

电阻点焊的变论域模糊控制方法

袁清珂, 张明天, 冯 桑

(广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 为提高电阻点焊模糊控制适应性和稳定性差的缺点, 根据变论域控制理论, 提出了电阻点焊的变论域模糊控制方法. 首先, 讨论了变论域模糊控制的基本原理. 其次, 设计了输入隶属函数、输出隶属函数、模糊控制规则、伸缩因子, 开发了一种基于规范化因子的电阻电焊变论域模糊控制器, 并使用模糊规则选择变论域的伸缩因子, 给出了算法实现的具体步骤. 最后, 进行了不同控制方案的实验研究, 分析了实验结果, 验证了该控制算法的优越性.

关键词: 模糊控制; 电阻点焊; 自适应控制; 变论域; 伸缩因子

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Variable universe fuzzy control methods for resistance spot welding

YUAN Qing-ke, ZHANG Ming-tian, FENG Sang

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: In order to enhance the adaptability and stability of resistance spot welding(RSW), the variable universe RSW control method is put forward based on the variable universe control theory. First, the basic theory of variable universe fuzzy control theory is discussed. Second, the inputting membership functions, the outputting membership functions, the fuzzy control rules and the extension-contraction factors are designed; thus, a fuzzy controller based on normalized factors is developed. The extension-contraction factors are selected according to the fuzzy rulers in proposed controller. The detailed calculation steps of the algorithm are given. Finally, a practical prototype is tested with different control methods. The test results are analyzed and discussed; and the advantages of the proposed control algorithm are verified.

Key words: fuzzy control; spot welding; adaptive control; variable universe; extension-contraction factors

1 引言(Introduction)

电阻点焊RSW(resistance spot welding)是一个高度非线性、有多变量耦合作用和含有大量不确定因素的过程, 且具有瞬时性和不可观测性的特点, 为提高其焊接质量, 通常需采用模糊控制技术对电阻电焊过程进行控制^[1]. 其控制方案如图1所示, 由模糊化、模糊规则、解模糊等模块组成. 然而, 常规的模糊控制器存在着如稳态误差、纹波、鲁棒性有待进一步改善等缺点^[2], 针对这些问题, 国内外学者提出了多种解决方法. 由于电阻点焊至今尚未建立有理想的数学模型^[3], 难以进行计算机仿真和优化, 其模糊控制方案的设计仍然以总结专家的操作经验为基础. 而即使是“专家经验”也难以全面归纳电阻点焊的控制过程, 因此如何充分、合理地利用有限的控制经验, 则成为了能否成功研制电阻点焊模糊控制器的关键^[4].

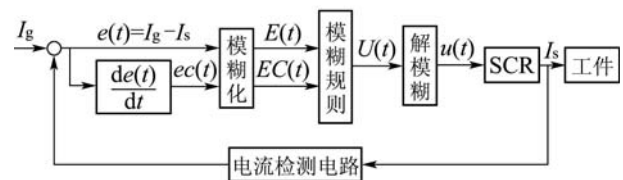


图 1 电阻点焊模糊控制方案

Fig. 1 Fuzzy control scheme for RSW

常规模糊控制器都是某种插值器, 其本质是插值机理与插值算法^[5], 而采用变论域自适应模糊控制对于处理多变量非线性系统十分有效^[5], 目前变论域模糊控制已在多个领域获得了深入的研究和成功的应用^[6].

2 变论域控制原理(Variable universe fuzzy control principle)

所谓变论域是指论域可以分别随着变量的

变化而自行调整,论域的变化情况如图2所示,图中 $\alpha(t)$ 为论域 $E(t)$ 的伸缩因子。

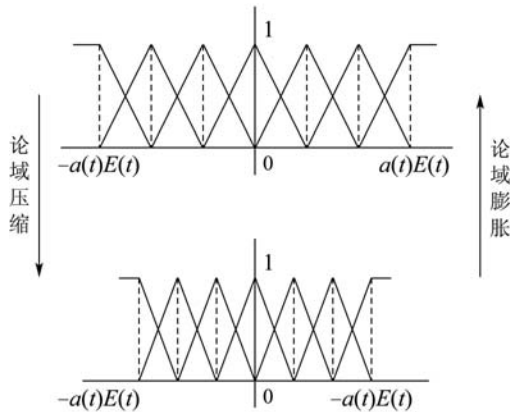


图2 论域的变化

Fig. 2 Universe variation

在变论域模糊控制理论中,伸缩因子须满足对偶性、避零性、单调性、协调性和正规性等条件。此外,变论域模糊控制理论对系统的控制规则和控制函数还有单调性的要求。

3 电阻点焊变论域模糊控制算法(Algorithm on variable universe fuzzy control of RSW)

根据变论域模糊控制理论,笔者设计了如图3所示的电阻点焊模糊控制器的控制方案。

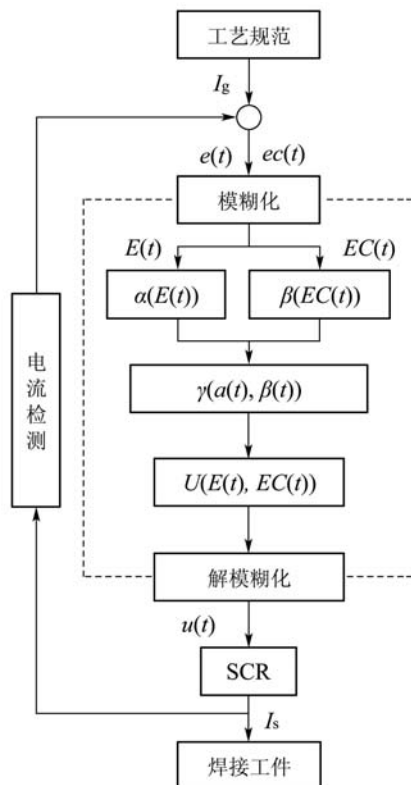


图3 电阻点焊变论域模糊控制方案

Fig. 3 Variable universe fuzzy control scheme of RSW

3.1 输入隶属函数(Inputting membership functions)

将输入变量 $e(t)$ 规范化到如图4所示的论域上,其中模糊划分 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$ 分别相当于常用的NL(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中),PL(正大), $A_i(i=1,2,\dots,7)$ 的解析式略。同理可规定输入函数 $ec(t)$ 的隶属函数如图5所示, $B_j(j=1,2,\dots,7)$ 的解析式略。

由 $e(t)$ 转换至 $E(t)$ 的计算为

$$E(t) = (G_e) \cdot e(t). \quad (1)$$

式中: G_e 为 $e(t)$ 的规范化因子, $G_e = 1/e(t)_{\max}$ 。

由 $ec(t)$ 转换至 $EC(t)$ 的计算为

$$EC(t) = (G_{ec}) \cdot ec(t). \quad (2)$$

式中: G_{ec} 为 $ec(t)$ 的规范化因子, $G_{ec} = 1/ec(t)_{\max}$ 。

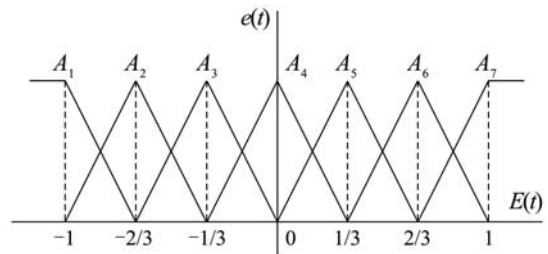


图4 $E(t)$ 的隶属函数图

Fig. 4 Membership functions of $E(t)$

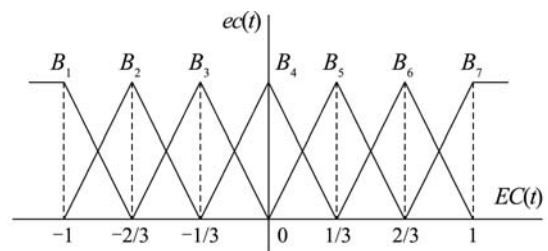


图5 $EC(t)$ 的隶属函数

Fig. 5 Membership functions of $EC(t)$

3.2 输出隶属函数(Outputting membership functions)

在变论域模糊控制理论中,关于推理后件的模糊集只出现它们的峰点,而与模糊集的形状无关,可将输出隶属函数确定如图6所示。

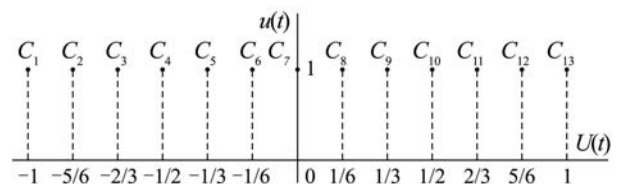


图6 $U(t)$ 的隶属函数

Fig. 6 Membership functions of $U(t)$

由 $U(t)$ 转换至 $u(t)$ 的计算为

$$u(t) = G_u \cdot U(t). \quad (3)$$

式中: G_u 为 $u(t)$ 的规范化因子, $G_u = 1/u(t)_{\max}$.

3.3 模糊控制规则(Fuzzy control rules)

根据前期工作积累的控制经验, 可设计模糊控制规则如表1所示.

表1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

$U(t)$	$E(t)$						
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
B1	1	5/6	2/3	1/2	1/3	1/6	0
B2	5/6	2/3	1/2	1/3	1/6	0	-1/6
B3	2/3	1/2	1/3	1/6	0	-1/6	-1/3
B4	1/2	1/3	1/6	0	-1/6	-1/3	-1/2
B5	1/3	1/6	0	-1/6	-1/3	-1/2	-2/3
B6	1/6	0	-1/6	-1/3	-1/2	-2/3	-5/6
B7	0	-1/6	-1/3	-1/2	-2/3	-5/6	-1

根据模糊控制器的插值原理, 有

$$u(t) = U(e(t), ec(t)) = G_u \cdot \sum \sum E_i(e(t)) \cdot EC_j(ec(t)). \quad (4)$$

3.4 伸缩因子(Extension-contraction factors)

根据变论域理论中关于伸缩因子的定义^[9], 为了获得满意的控制效果, 可以采用定性或定量的方法设计伸缩因子. 定性方法主要应用定性的知识, 如领域专家的经验, 确定伸缩因子的形式; 而定量方法, 则是利用所谓“定量的信息”, 即可测的数据, 形成伸缩因子.

结合电阻点焊的控制特点, 实时性要求高, 不适合选用过于复杂的伸缩因子. 可考虑定性地使用模糊规则选择 $e(t)$, $ec(t)$ 的伸缩因子 $\alpha(t)$, $\beta(t)$, 分别定义为L(大), M(中), S(小)和Z(零), 如图7和表2所示.

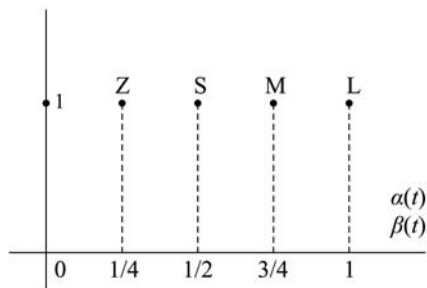


图7 $\alpha(t)$, $\beta(t)$ 的模糊集

Fig. 7 Fuzzy sets of $\alpha(t)$, $\beta(t)$

输出变量 $u(t)$ 的伸缩因子 $\gamma(t)$ 可按下式计算:

$$\gamma(t) = \frac{\alpha(t) + \beta(t)}{2}. \quad (5)$$

表2 $e(t)$, $ec(t)$ 的伸缩因子

Table 2 Extension-contraction factors of $e(t)$ and $ec(t)$

$e(t)$	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
$\alpha(t)$	L_e	M_e	S_e	Z_e	S_e	M_e	L_e
$ec(t)$	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
$\beta(t)$	L_{ec}	M_{ec}	S_{ec}	Z_{ec}	S_{ec}	M_{ec}	L_{ec}

现对伸缩因子 $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $\gamma(t)$ 分析如下:

- 1) 所确定的伸缩因子具有对偶性, 可以使输出量绝对值大小相同时具有同样的论域大小;
- 2) 所确定的伸缩因子具有避零性, 可以防止出现论域变化到极端形式, 即论域收缩为一点;
- 3) 所确定的伸缩因子具有单调性, 可以使论域随输出量的减少而减少;
- 4) 所确定的伸缩因子具有相容性, 可以保证输入量保持在变化后的论域内, 而不至于跑到论域以外.

可见伸缩因子的确定完全满足变论域理论的要求.

3.5 变论域模糊控制算法(Variable universe fuzzy control algorithm)

结合上述理论分析和电阻点焊的工作需求, 开发了变论域模糊控制算法, 其步骤如下:

Step 1 由电流检测电路检测出实时电流 I_s , 计算出电流误差及误差变化率:

$$\begin{cases} e(t) = I_g - I_s, \\ ec(t) = e(t) - e(t-1). \end{cases} \quad (6)$$

Step 2 将 $e(t)$, $ec(t)$ 规范化到各自的模糊论域上:

$$\begin{cases} e(t) = G_e \cdot e(t), \\ ec(t) = G_{ec} \cdot ec(t). \end{cases} \quad (7)$$

Step 3 计算输入论域的伸缩因子 $\alpha(t)$, $\beta(t)$ 和输出论域的伸缩因子 $\gamma(t)$:

$$\begin{cases} \alpha(t) = 1.0 \times (A_1 + A_7) + 0.75 \times (A_2 + A_6) + 0.5 \times (A_3 + A_5) + 0.25 \times A_4, \\ \beta(t) = 1.0 \times (B_1 + B_7) + 0.75 \times (B_2 + B_6) + 0.5 \times (B_3 + B_5) + 0.25 \times B_4, \\ \gamma(t) = \frac{\alpha(t) + \beta(t)}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

Step 4 由插值机理计算模糊控制器的输出变量:

$$U(t) = \gamma(t) \sum \sum A_i(\alpha(t)E(t)) \cdot B_j(\beta(t)EC(t)). \quad (9)$$

Step 5 计算实际的输出量:

$$\Delta\alpha = u(t) = G_u \cdot U(t). \quad (10)$$

重复上述步骤,直至焊接过程结束.

4 实验研究(Experiment research)

结合理论与算法设计,开发了一种以DSP为控制核心的控制系统,并应用于DN1-63型气动点焊机.实验材料为1.0 mm厚的低碳钢,焊接规范经调整确定为:电极压力1.5 KN、焊接时间17周(1周为0.02 s)、焊接电流6.5 KA、电极端面直径6.4 mm.

实验分为3个方案进行,分别为方案I:变论域模糊控制方案,如图3所示;方案II:传统模糊控制方案,如图1所示;方案III:无模糊控制方案,即常规恒流控制.

实验条件为:常规网压(380 V)、常规气压、无分流、电极端面无磨损、试件表面处理干净.试验以10点为1组,现列举一组实验结果如表3所示.

表3 焊点检测结果

Table 3 Test results of welding points

焊点	方案I		方案II		方案III	
	直径/mm	波动/%	直径/mm	波动/%	直径/mm	波动/%
1	4.9	-0.6	5.0	4.6	4.9	6.3
2	4.8	-2.6	4.7	-1.7	4.3	-6.7
3	4.9	-0.6	4.9	2.5	4.5	-2.4
4	5.1	3.4	5.1	6.7	4.8	4.1
5	5.0	1.4	4.5	-5.9	5.0	8.5
6	4.7	-4.7	4.7	-1.7	4.7	2.0
7	4.9	-0.6	4.8	0.4	3.6	-22
8	5.1	3.4	4.7	-1.7	4.9	6.3
9	4.9	-0.6	4.9	2.5	5.1	11
10	5.0	1.4	4.5	-5.9	4.3	-6.7

在对电阻点焊焊接的质量评判,通常针对一批次的焊点进行质量分析.主要从焊点大小均匀性、强度稳定性、外观等方面考虑.由于论文篇幅的限制,本文只分析焊点大小均匀性与离散性.

由表3可以看出,方案III的焊点直径的最大波动为22%、波动最大;方案II的焊点直径的最大波动为6.7%、波动较小;方案I的焊点直径的最大波动

为4.7%、波动最小;说明变论域模糊控制方案的稳定性和控制效果,具有明显的优越性.

5 结论(Conclusion)

由于电阻点焊的控制特点,引入模糊控制是必要的,而采用变论域模糊控制作为控制策略,可以避免电阻点焊控制研究中无合适的数学模型的难题;而且由于论域可随着误差的变化而变化,相当于在电阻点焊过程中动态调整模糊控制规则,可以发挥其快速响应的特点.实验结果表明,该方案可以有效抑制焊接电流的发散和过调,改善焊点的质量稳定性.

参考文献(References):

- [1] EL-BANNA M, FILEV D, CHINNAM R B. Intelligent constant current control for resistance spot welding[C] // *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Vancouver, USA: IEEE, 2006: 1570 – 1577.
- [2] YING H. Deriving analytical input-output relationship for fuzzy controllers using arbitrary input fuzzy sets and Zadeh fuzzy and operator[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2006, 14(5): 654 – 662.
- [3] WILLIAMS N T, PARKER J D. Review of resistance spot welding of steel sheets: modelling and control of weld nugget formation[J]. *International Materials Reviews*, 2004, 49(2): 45 – 75.
- [4] 吴开源, 黄石生, 蒙永民. 脉冲MIG焊电弧双模模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 22(1): 74 – 78.
(WU Kaiyuan, HUANG Shisheng, MENG Yongmin. Double-model fuzzy logic control strategy of arc in pulsed metal inertia gas welding[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 22(1): 74 – 78.)
- [5] 李洪兴, 苗志宏, 王加银. 非线性系统的变论域自适应模糊控制[J]. 中国科学E辑, 2002, 32(2): 211 – 223.
(LI Hongxing, MIAO Zhihong, WANG Jiayin. The adaptive fuzzy control of nonlinear systems based on variable universe[J]. *Science in China (Series E)*, 2002, 32(2): 211 – 223.)
- [6] 郑宏, 徐红兵, 朱贵平. 变论域自适应模糊控制在航机发电中的应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 253 – 256.
(ZHENG Hong, XU Hongbing, ZHU Guiping. Adaptive fuzzy control based on variable universe and its application to aircraft engine turbine power generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(2): 253 – 256.)

作者简介:

袁清珂 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为知识工程与智能设计、机电控制、多刚体动力学与计算机仿真, E-mail: qkyuan@gdut.edu.cn;

张明天 (1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机电控制、现代设计方法, E-mail: 43686795@qq.com.

冯桑 (1973—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机电控制、汽车电子, E-mail: fengsang@gdut.edu.cn.