

模糊规则组的谐调度

冯定芸 于福生 王 晓

(北京师范大学数学科学学院 教育部数学与复杂系统重点实验室 北京 100875)

摘要 模糊规则库谐调度是规则库研究中的重要内容。在决定一组新来的模糊规则可否加入到已有规则库时,需要知道它对已有规则库的谐调程度。利用模糊关系方程理论和贴近度定义了模糊规则组之间的谐调度。实验表明此定义能很好地容纳相容规则并排除矛盾规则,这对于知识库的建立和维护是至关重要的。

关键词 谐调度,模糊关系方程,模糊规则组,规则库

中图分类号 O159 文献标识码 A

Consistency Degree of Fuzzy Rule Groups

FENG Ding-yun YU Fu-sheng WANG Xiao

(Laboratory of Mathematics and Complex Systems, Ministry of Education, School of Mathematical Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract The research of consistency degree of fuzzy rules takes an important role in the study of rule base. When determining whether a group of fuzzy rules should enter the rule base, we need to know the consistency degree between the new group and the rules in the rule base. This paper defined the consistency degree of two fuzzy rule groups with the aid of fuzzy relation theory and closeness. Experiments show this definition can include compatible rules and exclude the rules in contradiction, and this is crucial in the process of building a rule base.

Keywords Consistency degree, Fuzzy relation function, Fuzzy rule group, Rule base

1 引言

在建立专家系统、设计模糊控制器的过程中,都涉及到模糊规则的处理。其中一个重要的问题是模糊规则的谐调度研究^[1,2]。尤其是在基于模糊规则的智能系统的设计过程中,会面临如何判别新来规则组和已有规则组的谐调性问题,进而决定是否将新来的规则加入到已有规则库。在模糊规则库中不仅仅需要知道有矛盾,更重要的是找到一种度量矛盾程度或谐调程度的方法^[3]。

纵观对模糊规则谐调性的研究,度量规则库谐调度的方法有基于经典数理逻辑理论的方法^[4-6],也有基于模糊逻辑的模糊方法^[2,7]。近年来,对谐调度或矛盾度的研究多是利用规则的前件、后件形成的模糊集的隶属度来定义单条规则的矛盾度^[8],或利用测量两个模糊集合的相似度,结合经典数理逻辑的方法来精简规则^[5]。这些方法都是从单条模糊规则的谐调度入手对规则库进行研究,本文是利用模糊关系方程来定义模糊规则组之间的谐调度。众所周知,一条或者一组模糊规则,可以用一个模糊关系方程来描述。因此,本文的研究方法是建立在模糊关系方程理论^[9-11]基础之上的。

本文第2节介绍与模糊规则相关联的模糊推理句和模糊关系方程的有关知识,为本文研究的预备知识;第3节给出模糊规则组的谐调度定义,并设计了谐调度的具体形式;第4节

给出两个实验,用以展示所给定义的合理性;最后对本文的工作进行了总结。

在后面的讨论中,所涉及的论域 X, Y 等均为有限论域, $P(X), F(X)$ 分别表示论域 X 的经典幂集合和模糊幂集合。

2 模糊推理句和模糊关系方程

模糊推理句最典型的形式是:“若 x 是 a , 则 y 是 b ”, 其中两个变元 x, y 分别属于两个不同的论域 X, Y ; a, b 分别是论域 X, Y 上的模糊概念^[11], 其真域分别是 $A \in F(X)$ 和 $B \in F(Y)$ 。这个推理句的真域的确定方法有多种, 其中一种便是基于模糊关系方程理论的。在这种方法中, 模糊推理句的真域 $R \in F(X \times Y)$ 满足模糊关系方程: $A \circ R = B$ (这里 \circ 表示取小-取大合成运算)。

假设论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, 论域 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, $A = (a_1, a_2, \dots, a_m) \in F(X)$ 表示论域 X 上的一个概念, $B = (b_1, b_2, \dots, b_n) \in F(Y)$ 表示论域 Y 上的一个概念。模糊推理句“若 A 则 B ”就可以由一个关系矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n} \in F(X \times Y)$ 表示, 满足 $A \circ R = B$ 。即满足下面的等式:

$$(a_1, a_2, \dots, a_m) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

到稿日期:2012-07-22 返修日期:2012-11-14 本文受国家自然科学基金(60775032, 10971243), 北京自然科学基金(4112031), 北京师范大学优先学科基金资助。

冯定芸(1989-), 女, 硕士, 主要研究方向为人工智能、专家系统, E-mail: fdy0810120063@163.com; 于福生(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能、模糊信息处理与决策、数据挖掘、计算智能; 王 晓(1987-), 女, 博士, 主要研究方向为人工智能与信息粒化、数据挖掘。

因而任意一条模糊规则就能简化为模糊关系矩阵 R , 而且 R 也完全表示了这条模糊推理句。

下面简单介绍一下模糊关系方程 $X \circ R = S$ 解的理论。

给出模糊关系方程 $X \circ R = S, R \in F(V \times W), S \in F(U \times V)$ 为已知, $X \in F(U \times V)$ 为未知模糊关系。令

$$\bar{X}(u, v) = \bigwedge_w \{S(u, v) | S(u, v) < R(v, w)\} \quad (1)$$

则方程 $X \circ R = S$ 相容(有解)的充要条件是 $\bar{X} \circ R = S$, 此时 \bar{X} 为方程的最大解(约定空集的下确界为 1, 即 $\bigwedge = 1$)。

利用上面的结论, 可以对一条模糊规则“若 A 则 B ”对应的模糊关系方程 $A \circ R = B$ 进行相容性判别及求最大解。为了行文方便, 把按照式(1)求得的 \bar{R} 称为形式模糊解, 需要注意的是形式解并不一定是方程 $A \circ R = B$ 的解, 只有方程 $A \circ R = B$ 有解时, \bar{R} 才是解, 并且是最大解。

3 规则组的谐调度

下面先引入两组规则的形式表达, 再在此基础上给出谐调度的公理化定义, 并构造具体的谐调度。为了叙述方便, 我们把模糊推理句“若 x 是 a , 则 y 是 b ”对应的模糊规则“若 A 则 B ”叫作 X 到 Y 的一条规则, 并简记为 $A \rightarrow B$ 。

定义 1 假设 S 是 X 到 Y 的 l 条规则组成的集合(称为 l 规则组), $S = \{A_i \rightarrow B_i, i = 1, \dots, l\}$, 其中 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}), B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$ 。称 l 规则组 S 是相容的, 如果方

$$\text{程组} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_l \end{bmatrix} \circ R_{m \times n} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_l \end{bmatrix} \text{ 有解。}$$

定义 2 给定 l 规则组 $S = \{A_i \rightarrow B_i, i = 1, \dots, l\}$ (其中 $A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}), B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$) 和 k 规则组 $T = \{C_i \rightarrow D_i, i = 1, \dots, k\}$ (其中 $C_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}), D_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})$), 称 S 和 T 是相容的, 如果下面的模糊关系方程相容:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{l1} & a_{l2} & \cdots & a_{lm} \\ c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} & \cdots & c_{km} \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{l1} & b_{l2} & \cdots & b_{ln} \\ d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{k1} & d_{k2} & \cdots & d_{kn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

定义 3 设 G 是 X 到 Y 的所有模糊规则组成的集合, 称映射 $\theta: P(G) \times P(G) \rightarrow [0, 1]$ 为规则组的谐调度, 如果它满足如下条件:

对于任意两个规则组 S_1, S_2 , 满足

- (1) $0 \leq \theta(S_1, S_2) \leq 1$;
- (2) $\theta(S_1, S_2) = \theta(S_2, S_1)$;
- (3) $\theta(S_1, S_2) = 1$ 当且仅当 S_1 和 S_2 相容。

为了给出规则组的谐调度的具体形式, 先给定 l 规则组 $S = \{A_i \rightarrow B_i, i = 1, \dots, l\}$ ($A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}), B_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{in})$) 和 k 规则组 $T = \{C_i \rightarrow D_i, i = 1, \dots, k\}$ ($C_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{im}), D_i = (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in})$), 按照式(1)来构造模糊关系

$$\text{式(2)中的 } \bar{R}, \text{ 令 } A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_l \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_l \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_k \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_k \end{bmatrix}.$$

例 1 令 $B' = A \circ \bar{R}, D' = C \circ \bar{R}$, 则容易验证 $\theta(S, T) = \delta(B, B') \wedge \delta(D, D')$ 是 X 到 Y 的规则组的谐调度, 其中 \bar{R} 是两组规则的模糊形式解, $\delta(A, A') = \frac{\sum_{i,j} (A(i, j) \wedge A'(i, j))}{\sum_{i,j} (A(i, j) \vee A'(i, j))}$ 。

例 2 令 $B' = A \circ \bar{R}, D' = C \circ \bar{R}$, 则容易验证 $\theta(S, T) = \delta(B, B') \wedge \delta(D, D')$ 是 X 到 Y 的规则组的谐调度, 其中 $\delta(A, A') = \frac{2 \sum_{i,j} (A(i, j) \wedge B(i, j))}{\sum_{i,j} (A(i, j) + B(i, j))}$ 。

有了规则组谐调度的度量方法, 就可以灵活地管理规则库了。我们可以仅把完全谐调的规则组进行合并, 也可以选择适当的阈值 $\gamma > 0$, 当 $\theta(S_1, S_2) > \gamma$ 时, 将两组规则进行合并。当然, γ 需要依情况而确定。这样就可以把 S_1, S_2 理解成 $\gamma > 0$ 水平上的相规则, 而用形式模糊解 \bar{R} 作为整体规则的模糊关系进行推理。这样既能兼顾两组规则的各自准确性, 也不会导致整体的推理矛盾。

实际中, 为了方便, 也可以利用谐调度来定义矛盾度: $d(S_1, S_2) = 1 - \theta(S_1, S_2)$ 。

4 实验研究

这里给出两个实验, 分别展示相容和不相容两种情况下的规则组的谐调和相容性的对应关系。下面的实验中, S_1 和 S_2 都是 X 到 Y 的模糊规则组。

实验 1

规则组 S_1 :

$$A_1 = (0.3, 0.2, 0.1); B_1 = (0, 0.2, 0.3) \\ A_2 = (0.5, 0.1, 0.4); B_2 = (0.4, 0.2, 0.4) \\ A_3 = (0.2, 0, 0.3); B_3 = (0.3, 0.2, 0.3)$$

规则组 S_2 :

$$A_4 = (0.1, 0.2, 0.1); B_4 = (0.2, 0.2, 0.2)$$

容易验证 S_1 是相容的, 且有最大公共解:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 \\ 0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.2 & 1.0 \end{bmatrix}$$

S_2 也是相容的, 且有最大公共解:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

但 S_1, S_2 是不相容的, 对应的形式模糊解为:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 \\ 0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 0.2 & 1.0 \end{bmatrix}$$

利用例 1 给出的谐调度定义可计算出:

$$\text{谐调度 } \theta(S_1, S_2) = 0.8333$$

$$\text{矛盾度 } d(S_1, S_2) = 0.1667$$

当取 $\epsilon = 0.9$ 时, 两组规则是不能变为一组的; 当 $\epsilon = 0.8$ 时, 由于 $\theta(S_1, S_2) > \epsilon$, 就能将规则放在一组, 并且取 X 为这组规则的模糊关系。

实验 2

规则组 S_1 :

$$A_1 = (0.4, 0.6, 0.7, 0.6, 0.3); B_1 = (0.7, 0.6, 0.6)$$

$$A_2 = (0.5, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1), B_2 = (0.3, 0.5, 0.3)$$

规则组 S_2 :

$$A_3 = (0.7, 0.5, 0.4, 0.5, 0.4), B_3 = (0.5, 0.7, 0.5)$$

$$A_4 = (0.2, 0.5, 0.3, 0.2, 0.4), B_4 = (0.5, 0.5, 0.4)$$

容易验证这两组规则是相容的,有最大解:

$$\bar{R} = \begin{bmatrix} 0.3 & 1.0 & 0.3 \\ 1.0 & 1.0 & 0.4 \\ 1.0 & 0.6 & 0.6 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 \end{bmatrix}$$

利用例 1 给出的谐调度定义计算得出两者的谐调度 $\theta(S_1, S_2) = 1$ 。这验证了相容的两组规则谐调度为 1。

结束语 本文利用模糊关系方程的理论,通过模糊关系方程的形式模糊解定义了两组模糊规则间的谐调度和矛盾度。通过实验可以看出,所给谐调度定义能准确度量两组模糊规则间的协调程度,保留相容规则、排除矛盾规则,从而为模糊规则库的管理提供了有力工具。将来我们将研究其他形式的模糊规则组的协调度,并将其应用到智能系统的研制与开发中。

参考文献

- [1] 张景元. 模糊控制规则库及其优化方法[J]. 淄博学院学报:自然科学与工程版, 2000(3):13-16
- [2] 张文修,梁怡. 模糊规则的谐调度与矛盾规则的排除方法[J]. 计算机学报, 1997(10):949-952
- [3] Castineira E, Cubillo S, et al. Searching degrees of self-contradiction in Atanassov's fuzzy sets[J]. Mathware & soft computing, 2008, 13(2006):139-156
- [4] Setnes M, Babuska R, et al. Similarity measures in fuzzy rule base simplification[J]. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics-part B:cybernetics, 1998, 28(3)
- [5] 宗成庆,陈肇雄. 规则库冗余性控制策略的研究[J]. 软件学报, 1997, 8(1):1-6
- [6] 石松芳,宋建萍. 专家系统中知识库维护的若干问题[J]. 湖北教育学院学报, 2006(8):24-26
- [7] Elstner M. SCC-DFTB: what is the proper degree of self-consistency[J]. J. Phys. Chem. A, 2007, 111:5614-5621
- [8] Carmona P, Castro J L, et al. Contradiction sensitive fuzzy model-based adaptive control[J]. International journal of approximate reasoning, 2002, 30:107-129
- [9] 陈新建,李建新. 关于 max-min 模糊关系方程有唯一解的充要条件[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 1998(7):73-76
- [10] 汪培庄,罗承忠. 有限模糊关系方程极小解的个数[J]. 科学通报, 1985(11):814-816
- [11] 罗承忠. 模糊集引论(上册)[M]. 北京:北京师范大学出版社, 2005:217-416
- [12] Tan Y, Goddard S, Prez C. A Prototype Architecture for Cyber-Physical systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1):1-2
- [13] Wan K, Man K L, Hughes D. Towards a Unified Framework for Cyber-Physical Systems(CPS)[C]// 2010 First ACIS International Symposium on Cryptography, and Network Security, Data Mining and Knowledge Discovery, E-Commerce and Its Applications, and Embedded Systems. Qinhuangdao, China: IEEE, 2010:292-295
- [14] Antsaklis P. On Control and Cyber-Physical Systems: Challenges and Opportunities for Discrete Event and Hybrid Systems [C]// Proceedings of the 9th International Workshop on Discrete Event Systems. Göteborg, Sweden: IEEE, 2008:28-30
- [15] 蔡热文. 基于面向方面的时间 Petri 网的实时信息物理系统的建模[D]. 广州:广东工业大学, 2012
- [16] 叶阳东,王娟,贾利民. 基于模糊时间 Petri 网的列车运行时间不确定性问题的处理[J]. 铁道学报, 2005, 27(1):6-13
- [17] Giua A, Seatzu C. Modeling and Supervisory Control of Railway networks using Petri Nets [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(3):431-445
- [18] Lesire C, Tessier C. Particle Petri Nets for Aircraft Procedure monitoring under Uncertainty[C]// Applications and Theory of Petri Nets 26th. Miami, FL, USA: Springer, 2005:329-348
- [19] 叶阳东,程少芬,王旭,等. 基于一种混合 Petri 网的列车运行系统的建模与分析[J]. 铁道学报, 2009, 31(5):42-49
- [20] 孟令云,杨肇夏,李海鹰. 单线铁路区间能力失效条件下列车运行调整模型[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(4):885-894
- [21] 章优仕,金炜东. 单线列车运行调整的梯度搜索算法仿真与研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11):2496-2501
- [22] 戴晓峰,刘澜. 铁路系统安全的人因研究综述[J]. 人类工效学, 2007, 13(4):51-54
- [23] Koval O, Floyd L. Human Element Factors Affecting Reliability and Safety [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(2):406-414

(上接第 30 页)

- [4] Poovendran R. Cyber physical systems; Close Encounters Between Two Parallel Words[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(8):263-1366
- [5] Ilic D, Xie L, Khan A, et al. Modeling Future Cyber-Physical energy Systems[C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008:1-9
- [6] Derler P, Lee A, Vincentelli S. Modeling Cyber-Physical Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):13-28
- [7] Swain T, Couzin D, Leonard E. Real-Time Feedback-Controlled Robotic Fish for Behavioral Experiments With Fish Schools [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):150-163
- [8] Zhihao J, Pajic M, Mangharam R. Cyber-Physical Modeling of Implantable Cardiac Medical Devices [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):122-137
- [9] Calhoun H, Lach J, Stankovic J, et al. Body Sensor Networks: A Holistic Approach From Silicon to Users[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1):91-106
- [10] Kinsy M, Khan O, Celanovic I. Time-Predictable Computer Architecture for Cyber-Physical Systems: Digital Emulation of Power Electronics Systems[C]// Proceedings of the 32nd Real-Time Systems Symposium. Vienna, Australia: IEEE, 2011:305-316
- [11] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16):1-8
- [12] Bestavros A, Kfoury A, Lapets A, et al. Safe Compositional Network Sketches: Formal Framework [C]// Proceedings of the 13th ACM International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control. New York, USA: ACM, 2010:231-241
- [13] Al-Hammouri A, Liberatore V, Al-Omari H, et al. A co-simulation platform for actuator networks[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, USA: ACM, 2007:383-384