

应用 Fuzzy 集合理论测辨系统 Fuzzy 模型的新方法——Fuzzy 推理合成法

李友善

赵福顺

(河北机电学院自动化系,石家庄)

(航空航天工业部电子技术设计研究所,汕头)

摘 要

本文基于 Fuzzy 集合理论,根据待辨识系统的量测数据,应用 Fuzzy 推理合成规则,提出建立系统 Fuzzy 模型的新方法,通过建立水泥回转窑热工过程 Fuzzy 模型,证实了该方法的可行性.

关键词: Fuzzy 子集, Fuzzy 关系, Fuzzy 推理合成, Fuzzy 模型,语言变量.

一、引 言

应用 Fuzzy 集合理论测辨,对一类难以建立精确数学模型的系统建立 Fuzzy 模型问题,国内外学者已取得某些研究成果^[2,3,4],其中所采用的方法大都是以相关分析、概率统计为主要数学处理工具,对大量精确量测数据按其论域与对应各 Fuzzy 子集的隶属度,分析在一定输入 Fuzzy 子集下相应输出 Fuzzy 子集的出现次数,从而建立系统的 Fuzzy 模型.笔者基于美国学者 L. A. Zadeh 提出的 Fuzzy 推理合成规则^[1],提出了一种建立系统 Fuzzy 模型的新方法,为使 Fuzzy 建模更加客观化与最佳化开辟了既简单又易实现的途径.

二、基本思想

系统精确数学模型的建立,其实质是应用一定的数学处理手段,基于取自待辨识系统的大量量测数据,找出体现系统输入与输出之间的内在联系,并通过一定的数学表达形式加以描述.建立系统 Fuzzy 模型的基本思想也是这样,只是需将采集到的精确量测数据进行 Fuzzy 化处理,转化成通过隶属度及 Fuzzy 子集表达的 Fuzzy 量.这样,便将原通过精确量输入输出数据对描述的系统输入输出之间的内在联系(精确数学模型)转化成一种相应的由条件语句 if (输入语言变量 Fuzzy 子集) then(输出语言变量 Fuzzy 子集)表达的 Fuzzy 关系,这便是系统的 Fuzzy 模型.笔者提出的根据由输入输出量测数据对转化的 Fuzzy 量 X, Y ,应用 Zadeh 提出的 Fuzzy 推理合成规则 $Y = X \circ R$ 建

立系统 Fuzzy 模型的新方法开辟了基于上述基本思想确定这种 Fuzzy 关系的有效途径。

三、建立系统 Fuzzy 模型

应用 Fuzzy 推理合成法建立系统 Fuzzy 模型的步骤是:

1. 采集系统输入输出量测数据对

数据采集是在系统正常运行情况下,根据操作员的操作所得输入输出变量的变化进行的。采集到的数据是以输入输出量测数据对形式出现的精确量。

2. 量测数据对的 Fuzzy 化

由于需要建立系统的 Fuzzy 模型,所用量测数据对应是 Fuzzy 量,故需对采集到的精确量量测数据对进行 Fuzzy 化处理。为此,

1) 确定系统输入语言变量及输出语言变量 Fuzzy 子集的论域。在考虑到输入输出语言变量变化范围的情况下,要注意各 Fuzzy 子集对所确定论域的覆盖程度,需使论域中的任何一点对这些 Fuzzy 子集的隶属度都不能太小,否则在这样一些点上将会出现“空档”,以致影响建模精度。

2) 对系统输入语言变量与输出语言变量在已确定的论域内进行量化,并通过一定的隶属度建立各语言变量论域上的 Fuzzy 子集赋值表。

3) 通过查找相应 Fuzzy 子集赋值表将每一组精确量输入输出数据对转化成 Fuzzy 量输入输出数据对。

3. 量测数据对的噪声处理

如果在系统输入输出量测数据对中存在噪声污染,而使一些输入输出量测数据对所体现的存在于系统输入输出间的 Fuzzy 关系出现“波动”,则可导致基于这些量测数据对建立的 Fuzzy 模型与系统客观实际的不一致,从而使其在控制规则上出现矛盾。例如,系统输入输出间的实际 Fuzzy 关系本为 if (输入语言变量为 NB) then (输出语言变量为 PB),但受噪声污染后的 Fuzzy 关系可能是 if (输入语言变量为 NB) then (输出语言变量为 PM),其中 NB, PB 与 PM 分别代表 Fuzzy 子集负大、正大与正中。

对于上述噪声,可在建模前应用基于 Fuzzy 聚类分析实现的 Fuzzy 滤波方法¹⁾予以消除,即把通过 Fuzzy 聚类分析取得的属于同一类的输入输出量测数据对经过隶属度求和的线性叠加并取平均构成新的 Fuzzy 子集,再根据这些新构成的 Fuzzy 子集描述的输入输出数据对建立 Fuzzy 模型。

4. 应用 Fuzzy 推理合成规则建立 Fuzzy 模型

假定待建模系统为多输入单输出过程。根据 m 对 Fuzzy 输入输出数据对,或由量测的 n 对输入输出数据对 ($n > m$) 通过噪声处理取得的 m 对 Fuzzy 输入输出数据对,应用 Fuzzy 推理合成规则建立 Fuzzy 模型的基本步骤是:

1) 计算全部 r 个 Fuzzy 输入 i_1, i_2, \dots, i_r “交”运算的 Fuzzy 关系 $R_{i_1 \times i_2 \times \dots \times i_r}$ 。这

1) 赵福顺,李友善, Fuzzy 控制理论在工业过程控制中的应用研究,哈尔滨工业大学研究生论文,1987。

是因为系统的 Fuzzy 输出是由其所有 r 个 Fuzzy 输入共同作用而产生。

2) 对于每一组 Fuzzy 输入输出数据对进行由输入到输出的 Fuzzy 推理, 即根据 $R_{i_1 \times i_2 \times \dots \times i_r}$ 计算 Fuzzy 输出分别属于其各 Fuzzy 子集 Q_1, Q_2, \dots, Q_l 的 Fuzzy 关系

$$R_{O_j, i} = \mu_{O_j, i} \wedge R_{i_1 \times i_2 \times \dots \times i_r} \quad (j = 1, 2, \dots, l; i = 1, \dots, m),$$

其中 $\mu_{O_j, i}$ 为 Fuzzy 子集 Q_j, i 的隶属度。

3) 将全部 m 组 Fuzzy 输入输出数据对的推理结果加以合成, 即计算 Fuzzy 关系 $R_{O_1, i}, R_{O_2, i}, \dots, R_{O_l, i} (i = 1, 2, \dots, m)$ 的“并”。于是, 求得

$$R_{O_j} = \bigcup_{i=1}^m R_{O_j, i}, \quad (j = 1, 2, \dots, l).$$

4) 对 $R_{O_j} (j = 1, 2, \dots, l)$ 进行 λ 水平截集处理。在选定阈值 λ 之后, 将

$$R_{O_j} (j = 1, 2, \dots, l)$$

中等于和大于 λ 的元素记为 1, 小于 λ 的元素记为 0。由此取得 λ 截关系 $R_{O_j, \lambda} (j = 1, 2, \dots, l)$ 。

5) 用 Fuzzy 输出的相应子集 Q_j 代替 $R_{O_j, \lambda}$ 中的元素 1, 取得 Fuzzy 关系

$$R_{O_j} (j = 1, 2, \dots, l).$$

6) 将 $R_{O_j} (j = 1, 2, \dots, l)$ 叠加构成一张 Fuzzy 关系总表 R 。该表便是根据输入输出量测数据对为系统建立的 Fuzzy 模型的一种表达形式。由该表还可写出一组以 Fuzzy 条件语句 if...then...构成的 Fuzzy 模型的另一种表达形式。

综上所述, 视待建模系统的具体情况, 通过试探总能找出一个合适的水平截集处理阈值 $\lambda \in [0, 1]$, 在根据该 λ 值求得的 Fuzzy 关系总表中, 既不应出现个别元素上的重叠现象, 也不应出现个别元素位置上的空档。

四、应用实例

笔者应用 Fuzzy 推理合成法曾为某水泥厂的 3×40 米中空回转窑热工过程的两个控制回路: 根据烧成带温度 (BZ) 与窑尾温度 (BE) 对与喂煤量成比例的喂煤电机转速 (CS) 的控制回路以及根据 BZ 与 BE 对回转窑转速 (KS) 的控制回路建立了 Fuzzy 模型。

从 BZ, BE \rightarrow CS 及 BZ, BE \rightarrow KS 两控制回路各采集的 45 对 ($n = 45$) 输入输出数据中, 经噪声处理取得 15 对 ($m = 15$) 输入输出数据 (见李友善研究生论文)。按照表 1—表 3 给出的 BZ, BE 和 CS 等各项 Fuzzy 子集赋值表 (其中各语言变量论域元素从属于其 Fuzzy 子集的隶属度采用正态分布型隶属函数), 由 15 对输入输出数据分别计算出输出语言变量 CS 的 Fuzzy 关系 R_{CSF} 、 R_{CSOK} 和 R_{CSL} , 分别见表 4—表 6。

选取水平截集阈值 $\lambda = 0.6$, 从表 4—表 6 分别求得表 7—表 9 示出的 Fuzzy 关系表。将表 7—表 9 叠加, 最终得出 BZ, BE \rightarrow CS 控制回路的 Fuzzy 模型, 示出表 10。

同理, 按上述方法还可求出 BZ, BE \rightarrow KS 控制回路的 Fuzzy 模型, 如表 11 所示。

表 1 BZ 论域上的 Fuzzy 子集赋值表

序号	量级	Fuzzy 子集		TH (甚高)	SH (稍高)	OK (正常)	SL (稍低)	TL (甚低)
		量化域°C						
1	-5	BZ ≤ 1590		0	0	0	0	1
2	-4	1590 < BZ ≤ 1600		0	0	0	0.3	0.9
3	-3	1600 < BZ ≤ 1610		0	0	0	1	0.5
4	-2	1610 < BZ ≤ 1620		0	0	0.2	0.9	0.1
5	-1	1620 < BZ ≤ 1625		0	0	0.8	0.3	0
6	0	1625 < BZ ≤ 1635		0	0	1	0	0
7	1	1635 < BZ ≤ 1640		0	0.3	0.8	0	0
8	2	1640 < BZ ≤ 1650		0.1	0.9	0.2	0	0
9	3	1650 < BZ ≤ 1660		0.5	1	0	0	0
10	4	1660 < BZ ≤ 1670		0.9	0.3	0	0	0
11	5	1670 < BZ		1	0	0	0	0

表 2 BE 论域上的 Fuzzy 子集赋值表

序号	量级	Fuzzy 子集		H (高)	OK (正常)	L (低)
		量化域°C				
1	-3	BE ≤ 825		0	0	1
2	-2	825 < BE ≤ 835		0	0.1	0.9
3	-1	835 < BE ≤ 845		0	0.8	0.5
4	0	845 < BE ≤ 855		0	1	0
5	1	855 < BE ≤ 865		0.5	0.8	0
6	2	865 < BE ≤ 875		0.9	0.1	0
7	3	875 < BE		1	0	0

表 3 CS 论域上的 Fuzzy 子集赋值表

序号	量级	Fuzzy 子集		F (快)	OK (正常)	S (慢)
		量化域 转/分				
1	-4	CS ≤ 350		0	0	1
2	-3	350 < CS ≤ 450		0	0	0.9
3	-2	450 < CS ≤ 500		0	0.2	0.8
4	-1	500 < CS ≤ 530		0	0.8	0.5
5	0	530 < CS ≤ 570		0	1	0
6	1	570 < CS ≤ 600		0.5	0.8	0
7	2	600 < CS ≤ 650		0.8	0.2	0
8	3	650 < CS ≤ 750		0.9	0	0
9	4	750 < CS		1	0	0

表 4

R_{CSF}		BZ	TH	SH	OK	SL	TL
BE							
H			0	0	0	0	0
OK			0	0	0.06	0.9	0.3667
L			0	0	0.933	0.9667	0.4667

表 5

R_{csok} BZ \sim BE \sim		TH	SH	OK	SL	TL	
		H	0.1333	0.1	0.0667	0.933	0.3667
		OK	0.06	0.06	0.933	0.1	0.06
		L	0.2667	0.2	0.06	0.1	0.6

表 6

R_{css} BZ \sim BE \sim		TH	SH	OK	SL	TL	
		H	0.833	0.933	0.934	0.2	0.934
		OK	0.9	0.834	0.167	0.1	0.867
		L	0.767	0.9	0.06	0	0

表 7

R_{csf} BZ \sim BE \sim		TH	SH	OK	SL	TL
		H				
		OK			F	
		L		F	F	

表 8

R_{csok} BZ \sim BE \sim		TH	SH	OK	SL	TL
		H				
		OK		OK	OK	
		L				OK

表 9

R_{css} BZ \sim BE \sim		TH	SH	OK	SL	TL
		H	S	S	S	
		OK	S	S		S
		L	S	S		

五、结 论

表 10、表 11 所示水泥回转窑热工过程 Fuzzy 模型分别与文献[5]给出的基于一般水泥回转窑操作方法的总结得出的 Fuzzy 模型(见表 12, 13)基本吻合, 并在某水泥厂

表 10

R_{Cs} \sim BE		TH	SH	OK	SL	TL
	H	S	S	S	OK	S
	OK	S	S	OK	F	S
	L	S	S	F	F	OK

表 11

R_{Ks} \sim BE		TH	SH	OK	SL	TL
	H	F	OK	OK	S	S
	OK	F	OK	OK	OK	S
	L	F	OK	OK	S	S

表 12

R_{Cs} \sim BE		TH	SH	OK	SL	TL
	H	S	S	S	OK	S
	OK	S	S	OK	F	S
	L	S	S	F	F	S

表 13

R_{Ks} \sim BE		TH	SH	OK	SL	TL
	H	F	OK	OK	OK	S
	OK	F	OK	OK	OK	S
	L	F	OK	OK	OK	S

水泥回转窑计算机 Fuzzy 控制中显示出良好的控制效果，提高了水泥生产的产质量，取得了可观的经济效益与社会效益，从而证明了应用 Fuzzy 推理合成法为工业生产过程测辨 Fuzzy 模型的正确性与可行性。

参 考 文 献

[1] Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8(1965), 338—353.
 [2] 季宝绶、刘志俊, 用模糊集合理论测辨系统的模型, *信息与控制*, 3(1980), 32—38.
 [3] Czogala, E. and Pedrycz, W., On Identification in Fuzzy Systems and its Application in Control Problem, *Fuzzy Sets and Systems*, 6(1981).
 [4] Pedrycz, W. and Hirota, K., Fuzzy-probabilistic Algorithms in Identification of Fuzzy Systems, IFAC Control Science and Technology (8-th Triennial World Congress), Kyoto, Japan, (1981).
 [5] 华新水泥厂编译组, 水泥回转窑的操作, 中国建筑工业出版社, 1977.

A NEW METHOD FOR THE ESTABLISHMENT OF FUZZY MODEL USING FUZZY SETS THEORETIC REASONING

Li Youshan

(Hebei Mechanics and Electricity Institute)

Zhao Fushun

(Institute of Electronics Design and Research, Ministry of Aeroindustry)

ABSTRACT

A new method to establish the fuzzy model of a process by fuzzy reasoning and composition (FRC) by the experimental data is presented. This method was successfully applied to the thermodynamic process of a rotary cement kiln.

Key words: Fuzzy subsets; fuzzy relation; fuzzy reasoning and composition; fuzzy model; linguistic variable.

何潘清漪优秀论文奖

美国哈佛大学教授何毓琦 (Y. C. Ho) 先生为了庆贺其母亲何潘清漪老太太九十岁生日,特设“何潘清漪优秀论文奖”。其目的在于,选拔、奖励、促进和宣扬中国在 DEDES 领域内得到国际承认的重大成果。授奖对象为离散事件动态系统 (DEDES) 方面的优秀中文论文作者。世界各地用中文发表的关于 DEDEC 方面的论文作者都有资格申请奖金。

何潘清漪奖由何毓琦先生提供奖金共 5000 美元,分五次授奖,每次授奖 1000 美元。如果某年度无合适论文,当年将不颁奖。首次征选论文工作从 1991 年开始 (截止日期为 1991 年 12 月 31 日),授奖时间为 1992 年 5 月。

论文评选专家小组成员有:曹希仁、陈翰馥、李伯天、谈自忠(组长)、饶大维、郑应平。申请者可将论文交《控制理论与应用》编辑部或专家小组成员。

欢迎申请者同时将论文投《自动化学报》,以便学术交流。