

# 基于有序加权平均算子的概率模糊认知图<sup>\*</sup>

吕镇邦 周利华

(西安电子科技大学计算机学院 西安 710071)

**摘要** 模糊认知图(FCM)与概率模糊认知图(PFCM)使用简单的加权和集结因果推理结果,忽略了原因节点间关联关系的不确定性,阈值函数导致推理结果进一步失真。在继承 FCM 与 PFCM 优点的基础上,引入有序加权平均(OWA)算子模拟各种确定的或模糊的与或组合关系,提出了基于有序加权平均算子的概率模糊认知图(OWA-PFCM)。通过构建一个动态的攻击效能评估模型,阐述了 OWA-PFCM 在工程建模中的应用。OWA-PFCM 能同时表示因果节点状态的不确定性、因果联系强度的不确定性、与或组合关系的不确定性,具有更强的模拟能力。

**关键词** 模糊认知图,有序加权平均算子,因果关系,与或关系,攻击效能评估

## Probabilistic Fuzzy Cognitive Maps Based on Ordered Weighted Averaging Operators

LU Zhen-bang ZHOU Li-hua

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** By aggregating the casual reasoning results with simple weighted sum, the Fuzzy Cognitive Maps (FCM) and the Probabilistic Fuzzy Cognitive Maps (PFCM) ignore the uncertainties of And/Or combinations among the antecedent nodes. The threshold functions cause further distortions to the inference results. A novel fuzzy cognitive model, Probabilistic Fuzzy Cognitive Maps based on Ordered Weighted Averaging (OWA) operators, OWA-PFCM was proposed by preserving the merits of FCM and PFCM, and introducing OWA operators for simulating the various certain or fuzzy And/Or relationships. To illustrate the application of OWA-PFCM, a dynamic attack effect evaluation model was constructed. OWA-PFCM can represent uncertainties of node states, uncertainties of causal relationships, and uncertainties of And/Or relationships effectively, therefore has more powerful simulation performance.

**Keywords** Fuzzy cognitive maps, Ordered weighted averaging operator, Causal relationship, And/Or relationship, Attack effect evaluation

### 1 引言

因果关系的表示与推理是人工智能中一个重要的研究领域。模糊认知图(Fuzzy Cognitive Maps, FCM)<sup>[1]</sup>是用于因果关系知识表示和推理的有效工具。FCM 模型可分为数值型 FCM 和语言型 FCM<sup>[2]</sup>。现有 FCM 模型大部分是数值型的,如扩展的模糊认知图(Extended Fuzzy Cognitive Maps, EFCM)<sup>[3]</sup>、概率模糊认知图(Probabilistic Fuzzy Cognitive Maps, PFCM)<sup>[4]</sup>等。其中, EFCM 可以看作数值型 FCM 在理论形式上的总框架。与语言型 FCM 相比,数值型 FCM 用简单的数值计算代替复杂的规则推理,虽然语义信息较少、模拟能力有所弱化,但计算复杂度则显著降低。由于计算简单,数值型 FCM 已在多个工程领域获得了广泛应用。PFCM 在继承传统 FCM 优点的前提下,引入条件概率测度表示概念间因果联系强度的不确定性,比传统 FCM 具有更强的模拟能力。

但数值型 FCM(包括 PFCM)不能模拟原因节点间的各种与或关系,现有语言型 FCM 也仅限于表示确定的与或组合关系<sup>[5]</sup>。针对这一缺陷,本文在 PFCM 中引入有序加权平均算子(Ordered Weighted Averaging operator, OWA 算子)<sup>[6,7]</sup>,提出了基于有序加权平均算子的概率模糊认知图

(OWA-PFCM) 模型。简要讨论了 OWA-PFCM 的赋权方法,并通过构建一个基于 OWA-PFCM 的攻击效能动态评估模型,阐述了 OWA-PFCM 在工程实践中的具体应用。

### 2 模糊认知图(FCM)与概率模糊认知图(PFCM)

**定义 1** 模糊认知图(FCM)是表达和推理系统中概念间因果关系的图模型,节点和有向边分别表示概念及概念间的因果关系。其推理公式为: $c_j(t+1) = T(\sum_{i=1}^n e_{ij} c_i(t))$ <sup>[1-3]</sup>。其中, $c_i(t)$ 表示原因节点(antecedent)在  $t$  时刻的状态值; $c_j(t+1)$ 表示后果节点(consequent)在  $t+1$  时刻的状态值;有向边的权值  $e_{ij}$  表示  $c_i$  与  $c_j$  间的因果联系强度( $i \neq j$ ),  $e_{ij}$  则为  $c_j$  的记忆系数,即当  $e_{ij} \neq 0$  时  $c_j$  自身也可看作一个原因节点<sup>[2]</sup>;  $T$  是阈值函数。 $c_i(t), e_{ij}$  均可取值于区间  $[0, 1]$  或  $[-1, 1]$ 。通常,  $c_j(t) \in [0, 1], e_{ij} \in [0, 1] \vee [-1, 1], T: R \rightarrow [0, 1]$  (或  $R^+ \rightarrow [0, 1]$ ) 确保  $c_j(t+1) \in [0, 1]$ 。

传统 FCM 能够有效表示节点状态的不确定性,但仅限于表示单调的或对称的因果关系。图 1 所示为一个简单的模糊认知图。

文献<sup>[4]</sup>在 FCM 概念间的因果关系中引入广义的条件概率测度,提出概率模糊认知图(PFCM)模型。在 PFCM 中,

<sup>\*</sup>基金项目:国家自然科学基金资助项目(60573036),航空基础科学基金资助项目(03F31007)。吕镇邦 博士研究生,主要研究方向为模糊计算、信息安全;周利华 教授,博士生导师。

有向边的权值或概念间的因果联系强度可以由条件概率  $p[e_{ij} | c_i(t), c_m(t), \dots, c_n(t)]$  来测度, 而非固定的  $e_{ij}$ , 因此自然扩展了 FCM 的模拟能力。

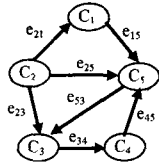


图1 一个简单的模糊认知图

**定义2** 概率模糊认知图(PFCM)是一种扩展的 FCM 模型, 利用条件概率测度表示因果关系的不确定性。其推理公式为:  $c_j(t+1) = T(\sum_{i=1}^n p[e_{ij} | c_i(t), c_m(t), \dots, c_n(t)]c_i(t))$ 。其中,  $p[e_{ij} | c_i(t), c_m(t), \dots, c_n(t)]$  (简记为  $p_{ij}(t) \in [0, 1]$  或  $[-1, 1]$ )。

### 3 基于 OWA 算子的概率模糊认知图

FCM 和 PFCM 之所以不能处理节点间的与或组合关系, 是受限于其推理公式或集结算法。首先, FCM 和 PFCM 使用简单的加权和  $\Sigma$  来表示总的因果效应, 忽视了原因节点间确定的或模糊的与或组合关系; 其次, 为确保  $c_j(t+1) \in [0, 1]$  (或  $[-1, 1]$ ), 阈值函数  $T$  将加权和  $\Sigma$  强制转换至  $[0, 1]$  或  $[-1, 1]$  内, 导致其推理结果进一步失真。

有序加权平均(OWA)算子是由美国学者 Yager 提出的一类重要的加权集结算子, 能够利用不同的权向量模拟各种确定的或模糊的与或关系, 广泛应用于信息融合与数据合成<sup>[6,7]</sup>。

**定义3** 设  $\phi: R^n \rightarrow R$ , 若:

$$1) w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T, \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n,$$

2)  $a_\sigma = [a_{\sigma(1)}, a_{\sigma(2)}, \dots, a_{\sigma(n)}]^T$  是  $a$  中元素以降序排列组成的向量,

$$3) \phi(a_1, a_2, \dots, a_n) = w^T a_\sigma = \sum_{j=1}^n w_j a_{\sigma(j)}, \forall a = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T \in R^n,$$

则称  $\phi$  为  $n$  维有序加权平均(OWA)算子。

OWA 算子本质上是一种参数化的与或运算, 介于  $\min$  和  $\max$  运算之间, 具有可交换性、单调性与幂等性<sup>[8]</sup>。利用不同的 OWA 权向量可以模拟各种确定的或模糊的与或关系。

Yager 在文献[6]中定义了 orness 测度, 用以衡量 OWA 算子的与或度。利用具有不同 orness 的权向量, OWA 算子即可模拟不同的与或组合关系。

$$\text{定义4 } orness(w) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (n-j)w_j$$

易见,  $orness(w) \in [0, 1]$ ;

$$orness(w_{\min}) = 0, orness(w_{avg}) = \frac{1}{2}, orness(w_{\max}) = 1。$$

本节将 OWA 算子引入 PFCM, 用 OWA 算子替代传统 FCM 模型中的加权和  $\Sigma$  与阈值函数  $T$ , 提出基于有序加权平均算子的概率模糊认知图——OWA-PFCM 模型。

**定义5** 基于有序加权平均算子的概率模糊认知图(OWA-PFCM)是一种扩展的 FCM 模型, 利用有序加权平均算子表示与或组合关系的不确定性, 利用条件概率测度表示因果联系强度的不确定性。其推理公式为:

$$1) \text{若定义 } c_i(t) \in [0, 1] \wedge p_{ij}(t) \in [-1, 1], \text{ 则:}$$

$$c_j(t+1) = \max\{\phi[p_{1j}(t)c_1(t), p_{2j}(t)c_2(t), \dots, p_{nj}(t)c_n(t)], 0\};$$

2) 若定义  $c_i(t) \in [-1, 1] \vee p_{ij}(t) \in [0, 1]$  (其他情形), 则:  $c_j(t+1) = \phi[p_{1j}(t)c_1(t), p_{2j}(t)c_2(t), \dots, p_{nj}(t)c_n(t)]$ 。

OWA-PFCM 模型有机结合了状态模糊测度、条件概率测度、与或关系测度, 是对 FCM 和 PFCM 的继承和扩展。当  $w = w_{avg} = [\frac{1}{n}, \frac{1}{n}, \dots, \frac{1}{n}]$  时, OWA-PFCM 退化为 PFCM。并当  $p_{ij}(t)$  退化为  $e_{ij}$  时, 进一步退化为 FCM。

OWA-PFCM 包含两类权信息: 度量数据源重要性或因果联系强度的概率测度  $p_{ij}(t)$  和度量数据源间与或关系的 OWA 权向量  $w$ 。根据 OWA-PFCM 的推理公式, 二者与原因节点的状态值共同决定后果节点的状态值。

$p_{ij}(t)$  通常由领域专家在创建 OWA-PFCM 时以数值列表或知识库的形式直接给出<sup>[4,8]</sup>。

确定 OWA 权向量  $w$  的方法可分为以下两类:

第一种方法是利用模糊语言量词来构造 OWA 集结权向量。用来构造 OWA 集结权向量的模糊语言量词称之为规则单调递增量化算子(RIM Quantifier), 必须满足以下条件<sup>[6]</sup>:

$$1) Q(0) = 0, Q(1) = 1;$$

$$2) \text{若 } r_1 > r_2, \text{ 则 } Q(r_1) \geq Q(r_2)。$$

另一种方法是根据给定的 orness 水平(即原因节点间总的与或度), 通过求解最大熵(或离差,  $disp(w)$ )规划模型<sup>[9]</sup> 或最小可变性(或方差,  $var(w)$ )规划模型<sup>[10]</sup> 来确定 OWA 集结权向量  $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ 。

### 4 基于 OWA-PFCM 的攻击效能评估模型

在入侵检测领域, 由于检测结果与系统状态的不确定性, 利用传统方法对攻击效能进行有效评估将面临诸多的困难<sup>[11]</sup>。此外, 攻击后果不仅取决于攻击者的技术水平, 还取决于目标系统的配置漏洞以及所提供的服务等。作为攻击后果的原因节点, 攻击水平、安全漏洞、系统服务等要素之间存在“与”的逻辑关系。而多种可选的攻击手段(或不同的安全漏洞)之间又存在着“或”的逻辑关系。同时, 多个系统服务之间往往存在着不确定的与或关系。特别是对于复合攻击, 诸原因节点间存在着复杂的与或组合关系。利用传统 FCM 或 PFCM 也很难对上述问题建模。

基于有序加权平均算子的概率模糊认知图 OWA-PFCM 模型不仅能够表示和推理模糊的因果关系, 还能模拟因果联系强度的不确定性、原因节点与或组合关系的不确定性, 是一种较为有效的认知和建模工具。本节以一种典型的复合攻击——Mstream DDoS<sup>[12]</sup> 为例, 利用 OWA-PFCM 构建一个攻击效能动态评估模型。

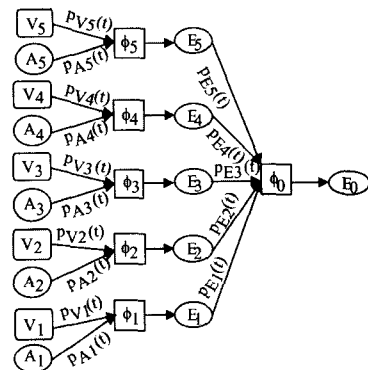


图2 基于 OWA-PFCM 的 Mstream DDoS 攻击效能评估模型

Mstream DDoS可分解为5个阶段:1) 探测主机;2) 扫描端口;3) 入侵系统;4) 安装木马;5) 跳板攻击。其基于OWA-PFCM的攻击效能评估模型如图2所示。

基于OWA-PFCM的攻击效能评估模型为一个五元组: $\{A, V, E, P, \phi\}$ 。其中, $A$ 为攻击警报信息论域, $V$ 为脆弱性信息论域, $E$ 为攻击后果论域, $P$ 为条件概率权重, $\phi$ 为OWA算子集合。概念 $E_0$ 是最终的后果节点,表示复合攻击总的攻击后果。 $A_i, V_i$ 与 $E_i (i \geq 1)$ 分别表示对应于第 $i$ 个攻击阶段的入侵警报信息、脆弱性信息和攻击后果。 $A_i, V_i$ 均为原因节点,其状态值由各自的隶属函数定义。 $E_i$ 既是当前攻击阶段的后果节点,又是后续阶段攻击后果 $E_{i+1}$ 的原因节点。OWA-PFCM根据原因节点的当前状态值、重要性 $p_{ij}(t)$ 及与或组合关系,利用不同的OWA算子 $\phi_i$ 推理并融合结果。由于后继阶段的节点值 $V_i(t), A_i(t)$ 和 $E_i(t)$ 还会受到其前驱阶段攻击效果 $\{E_1(t), E_2(t), \dots, E_{i-1}(t)\}$ 的影响( $i > 1$ ),因此 $p_{ij}(t)$ 可随攻击进程动态变化。该OWA-PFCM攻击效能评估模型的推理过程如下:

1) 计算 $\{E_1(t), E_2(t), \dots, E_5(t)\}$ ,得到各攻击阶段的效能评估:

$$E_1(t+1) = \phi_1[A_1(t), V_1(t)];$$

$$E_i(t+1) = \phi_i[A_i(t), V_i(t), E_1(t), E_2(t), \dots, E_{i-1}(t)],$$

$$i > 1;$$

2) 计算 $E_0(t); E_0(t+1) = \phi_0[E_1(t), E_2(t), \dots, E_5(t)]$ ,得到总的攻击效能评估结果。

**结束语** 传统FCM能够有效表示节点状态的不确定性,但仅限于表示单调的或对称的因果关系。PFCM利用条件概率测度表示因果关系的不确定性,扩展了FCM的性能。但FCM与PFCM均不能表示节点间与或组合关系的不确定性。OWA算子是泛化的析取/合取运算,能够利用不同的权向量模拟任意的与或组合关系。基于有序加权平均算子的概率模糊认知图OWA-PFCM模型在继承PFCM优点的前提下,兼顾各原因节点的自主性、重要性及与或组合关系,能同时表示因果节点状态的不确定性、因果联系强度的不确定性、与或组合关系的不确定性,因此具有更强的认知与模拟能力。

## 参 考 文 献

[1] Kosko B. Fuzzy Engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall,

1997

- [2] Aguilar J. A Survey about Fuzzy Cognitive Maps Papers[J]. International Journal of Computational Cognition, 2005, 3(2): 27-33
- [3] Hagiwara M. Extended Fuzzy Cognitive Maps[C]// Proc. of the 1st IEEE International Conference on Fuzzy Systems. New York: IEEE, 1992: 795-801
- [4] 骆祥峰, 高隽. 概率模糊认知图[J]. 中国科技大学学报, 2003, 33(1): 26-33
- [5] Lv Zhenbang, Zhou Lihua. A Hybrid Fuzzy Cognitive Model Based on Weighted OWA Operators and Single-antecedent Rules [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2007, 22(11): 1189-1196
- [6] Yager R R. On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision Making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190
- [7] Calvo T, Mesiar R, Yager R R. Quantitative Weights and Aggregation[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, 12(1): 62-69
- [8] 骆祥峰, 高隽, 张旭东. 基于信任知识库的概率模糊认知图[J]. 计算机研究与发展, 2003, 40(7): 925-933
- [9] Fullér R, Majlender P. An Analytic Approach for Obtaining Maximal Entropy OWA Operator Weights[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 124(1): 53-57
- [10] Fullér R, Majlender P. On Obtaining Minimal Variability OWA Operator Weights[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 136(2): 203-215
- [11] Carver C A, Hill J M D, Pooch U W. Limiting Uncertainty in Intrusion Response[A]// Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Information Assurance and Security[C]. New York, USA: IEEE Computer Society, 2001: 142-147
- [12] MIT Lincoln Laboratory. 2000 DARPA Intrusion Detection Scenario Specific Data Sets [EB/OL]. [http://www.ll.mit.edu/IST/ideval/data/2000/2000\\_data\\_index.html](http://www.ll.mit.edu/IST/ideval/data/2000/2000_data_index.html)

(上接第153页)

[2] 刘朝涛, 李祖枢. 一种汉语问题理解方法及其实现[C]// Proc. The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, 2008

[3] 曹志娟, 李祖枢, 刘朝涛. 自动问答系统中的问题理解研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(11): 158-161

[4] 卢志坚, 张冬莱. 中文问答系统中的问句理解[J]. 计算机工程, 2004, 30(18)

[5] Li X, Roth D. Learning Question Classifiers [C]// Proc. the 19th International Conference on Computational Linguistics (COLING). Taipei, Taiwan, 2002

[6] Zhang D, Lee W S. A Language Modeling Approach to Passage Question Answering [C]// Proc. The Twelfth Text Retrieval Conference. Gaithersburg, Maryland, 2003

[7] Ravichandran D, Hovy E. Learning Surface Text Patterns for a Question Answering System [C]// Proc. the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL). Philadelphia, July 2002

[8] 文勤, 张宇, 刘挺, 等. 基于句法结构分析的中文问题分类[J]. 中文信息学报, 2006, 120(12): 33-39

[9] 李鑫, 杜永萍, 等. 基于句法信息和语义信息的问题分类 [C]// 第一届全国信息检索与内容安全学术会议. 复旦大学, 2004: 243-251

[10] 张亮, 王树梅, 黄河燕, 等. 面向中文问答系统的问句句法分析 [J]. 山东大学学报: 理学版, 2006, 41(3): 30-33

[11] 伍雅清. 汉语特殊疑问词的非疑问用法研究 [J]. 语言教学与研究, 2002(2): 41-49

[12] 孙建军, 成颖, 等. 信息检索技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2004