浙江理工大学学报,第 30 卷,第 1 期,2013 年 1 月
Journal of Zhejiang Sci-Tech University
Vol. 30, No. 1, Jan. 2013

文章编号:1673-3851 (2013) 01-0059-06

基于泛三 I 算法的模糊系统响应能力分析

李 龙,裴道武
(浙江理工大学信息学院,杭州 310018)

摘 要:讨论基于三 I 算法构成的模糊系统的响应能力是模糊系统理论的重要研究方向之一。根据选取三个常用的模糊蕴涵算子,给出了基于这些蕴涵算子的泛三 I 算法公式,其次构造了基于泛三 I 算法的单输入单输出模糊控制器,分析这些模糊控制器的响应能力,最后对这些模糊系统进行了实验仿真。

关键词:模糊推理;三 I 算法;泛三 I 算法;模糊控制器;响应能力
中图分类号:TP273.4 **文献标志码**:A

0 引 言

自 Zadeh 提出模糊集的概念以后,进一步发展了模糊逻辑和模糊推理理论,并且被应用于表达模糊系统[1]。目前,模糊控制技术已经成为智能控制方法的重要组成部分。常用的模糊控制算法可归结为某种插值算法,它是对响应函数的逼近[2]。因此对模糊推理算法的研究将有助于提高模糊控制系统的响应能力,改善模糊控制的效果。

三 I 方法[3]是我国学者王国俊教授于 1999 年提出的,该方法是一种新的模糊推理方法,具有良好的逻辑基础且包含推理优化的思想。近年来,有不少文献从模糊控制系统应用的角度对三 I 算法展开进一步研究,得到许多有价值的结果[4-7]。

文献[8]指出,对于几个重要的模糊蕴涵算子,基于普通三 I 算法构造的模糊系统的响应能力比较差。进一步,当三个蕴涵算子不局限于同一种模糊蕴涵算子时,所构造的模糊系统可能有更好的响应能力[8]。文献[9]中唐益明使用两个不同蕴涵算子构造了(1,2,1)型泛三 I 算法,并且给出了相应的模糊系统及响应函数。本文在文献[8]和[9]的基础上,进一步对泛三 I 算法及模糊控制系统理论展开研究,讨论泛三 I 算法表达式,以及基于这些算法构造的模糊控制器的响应能力。

1 预备知识

三 I 方法的规则[10]:设 $A,A^* \in F(X)$,$B \in F(Y)$,那么 *FMP* 问题的 B^* 应为论域 Y 上使得式(1)对于任何 $x \in X, y \in Y$ 恒取最大值的最小模糊集:

$$(A(x) \to B(y)) \to (A^*(x) \to B^*(y)) \quad (1)$$

为了表述清楚,可以将式(1) 改写为:

$$R_1(R_2(A(x),B(y)),R_3(A^*(x),B^*(y))) \quad (2)$$

其中 R_i 表示蕴涵算子,$i=1,2,3$。

日常的模糊推理过程中经常用到以下蕴涵算子:

a) $R_L(a,b) = 1 \wedge (1-a+b)$

b) $R_G(a,b) = \begin{cases} 1, & a \leqslant b, \\ b, & a > b. \end{cases}$

c) $R_{G_0}(a,b) = \begin{cases} 1, & a \leqslant b, \\ \dfrac{b}{a}, & a > b. \end{cases}$

d) $R_M(a,b) = a \wedge b$

e) $R_0(a,b) = \begin{cases} 1, & a \leqslant b, \\ (1-a) \vee b, & a > b. \end{cases}$

在文献[4]中,这 5 个蕴涵算子分别叫做 Lukasiewicz 蕴涵算子、Gödel 蕴涵算子、Goguen 蕴涵算子、Mamdani 蕴涵算子和 R_0 蕴涵算子。

收稿日期:2012-05-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11171308)
作者简介:李 龙(1988-),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要从事为非经典数理逻辑与近似推理方面的研究。

为了重点展示三I方法的应用，本文以单输入单输出模糊系统为例，简要叙述基于CRI方法的Mamdani控制算法。

设X为输入变量论域，Y为输出变量论域，取语言值$A_i \in F(X)$，$B_i \in F(Y)$，记$A=\{A_i\}_{1\leqslant i\leqslant n}$，$B=\{B_i\}_{1\leqslant i\leqslant n}$，视$A$，$B$为语言变量，由此形成$n$条推理规则：

IF x is A_i then y is B_i，$i=1,2,3,\cdots,n$.

这里$x\in X$，$y\in Y$叫做基础变量。按照Mamdani算法，第i个推理规则的真域为X到Y的模糊关系$R_i=A_i\times B_i$，其中$R_i(x,y)=A_i(x)\wedge B_i(y)$，这$n$条规则自然用"或"(它对应集合的并)联结，因此$n$条规则的总真域$R=\bigcup_{i=1}^{n}R_i$，即

$$R(x,y)=\bigvee_{i=1}^{n}R_i(x,y)=\bigvee_{i=1}^{n}(A_i(x)\wedge B_i(y))$$

给定$A^*\in F(X)$，则推理结果$B^*\in F(Y)$，它由CRI算法来确定：$B^*=A^*\circ R$，这里

$$B^*(y)=\bigvee_{x\in X}(A^*(x)\wedge R(x,y)) \tag{3}$$

对于一个模糊系统，输入量为确切量，设为$x'\in X$，为了能使用式(2)，需将x'模糊化，通常采用单点模糊集：

$$A'(x)=\begin{cases}1, & x=x',\\ 0, & x\neq x'.\end{cases} \tag{4}$$

代入式(3)便得推理结果B'：

$$B'(y)=R(x',y)=\bigvee_{i=1}^{n}(A_i(x')\wedge B_i(y)) \tag{5}$$

因B'是模糊集，故需经清晰化得到确切数作为对实际控制对象的操作量，常用的方法为"重心法"：

$$y'=\frac{\int_{y\in Y} yB'(y)\mathrm{d}y}{\int_{y\in Y} B'(y)\mathrm{d}y} \tag{6}$$

要判断基于CRI算法下的模糊控制器具有阶跃响应性能还是具有泛逼近性，只需要确定B'，然后代入式(6)，求出y'再进行判断即可，为了讨论方便，还需要明确以下概念。

定义1[1]　给定某个论域X，$A=\{A_i\}_{1\leqslant i\leqslant n}$为$X$上一族正规模糊集，峰点为$x_i$(即满足$A(x_i)=1$的点)，称$A$为$X$上的一个模糊划分，如果满足条件：$(\forall i,j)(i\neq j\Rightarrow x_i\neq x_j)$并且$(\forall x\in X)(\sum_{i=1}^{n}A_i(x)=1)$，其中$A_i$叫做$A$的一个基元，从而亦可称$A$为$X$的一个基元组。

2　泛三I算法

在文中提到了常用的5个蕴涵算子，为确定式(2)中R_1，R_2，R_3，本文选择其中的3个蕴涵算子(R_0，R_M，R_L)进行组合代入式(2)。共分6种情形，分别如下。

定理1　设X，Y是非空集，A，$A^*\in F(X)$，$B\in F(Y)$，当式(2)中R_1，R_2，R_3，蕴涵算子依次取R_0，R_M，R_L时，使得式(1)的值取得最大值的最小模糊集B^*的算法如下：

$$B^*(y)=\sup_{x\in E_y}\{A^*(x)\wedge[R_M(A(x),B(y))+A^*(x)-1]\},y\in Y。$$

其中$E_y=\{x\in X\mid R_M(A(x),B(y))+A^*(x)\geqslant 1\}$。

证明：由条件可知，式(2)可以写成：

$$R_0(R_M(A(x),B(y)),R_L(A^*(x),B^*(y))) \tag{7}$$

这里设y，A，B，A^*都已固定，要求对于一切可能的x，$B^*(y)$能使得式(7)的值最大。因y固定，以$M(x)$记$R_M(A(x),B(y))$，则式(7)可写成

$$R_0(M(x),R_L(A^*(x),B^*(y)))=\begin{cases}1, & M(x)\leqslant R_L(A^*(x),B^*(y)),\\ (M(x))'\vee R_L(A^*(x),B^*(y)), & M(x)>R_L(A^*(x),B^*(y))。\end{cases} \tag{8}$$

要使得式(8)取得最大值(此时最大值通过式(8)可以看出为1)，必有$M(x)\leqslant R_L(A^*(x),B^*(y))=1\wedge(1-A^*(x)+B^*(y))$。

a) 当$A^*(x)>B^*(y)$时，$M(x)\leqslant(1-A^*(x)+B^*(y))$，即$B^*(y)\geqslant M(x)+A^*(x)-1$

b) 当$A^*(x)\leqslant B^*(y)$时，$M(x)\leqslant R_L(A^*(x),B^*(y))=1$恒成立。

综上，可以得到$B^*(y)=\sup_{x\in E_y}\{A^*(x)\wedge[M(x)+A^*(x)-1]\}$，$y\in Y$，其中：

$E_y=\{x\in X\mid M(x)+A^*(x)\geqslant 1\}$，

$M(x)=R_M(A(x),B(y))$。

定理2　设X，Y是非空集，A，$A^*\in F(X)$，$B\in F(Y)$，当式(2)中R_1，R_2，R_3蕴涵算子依次取R_0，R_L，R_M时，使得式(1)的值取得最大值的最小模糊集B^*的算法如下：

$$B^*(y)=\sup_{x\in X}\{A^*(x)\wedge R_L(A(x),B(y))\}。$$

证明：由条件可知，式(2)可以写成：

$$R_0(R_L(A(x),B(y)),R_M(A^*(x),B^*(y))) \tag{9}$$

这里设y，A，B，A^*都已固定，要求对于一切可能的x，$B^*(y)$能使得式(9)的值最大。因y固定，以$M(x)$记$R_L(A(x),B(y))$，则式(9)可写成：

$$R_0(M(x),R_M(A^*(x),B^*(y)))=\begin{cases}1, & M(x)\leqslant R_M(A^*(x),B^*(y)),\\ (M(x))'\vee R_M(A^*(x),B^*(y)), & M(x)>R_M(A^*(x),B^*(y))。\end{cases} \tag{10}$$

要使得式(10)取得最大值(此时最大值通过式(10)可以看出为 1)，

$$M(x) \leqslant R_M(A^*(x), B^*(y)) = A^*(x) \wedge B^*(y) \tag{11}$$

a) 若 $A^*(x) < M(x)$ 则式(11)不成立。这时可以令 $B^*(y) \geqslant A^*(x)$，此时也可以写作 $B^*(y) \geqslant A^*(x) \wedge M(x)$。

b) 若 $A^*(x) \geqslant M(x)$ 则由式(11)可知，必有 $B^*(y) \geqslant M(x)$，此时也可以写作 $B^*(y) \geqslant A^*(x) \wedge M(x)$。

综上：可以得到 $B^*(y) = \sup\limits_{x \in X}\{A^*(x) \wedge M(x)\}$，其中 $M(x) = R_L(A(x), B(y))$。

定理 3　设 X, Y 是非空集，$A, A^* \in F(X)$，$B \in F(Y)$，当式(2)中 R_1, R_2, R_3 蕴涵算子依次取 R_L, R_0, R_M 时，使得式(1)的值取得最大值的最小模糊集 B^* 的算法如下：

$$B^*(y) = \sup_{x \in X}\{A^*(x) \wedge R_0(A(x), B(y))\}。$$

证明：类似定理 2 的证明

定理 4　设 X, Y 是非空集，$A, A^* \in F(X)$，$B \in F(Y)$，当式(2)中 R_1, R_2, R_3 蕴涵算子依次取 R_M, R_0, R_L 时，使得式(1)的值取得最大值的最小模糊集 B^* 的算法如下：

$$B^*(y) = \sup_{x \in E_y}\{A*(x)\}, y \in Y$$

其中 $E_y = \{x \in X \mid A(x) \leqslant B(y)\}$。

证明：由条件可知，式(2)可以写成：

$$R_M(R_0(A(x), B(y)), R_L(A^*(x), B^*(y))) \tag{12}$$

这里设 y, A, B, A^* 都已固定，要求对于一切可能的 $x, B^*(y)$ 能使得式(12)的值最大。因 y 固定，以 $M(x)$ 记 $R_0(A(x), B(y))$，则式(12)可写成：

$$R_M(M(x), R_L(A^*(x), B^*(y))) = M(x) \wedge R_L(A^*(x), B^*(y)) = \begin{cases} 1, & A(x) \leqslant B(y), \\ (A(x))' \vee B(y), & A(x) > B(y). \end{cases} \wedge \begin{cases} 1, & A^*(x) \leqslant B^*(y), \\ (A^*(x))' + B^*(y), & A^*(x) > B^*(y)。\end{cases} \tag{13}$$

即

$$M(x) \wedge R_L(A^*(x), B^*(y)) = \begin{cases} 1, & A(x) \leqslant B(y) \text{ 且 } A^*(x) \leqslant B^*(y), \\ 1 \wedge [(A^*(x))' + B^*(y)], & A(x) \leqslant B(y) \text{ 且 } A^*(x) > B^*(y), \\ [(A(x))' \vee B(y)] \wedge 1, & A(x) > B(y) \text{ 且 } A^*(x) \leqslant B^*(y), \\ [(A(x))' \vee B(y)] \wedge (A^*(x))' + B^*(y), & A(x) > B(y) \text{ 且 } A^*(x) > B^*(y)。\end{cases} \tag{14}$$

要使得式(14)取得最大值，当 $A^*(x) \leqslant B^*(y)$ 且 $A(x) \leqslant B(y)$ 取得最大值，于是

$$B^*(y) = \sup_{A(x) \leqslant B(y)}\{A*(x)\}$$

定理 5　设 X, Y 是非空集，$A, A^* \in F(X)$，$B \in F(Y)$，当式(2)中 R_1, R_2, R_3 蕴涵算子依次取 R_M, R_L, R_0 时，使得式(1)的值取得最大值的最小模糊集 B^* 的算法如下：

$$B^*(y) = \sup_{x \in E_y}\{A*(x)\}, y \in Y$$

其中 $E_y = \{x \in X \mid A(x) \leqslant B(y)\}$。

证明：类似定理 4 的证明

定理 6　设 X, Y 是非空集，$A, A^* \in F(X)$，$B \in F(Y)$，当式(2)中 R_1, R_2, R_3 蕴涵算子依次取 R_L, R_M, R_0 时，使得式(1)的值取得最大值的最小模糊集 B^* 的算法如下：

$$B^*(y) = \sup_{x \in E_y}\{A^*(x) \wedge R_M(A(x), B(y))\},$$

$y \in Y$，

其中 $E_y = \{x \in X \mid (A^*(x))' < R_M(A(x), B(y))\}$。

证明：由条件可知，式(2)可以写成：

$$R_L(R_M(A(x), B(y)), R_0(A^*(x), B^*(y))) \tag{15}$$

这里设 y, A, B, A^* 都已固定，要求对于一切可能的 $x, B^*(y)$ 能使得式(15)的值最大。因 y 固定，以 $M(x)$ 记 $R_M(A(x), B(y))$，则式(15)可写成：

$$R_L(M(x), R_0(A^*(x), B^*(y))) = 1 \wedge [(1 - M(x)) + R_0(A^*(x), B^*(y))] \tag{16}$$

要使得式(16)取得最大值(此时最大值通过式(16)可以看出为 1)，必有

$$M(x) \leqslant R_0(A^*(x), B^*(y)) = \begin{cases} 1, & A^*(x) \leqslant B^*(y), \\ (A^*(x))' \vee B^*(y), & A^*(x) > B^*(y) \end{cases} \tag{17}$$

所以对固定的 x 及 $y \in Y$，当 $A^*(x) \leqslant B^*(y)$ 时，式(17)恒成立；当 $A^*(x) > B^*(y)$ 时，要使式(17)成立，则必有 $(A^*(x))' \vee B^*(y) \geqslant M(x)$，当 $(A^*(x))' \geqslant M(x)$ 时，与 $B^*(y)$ 的取值无关；当 $(A^*(x))' < M(x)$ 时，$B^*(y) \geqslant M(x)$。

综上可得，

$$B^*(y) = \sup_{x \in E_y}\{A^*(x) \wedge M(x)\}, y \in Y,$$

其中 $E_y = \{x \in X \mid (A^*(x))' < M(x)\}$。

3　基于泛三 I 算法的单输入单输出模糊控制器及响应函数

主要讨论了基于上节给出的 6 种情形下的三 I 算法构造的单输入单输出的模糊系统响应能力，给出了下述 3 个定理。在讨论构造的模糊控制器及响应函数之前，首先给出一个常用的条件。

条件 P[2]：假设 X,Y 分别为输入和输出变量论域，$A=\{A_i\}_{(1\leqslant i\leqslant n)}$，$B=\{B_i\}_{(1\leqslant i\leqslant n)}$ 分别为 X 和 Y 的模糊划分。不妨规定 X 和 Y 均为实数区间，即 $X=[a,b]$，$Y=[c,d]$，其中 $a<x_1<x_2<\cdots<x_n<b$，$c<y_1<y_2<\cdots<y_n<d$，这里 x_i，y_i 分别为 A_i，B_i 的峰点。此外恒假定 A_i，B_i 为可积函数。

定理 7　在条件 P 下，存在一组基函数 $A'=\{A'_i\}_{(1\leqslant i\leqslant n)}$，使得当 R_i 依次取 R_0，R_M，R_L 或者 R_L，R_M，R_0 时，基于此不同蕴涵算子的泛三 I 算法构成的模糊控制器近似为以 A_i' 为基函数的一元分段插值函数，即

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n}A'_i(x')y_i$$

证明：以第一种情形为例，由定理 1 可知，

$$B^*(y)=\sup_{x\in E_y}\{A^*(x)\wedge[R_M(A(x),B(y))+A^*(x)-1]\},y\in Y。$$

其中 $E_y=\{x\in X\mid R_M(A(x),B(y))+A^*(x)\geqslant 1\}$。分 2 种情况讨论：

a) 当 $x\in E_y$ 时，对于给定的输入 $x'\in X$（单点法），得 $B'(y)=\bigvee_{i=1}^{n}\{A_i(x')\wedge B_i(y)\}$。

按照重心法有：

$$y'=\frac{\int_c^d yB'(y)\mathrm{d}y}{\int_c^d B'(y)\mathrm{d}y}\approx\frac{\sum_{i=1}^{n}y_iB'(y_i)h_i}{\sum_{i=1}^{n}B'(y_i)h_i}=$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}h_i\{\bigvee_{k=1}^{n}[A_k(x')\wedge B_k(y_i)]\}y_i}{\sum_{i=1}^{n}h_i\{\bigvee_{k=1}^{n}[A_k(x')\wedge B_k(y_i)]\}}=$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}h_iA_i(x')y_i}{\sum_{i=1}^{n}h_iA_i(x')}=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i(x')A_i(x')y_i=\sum_{i=1}^{n}A'_i(x')y_i$$

其中已令 $A'_i(x')=\alpha_i(x')A_i(x')$ 且 $\alpha_i=\dfrac{h_i}{\sum_{j=1}^{n}h_j[A_j(x')]}$。若记 $A'=\{A'_i\}_{(1\leqslant i\leqslant n)}$ 则取 $F(x)=\sum_{i=1}^{n}A'_i(x')y_i$，显然 $F(x)$ 是以 A'_i 为基函数的一元分段插值函数。

b) 当 $x\notin E_y$，从定理 1 的证明过程中知道 $B^*(y)$ 与式(8)恒成立无关，则由三 I 算法可知 $B^*(y)=0$，此时则在解模糊时（本文采用重心法）分母为零则无意义，故此处可补充定义，比如取 $B^*(y)=\sup_{x\in E_y}\{A^*(x)\wedge[R_M(A(x),B(y))+A^*(x)-1]\}$，这样就和 $x\in E_y$ 的情形一样，结论成立。

类似地，可以得到以下结论。

定理 8　在条件 P 下，存在一组基函数 $A'=\{A'_i\}_{(1\leqslant i\leqslant n)}$，使得当 R_i 依次取 R_0，R_L，R_M 或者 R_L，R_0，R_M 时，基于此不同蕴涵算子的泛三 I 算法构成的模糊控制器近似为以 A'_i 为基函数的一个阶跃输出函数，即

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n}\frac{h_i}{y_n-c}y_i=\text{常数}。$$

定理 9　在条件 P 下，存在一组基函数 $A'=\{A'_i\}_{(1\leqslant i\leqslant n)}$，使得当 R_i 依次取 R_M，R_0，R_L 或者 R_M，R_L，R_0 时，基于此不同蕴涵算子的泛三I算法构成的模糊控制器近似为以 A'_i 为基函数的一个阶跃输出函数，即

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n}\frac{h_i}{y_n-c}y_i=\text{常数}。$$

注：　定理 8 和定理 9 得出的响应函数都是阶跃输出函数。这里由于在求解输出 y' 时 $B'(y)$ 的不同，证明的过程有些不同。这里就不详细叙述，类似定理 7 的证明。

4　实验仿真

典型二阶环节的模糊系统的结构如图 1 所示。

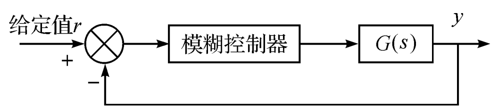


图 1　典型二阶环节二阶模糊系统框图

许多工业控制对象都可以等效为二阶环节。当采用典型二阶环节的模糊控制器，当系统的输入为单位阶跃信号时，系统输出能尽快跟随系统输入。由图 1 可知，在模糊控制器这一环节中选取变量域为 [－4,4]。模糊推理过程依据定理 1 给出的泛三 I 算法，模糊化采用单点模糊集方法，去模糊化采用重心法。

$$G(s)=\frac{20}{1.6s^2+4.4s+1}$$

具体的实现步骤如下：

Step 1：创建一个.fis 模糊系统，并且增加系统的变量。本实验加入输入变量为 e、de

a = newfis('Triple_fuzzy')；

a = addvar(a,'input','*e*',[－44])；

a = addvar(a,'input','*de*',[－44])；

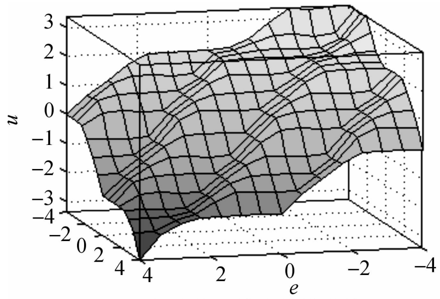
Step 2：确定输入变量和输出变量的隶属度函数。

Step 3：增加模糊控制规则。

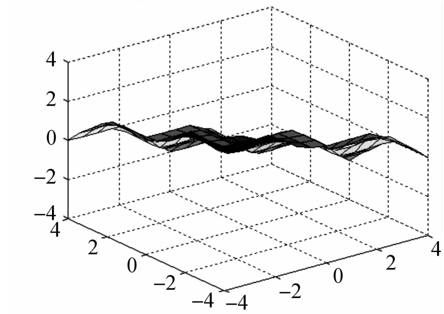
Step 4：进行模糊推理，计算出被控对象的控制输入。

Step 5：控制作用于被控系统 $G(s)$，计算系统输出。

按照以上步骤对其进行仿真，结果如图 2、图 3 所示。



(a) 模糊推理输出特性曲线



(b) $[x, y, z]$输出曲面图

图 2　模糊推理系统的曲面图

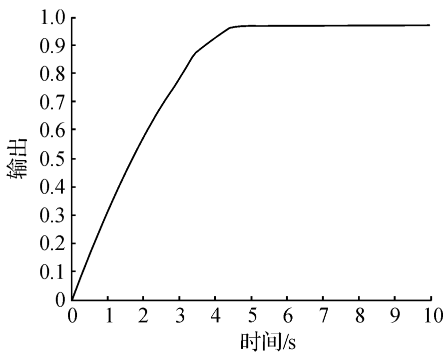


图 3　模糊控制输出曲线

图 2(a) 表示的是模糊推理系统的输出曲面图，看图中基于三 I 算法的推理结果变化较为平缓；图 2(b) 图反应了输入—输出曲线图。从图 3 可以看出，当被控对象的基本参数 $T = 0.01$ s，$td = 0.02$，偏差和偏差变化的量化因子分别为 30 和 5。控制量的比例因子 1，系统输出在时间 4.5 s 左右时达到稳定状态。

6　结　论

提出并讨论了泛三 I 算法和泛三 I 算法设计的模糊系统的响应能力。所得到结果进一步丰富和完善了对三 I 算法及模糊控制系统理论的研究。主要结果如下：

a）当蕴涵算子依次取 R_0，R_M，R_L 或者 R_L，R_M，R_0 所构造的模糊控制器都可归结为某种插值方法，它们相应的模糊控制器均具有函数逼近的泛性且在一定意义下相互等效，从而可以用于模糊控制系统之中。

b）当蕴含算子取其他 4 种情况所构造的模糊控制器都近似为阶跃输出函数，故它们几乎不能用于模糊控制系统之中。

此外，这些结果不难推广到多输入单输出的一般模糊系统，因为这将是多元向量值的插值问题。

参考文献：

[1] Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1973, 3(1): 28-44.

[2] 李洪兴. 模糊控制的插值机制[J]. 中国科学：E 辑，1998，28(3)：259-267.

[3] 王国俊. 模糊推理的全蕴涵三 I 算法[J]. 中国科学：E 辑，1999，29(1)：43-53.

[4] 李洪兴，彭家寅，王加银. 常见模糊蕴涵算子的模糊系统及其响应函数[J]. 控制理论与应用，2005，22(3)：341-347.

[5] 李洪兴，尤　飞，彭家寅，等. 基于某些模糊蕴涵算子的模糊控制器及其响应函数[J]. 自然科学进展，2003，13(10)：1073-1077.

[6] 侯　建，尤　飞，李洪兴. 由三 I 算法构造的一些模糊控制器及其响应能力[J]. 自然科学进展，2005，15(1)：29-37.

[7] 潘海玉，裴道武，陈仪香. 基于三 I 算法的模糊系统的响应能力[J]. 控制理论与应用，2011，28(1)：24-30.

[8] 李洪兴. Fuzzy 系统的概率表示[J]. 中国科学：E 辑，2006，36(4)：373-397.

[9] Tang Y M, Liu X P. Differently implicational universal triple I method of (1, 2, 2) type[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2010, 59: 1965-1984.

[10] 王国俊. 非经典数理逻辑与近似推理[M]. 北京：科学出版社，2000.

Response Ability of Fuzzy Systems Based on the Universal Triple I Methods

LI Long, *PEI Dao-wu*
(School of Informatics, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To discuss the universal triple I algorithms and consider responsiveness of the corresponding fuzzy systems are important research directions in the theory of fuzzy systems. Firstly, the authors select three commonly used fuzzy implication operators to give the expression of the universal triple I algorithms. Secondly, the authors construct the single-input single-output (SISO) fuzzy controllers based on the universal triple I methods and analyze their response ability. Finally, the authors show availability of the obtained fuzzy systems by experiment and simulation.

Key words: fuzzy reasoning; triple I method; universal triple I method; fuzzy controller; response function

(责任编辑: 陈和榜)