sup>[2]</sup>,采用典型的两输入单输出的模糊控制器,其结构见图 2。



图 2 离散模糊控制器结构

Fig.2 Sketch of discrete fuzzy controller

### 2.1 模糊控制器的输出输入变量

通过人机交互界面预置焊接电流值  $I_g$  送给 DSP,

由霍尔电流传感器检测出的实际电流值经 A/D 转换后为反馈值  $I_f(n)$ , 采样时间为  $T$ , 则  $nT$  时刻偏差  $e(n)=I_g-I_f(n)$ , 偏差变化率  $ec(n)=[e(n)-e(n-1)]/T$ <sup>[3]</sup>。在本系统中,模糊控制器主要用于实现 TIG 电源的恒电流外特性,所以模糊控制器的输入变量定义为  $e(n)$  和  $ec(n)$ 。

根据 DSP 产生 PWM 波原理,将该模糊控制器的输出定义为: TMS320F240 用于产生脉宽调制波形的比较寄存器中的比较值(有效输出脉冲宽度)校正量  $\Delta u$ 。

根据上述定义,输入语言变量为  $E$  和  $EC$ , 输出语言变量为  $U$ 。

### 2.2 论域、量化因子和比例因子的选择

TIG 焊的下降外特性曲线在理想情况下斜率  $k$  为无穷大( $k=U/I=\tan\alpha, \alpha=90^\circ$ ),而在实际情况中,焊接电流越大,  $\alpha$  越小。TIG 焊弧长实用范围约为 0.5~3 mm, 对应的电弧电压为 8~20 V, 在焊接电压小于 8 V 或大于 20 V 时,运用模糊控制消除焊接电流偏差。本电源额定焊接电流为 315 A( $\alpha \leq 75^\circ$ ), 估算下降外特性区间电流偏差在 3 A 左右。因此,语言变量  $E, EC$  和  $U$  的基本论域选择为

$$e \in [-3, 3], ec \in [-3, 3], \Delta u \in [-18, 18]。$$

$E, EC$  和  $U$  所取的模糊子集的论域都为  $[-6, 6]$ 。由此可以得到对应的量化因子和比例因子

$$k_e=6/3=2, k_{ec}=6/3=2, k_u=18/6=3。$$

量化因子和比例因子对系统的动态特性和稳态特性都有重要影响。它们决定了最终的控制效果。因此,先综合选取适当的基本论域,然后在实际调试过程中不断修正,以达到较满意的结果。

### 2.3 模糊控制规则的设计

$E, EC$  与  $U$  的词集取七个词汇,即:负大( $NB$ ), 负中( $NM$ ), 负小( $NS$ ), 零( $Z$ ), 正小( $PS$ ), 正中( $PM$ ), 正大( $PB$ )。隶属度函数形状可取为三角形、梯形、钟形或正态分布形,为了计算简单,选择简单实用的三角形为隶属度函数形状,表达式为<sup>[4]</sup>

$$\mu(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a), & x \in [a, b] \\ (c-x)/(c-b), & x \in [b, c] \\ 0 & \text{其他} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $a$  为三角形函数的左脚;  $b$  为三角形函数的顶点。

由 MATLAB 模糊逻辑工具箱隶属度函数编辑器编辑的  $U$  的隶属度函数曲线如图 3 所示,隶属度

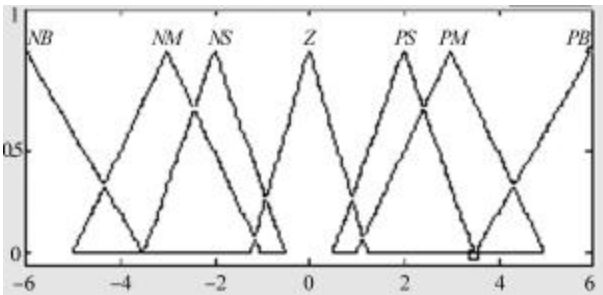


图 3 U 隶属度函数曲线  
Fig.3 Membership functions of U

表 1 E, EC 的隶属度函数赋值  
Tab.1 Membership degrees of E, EC

E, EC	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.33	0.66	1.00
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20	0.60	1.00	0.60	0.20
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.00	0.33	0	0	0
Z	0	0	0	0	0	0.20	1.00	0.20	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.33	1.00	0.33	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.20	0.60	1.00	0.60	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.00	0.66	0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2 U 的隶属度函数赋值  
Tab.2 Membership degrees of U

U	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20	0.60	1.00
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50	1.00	0.50	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.33	1.00	0.33	0	0	0
Z	0	0	0	0	0	0.20	1.00	0.20	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.33	1.00	0.33	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0	0.50	1.00	0.50	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.00	0.60	0.20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3 模糊控制规则  
Tab.3 Fuzzy control rules

$\tilde{E}\tilde{C}$	不同偏差 $\tilde{E}$ 时输出的 $\tilde{U}$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	PS
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	NS	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	PS	PS	PM	PB	PB	PB

模糊控制器的输出是一个模糊量,该模糊量不能用于控制执行机构<sup>[4]</sup>,还需将其转化为精确量,即非模糊化。非模糊化有三种常见算法:最大隶属度法、面积法、加权平均判决法<sup>[5]</sup>。本系统采用加权平均判决方法(又称重心法)。

见表 1、表 2。

模糊控制规则的建立采用 Mamdani 推理算法,主要思想是:当偏差较大时,以消除偏差为主;当偏差较小时,则以系统稳定、消除震荡和防止超调为主,可以用“IF X=A and Y=B THEN Z=C”形式的条件语句来加以描述,根据这一推理规则,每一对输入量  $\tilde{E}$  和  $\tilde{E}\tilde{C}$  就可以得到相应的输出量 U 如表 3 所示。

### 2.4 模糊量的清晰

### 2.5 模糊控制表的生成

把表 3 中的  $\tilde{E} \wedge \tilde{E}\tilde{C}=7 \times 7=49$  条控制规则,输入到 MATLAB 模糊控制逻辑工具箱的规则编辑器中,通过模糊规则观察器可以得到模糊控制表,如表 4 所示。从 MATLAB 模糊逻辑工具箱曲面观察器可以观察到 E, EC 与 U 对称变化的三维曲面,如图 4 所示。由图可知,该系统是一个非线性系统。

### 3 系统软件设计

本模糊控制系统软件的设计是基于查表法的思想,其基本原理是把 MATLAB 辅助生成的离散模糊控制表固化到 DSP 的 FLASH 程序存储器中,当控制器工作时,只需直接根据采样得到的偏差和偏差变化率的量化值找出当前时刻的控制输出量化值,然后将此量化值乘以比例因子,得到最终的

专题讨论——数字化焊接电源

表 4 离线模糊控制  
Tab.4 Offline fuzzy control

EC	不同偏差 E 时输出的 U												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-6	-6	-6	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0
-5	-6	-6	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	0	1
-4	-6	-6	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	0	1
-3	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-1	-1	0	2	2	2
-2	-5	-5	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	2	2	2
-1	-4	-4	-4	-3	-3	-1	-1	0	2	2	3	3	3
0	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	2	3	3	4	4
1	-3	-3	-3	-2	-2	0	1	1	3	3	4	4	4
2	-2	-2	-2	-1	0	1	2	3	3	3	4	5	5
3	-2	-2	-2	0	1	1	2	3	3	4	4	5	5
4	-1	0	0	1	2	3	3	4	4	5	5	6	6
5	-1	0	0	1	2	3	3	4	4	5	5	6	6
6	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	6	6	6

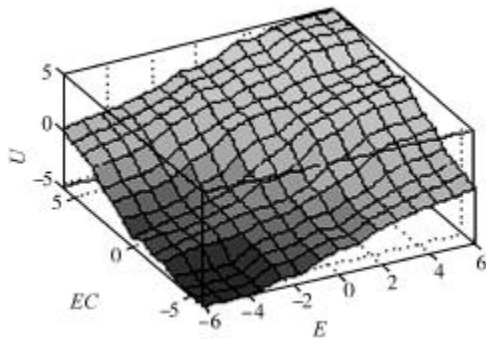


图 4 模糊输入 E, EC 与输出 U 的关系

Fig.4 Relationship of fuzzy input E, EC and output U

输出控制量。这种方法的优点是计算时间较短,系统响应速度快。系统软件设计可分四个部分:焊前准备、高频引弧、焊接阶段控制、熄弧控制。焊接阶段控制主要是模糊控制<sup>[4]</sup>,其程序流程如图 5 所示。为了加快控制过程,缩短过渡时间,在程序中分两个环节进行,当电流偏差大于 3 A 时,系统进入加速控制过程,让信号迅速逼近给定值;当偏差小于等于 3 A 时,系统进入模糊控制环节,根据偏差和偏差变化率,量化后查询模糊离线总控制表,取出控制量的增量,然后进行控制<sup>[4]</sup>。

#### 4 仿真分析

模糊控制子程序直接影响驱动 IGBT 的脉冲波形,所以在未仿真调试好参数的情况下直接联机实验是不安全的,可能损坏 IGBT。模糊控制系统对阶跃信号的响应如图 6 所示。从图中可以看出,弧长的电阻值从 0.15 Ω 变到 0.1 Ω,电流变化响应

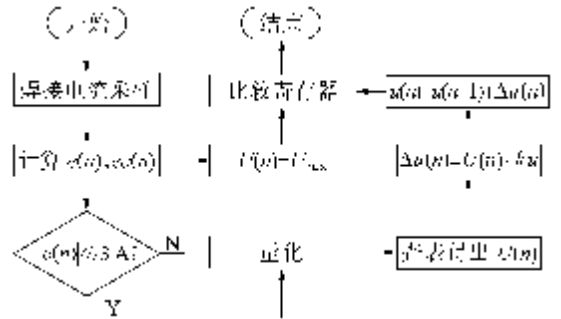


图 5 模糊控制软件流程

Fig.5 Sketch of fuzzy control system

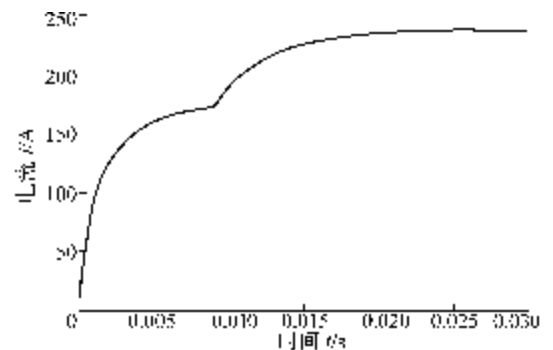


图 6 模糊控制系统对阶跃信号的响应

Fig.6 Response of fuzzy control system to ramp signal

在 12 ms 内达到稳态,无超调和振荡。

#### 5 结论

(1)电源采用 TMS320F240 为核心,它具有丰富的片内外设,减少了外围器件,独特内核结构更利于模糊控制算法的运算。

(2)从仿真结果可以看出,所设计的模糊控制系统对 TIG 焊接电流有良好的控制效果,使电流很快回到稳定工作点,而且比较平滑。

(3)应用 MATLAB 的 Fuzzy 工具箱生成离散模糊控制表固化 DSP 的 flash 中,减少了运算难度,提高计算速度。

#### 参考文献:

- [1] 宁改娣,杨拴科.DSP 控制器原理及应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [2] 李国勇.智能控制及其 MATLAB 实现[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [3] 艾盛,张健,马彩霞.单片机模糊控制逆变 TIG 焊电源的研究[J].机械科学与技术,1999,18(2):288-290.
- [4] 王建萍.微机模糊控制在 TIG 逆变电源中的应用[J].电子技术应用,2002(2):17-19.
- [5] 冯冬青,谢宋和.模糊智能控制[M].北京:化学工业出版社,1998.

