

文章编号: 1000-8152(2006)01-0074-05

脉冲 MIG 焊电弧双模模糊控制

吴开源, 黄石生, 蒙永民

(华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对脉冲 MIG 焊焊钢时的电弧稳定性控制, 采用峰值弧压反馈的方式, 设计了基于修正因子的电弧双模模糊控制器, 当峰值弧压偏差较大时采用基于修正因子的粗调模糊控制规则, 以送丝速度 V_f 为控制量, 而当峰值弧压偏差较小时采用基于修正因子的细调模糊控制规则, 以基值时间 T_b 为控制量, 以查表方式实现模糊控制器. 最后通过试验验证了在焊接过程中弧长变化时所设计的模糊控制器可保持电弧的稳定从而保证焊接过程的稳定.

关键词: 脉冲 MIG 焊; 电弧调节; 修正因子; 双模; 模糊控制

中图分类号: TG434.1 **文献标识码:** A

Double-model fuzzy logic control strategy of arc in pulsed metal inertia gas welding

WU Kai-yuan, HUANG Shi-sheng, MENG Yong-min

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

Abstract: According to the feature of arc control in welding steel using pulsed metal inertia gas (MIG) welding, a correction-factor-based double-model fuzzy logic controller (FLC) was developed to realize the stability of arc control by means of feedback of peak arc voltage. When the difference of peak arc voltage is high, a coarse adjusting fuzzy control rule with correction factor is designed, the peak arc voltage is controlled by the wire feeding speed by means of feedback of peak arc voltage. When the difference of peak arc voltage is small, a fine adjusting fuzzy control rule with correction factor is designed, the peak arc voltage is controlled by the pulse base time by means of feedback of arc voltage. The FLC is realized in a Look-Up-Table (LUT) method. An experiment has been carried out, aiming at implementing the control strategy to control the arc length change in welding process. The experiment result shows that the proposed controller enables the stability of arc and welding process to be achieved in pulsed MIG welding process.

Key words: pulsed MIG welding; arc adjustment; correction factor; double-model; fuzzy logic control

1 引言 (Introduction)

焊接电弧弧长的稳定性主要取决于两个方面: 一是电弧的自身调节作用; 二是焊接参数及所选择的工艺方法^[1]. 脉冲 MIG 焊 (Pulsed Metal Inertia Gas Welding) 焊接钢时, 焊丝伸出长度的自身调节作用比较强, 但焊接钢时因焊丝送进速度的不稳定、手的抖动以及工件因热而产生的变形, 使电弧弧长改变, 导致电弧电压不稳定, 引起弧长的不稳定, 所以单靠焊丝伸出长度自身调节作用并不能保持电弧的稳定, 必须采取电弧电压反馈的方式保证电弧的稳定. 由于模糊控制有许多优点, 如设计系统时不需要建立被控对象的数学模型, 较易建立语言变量的控制规则, 系统的鲁棒性强, 尤其适用于非线性、时变、滞后系统的控制, 因此适合于脉冲 MIG 焊电源

的建模和控制^[2]. 为此, 本文引入基于修正因子的双模模糊控制策略, 采用峰值弧压反馈的方式, 以基值时间和送丝速度为控制量, 电弧稳定性为被控制量, 设计脉冲 MIG 焊电弧模糊控制系统.

2 模糊控制器的结构 (Fuzzy logic controller architecture)

2.1 双模模糊控制 (Double-model-based FLC)

双模模糊控制系统如图 1 所示.

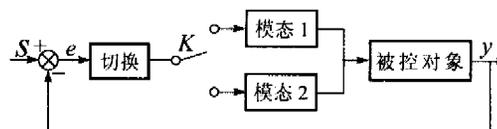


图 1 双模模糊控制系统原理框图

Fig. 1 The double-model-based fuzzy logic control system

收稿日期: 2003-10-15; 收修改稿日期: 2005-12-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375054); 广东省自然科学基金资助项目(990555).

其工作原理^[3]为: 对于较大的偏差 $e = S - y$ (式中 S 为系统给定值, y 为系统输出), 例如 $|e| \geq E_M$, 控制系统采用模式 1 (粗调模式) 进行模糊控制, 以提高系统的响应速度, 加快响应过程; 对于 $|e| < E_M$ 的较小偏差, 控制系统采用模式 2 (细调模式) 进行模糊控制, 以提高系统的阻尼程度, 使其响应过程具有较小超调, 甚至无超调的特性. 切换装置根据选定的切换阈值 E_M 进行程序切换, 以实现双模控制.

采用双模模糊控制策略主要是基于以下的考虑: 由于送丝系统的齿轮传动装置间存在间隙, 焊丝送进是靠送丝轮表面与焊丝间的摩擦力推动实现的, 存在打滑问题; 由于送丝导管直径比焊丝直径大, 焊丝在导管中呈弯曲状以及送丝导管本身经常处于弯曲的状态, 导致送丝阻力是经常变化的, 基于以上的因素, 对送丝速度的调节系统来说, 比较粗的模糊控制表比较合适, 过频的调节可能导致送丝系统来不及响应. 而对于基值时间来讲, 由于基值时间是由定时器来控制, 可采用较细的模糊控制表, 响应速度比较快.

该策略通过实时检测峰值弧压在线调整送丝速度或基值时间, 进行电弧的稳定性控制. 当峰值弧压偏差的绝对值 $|\Delta U_f(k)| \geq U_g$ 时, 以送丝速度作为控制量, 采用模糊控制粗调控制表; 当 $|\Delta U_f(k)| < U_g$ 时, 以基值时间为控制量, 采用模糊控制细调控制表, 其中 U_g 为模糊控制的阈值. 通过不断调整送丝速度和基值时间, 保持电弧的稳定和焊接过程的稳定.

2.2 基于修正因子的模糊控制器 (Correction-factor-based FLC)

在模糊控制规则中对偏差 E 及偏差变化率 EC 采取不同的重视程度, 即引入修正因子 α , 则可得到基于修正因子的模糊控制系统^[4] (图 2).

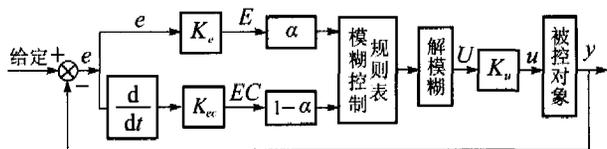


图 2 基于修正因子的模糊控制系统

Fig. 2 The correction-factor-based fuzzy logic control system

设偏差 E , 偏差变化率 EC 及控制量 U 的论域都为 $\{-N, -(N-1), \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, (N-1), N\}$, 则可得到基于修正因子的控制规则解析式为

$$U = - \langle \alpha E + (1 - \alpha) EC \rangle,$$

$$\alpha \in [\alpha_0, \alpha_n], (0 \leq \alpha_0 \leq \alpha_n \leq 1), \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{(\alpha_0 - \alpha_n) |E|}{N} + \alpha_0. \quad (2)$$

式(1)中 α 为修正因子, 它是介于 0 与 1 之间的实数, 即 $\alpha \in [0, 1]$; 偏差 $E = S - y$, S 为系统给定值, y 为系统输出; 偏差变化率 $EC(k) = E(k) - E(k-1)$, $k = 0, 1, 2, \dots$ 为离散时间变量; 式(1)中 $\langle \cdot \rangle$ 的运算规则为

$$\langle x \rangle = \begin{cases} \text{int } x + 1, & x \text{ 为大于 } 0 \text{ 的非整数时,} \\ x, & x \text{ 为整数时,} \\ \text{int } x - 1, & x \text{ 为小于 } 0 \text{ 的非整数时.} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 $\text{int } x$ 表示对 x 取整.

式(2)为 α 调整式, 当 E 增大时, α 增大, U 中 E 占的比例增加, 即控制作用用来消除偏差; 当 E 减小时, α 减小, U 中 E 占的比例减小, 即控制作用用来消除偏差变化率.

2.3 基于查表方式的模糊控制器 (Look-Up-Table-based FLC)

由模糊逻辑推理法^[5]可知, 对于 n 条模糊控制规则可以得到 n 个输入输出关系矩阵 R_1, R_2, \dots, R_n , 从而由模糊规则的合成算法可得系统总的模糊关系矩阵为

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i, \quad (4)$$

则对于任意系统偏差 E_i 和系统偏差变化率 EC_j , 其对应的模糊控制器输出 U_{ij} 为

$$U_{ij} = (E_i \times EC_j) \cdot R. \quad (5)$$

对式(5)得到的模糊控制量 U_{ij} 再进行解模糊计算就可以去直接控制系统对象了. 然而, 在实际应用中, 由于模糊关系矩阵 R 是一个高阶矩阵, 如果对于任何瞬间的系统偏差 E_i 和偏差变化率 EC_j 都用式(5)合成计算出控制输出 U_{ij} , 显然要花费大量的计算时间, 其结果是系统实时控制性能变差. 为了克服实时计算量大的缺点, 实际应用中通常采用查表法进行模糊控制.

3 模糊控制器的设计 (Design of fuzzy logic controller)

3.1 变量的模糊化 (Fuzzy state variables)

对模糊控制器的输入变量作以下定义:

$$e_n = U_g - U_m, \quad ec_n = e_n - e_{n-1}, \quad (6)$$

式中: e_n 为第 n 次的采样偏差, U_g 为电弧电压给定量, U_m 为第 n 次采样到的峰值电弧电压反馈量, ec_n 为第 n 次的偏差变化率, e_{n-1} 为第 $n-1$ 次的采样偏差.

对峰值弧压的采样是在从基值过渡到峰值阶段后的 2.5 ms 时进行的,这是考虑到在脉冲电流上升沿弧压的波动较大,而在进入脉冲 3 ms 以后有可能形成熔滴,使弧压的采样受到影响,因此应选择弧压干扰最小时进行采样。

实际焊接中弧长波动一般不超过 ± 5 mm,根据在氩气保护情况下电场强度为 0.59 V/mm,由此可得输入量的偏差范围为: $e_n = -5 \times 0.59 \sim +5 \times 0.59 \approx -3 \sim +3$ V. 选定 e_n 的变化范围为 $[-3, +3]$, ec 的变化范围也取为 $[-3, +3]$.

在其它条件不变时测定送丝速度对峰值弧压的影响,当送丝速度给定为 2.2 ~ 3.4 V 时所对应的送丝速度和峰值弧压分别为 2.01 ~ 3.87 m/min 和 33.4 ~ 27.4 V. 因此每伏峰值弧压的变化对应送丝速度的变化为: $(3.4 - 2.2)/(33.4 - 27.4) = 0.2$.

对应峰值弧压 3 V 的变化,送丝速度控制电压的变化范围为 ± 0.6 ms,即 $[-0.6, +0.6]$.

通过试验得到基值时间 T_b 为 3 ~ 15 ms 时,焊接过程才能稳定,飞溅少,因此每伏峰值弧压的变化对应基值时间的变化为: $(15 - 3)/(33.4 - 27.4) = 2$.

对应峰值电压 3V 的变化,基值时间 T_b 的变化范围为 ± 6 ms,即 $[-6, +6]$.

3.2 量化因子及比例因子的确定 (Proportion factor and quantization factor)

对于粗调模糊控制器,取 E, EC, U 的论域皆为 $[-3, +3]$,即

$E = EC = U = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,分为 7 级.

根据偏差、偏差变化率及输出量的取值范围和它们的论域^[6],可求出:偏差 e 和偏差变化率 ec 的量化因子为 $k_e = k_{ec} = 3/3 = 1$,输出量 u 的比例因子为 $k_u = 0.6/3 = 0.2$.

就输入量 E, EC 而言,通过比例因子可将相应的量转化到相应的论域上.即 -3 对应 -3V, -2 对应 -2V 等等.对于输出量 U 也可以采用相应的方法进行转换.

对于细调模糊控制器,取 E, EC, U 的论域皆为 $[-6, +6]$,即:

$E = EC = U = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,分为 13 级.

根据偏差、偏差变化率及输出量的取值范围和它们的论域,可求出:偏差 e 和偏差变化率 ec 的量化因子为 $k_e = k_{ec} = 6/3 = 2$,输出量 u 的比例因子为 $k_u = 6/6 = 1$.

同样通过比例因子可将相应的量转化到相应的论域上,即 -6 V 对应 -3 V, -5 V 对应 -2.5 V 等,对于输出量 U , -6 V 对应 -6 ms, -5 V 对应 -5 ms 等.

3.3 模糊控制粗调表的生成 (Coarse adjusting table)

当峰值弧压偏差较大时,偏差 E , 偏差变化率 EC 和送丝速度给定 V_f 量化总等级为 $d = (2m + 1) |_{m=4} = 7$. 当偏差较大时, α 取得大些,表示对偏差 E 的加权值大,使控制的主要目标是消除偏差;而当偏差较小时,更主要的控制目标是使系统尽快地稳定,准确定位而无超调,因此使偏差变化 EC 的加权值大些,即 α 值取小些. 针对不同的等级偏差范围, α 的取值见式(7).

$$v = \begin{cases} -\langle \alpha_{11}E + (1 - \alpha_{11})EC \rangle, & E = 0 \text{ 时}, \alpha_{11} = 0.30, \\ -\langle \alpha_{12}E + (1 - \alpha_{12})EC \rangle, & E = \pm 1, \pm 2 \text{ 时}, \\ & \alpha_{12} = 0.50, \\ -\langle \alpha_{13}E + (1 - \alpha_{13})EC \rangle, & E = \pm 3 \text{ 时}, \alpha_{13} = 0.60. \end{cases} \quad (7)$$

由此生成的模糊控制粗调表如表 1 所示.

表 1 模糊控制粗调控制表

Table 1 Coarse adjusting table of fuzzy logic controller

e	ec						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	3	2	2	1	1
-2	3	2	2	1	1	0	-1
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
2	-1	0	-1	-1	-2	-2	-3
3	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-3

3.4 模糊控制细调表的生成 (Fine adjusting table)

当峰值弧压偏差较小时,考虑到控制精度,把量化等级分得更细一些.为此将峰值弧压偏差 E 、偏差变化率 EC 和基值时间 T_b 总等级数分为 $d = (2m + 1) |_{m=6} = 13$. 细调阶段是控制稳定性的主要阶段,对控制品质(如振荡和超调)起决定性影响的是细调控制表生成的质量,为此将细调阶段中的不同偏差域的 α 取得更细一些,如式(8)所示.

$$V = \begin{cases} -\langle \alpha_{21}E + (1 - \alpha_{21})EC \rangle, & E = 0 \text{ 时}, \alpha_{21} = 0.30, \\ -\langle \alpha_{22}E + (1 - \alpha_{22})EC \rangle, & E = \pm 1, 2 \text{ 时}, \alpha_{22} = 0.50, \\ -\langle \alpha_{23}E + (1 - \alpha_{23})EC \rangle, & E = \pm 3, 4 \text{ 时}, \alpha_{23} = 0.60, \\ -\langle \alpha_{24}E + (1 - \alpha_{24})EC \rangle, & E = \pm 5, 6 \text{ 时}, \alpha_{24} = 0.70. \end{cases} \quad (8)$$

由此生成的模糊控制细调表如表 2 所示。

表 2 模糊控制细调控制表

Table 2 Fine adjusting table of fuzzy

logic controller		ec											T _b	
e		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4		5
-6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	3	3	3	3
-5	6	5	5	5	5	4	4	4	3	3	3	2	2	2
-4	5	5	4	4	4	3	3	2	2	2	1	1	0	0
-3	5	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1	-1	-1	-1
-2	4	4	3	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-2
-1	4	3	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3
0	5	4	3	3	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5
1	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4
2	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-4
3	1	1	-1	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-5	-5
4	0	-1	-1	-2	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5
5	-2	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-5	-6	-6
6	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-5	-5	-5	-6	-6	-6	-6	-6

3.5 模糊控制器的实现 (Implementation of LUT method)

为了提高运算速度, 节省存储单元, 以上工作都是离线进行的, 在得到模糊控制粗调表和细调表后, 将其存到内存中, 并编制一个相应的查表子程序. 在实际控制过程中, 模糊控制器只需进行以下几步工作:

1) 在每一个脉冲周期中采样峰值弧压 U_m , 并求取实际的即时偏差 e_n 和偏差变化率 ec_n

$$e_n = U_g - U_m, \quad ec_n = e_n - e_{n-1}. \quad (9)$$

2) 比较峰值弧压偏差的绝对值和模糊控制的阈值, 大于阈值时调用粗调模糊控制表, 小于阈值时调用细调模糊控制表;

3) 将实际的 e_n 和 ec_n 分别乘以量化因子 k_e 和 k_{ec} , 取得相应论域元素表征的查表所需要的 x_n 和 y_n 值, 即

$$x_p = k_e e_n, \quad y_n = k_{ec} ec_n, \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \quad (10)$$

4) 以 x_n 和 y_n 查找控制表的行和列, 可得到控制量的论域值 U_n ;

5) 将查表得到的控制量的论域值 U_n 乘以比例因子 k_u , 即

$$u^* = k_u U_n. \quad (11)$$

由此便可得到实际的控制量 u^* , 输出去控制被控对象.

4 试验研究 (Experiment)

4.1 试验条件 (Experiment method and equipment)

本试验采用本校研制的电源系统由 4 部分组

成^[7]: 主电路、单片机系统、驱动电路和送丝电路. 主电路是 IGBT 全桥逆变结构, 单片机系统以 DS80C320 为核心, 驱动电路包括以 SG3525A 为核心的 PWM 脉宽调制电路、过流保护电路、IGBT 隔离驱动电路和过欠压保护电路等, 送丝电路是以 TL494CN 为核心的脉宽调制电路.

试验所采用的焊接参数及条件见表 3.

表 3 焊接参数及条件

Table 3 Welding parameters and conditions

焊接方法	脉冲 MIG 焊
接头形式	堆焊
焊接材料	6 mm 低碳钢板
峰值电流	290 A
峰值时间	3.5 ms
基值电流	50 A
基值时间	3 ~ 15 ms
焊接速度	350 mm/min
送丝速度	2 ~ 4.24 m/min
焊丝材料	H08Mn2SiA
焊丝直径	Φ 1.2 mm
保护气体	99% Ar, 1% CO ₂
保护气流量	15 L/min
工件长度	200 mm

焊接试验如图 3 所示, 工件厚度为 6 mm. 试验采用上坡焊, 焊接时焊枪高度从 10 mm 变化到 20 mm. 导电嘴到喷嘴之间的开始距离为 10 mm, 焊接方向从 A 点到 B 点.

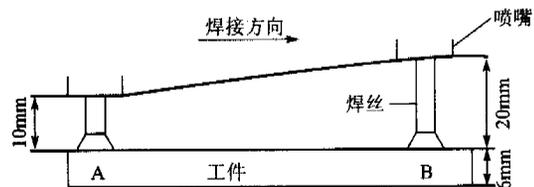


图 3 上坡焊试验示意图

Fig. 3 Sketch of upgrade welding

4.2 试验结果及分析 (Discussion of experiment results)

图 4 为试验所测得的电流电压波形图. 图 5 为上坡焊时的焊缝外观图. 从图 4 中可以看出, 随着喷嘴到工件距离的增大, B 点的基值时间明显大于 A 点的基值时间, 保持了峰值电压的恒定; 在 A 点采集到的平均电流为 148 A, 在 B 点采集到的平均电流为 137 A, 因此可知从 A 点到 B 点送丝速度也变慢了, 保证了电弧的稳定, 从图 4 中可看出, 在基值电流、峰值电流和峰值时间均相等的情况下, A 点的焊丝熔化速度高于 B 点的焊丝熔化速度.

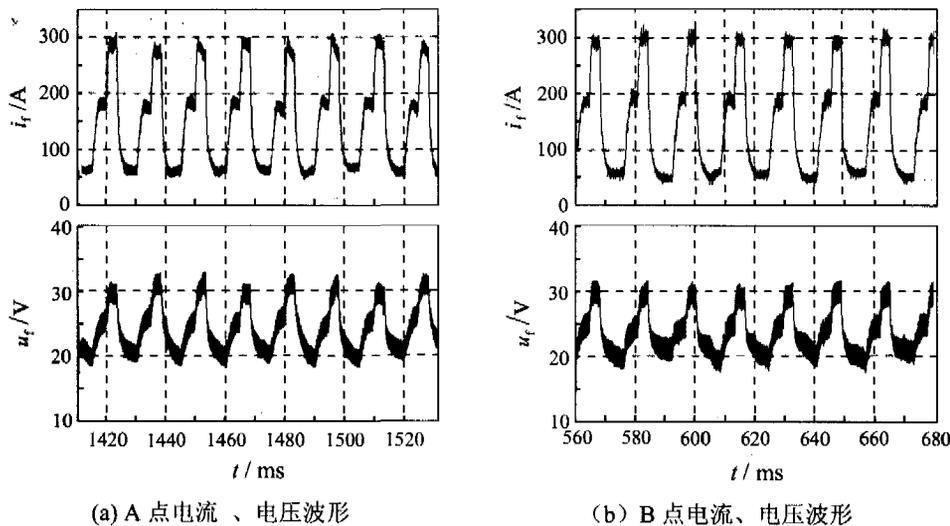


图4 上坡焊时电流电压波形图

Fig. 4 Output current and voltage waveform

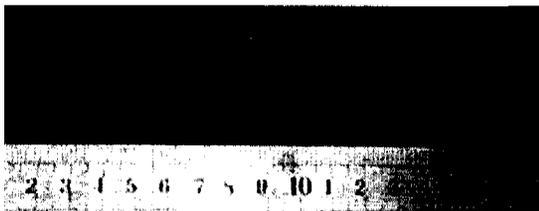


图5 上坡焊时焊缝外观图片

Fig. 5 Photograph of weld line of upgrade welding

5 结论(Conclusion)

针对脉冲MIG焊焊钢时的电弧电压控制,设计了基于修正因子的电弧双模糊控制器.当峰值弧压偏差较大时采用基于修正因子的粗调模糊控制规则,以送丝速度为控制量,而当偏差较小时采用基于修正因子的细调模糊控制规则,以基值时间作为控制量,以查表方式实现模糊控制器.试验结果表明,采用上坡焊时电弧电压稳定,电弧弧长稳定性好,抗干扰能力强.

参考文献(References):

- [1] 蒙永民. GMAW-P 焊熔滴过渡模糊控制的研究[D]. 广州:华南理工大学机电系, 2001.
(MENG Yongmin. Study on fuzzy logic control for GMAW-P droplet transfer process [D]. Guangzhou: Department of Mechatronic Engineering, South China University of Technology, 2001.)
- [2] 陈强, 潘际奎, 大岛健司. 焊接过程的模糊控制[J]. 机械工程学报, 1995, 31(4): 86-91.
(CHEN Qiang, PAN Jiluan, OSHIMA K. Fuzzy control in welding process [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1995, 31(4): 86-91.)
- [3] 李友善, 李军. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
(LI Youshan, LI Jun. Fuzzy Theory and Its Application in Process Control [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1993.)
- [4] 张立岩, 叶景楼, 刘建辉. 基于期望配置的带有调整因子的二维模糊控制算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(10): 651-652.
(ZHANG Liyan, YE Jinglou, LIU Jianhui. Study of two-Demension fuzzy algorithm with adjustable factors based on control expectation [J]. Computer Automated Measurement & Control, 2002, 10(10): 651-652.)
- [5] 闻新. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
(WEN Xin. The Analysis and Application of MATLAB Fuzzy Logic Toolbox [M]. Beijing: Science Press, 2001.)
- [6] LEE C C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1990, 20(2): 404-418.
- [7] 黄石生. 新型弧焊电源及其智能控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
(HUANG Shisheng. New Type Arc Power Source and Intelligent Control [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2000.)

作者简介:

吴开源 (1978—), 男, 华南理工大学机械工程学院博士研究生, 目前主要研究方向为新型弧焊逆变电源及其数字化智能控制, E-mail: scutwky2000@163.com;

黄石生 (1938—), 男, 华南理工大学机械工程学院教授、博士生导师, 曾任华南理工大学副校长, 目前主要研究方向为新型弧焊逆变电源及其数字化智能控制;

蒙永民 (1969—), 男, 华南理工大学机械工程学院博士, 目前主要研究方向为新型弧焊逆变电源及其数字化智能控制.