

# 基于 DSP 的 MIG 焊接弧长模糊控制系统研究

于超林,胡绳荪,宋东风,殷凤良

(天津大学 材料科学与工程学院,天津 300072)

**摘要:**基于 DSP 控制的 MIG 焊接系统,采用缓降弧焊电源外特性和变速送丝的控制方法以达到保证弧长不变的目的,并将模糊控制引入到变速送丝控制设计中。阐述了利用 MATLAB 的模糊逻辑工具箱进行模糊控制规则设计,并利用 Simulink 工具箱中的仿真工具对所设计的控制方法进行仿真。实验研究表明,应用该软件设计的控制方法与传统 PID 控制相比,可快速、准确地控制焊接弧长的稳定。

**关键词:**DSP;模糊控制;变速送丝;MATLAB;PID

**中图分类号:**TG444+.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2007)01-0046-04

**Study on system of arc length fuzzy control on MIG welding based on DSP**

YU Chao-lin, HU Sheng-sun, SONG Dong-feng, YIN Feng-liang

(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Based on the MIG welding system controlled by DSP, A combinational controlling method that was of alternate wire-feed control cooperating with the slow negative characteristic power source was adopted to study to keep the length of arc unvaried. And the fuzzy control was introduced into the design of alternate wire-feed control. How to design the fuzzy control for this method by taking use of the toolbox in MATLAB was formulated in this paper. And through the simulation tool in Simulink toolbox, simulation was given for this control method. Study shows that this control method designed by MATLAB was faster and preciser on controlling arc length stabilization compared with the conventional PID control method.

**Key words:** DSP; fuzzy control; alternate wire-feed; MATLAB; PID

## 0 前言

由于 MIG 焊具有效率高、质量好、易实现自动化、适于全位置焊接等优点<sup>[1]</sup>,因此,该方法被广泛用于钢铁、铝、铜、钛等金属的焊接。MIG 焊接质量主要依赖于焊接过程的电弧稳定,其过渡形式是射滴过渡。为实现 MIG 焊接的稳定性,需要有两个前提条件:一是需采取一定的控制策略,以保证在焊接过程中能够实时保证电弧的稳定;二是要有可便利实现该控制方法的硬件基础。因焊接是一种非线性、多变量耦合、时变过程,无法给出精确的控制理论模型,而模糊控制则恰恰是适合这种情况的智能控制策略。它是一种在总结采用人类自然语言概念操作经验的基础上升华发展的模仿人类智能的一类控制方法。DSP 的出现同时为更好地实现这种控

制方法提供了硬件基础。这是因为模糊控制方法的最大特点是通过设计好的数据表格进行控制量的计算,而 DSP 具有快速的计算功能,因此这两者的结合,能够快速实现弧长稳定控制。本研究正是基于上述两个前提条件的实现来进行弧长控制的研究。

## 1 控制方案

MIG 焊接的送丝有等速送丝和变速送丝两种方式。在细丝 MIG 焊时,通常采用等速送丝方式,通过电弧的自调节作用来保持弧长的稳定。但由于弧长自调节作用有限,当弧长变化较大时,很容易造成熄弧,或者粘丝。为此,采用变速送丝与电弧自调节联合控制方案。在焊接过程中,使用缓降特性电源,以模糊控制送丝调节为主要调节手段,以电弧自调节为辅助调节手段。即当焊接弧长发生波动时,根据弧压的变化调整送丝速度,以削弱弧长的变化;同时,由于焊接电流发生变化,自调节作用也可以起到促进弧长恢复的作用。

收稿日期:2006-05-08;修回日期:2006-09-26

基金项目:天津市自然科学基金资助项目(05YFJMJC08900)

作者简介:于超林(1978—),男,山东荣成人,在读硕士,主要从事数字化焊接电源及自动控制的研究工作。

### 2 数字化控制系统的硬件组成

实验采用山东奥太 NBC-500 逆变焊机,其控制电路原为模拟控制,后改为基于 DSP 控制。实现弧长模糊控制的硬件系统如图 1 所示,该电路主要包括主电路、数字控制、送丝机电路三部分。主电路部分完成焊接所需要的电能转换和供给;数字控制部分由单片机系统、DSP 系统组成。这两个系统主要完成焊接过程的管理、参数显示、参数设置和对所采集焊接参数的计算以及实现控制策略。

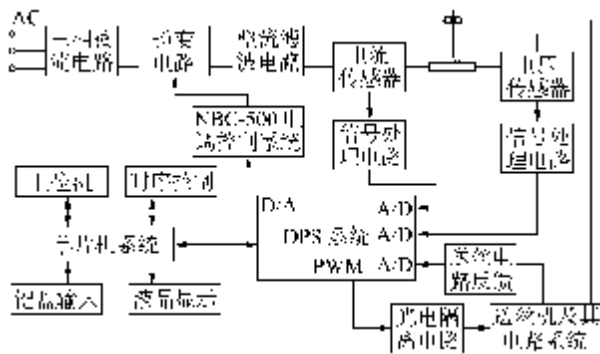


图 1 数字化弧长控制系统

Fig.1 Diagram of digital arc length control system

### 3 基于 MATLAB 弧长模糊控制系统的设计<sup>[2]</sup>

#### 3.1 模糊控制输入、变量的确定

根据上述控制方案,以电弧电压的实际值与给定值的误差  $E$  和弧压误差的变化率  $\Delta E$  作为模糊控制的输入变量,以控制送丝机速度的 PWM 信号的占空比  $u$  作为模糊控制器的输出。

#### 3.2 变量的模糊化

##### 3.2.1 语言值的确定

根据模糊控制的相关理论<sup>[3]</sup>,本研究中偏差  $E$  的语言值取{负大、负中、负小、负零、正零、正小、正中、正大}。偏差变化率和输出变量的语言值分别设定为  $EC=U=\{\text{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大}\}$ ,用字母表示写成: $E=\{PB, PM, PS, PO, NO, NS, NM, NB\}$ ,  $EC=U=\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 。

##### 3.2.2 论域的确定

考虑到 MIG 实际焊接过程中,弧长波动不会超过  $\pm 5 \text{ mm}$ ,在氩气保护状态下电场强度为  $0.59 \text{ V/mm}$ <sup>[4]</sup>,故可得输入量的偏差范围为

$E=-5 \text{ mm} \times 0.59 \text{ V/mm} \sim 5 \text{ mm} \times 0.59 \text{ V/mm} \approx -3 \sim 3 \text{ V}$ ,  $EC$  的范围也为  $[-3, 3]$ 。由于是 DSP 输出的 PWM 信号,经过实验测量,在焊接弧长控制过程中,用以控

制送丝速度的占空比的调整范围为  $[-5, 5]$ 。故本系统电弧电压的误差采用 14 级论域:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ; 误差变化率  $EC$  采用 13 级论域:  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ; 为保证送丝速度的精确, PWM 占空比输出  $U$  采用 15 级论域:  $\{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ 。按照上述各变量确定的论域和实际变化值,可以确定所对应的量化因子  $K_e, K_{ec}$  和比例因子  $K_u$  分别为 2, 2.33, 0.7。

#### 3.3 模糊控制隶属函数的确定

隶属度函数有多种形式,由于三角形模糊化算法比较简单<sup>[5]</sup>,本设计采用三角形隶属度函数。利用 MATLAB 的模糊逻辑工具箱提供的图形用户界面 (GUI) 工具,设计了变量的隶属函数,如图 2~图 4 所示。相应各个模糊变量的隶属度赋值见表 1~表 3。

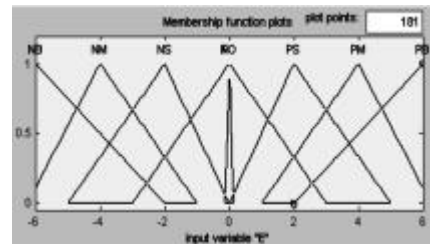


图 2 弧压误差  $E$  的隶属函数

Fig.2 Membership function of arc voltage error

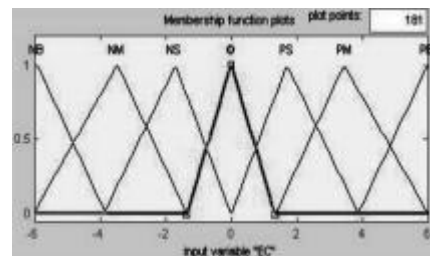


图 3 电弧电压偏差变化率  $EC$  隶属度函数

Fig.3 Membership of change rate  $EC$  of arc voltage deviation

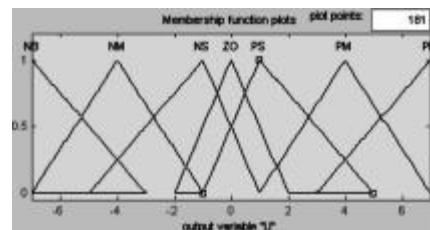


图 4 控制输出变量隶属函数

Fig.4 Membership function of output variable

#### 3.4 模糊控制规则的制定

采用较为成熟的 Mamdani (Max-Min) 推理算法,根据控制思想可建立  $7 \times 8 = 56$  条形如“if A and B, then C”的控制规则。将这 56 条控制规则整理成模

表 1 误差 E 的隶属度赋值

**Tab.1 Assignment table of membership grade of error E**

E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
PO	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 2 误差变化率 EC 的隶属度赋值

**Tab.2 Assignment table of membership grade of error variance ratio EC**

E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.9	1.0	0.7	0.2	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0
NS	0	0	0.2	0.7	1.0	0.9	0	0	0	0	0	0	0
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3 输出变量 U 的隶属度赋值

**Tab.3 Assignment table of membership grade of output variance**

U	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	
PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0
PS	0	0	0	0	0	0	0	0.4	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0
ZO	0	0	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0	0	0
NS	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.4	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

模糊控制规则表如表 4 所示。

表 4 模糊控制规则

**Tab.4 Fuzzy control rule**

EC/E	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
NM	NB	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PS
NS	NM	NS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PS
ZO	NS	NS	NS	ZO	ZO	PS	PS	PS
PS	NS	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PS	PM
PM	NS	NS	ZO	PS	PS	PS	PM	PB
PB	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB

### 3.5 反模糊化(模糊精确化)

模糊控制的最终输出必须是一个精确量,因此从模糊量到精确量的变换过程,即反模糊化过程。传统的反模糊化方法包括:最大隶属度法、中位数法和重心法。利用 MATLAB 模糊逻辑工具箱中的模

糊规则观察器可以直观地观察到当输入变量 E, EC 发生变化时,对应输出量 U 具体变化情况,如表 5 所示。

表 5 输出量 U 的模糊控制

**Tab.5 Fuzzy control table of output variance U**

E(X)/ Δ E(Y)	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-7	-7	-7	-6	-6	-6	-5	-4	-3	-1	0	0	0
-5	-7	-7	-6	-6	-5	-4	-4	-3	-2	-1	0	0	0
-4	-6	-6	-6	-5	-5	-4	-3	-3	-1	-1	0	0	0
-3	-6	-5	-5	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	1	1	1
-2	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-1	0	0	1	1	2
-1	-5	-4	-4	-3	-2	-1	-1	0	0	0	1	2	3
0	-4	-4	-3	-1	-1	0	0	0	1	1	2	3	3
0	3	3	2	1	1	0	0	0	1	1	3	4	4
1	3	2	1	0	0	0	1	1	2	3	4	4	5
2	2	1	1	0	0	1	2	3	3	4	4	4	5
3	1	1	1	0	1	2	3	3	4	4	5	5	6
4	0	0	0	1	1	3	3	4	5	5	6	6	6
5	0	0	0	1	2	3	4	4	5	6	6	7	7
6	0	0	0	1	3	4	5	6	6	6	7	7	7

## 4 模糊控制系统与其他控制系统的仿真比较

送丝机系统一般是二阶系统,经过测量计算,所使用的送丝机系统的传递函数为

$$G(S) = \frac{4.12}{S^2 + 3.675S}$$

利用 MATLAB 软件的 Simulink 工具箱中的 Fuzzy 模块,对所设计的模糊控制系统与传统的 PID 控制进行仿真对比,以验证模糊控制对所控制系统的响应。两者在 MATLAB 下的仿真比较模型如图 5 所示,控制效果如图 6 所示。由图可知,所设计的模糊控制效果远比原系统的 PID 控制好。这有利于送丝的稳定,能够更好地提高电弧的稳定性。

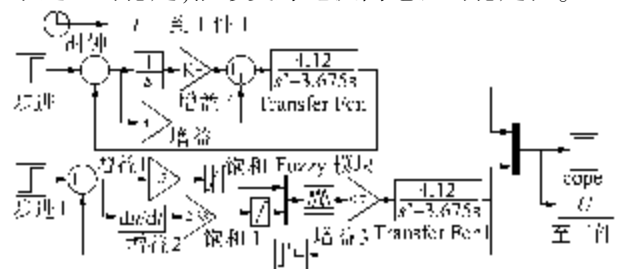


图 5 模糊控制与 PID 控制比较仿真模型

Fig.5 Simulation model graph of comparing fuzzy control with PID control

## 5 实验验证

实验利用台阶试样进行弧长控制验证,其原理

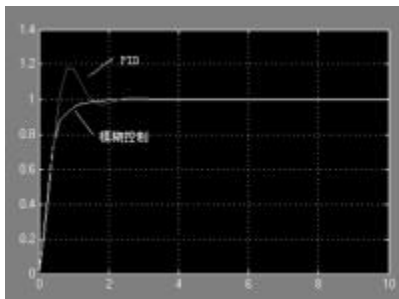


图 6 模糊控制与 PID 控制对系统响应仿真效果

Fig.6 Simulation effect graph of responding to system controlled by fuzzy and PID respectively

如图 7 所示。

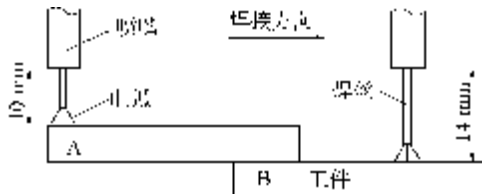


图 7 台阶实验示意

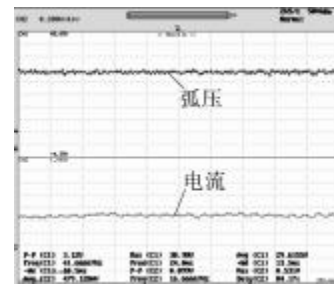
Fig.7 Sketch map of stepped test

实际焊接时,电弧波动一般在 5 mm 以内,因此,台阶高度设为 5 mm,即弧长波动 5 mm,焊枪枪嘴距工作高度初设为 10 mm,焊接中突变为 15 mm,焊接方向为 A 到 B。在初始焊接时,焊接电压 30 V,焊接电流 210 A,分别在采用弧长自调节和在此研制的弧长模糊控制系统条件下,对两种控制效果进行对比实验,并分别记录弧长自调节和模糊控制调节在 A,B 两个过程的电压、电流波形如图 8、图 9 所示。

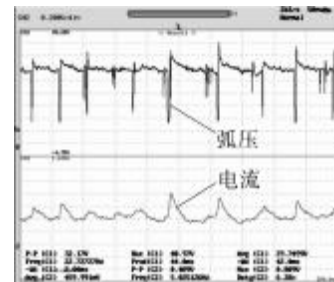
由图可知,当弧长突然发生变化后的焊接过程中,恒送丝利用电弧自调节的控制条件下,焊接稳定性变差,电参数不稳定,由正常的射滴过渡变为短路过渡,飞溅过多,焊接质量差;而利用模糊控制变送丝条件下,在电弧发生突变后,能够改变送丝速度,建立新的稳定工作点,电参数比较稳定,能够保证正常的射滴过渡,焊接稳定,飞溅小。

### 6 结论

在等速送丝情况下,模糊控制电弧稳定的方法是直接控制电弧电压输出。在此针对变速送丝,在基于 DSP 硬件基础上设计的弧长稳定模糊控制,其方法是通过控制送丝速度即时调整电弧长度,达到电弧在干扰情况下的稳定。经过仿真比较和实验证明,所设计的模糊控制能够满足正常焊接,并且具有比 PID 控制更为良好的动态响应特性,与传统的调节方法——电弧自调节相比,控制效果好。

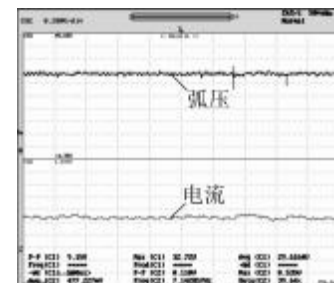


a A 过程波形

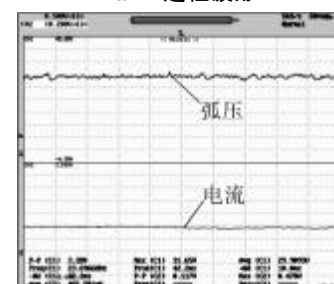


b B 过程波形

图 8 弧长自调节电压电流波形  
Fig.8 Waveshape of voltage and current of self-regulation in arc length



a A 过程波形



b B 过程波形

图 9 模糊控制电压电流波形

Fig.8 Waveshape of voltage and current of fuzzy control

### 参考文献:

- [1] 姜焕中.电弧焊与电渣焊[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 张国良.模糊控制及其 MATLAB 应用[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [3] 诸 静.模糊控制原理与应用[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [4] 吴开源,李 阳,黄石生,等脉冲 MIG 焊电源模糊控制器的研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(10):15-19.