

文章编号: 1000-8152(2001)01-0069-07

一种建立模糊模型的粗糙集方法*

李文 孙辉

(大连铁道学院电气信息分院·大连·116028) (哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室·哈尔滨·150001)

陈善本

摘要: Pawlak 提出的粗糙集理论是一种刻画不确定性的数学工具. 本文研究了基于粗糙集理论建立模糊模型的方法, 提出了扩充与整定的概念, 并运用所提出的方法建立了脉冲 TIG 焊动态过程模型. 经模型有效性确认表明该方法是有效的.

关键词: 粗糙集; 模糊模型; 整定与扩充; 焊接过程建模

文献标识码: A

A Rough Set Method of Building Fuzzy Model

LI Wen and SUN Hui

(School of Electrical Information, Liaoning Dalian Railway Institute·Dalian, 116028, P. R. China)

CHEN Shanben

(National Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology·Harbin, 150001, P. R. China)

Abstract: The rough set theory, which is proposed by Pawlak, provides a tool for describing uncertainty. This paper discusses the method of building fuzzy model based on the rough set theory, presents concepts of adjustment and expansion, and the dynamic model of pulse TIG welding process is built by the proposed method. The validations of models are done and the results show that the method is effective.

Key words: rough set; fuzzy model; adjustment and expansion; modeling welding process

1 引言 (Introduction)

复杂对象的控制规则难以人工提取, 这在一定程度上限制了模糊控制的应用. 同时, 模糊控制系统中的多变量使系统设计变得十分复杂, 也导致了规则总数随着输入个数的增加, 成几何级数“爆炸”. 因此, 对一个复杂系统研究在精度允许的范围内, 能够自动提取模糊控制规则、压缩模型维数和每维分档数的新的模型理论和辨识方法是必要的.

本文首先在广义模型化概念的指导下, 以粗糙集理论^[1,2]为基础, 构造了一种新的模糊模型表示形式. 针对模糊模型的完备化问题, 提出了整定与扩充的原理和方法, 给出了一种基于粗糙集理论的模糊系统建模方法. 然后, 运用该方法定量分析了脉冲 TIG 焊 (pulse tungsten inert gas welding) 这一复杂过程, 建立了关于熔池背面宽度的模糊模型. 最后对所建立的模糊模型进行了模型有效性确认, 并给出了脉冲 TIG 焊背面熔池宽度预测的仿真结果.

受篇幅所限, 文中所有定理和命题的证明从略,

读者可参阅文献[3]有关章节.

2 模糊模型及其形式定义 (Fuzzy model and its formal definition)

设系统 S 由 n 个输入点 x_1, \dots, x_n 和 m 个输出点 y_1, \dots, y_m 构成. 令

$$X = \{x_1, \dots, x_n\},$$

称 X 为 S 的输入空间; 令

$$Y = \{y_1, \dots, y_m\},$$

称 Y 为 S 的输出空间.

设对系统的输入输出进行有限次测量 (t 次) 后, 得到的输入输出量测值为如下序列

$$\begin{cases} x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}, y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1m}; \\ x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}, y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2m}; \\ \vdots \\ x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tn}, y_{t1}, y_{t2}, \dots, y_{tm}. \end{cases} \quad (1)$$

对输入输出量测值 x_{ij} 和 y_{jk} ($i = 1, \dots, t, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, m$) 进行模糊化处理. 经模糊化处

* 基金项目: 辽宁省自然科学基金(972085)和大连市青年学术带头人计划资助项目.
收稿日期: 1998-08-25; 收修改稿日期: 2000-03-03.

理后,其形式为

$$\begin{cases} \underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}, \dots, \underline{A}_{1n}, \underline{B}_{11}, \underline{B}_{12}, \dots, \underline{B}_{1m}; \\ \underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}, \dots, \underline{A}_{2n}, \underline{B}_{21}, \underline{B}_{22}, \dots, \underline{B}_{2m}; \\ \vdots \\ \underline{A}_{m1}, \underline{A}_{m2}, \dots, \underline{A}_{mn}, \underline{B}_{m1}, \underline{B}_{m2}, \dots, \underline{B}_{mm}. \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)的每一行添加标号 l_1, \dots, l_m , 就得到了系统 S 的一个模糊模型. 令

$$V_X = \{\underline{A}_1, \dots, \underline{A}_N\},$$

称 V_X 为输入空间 X 的值空间; 令

$$V_Y = \{\underline{B}_1, \dots, \underline{B}_M\},$$

称 V_Y 为输出空间 Y 的值空间; 令

$$L = \{l_1, \dots, l_m\},$$

称 L 为模糊模型的标号集. 于是, 我们可以形式地给出系统模糊模型的定义如下.

定义 1 设 S 是一个模糊系统, S 的一个模糊模型 FM 定义为如下的六元组:

$$FM = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle.$$

其中, $L = \{l_1, \dots, l_m\}$ 是 FM 的标号集; $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ 是 S 的输入空间; $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ 是 S 的输出空间; $V_X = \{\underline{A}_1, \dots, \underline{A}_N\}$ 是输入空间 X 的值空间; $V_Y = \{\underline{B}_1, \dots, \underline{B}_M\}$ 是输出空间 Y 的值空间; f 是输入空间和输出空间到它们的值空间上的赋值函数, 即

$$f: L \times (X \cup Y) \rightarrow (V_X \cup V_Y). \quad (3)$$

对于一个给定的模糊模型 FM , 赋值函数 f 是一个单值的确定函数, 即对确定的 $l_i \in L$ 和 $x_j \in X$, 有唯一确定的 $f(l_i, x_j) \in V_X$; 对确定的 $l_i \in L$ 和 $y_j \in Y$, 有唯一确定的 $f(l_i, y_j) \in V_Y$.

上面所定义的模糊模型可以用表 1 所示的形式来表示.

表 1 模糊模型表示例

Table 1 An example of fuzzy model table

L	X, Y			
	x_1	x_2	x_3	y
l_1	\underline{A}_2	\underline{A}_1	\underline{A}_2	\underline{B}_2
l_2	\underline{A}_2	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{B}_2
l_3	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{B}_1
l_4	\underline{A}_2	\underline{A}_2	\underline{A}_2	\underline{B}_1
l_5	\underline{A}_2	\underline{A}_2	\underline{A}_2	\underline{B}_3
l_6	\underline{A}_3	\underline{A}_2	\underline{A}_3	\underline{B}_3
l_7	\underline{A}_3	\underline{A}_3	\underline{A}_3	\underline{B}_3

表中, $L = \{l_1, \dots, l_7\}$; $X = \{x_1, x_2, x_3\}$; $Y = \{y\}$; $V_X = \{\underline{A}_1, \underline{A}_2, \underline{A}_3\}$; $V_Y = \{\underline{B}_1, \underline{B}_2, \underline{B}_3\}$; $f(l_1, x_1) = \underline{A}_2, \dots, f(l_7, x_3) = \underline{A}_3, f(l_7, y) = \underline{B}_3$.

2.1 模型中的范畴和知识 (Categories and knowledge in model)

定义 2 设 R 是非空集合 A 上的等价关系. 对任意的 $a_i \in A$, 令

$$[a_i]_R = \{a_j \mid a_j \in A \text{ 且 } a_i R a_j\}.$$

称 $[a_i]_R$ 为 A 中的 a_i 关于 R 的等价类. 在 A 中以 R 的等价类为元素构成的集合, 称为 A 的商集, 记为 A/R .

定义 3 设 $FM = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是一个模糊系统的模糊模型, $Z = X \cup Y, W \subseteq Z, W \neq \emptyset$. 对任意 $z \in Z$, 定义

$$\begin{cases} \mathcal{Z} = \{[l_i, l_j] \mid l_i, l_j \in L \text{ 且 } f(l_i, z) = f(l_j, z)\}, \\ \text{IND}(W) = \bigcap \{z \mid z \in W\}. \end{cases} \quad (4)$$

显然 \mathcal{Z} 和 $\text{IND}(W)$ 都是 L 上的等价关系. 对任意的 $l \in L$, 称 $[l]_{\text{IND}(W)}$ 为 FM 中关于 W 的一个范畴, 并且称 $L/\text{IND}(W)$ 为 FM 中关于 W 的一个知识.

例如, 在表 1 所示的模糊模型中令 $W = \{x_1, x_2\}$, 于是 $W \subseteq Z$. FM 中关于 W 的各范畴如下:

$$[l_1]_{\text{IND}(W)} = [l_2]_{\text{IND}(W)} = \{l_1, l_2\},$$

$$[l_3]_{\text{IND}(W)} = \{l_3\},$$

$$[l_4]_{\text{IND}(W)} = [l_5]_{\text{IND}(W)} = \{l_4, l_5\}$$

$$[l_6]_{\text{IND}(W)} = \{l_6\},$$

$$[l_7]_{\text{IND}(W)} = \{l_7\}.$$

FM 中关于 W 的知识:

$$L/\text{IND}(W) = \{[l_1]_{\text{IND}(W)}, [l_3]_{\text{IND}(W)}, [l_4]_{\text{IND}(W)}, [l_6]_{\text{IND}(W)}, [l_7]_{\text{IND}(W)}\}.$$

2.2 模型中知识的近似及其度量 (Approximation and measurement of knowledge in model)

根据粗糙集理论^[1]的基本思想和概念, 我们给出如下定义.

定义 4 设 $FM = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是系统的模糊模型, $Z = X \cup Y, W \subseteq Z, W \neq \emptyset, L/\text{IND}(Y) = \{C_1, \dots, C_k\}$. 对关于 Y 的范畴 $C_i, i = 1, \dots, k$, 定义如下两个集合:

$$\text{LOW}_{\text{IND}(W)}(C_i) = \{l \mid l \in L \text{ 且 } [l]_{\text{IND}(W)} \subseteq C_i\}, \quad (5)$$

$$\text{UP}_{\text{IND}(W)}(C_i) = \{l \mid l \in L \text{ 且 } [l]_{\text{IND}(W)} \cap C_i \neq \emptyset\}. \quad (6)$$

FM 中关于 Y 的知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 $\text{IND}(W)$ -下近似定义为:

$$\text{LOW}_{\text{IND}(W)}(L/\text{IND}(Y)) = \bigcup_{i=1}^k (\text{LOW}_{\text{IND}(W)}(C_i)); \quad (7)$$

FM 中关于 Y 的知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 $\text{IND}(W)$ -上近似

定义为:

$$\text{UP}_{\text{IND}(W)}(L/\text{IND}(Y)) = \bigcup_{i=1}^k (\text{UP}_{\text{IND}(W)}(C_i)); \quad (8)$$

FM 中关于 Y 的知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 $\text{IND}(W)$ - 确切度定义为:

$$\alpha_{\text{IND}(W)}(L/\text{IND}(Y)) = \frac{\sum_{i=1}^k \text{Card LOW}_{\text{IND}(W)}(C_i)}{\sum_{i=1}^k \text{Card UP}_{\text{IND}(W)}(C_i)}; \quad (9)$$

FM 中知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 $\text{IND}(W)$ - 粗糙度定义为:

$$\rho_{\text{IND}(W)}(L/\text{IND}(Y)) = 1 - \alpha_{\text{IND}(W)}(L/\text{IND}(Y)). \quad (10)$$

例如, 在表 1 所示的模型中, 输出空间 Y 的 $\text{IND}(X)$ - 下近似为

$$\text{LOW}_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = \{l_1, l_2, l_3, l_6, l_7\}$$

模型中输出空间 Y 的 $\text{IND}(X)$ - 上近似为

$$\text{UP}_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7\},$$

模型中输出空间知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 $\text{IND}(X)$ - 确切度为

$$\alpha_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = \frac{5}{7} = 0.71.$$

模型中输出空间知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 $\text{IND}(X)$ - 粗糙度为

$$\rho_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = 1 - 0.71 = 0.29.$$

3 模型的一致性与完备化 (Consistency and completion of model)

一致性是对模糊模型的一项基本要求, 在不一致的模型中, 存在着相互矛盾的规则. 完备性是指模型对系统的所有输入必须产生相应的输出, 否则模型将出现“断档”, 即不能有效地对系统输出给出决策.

本节首先给出模型一致性的概念和极大一致性分解定理, 然后给出模型完备性的概念及其度量, 最后研究了模型完备化过程中的整定与扩充方法. 模型的一致性和模型的简化是从粗糙集理论中推广到本模糊模型中来的.

3.1 模型的一致性与极大一致性分解 (Consistency and maximal consistent decomposing of model)

定义 5 设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的模糊模型, 对任意 $l_i \in L$. 符号 f_i 表示下述序列:

$$f(l_i, x_1), \dots, f(l_i, x_n), f(l_i, y_1), \dots, f(l_i, y_m),$$

将 f_i 称为 FM 中的第 l_i 条规则, 符号 $(f_i \uparrow X)$ 和

$(f_i \uparrow Y)$ 分别表示序列:

$$f(l_i, x_1), \dots, f(l_i, x_n) \text{ 和 } f(l_i, y_1), \dots, f(l_i, y_m),$$

并分别称它们为第 l_i 条规则的前件和后件. 如果对任意的 $l_j \in L$, 若 $(f_i \uparrow X) = (f_j \uparrow X)$, 则 $(f_i \uparrow Y) = (f_j \uparrow Y)$, 那么称规则 l_i 是一致的. 若 FM 中的所有规则都是一致的, 则称 FM 是一致的.

命题 1 设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的模糊模型, FM 是一致的, 当且仅当 $\alpha_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = 1$.

命题 2 设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的模糊模型, $L = L_1 \cup L_0$. FM 能够被唯一地分解为两个子模型:

$$\text{FM}_1 = \langle L_1, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle, \quad (11)$$

$$\text{FM}_0 = \langle L_0, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle, \quad (12)$$

使得在 FM_1 中 $\alpha_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = 1$, 在 FM_0 中 $\alpha_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)) = 0$.

定理 1 极大一致性分解定理.

设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的任意模糊模型. 必存在着 L 的一个极大子集 L_1 , 使 FM 的一个子模型 $\text{FM}_1 = \langle L_1, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是一致的.

3.2 模型的完备性 (Completeness of model)

定义 6 设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的一个模糊模型, 输入空间 X 的各输入点为 x_1, \dots, x_n , 每个输入点 $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ 的所有不同取值分别为 $\underline{A}_1^i, \dots, \underline{A}_r^i$, 令 $D_i = \{\underline{A}_1^i, \dots, \underline{A}_r^i\}$, 称 $U = D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n$ 为 FM 的前件论域; 称数字 $\text{Card } U = \prod_{i=1}^n r_i$ 为 FM 的规则完备数; 称值 $\frac{\text{Card } L}{\text{Card } U}$ 为 FM 的完备度; 当 $U = \bigcup_{l_i \in L} \{(f_i \uparrow X)\}$ 时, 称 FM 是完备的.

命题 3 设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的任意模糊模型, 其中 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ 是输入空间的输入点, 每一个输入点所分的档数分别为 r_1, \dots, r_n . FM 是完备的, 当且仅当

$$\text{Card } L / \prod_{i=1}^n r_i = 1. \quad (13)$$

3.3 输入空间的整定 (Adjustment of input space)

由模糊模型的完备度可知, 如果降低各输入点的分档数量 r_i 的值, 可以有效地提高模糊模型的完备度.

定义 7 设 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的模糊模型, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ 取满足下列条件的 x_i' :

1) $x_i \subset x_i'$ 且 x_i' 是 L 上的等价关系;

2) 令 $X' = \{x_1, \dots, x_{i-1}, x'_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}$, $FM' = \langle L, X', Y, V_X, V_Y, f \rangle$, 使得 $LOW_{IND(X)}(L/IND(Y)) = LOW_{IND(X')} (L/IND(Y))$.

若存在这样的 x'_i , 则以 FM' 取代 FM , 称这一过程为对输入点 x_i 的整定.

定理 2 整定的一致性定理.

对一致模糊模型的输入空间进行的整定不影响模糊模型的一致性.

3.4 一致模型的扩充 (Expansion of consistent model)

定义 8 设 $FM = \langle L, X, Y, V_X, V_Y, f \rangle$ 是模糊系统 S 的模糊模型, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, $L = \{l_1, \dots, l_t\}$. 将 FM 看成是由其中的所有规则构成的集合, 即 $FM = \{f_{i_1}, f_{i_2}, \dots, f_{i_t}\}$. Γ 是关于 FM 的一个算子, 定义
$$\Gamma(FM) = FM \cup \{f_{i_{t+1}}\}. \quad (14)$$

$f_{i_{t+1}}$ 是满足下列条件的任意规则:

$$1) (f_{i_{t+1}} \uparrow X) \notin \bigcup_{i=1}^t (f_i \uparrow X);$$

2) 存在着 X 的非空真子集 F 和 $j \leq t$ 使

$$(f_{i_{t+1}} \uparrow ((X \cup Y) - F)) = (f_j \uparrow ((X \cup Y) - F)),$$

且

$$l_j \in LOW_{IND(Y-F)}(L/IND(Y)).$$

称 $\Gamma(FM)$ 为对 FM 的一次扩充.

定理 3 算子 Γ 的不动点存在定理. 对任意模糊模型 FM , 算子 Γ 存在着不动点, 即以 Γ 对 FM 连续作用有限次后得到模糊模型 FM' , 将使得

$$\Gamma(FM') = FM'.$$

定理 4 扩充一致性定理. 如果模糊模型 FM 是一致的, 那么 $\Gamma(FM)$ 仍然是一致的.

4 基于粗糙集理论的模糊模型建立方法 (Modeling method of fuzzy model based on rough set theory)

本节介绍了基于粗糙集理论的模糊模型建立步骤和脉冲 TIG 焊动态过程模糊模型的提取过程, 并对所建模型进行了模型有效性确认.

4.1 模型及误差准则的选择 (Selection of model and error criterion)

模型是在某种意义下对实际系统的一种近似描述, 它的确定要兼顾其精确性和复杂性. 模型的精确性要求越高, 模型就会变得越复杂; 如果适当地降低模型的精度要求, 只考虑主要因素而忽略次要因素, 模型就可以简单一些. 所以在建立模型时, 存在着精确性和复杂性的矛盾, 必须找到解决这一矛盾的折衷方法. 本文提出的建模方法是通过计算各输入点的确切度, 对模糊系统的输入空间进行筛选, 以找出能在给定的准则下逼近原系统的最简单模糊模型.

文中采用的误差准则为

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y(t) - y_p(t)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^2(t). \quad (15)$$

其中 N 为测试的总次数, $y(t)$ 为实际输出, $y_p(t)$ 为模型输出.

4.2 基于粗糙集理论的模糊模型建立步骤 (Steps of building fuzzy model based on rough set theory)

第一步 数据预处理.

1) 对输入、输出语言变量值进行划分并确定各语言变量值的隶属函数;

2) 对所采集数据进行模糊化处理.

第二步 输入空间的筛选.

1) 对初始模糊模型进行一致性处理, 即删除重复和矛盾规则, 矛盾规则采用保留出现次数多者的处理原则 (次数相同者任取其一), 由此生成初始一致模糊模型.

2) 输入变量的确定. 在实际应用中, 可在输入空间化简的基础上, 根据确切度的大小适当选择输入点 (该过程可称为输入空间的筛选).

对输入空间筛选后得到的模糊模型需再进行一次极大一致性分解, 生成一致模糊模型.

第三步 模糊模型的整定与扩充. 对生成的一致模糊模型进行整定与扩充处理, 并计算模型的完备度. 若该模糊模型的完备度等于 1, 则到第五步.

第四步 进行模型的完备化补充. 对一致模糊模型的完备化补充实际上是采用适当方法 (如专家经验等) 进行规则补充, 直至所求模型的完备度为 1, 得到最终的模糊模型.

第五步 模型检验. 应用所选定的模型误差准则进行模型有效性确认, 若满足误差要求, 则结束, 否则转第三步.

4.3 脉冲 TIG 焊动态过程模型的建立 (Modeling dynamic process of pulse TIG welding)

由于焊接过程是一个具有高度非线性、多变量耦合作用、存在着不确定因素的复杂过程, 因此对这一过程使用传统的建模理论和方法建立精确的数学模型是十分困难的. 在此以分析与建立脉冲 TIG 焊背面熔池宽度模型作为本文所提出的建立模糊模型粗糙集方法的一个具体应用.

4.3.1 数据采集 (Sampling data)

为了建立脉冲 TIG 焊平板堆焊在恒焊速变电流规范下的动态模糊模型, 我们采集了 800 对输入 (脉冲电流峰值时间 T_p) 和输出 (焊件背面熔池宽度 B_w) 数据. 具体实验参数如表 2 所示. 这 800 对数据是从 8 块试件的实际焊接过程中采集得到的, 每块

试件施焊 100 个脉冲.

表 2 脉冲 TIG 焊试验条件

Table 2 Conditions of pulse TIG welding

参数名称	参数值
脉冲频率 f/Hz	1
峰值电流 I_p/A	120
基值电流 I_b/A	60
钨极直径 ϕ/mm	3.0
钨极锥角 $\theta/(\circ)$	30
弧长 l/mm	4.0
氩气流量 $L/l \cdot \text{min}^{-1}$	8.0
焊接速度 $V_w/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	2.5
试件尺寸 $(\text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm})$	$280 \times 50 \times 2$

从上述的 800 对输入输出数据中随机选取 400 对数据来建立 TIG 焊动态过程模糊模型;另外的 400 对数据用来进行模糊模型有效性确认.

4.3.2 初始一致模型的形成 (Acquisition of initial consistent model)

脉冲 TIG 焊背面熔宽动态模糊模型的形式为 $\text{FM} = \langle L, X, Y, V_x, V_y, f \rangle$. 在此选定模糊模型的输入空间为 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$, 输出空间为 $Y = \{y\}$. 其中, x_1 为 t 时刻的电流脉冲峰值时间 $T_p(t)$, x_2 为 $t-1$ 时刻的电流脉冲峰值时间的 $T_p(t-1)$, x_3 是 $t-1$ 时刻的电流脉冲峰值时间的变化率 $T_p(t-1) - T_p(t-2)$, x_4 是 t 时刻的峰值电压 $U_p(t)$, x_5 和 x_6 分别是 $t-1$ 时刻和 $t-2$ 时刻的背面熔池宽度 $B_w(t-1)$ 和 $B_w(t-2)$, 过程输出 y 为 t 时刻的背面熔池宽度 $B_w(t)$.

首先确定输入/输出语言变量值及其隶属函数;之后,对采集数据进行模糊化处理,得到表 3. 实际上表 3 是一组以 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 为输入点,以 y 为输出点的初始模糊模型. 对初始模糊模型进行极大一致性处理,从而得到由 164 条一致规则组成的具有六个前件的初始一致模糊模型,如表 4 所示,同时也确定了模糊模型中的标号集 $L = \{1, 2, 3, \dots, 164\}$.

表 3 模糊输入/输出数据表

Table 3 Fuzzy data table of input-output

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y
1	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{C}_1	\underline{D}_2	\underline{B}_3	\underline{B}_3	\underline{B}_1
2	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{C}_1	\underline{D}_2	\underline{B}_3	\underline{B}_3	\underline{B}_1
3	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{C}_1	\underline{D}_2	\underline{B}_4	\underline{B}_4	\underline{B}_2
...
400	\underline{A}_7	\underline{A}_7	\underline{C}_5	\underline{D}_2	\underline{B}_7	\underline{B}_7	\underline{B}_7

表 4 初始一致模糊模型

Table 4 Initial consistent FM

L	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y
1	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{C}_1	\underline{D}_2	\underline{B}_3	\underline{B}_3	\underline{B}_1
2	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{C}_1	\underline{D}_2	\underline{B}_3	\underline{B}_3	\underline{B}_1
3	\underline{A}_1	\underline{A}_1	\underline{C}_1	\underline{D}_2	\underline{B}_4	\underline{B}_4	\underline{B}_2
...
164	\underline{A}_7	\underline{A}_7	\underline{C}_5	\underline{D}_2	\underline{B}_7	\underline{B}_7	\underline{B}_7

4.3.3 输入空间的筛选 (Selection of input space)

下面通过计算输入空间知识对输出空间知识的确切度来定量分析每个输入变量对输出的影响程度. 先计算初始一致模糊模型中 7 种复合关系 $\text{IND}(X), \text{IND}(X - \{x_1\}), \dots, \text{IND}(X - \{x_6\})$ 在标号集上产生的范畴个数及关于知识 $L/\text{IND}(Y)$ 的 7 种下近似 $\text{LOW}_{\text{IND}(X)}(L/\text{IND}(Y)), \text{LOW}_{\text{IND}(X - \{x_1\})}(L/\text{IND}(Y)), \dots, \text{LOW}_{\text{IND}(X - \{x_6\})}(L/\text{IND}(Y))$ 中的元素个数如表 5.

表 5 范畴个数及元素个数统计表

Table 5 Statistical table of categories and elements

复合关系序号	1	2	3	4	5	6	7
范畴个数	164	131	149	153	150	145	142
元素个数	164	101	134	143	137	127	124

由表 5 和确切度定义,可分别求出去除输入点 $x_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 后的确切度 α , 并根据 α 值得出输入点对输出影响程度的顺序 d , 如表 6 所示.

由此可见,在六个输入中 x_1, x_5 和 x_6 对输出的影响最大,所以可将模型输入空间中输入点 x_2, x_3 , 和 x_4 筛选掉,得到一个具有三个输入点的模糊模型. 由于输入点的减少产生了新的重复和矛盾规则,故需要再进行一次模糊模型的极大一致性处理,并得到一个由 79 条规则构成的一致模糊模型.

表 6 单独除去输入点 x_i 后的确切度统计表

Table 6 The table of approximate degree after removing x_i

变量符号	参数名称	α	d
x_1	t 时刻电流脉冲峰值时间	0.616	1
x_2	$t-1$ 时刻电流脉冲峰值时间	0.817	4
x_3	$t-1$ 时刻电流脉冲峰值时间变化率	0.872	6
x_4	t 时刻峰值电压	0.835	5
x_5	$t-1$ 时刻背面熔池宽度	0.774	2
x_6	$t-2$ 时刻背面熔池宽度	0.756	3

4.3.4 整定与扩充(Adjustment and expansion)

根据所介绍的整定方法对筛选后的一致模糊模型进行整定,通过整定表明各输入点的分档不可合并;再对整定后的模型进行扩充,经过两轮扩充后,得到最终模糊模型 FM,其中的规则数为 252 条,其完备度为 0.735,故应进行完备化补充,完备化补充视具体情况可采取不同方法,本文通过排除不可能出现的输入组合后,根据专家经验进行了规则补充,最后得到一个由 343 条模糊规则构成的完备的背面熔宽模糊模型(1)。

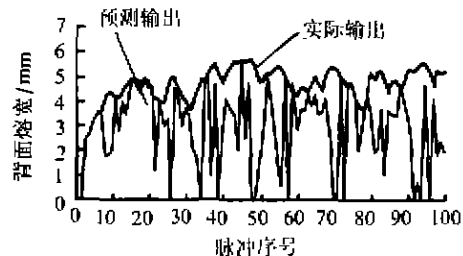
为了检验该建模方法的有效性,我们在同样输入/输出数据下基于模糊关系模型的相关统计方法建立了与模型(I)具有相同输入输出变量的由 79 条模糊规则构成的背面熔宽模糊模型(II)。

由于篇幅所限,模糊模型(I)与(II)从略。

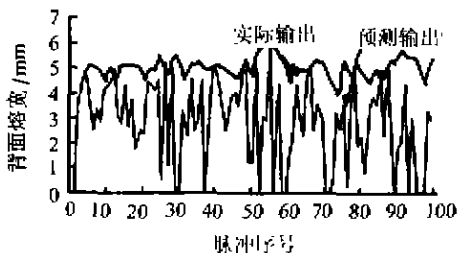
5 模型有效性确认(Validation of model)

对脉冲 TIG 焊背面熔池宽度进行预测仿真的目的是为了检验所建立的动态模糊模型的有效性,判断模型结果是否准确的最终办法是“通过实践来检验”,即通过比较模型结果与实际系统的运行结果的偏差来计算模型的精度,称为运行有效性确认。

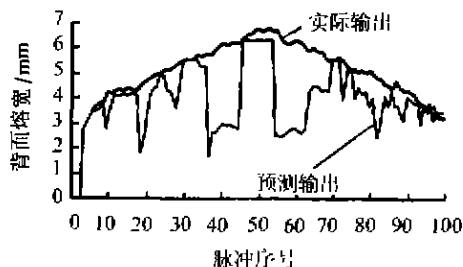
模型确认方法多种多样,其中较有代表性的方法有图灵测试法、主观有效性评价法、预测有效性方法、历史数据法和曲线法等十几种方法,在本文中采用预测有效性方法、历史数据法和曲线法相结合的方式对模型进行检验。



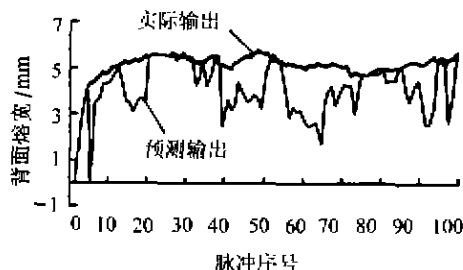
(a) 三维79条规则(A22)



(b) 三维79条规则(A23)



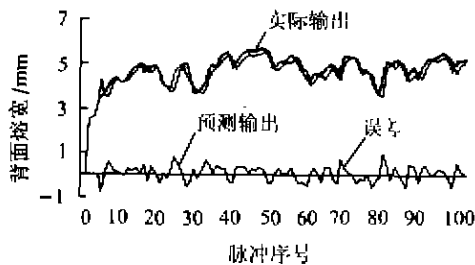
(c) 三维79条规则(H02)



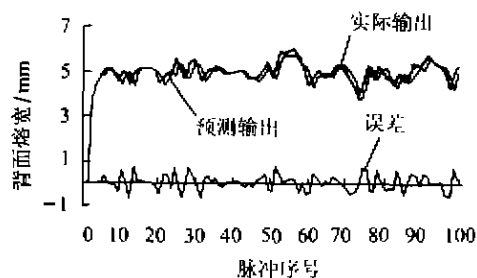
(d) 三维79条规则(H04)

图1 采用模型(II)时的背面熔宽预测曲线

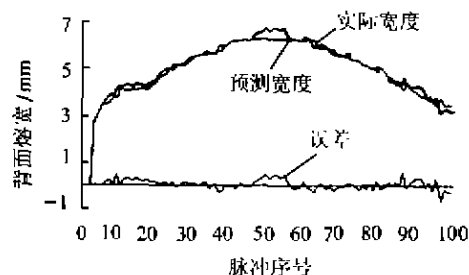
Fig. 1 Prediction curve of back width with model (II)



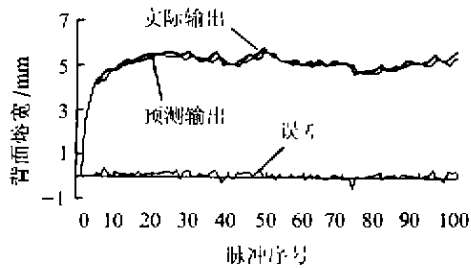
(a) 三维完整规则集(A22)



(b) 三维完整规则集(A23)



(c) 三维完整规则集(H02)



(d) 三维完整规则集(H04)

图 2 采用模型(1)时的背面熔宽预测曲线

Fig. 2 Prediction curve of back width with model (1)

为检验所建立的脉冲 TIG 焊背面熔宽模糊模型的有效性,用从另外 4 块试件(A22, A23, H02, H04)上采集的 400 组数据进行背面熔池宽度模糊模型的有效性确认,得到曲线如图 1 和图 2 所示,并根据所选择的误差准则(式(15))计算可知,用本文提出的建模方法建立的模糊模型输出结果的误差为 0.077,用传统的相关统计建模方法建立的模糊模型输出结果的误差为 4.816.

模型有效性确认结果表明:本文提出的建立模糊模型的粗糙集方法能够在数据不精确、不完整和

不确定的情况下比较客观地、有效地提取复杂过程的模糊模型.

参考文献(References)

- [1] Pawlak Z. Rough sets [J]. Internal Journal of Information and Computer Science, 1982, 11(5):341-356
- [2] Pawlak Z. Rough Set: Theoretical Aspects of Reasoning About Data [M]. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991
- [3] Li Wen. Knowledge model of fuzzy system and identification approach [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1991 (in Chinese)

本文作者简介

李文 1960年生,现任大连铁道学院电气信息分院副教授,博士,主要研究兴趣是智能控制,目前正从事控制系统不确定性方面的研究.

孙辉 1950年生,现任大连铁道学院电气信息分院副教授,主要研究兴趣是人工智能与综合智能系统设计,目前正从事控制系统不确定性方面的研究

陈善本 1956年生,现任哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室教授,博士生导师,主要从事焊接机器人及焊接过程控制方面的研究.