

决策演化集的膜结构

胡玉文^{1,2,3} 徐久成^{1,2} 徐天贺^{1,2}

(1. 河南师范大学计算机与信息工程学院, 新乡, 453007; 2. 河南省高校计算智能与数据挖掘工程技术研究中心, 新乡, 453007; 3. 河南师范大学图书馆, 新乡, 453007)

摘要: 决策演化集是处理决策规则在时间序列上演化问题的理论, 它将着眼点从静态决策信息系统转移到动态时间序列上, 研究决策信息系统随时间变化的演化规律, 是一种新的决策规则研究方法。目前, 在决策演化集的标准结构下, 其定义的演化轨迹是一个很难描绘的 n 维空间图形, 所以本文提出了膜结构重新描述决策演化集, 在膜结构下, 被约简掉的属性同样会获得重视。在当时间从 t_{i-1} 进入 t_i 时, 属性根据自身对决策的影响而进入不同的膜, 同时所产生的数据流动也被标记出来, 从而解决了决策信息系统演化轨迹具象化的问题, 并通过实例演示了决策信息系统的演化过程和轨迹。

关键词: 粗糙集; 粒度决策; 决策演化; 膜结构

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A

Membrane Membrane Structure of Decision Evolution Sets

Hu Yuwen^{1,2,3}, Xu Jiucheng^{1,2}, Xu Tianhe^{1,2}

(1. College of Computer and Information Engineering, Henan Normal University, Xinxiang, 453007, China; 2. Engineering Technology Research Center for Computing Intelligence & Data Mining, Xinxiang, 453007, China; 3. Library, Henan Normal University, Xinxiang, 453007, China)

Abstract: As a new research method for decision rules, decision evolution set is the theory to deal with evolution problems of decision rules in time series, which transfers the focus from static information system to dynamic time series and studies the time-dependent evolution regulations of decision information systems. At present, the evolution trace defined by normal structure of decision evolution set is a graph in n -dimensional space, which is difficult to describe. So the membrane structure is newly proposed in this paper to describe the decision evolution set. In the membrane structure, the reduced attributes are got attention in the same way. When the time goes from point t_{i-1} to point t_i , attributes will enter different membranes based on their influence to decision and the data flow made in the process will be labelled at the same time. Thereby the problem of evolution trajectory visualization for decision information system is then solved. And the evolution process and trace of decision evolution system has been demonstrated by using some samples.

Key words: rough sets; granular decision; decision evolution; membrane structure

基金项目: 国家自然科学基金(60873104, 61040037, 61370169)资助项目; 河南省科技攻关重点项目(112102210194)资助项目; 河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A520529)资助项目; 河南省高等学校人文社会科学研究项目(2013-QN-371)资助项目; 2013 河南师范大学教育项目资助项目; 河南师范大学青年科学基金(2014QK28)资助项目; 河南省高等学校重点科研项目(16A520057)资助项目。

收稿日期: 2015-05-20; **修订日期:** 2015-09-08

引 言

伴随着当今信息化社会的快速发展,数据挖掘和人工智能越来越受到重视与青睐。在数据挖掘和人工智能的许多方法中,粗糙集作为一种有效的方法在信息科学领域处理复杂系统时被广泛应用,具有很强的生命力。经典粗糙集理论的一大特点是研究多集中在对静态信息系统的处理上^[1-5],但不能忽视和值得注意的是,现实中的数据库大多是动态的,随着时间不断地变化着。很多学者也开始将粗糙集、粒计算同时间序列相结合,提出了很多方法^[6-12],其主要指导思想是去除动态数据表中数据对于时间的依赖性,将除去时间依赖性的数据重新组织为一个静态数据表,并使用粗糙集中的属性约简和规则提取方法对新形成的静态数据表进行处理。这些方法同经典粗糙集很相似,最后的结果还是对静态数据表的处理,但在把动态数据表转换为静态数据表的过程里忽略了除去的时间依赖性中所蕴藏的信息。文献[13]在对时间序列数据进行分析预测时利用了 F-变换和模糊趋势模型。文献[14]把着眼点放在被传统方法忽略掉的时间依赖性上,没有拘泥于属性约简和规则提取上,而是将动态数据表进行时间粒度划分,并对每个时间粒产生的相关规则进行研究,发现其中的相关性,从而提出了粒度决策演化模型。文献[15]在粒度决策演化模型的基础上对演化过程中的属性进行分类,提出了决策演化集,并建立了粒度决策代数描述和粒度决策演化矩阵。虽然文献[15]创建了时间序列下粒度决策的演化理论,给出了决策信息系统演化轨迹的概念,而且对决策信息系统的演化过程进行了多方面的研究^[16-21],但是在标准定义下,决策信息系统的演化轨迹是一个 n 维空间的图形,很难具象化出来。然而演化轨迹的绘制有着其实际的意义,它可以帮助人们更好地观察决策信息系统的演化趋势,各个节点的稳定状态和数据交换的情况,因此本文将就演化轨迹具象化的问题展开研究。

1 预备概念

定义 1^[14] 在决策信息系统 $S=(U, CUD)$ 在时间序列存在时间粒 $g_i, g_{i+1} \in G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, 在粒 g_i, g_{i+1} 存在决策规则 $\text{Decision_}l_{g_i} \rightarrow f$ 和 $\text{Decision_}l_{g_{i+1}} \rightarrow f, | \text{Decision_}l_{g_{i+1}} \cap \text{Decision_}l_{g_i} |$ 同 $| \text{Decision_}l_{g_i} |$ 比值称为 g_{i+1} 相对于 g_i 的属性继承度, 记为 $\text{InA}(g_{i+1} | g_i)$ 。

定义 2^[14] 在决策信息系统 $S=(U, CUD)$ 在时间序列存在时间粒 $g_i \in G = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, 粒 g_i 存在 $\text{Decision_}l \rightarrow f, c \in \text{Decision_}l$, 将 c 在 G 中所有 $\text{Decision_}l \rightarrow f$ 出现次数与决策规则总数的比值称为 c 相对于决策属性 f 的支持度, 简称属性支持度, 记为 $\text{Sup_D}(c | f)$ 。

定义 3^[14] 在决策信息系统 $S=(U, CUD)$ 中, $c \in C$ 。对于 $\text{Decision_}l \rightarrow f$, 由所有属性支持度为 $\text{Sup_D}(c | f) = 1$ 的 c 组成的集合称为决策 f 的属性支持核, 记为 $\text{coreS}(f)$ 。

定义 4^[15] 在时间点 t_i , 决策表信息系统 $S=(U, CUD)$, 决策 $f_i \in D$, 则决策 f_i 在决策信息系统 S 的内演化集为 $\bar{C}_{f_i} = \{c | c \in C, \text{Sup_D}(c | f_i) \neq 0\}$ 。

定义 5^[15] 在时间点 t_i , 决策表信息系统 $S=(U, CUD)$, 决策 $f_i \in D$, 则决策 f_i 在决策信息系统 S 的外演化集为 $\underline{C}_{f_i} = \{c | c \in C, \text{Sup_D}(c | f_i) = 0\}$ 。

定义 6^[15] 在时间点 t_i , 决策表信息系统 $S=(U, CUD)$, 决策 $f_i \in D$ 在 S 的内演化集为 \bar{C}_{f_i} , 集合 $\bar{C}_{f_i}^+ \subseteq \bar{C}_{f_i}, \forall c \in \bar{C}_{f_i}^+, \text{Sup_D}(c | f_i) = 1$, 则称 $\bar{C}_{f_i}^+$ 为决策 f_i 在决策信息系统 S 的核演化集, 即 $\bar{C}_{f_i}^+ = \{c | c \in C, \text{Sup_D}(c | f_i) = 1\}$ 。

定义 7^[15] 决策表信息系统 $S=(U, CUD)$, 决策 $f_i \in D$ 在 S 的内演化集为 \bar{C}_{f_i} , 集合 $\bar{C}_{f_i}^- \subseteq \bar{C}_{f_i}, \forall c \in \bar{C}_{f_i}^-, 0 < \text{Sup_D}(c | f_i) < 1$, 则称 $\bar{C}_{f_i}^-$ 为决策 f_i 在决策信息系统 S 的从属演化集, 即 $\bar{C}_{f_i}^- = \{c | c \in C, 0 < \text{Sup_D}(c | f_i) < 1\}$ 。

定义 8^[15] 在时间点 t_i , 决策表信息系统 $S=(U, CUD)$, 决策 $f_i \in D$, 在 S 的核演化集为 $\bar{C}_{f_i}^+$, 从属

演化集为 \overline{C}_{f_i} ,外演化集为 \underline{C}_{f_i} ,则决策 $f_i = P(\overline{C}_{f_i}^+, \overline{C}_{f_i}^-, \underline{C}_{f_i})$ 。

定义 9^[15] 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策 $f_i \in D$, 则矩阵 E 被称为决策 f_i 的演化矩阵

$$E = (e_{ij}) = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{i1} & \cdots & e_{ij} \end{bmatrix} \quad e_{ij} \in \{0, 1\}$$

在时间点 $t_i, c_j \in C$, 如果 $c_j \in \overline{C}$, 则 $e_{ij} = 1$, 否则 $e_{ij} = 0$ 。

定义 10^[15] 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 在时间点 t_i 下决策 f_i 的演化矩阵为 $E_{t_i} = [\text{Con}_{t_1}, \text{Con}_{t_2}, \dots, \text{Con}_{t_i}]$, 其中列向量 $\text{Con}_{t_j} = (e_1, e_2, \dots, e_n)_{t_j}, t_j \in T, c_m \in C (m = 1, 2, \dots, n)$ 。则时间点 t_{i+1} 下决策 f_i 的演化矩阵为 $E_{t_{i+1}} = [E_{t_i}, \text{Con}_{t_{i+1}}]$, 其中列向量 $\text{Con}_{t_{i+1}} = (e_1, e_2, \dots, e_n)_{t_{i+1}}, t_{i+1} \in T$ 。

定义 11^[15] 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 f_i 演化矩阵 $E_{t_i} = [E_{t_{i-1}}, \text{Con}_{t_i}]$, 支持度向量 $st_{(i-1, i)} = (\text{Sup}_{-D_{t_i}}(c_1 | f_i), \text{Sup}_{-D_{t_i}}(c_2 | f_i), \dots, \text{Sup}_{-D_{t_i}}(c_n | f_i))$, 则 $\cos\theta = (st_{(i-1, i)} \cdot \text{Con}_{t_i}) / \|st_{(i-1, i)}\| \cdot \|\text{Con}_{t_i}\|$, 称 θ 为决策 f_i 在时间点 t_i 的支持度夹角。

定义 12^[15] 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 f_i 演化矩阵 $E_{t_i} = [E_{t_{i-1}}, \text{Con}_{t_i}]$, $E_{t_{i+1}} = [E_{t_i}, \text{Con}_{t_{i+1}}]$, 预测向量 $\text{fore}_{(t_i, t_{i+1})} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, 则 $\cos\alpha = (\text{fore}_{(t_i, t_{i+1})} \cdot \text{Con}_{t_{i+1}}) / \|\text{fore}_{(t_i, t_{i+1})}\| \cdot \|\text{Con}_{t_{i+1}}\|$, 称 α 为决策 f_i 在时间点 t_{i+1} 的偏移夹角。

定义 13^[15] 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 f_i 演化矩阵 $E_{t_i} = [E_{t_{i-1}}, \text{Con}_{t_i}]$, 预测向量 $\text{fore}_{(t_{i-1}, t_i)} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, 支持度向量 $st_{(i-1, i)} = (\text{Sup}_{-D_{t_i}}(c_1 | f_i), \text{Sup}_{-D_{t_i}}(c_2 | f_i), \dots, \text{Sup}_{-D_{t_i}}(c_n | f_i))$, 则 $\cos\beta = (\text{fore}_{(t_{i-1}, t_i)} \cdot st_{(i-1, i)}) / \|\text{fore}_{(t_{i-1}, t_i)}\| \cdot \|st_{(i-1, i)}\|$, 称 β 为决策 f_i 在时间点 t_i 的预测支持夹角。

定义 14 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 f_i 的演化矩阵 $E_{t_i} = [E_{t_{i-1}}, \text{Con}_{t_i}, \text{Con}_{t_{i+1}}]$, 则 $\cos\gamma = (\text{Con}_{t_i}, \text{Con}_{t_{i+1}}) / \|\text{Con}_{t_i}\| \cdot \|\text{Con}_{t_{i+1}}\|$, 称 γ 为决策 f_i 在时间点 t_{i+1} 的相对于时间点 t_i 的演化夹角。

定义 15 时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 f_i 的演化矩阵 $E_{t_i} = [E_{t_{i-1}}, \text{Con}_{t_i}, \text{Con}_{t_{i+1}}]$, 预测向量 $\text{fore}_{(t_i, t_{i+1})} = (c_1, c_2, \dots, c_n)$, 则 $\cos\varphi = (\text{fore}_{(t_i, t_{i+1})} \cdot \text{Con}_{t_i}) / \|\text{fore}_{(t_i, t_{i+1})}\| \cdot \|\text{Con}_{t_i}\|$, 称 φ 为决策 f_i 在时间点 t_i 的预测夹角。

2 决策演化集的膜结构

2.1 膜计算的基本理论

许多计算机科学领域的突破性进展都来源于自然界的启发, 这些进展不仅在理论上而且在实际应用中均引起了广泛关注。作为自然计算范围内一个新分支, 正随着其发展产生了大量的计算框架, 为生物分子计算提供了大量工具。虽然活细胞的结构是启发膜计算模型的源泉, 但得到丰富的计算模型才是研究膜计算的目的, 正如计算理论在计算机科学研究中所处的地位一样。

膜计算下的膜结构由主膜及主膜内按层次机构排列的膜组成, 内部被这些膜划分成若干个区域。就像在生物学中常见的活细胞一样, 膜结构其实是一种三维的囊泡形式, 实际中经常使用平面的文氏图来描述膜的结构, 如图 1 所示。由此,

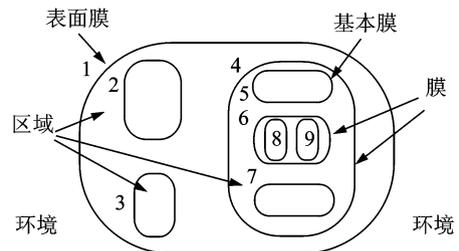


图 1 膜的结构

Fig. 1 Membrane structure

膜系统的计算可以定义为:它开始于膜系统的某个初始格局,计算可以随着格局传递下去,直到在输出膜中出现计算结果时终止。

膜系统具有如下的形式: $\Pi = (O, \mu, \omega_1, \dots, \omega_m, R_1, \dots, R_m, i_o)$ 。式中: O 表示一个字母表,其元素称为对象; μ 表示由 m 个膜组成的膜结构,每个膜(或者区域)对应的标号依次为 $1, 2, \dots, m$, m 称为 Π 系统的度数; $\omega_i (1 \leq i \leq m)$ 表示在初始状态下存在区域 $1, 2, \dots, m$ 中的字符串,这些字符串表示 O 上的多重集; $R_i (1 \leq i \leq m)$ 为字母表 O 上的进化规则的有限集合; R_i 对应于其中区域 i 的进化规则集合;进化规则形如 $u \rightarrow v, u$ 为 O 上的字符串, v 为 O_{tar} 上的字符串, $O_{tar} = O \times TAR, TAR = \{here, out\} \cup \{in_j | 1 \leq j \leq m\}$; $i_o \in \{1, 2, \dots, m\}$ 是一个基本膜(输出膜)的标记;符号 $here, out, in_j, 1 \leq j \leq m$ 被称为目标命令或者目标指令, u 的长度被称为规则 $u \rightarrow v$ 的半径。如果 Π 中的规则半径大于 1, 则称之为协作系统, 否则称之为非协作系统。

2.2 决策演化集的膜结构

时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 $f_i \in D$, 在时间点 t_i 下, 决策 f_i 的约简属性组成的约简属性集为 $Reduce_{t_i}$, 决策规则中的属性组成决定属性集为 $Decide_{t_i}$ 。在时间点 t_{i+1} 下, 约简属性集为 $Reduce_{t_{i+1}}$, 决定属性集为 $Decide_{t_{i+1}}$, $Reduce_{t_i}$ 和 $Reduce_{t_{i+1}}$ 之间, $Decide_{t_i}$ 和 $Decide_{t_{i+1}}$ 之间并不一定相等, 但 $Reduce_{t_i} \cup Decide_{t_i} = Reduce_{t_{i+1}} \cup Decide_{t_{i+1}} = C$, 所以当时间从 t_i 到 t_{i+1} 时, 约简属性集 $Reduce$ 和决定属性集 $Decide$ 之间存在着数据交换和进化规则。

时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 决策 $f_i \in D$ 的膜结构具有如下形式: $\Pi_{t_i} = (C, [\text{surface} [\text{reduce}]_{\text{reduce}} [\text{decide}]_{\text{decide}}]_{\text{surface}}, \omega_{\text{reduce}}, \omega_{\text{decide}}, R_{\text{reduce}}, R_{\text{decide}}, \text{decide})$ 。式中: C 为决策表信息系统的条件属性集; $[\text{surface} [\text{reduce}]_{\text{reduce}} [\text{decide}]_{\text{decide}}]_{\text{surface}}$ 为决策演化集的膜结构, $[\text{surface}]_{\text{surface}}$ 表示表层膜, $[\text{reduce}]_{\text{reduce}}, [\text{decide}]_{\text{decide}}$ 表示基本膜; $\omega_{\text{reduce}}, \omega_{\text{decide}}$ 分别是膜 $[\text{reduce}]_{\text{reduce}}$ 和 $[\text{decide}]_{\text{decide}}$ 中的字符串; R_{reduce} 和 R_{decide} 分别对应 $[\text{reduce}]_{\text{reduce}}$ 和 $[\text{decide}]_{\text{decide}}$ 中从时间点 t_i 到 t_{i+1} 的演化规则, 进化规则形如 $u \rightarrow v, u$ 为 C 上的字符串; decide 表示基本膜 $[\text{decide}]_{\text{decide}}$ 为输出膜。

依据上述定义, 可得决策演化集的膜结构示意图, 如图 2 所示。

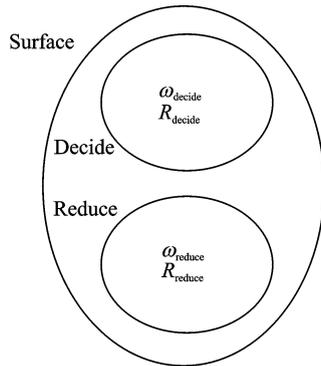


图 2 时间粒 g_i 到 g_{i+1} 的决策演化集的膜结构

Fig. 2 Membrane structure of decision evolution sets from time granule g_i to g_{i+1}

对于决策表信息系统 $S = (U, C \cup D)$, 当时间序列从 t_i 到 t_{i+1} , 两个临近的时间粒分别为 g_i 和 g_{i+1} , 决策 f 分别从时间粒 g_i 和时间粒 g_{i+1} 得到规则 $\text{Decision}_{g_i} \rightarrow f$ 和 $\text{Decision}_{g_{i+1}} \rightarrow f$, 所以根据膜结构的定义可知 $\text{Decision}_{g_i} = \omega_{\text{decide}}, C - \omega_{\text{decide}} = \omega_{\text{reduce}}, \omega_{\text{decide}} \cup \omega_{\text{reduce}} = C, R_{\text{decide}}$ 为 Decision_{g_i} 到 $\text{Decision}_{g_{i+1}}$ 的进化规则, R_{reduce} 为 $C - \text{Decision}_{g_i}$ 到 $C - \text{Decision}_{g_{i+1}}$ 的进化规则。

当决策演化集从时间点 t_i 移动到时间点 t_{i+1} 时, 演化流程如图 3 所示。图 3 中存在着时间粒 g_{i-1} 到

g_i 和时间粒 g_i 到 g_{i+1} 的实体膜,同时还存在着在时间粒 g_i 到 g_{i+1} 的预测膜, α 为时间点 t_{i+1} 相对于 t_i 的演化夹角, β 为偏移夹角, θ 为预测夹角。

性质 1 决策表信息系统 $S=(U, C \cup D)$, 决策 $f_i \in D$, 如果 $c \in \overline{C}_{f_i}^-$, 则 $c \in \omega_{decide}$ 。

证明: 由定义 6 可知, 如果 $c \in \overline{C}_{f_i}^+$, 则 $\text{Sup}_D(c|f) = 1$, 所以在时间粒 g_i 得到的 $\text{Decision}_{g_i} \rightarrow f$ 中, $c \in \text{Decision}_{g_i}$, 在时间粒 g_{i+1} 得到 $\text{Decision}_{g_{i+1}} \rightarrow f$ 中 $c \in \text{Decision}_{g_{i+1}}$, 而 ω_{decide} 是膜 $[\text{decide}]_{decide}$ 即决策膜中的字符串, 且 $\text{Decision}_{g_i} = \omega_{decide}$, 则 $c \in \omega_{decide}$ 。

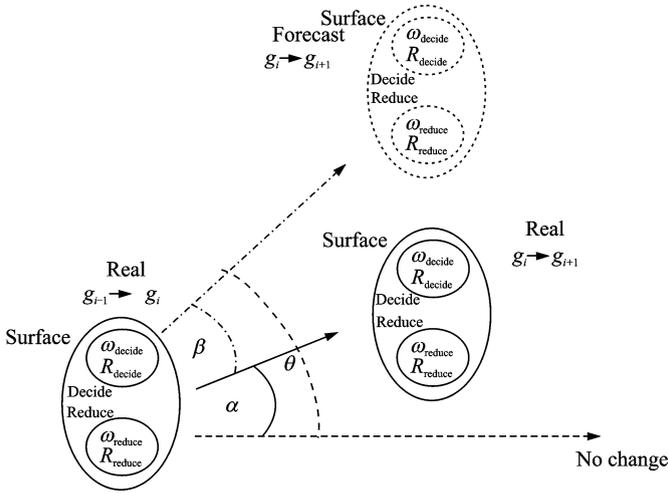


图 3 膜结构下决策演化集演化流程图

Fig. 3 Evolution processes of membrane structure of decision evolution sets

性质 2 决策表信息系统 $S=(U, C \cup D)$, 决策 $f_i \in D$, 如果 $c \in \underline{C}_{f_i}$, 则 $c \in \omega_{reduce}$ 。

证明: 由定义 5, 如果 $c \in \underline{C}_{f_i}$, 则 $\text{Sup}_D(c|f) = 0$, 所以在时间粒 g_i 得到的 $\text{Decision}_{g_i} \rightarrow f$ 中, $c \notin \text{Decision}_{g_i}$, $c \in C\text{-Decision}_{g_i}$, 在时间粒 g_{i+1} 得到的 $\text{Decision}_{g_{i+1}} \rightarrow f$ 中 $c \notin \text{Decision}_{g_{i+1}}$, $c \in C\text{-Decision}_{g_{i+1}}$, 而 ω_{reduce} 是膜 $[\text{reduce}]_{reduce}$ 即约简膜中的字符串, 且 $C\text{-Decision}_{g_i} = \omega_{reduce}$, 则 $c \in \omega_{reduce}$ 。

2.3 实例解析

设时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}, \dots\}$, 在时间点 t_i 下, 决策信息系统 $S=(U, C \cup D)$, 条件属性集 $C = \{a, b, c, d, e, h, k, l, m, n\}$, 决策属性集 $D = \{q\}$, 每个属性 $c \in C \cup D$ 的值域 $V_c = \{0, 1, 2\}$ 。对决策信息系统 S 在时间序列下进行粒度划分得到粒集, 时间子粒 $g_i (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 进行规则提取处理, 结果如表 1 所示。

表 1 决策信息系统各个时间粒的决策规则

Tab. 1 Decision rules for each time granules of decision information system

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6
决	$b_1 d_1 e_0 k_2 m_0 n_1 \rightarrow q_0$	$b_1 c_1 d_2 h_0 n_2 \rightarrow q_0$	$a_0 d_2 h_1 k_1 l_2 \rightarrow q_0$	$a_0 b_0 c_1 d_2 m_2 \rightarrow q_0$	$c_1 d_2 e_0 k_0 l_0 m_1 \rightarrow q_0$	$a_1 b_1 d_2 k_1 l_2 n_0 \rightarrow q_0$
策	$a_2 b_1 c_0 d_2 h_1 l_2 m_0 \rightarrow q_1$	$a_0 b_1 c_0 l_1 n_2 \rightarrow q_1$	$b_0 h_2 m_1 n_2 \rightarrow q_1$	$d_0 e_2 l_0 n_1 \rightarrow q_1$	$c_1 d_2 e_0 k_1 m_1 \rightarrow q_1$	$e_1 h_2 k_0 l_1 m_1 n_2 \rightarrow q_1$
规	$b_0 c_2 e_1 k_2 n_0 \rightarrow q_2$	$a_1 d_2 e_0 k_0 \rightarrow q_2$	$a_0 b_0 e_2 h_1 m_1 \rightarrow q_2$	$a_2 b_2 e_1 k_0 l_0 n_1 \rightarrow q_2$	$a_2 b_1 c_2 d_0 h_1 k_0 \rightarrow q_2$	$c_2 d_1 e_1 k_0 l_2 \rightarrow q_2$

对表 1 进行数据处理,将决策 q_0, q_1 和 q_2 的决策规则分别集合在一起,结果如表 2 所示。

表 2 按决策属性整理的各个时间粒的决策规则

Tab. 2 Decision rules for each time granule in accordance with decision attributes

	q_0	q_1	q_2
决策规则	$b_1 d_1 e_0 k_2 m_0 n_1 \rightarrow q_0$	$a_2 b_1 c_0 d_2 h_1 l_2 m_0 \rightarrow q_1$	$b_0 c_2 e_1 k_2 n_0 \rightarrow q_2$
	$b_1 c_1 d_2 h_0 n_2 \rightarrow q_0$	$a_0 b_1 c_0 l_1 n_2 \rightarrow q_1$	$a_1 d_2 e_0 k_0 \rightarrow q_2$
	$a_0 d_2 h_1 k_1 l_2 \rightarrow q_0$	$b_0 h_2 m_1 n_2 \rightarrow q_1$	$a_0 b_0 e_2 h_1 m_1 \rightarrow q_2$
	$a_0 b_0 c_1 d_2 m_2 \rightarrow q_0$	$d_0 e_2 l_0 n_1 \rightarrow q_1$	$a_2 b_2 e_1 k_0 l_0 n_1 \rightarrow q_2$
	$c_1 d_2 e_0 k_0 l_0 m_1 \rightarrow q_0$	$c_1 d_2 e_0 k_1 m_1 \rightarrow q_1$	$a_2 b_1 c_2 d_0 h_1 k_0 \rightarrow q_2$
	$a_1 b_1 d_2 k_1 l_2 n_0 \rightarrow q_0$	$e_1 h_2 k_0 l_1 m_1 n_2 \rightarrow q_1$	$c_2 d_1 e_1 k_0 l_2 \rightarrow q_2$

以决策 q_0 为观察点来解释说明决策演化集膜结构的工作方法。由表 2 和定义 9 可以得到决策 q_0 在不同时间点 $t_i (i=1,2,3,4,5,6)$ 下的演化矩阵分别为

$$\begin{aligned}
 E_1 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & E_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} & E_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\
 E_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} & E_5 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & E_6 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

在时间点 t_i 得到决策信息系统 S 从时间粒 g_5 到 g_6 的实体膜结构如图 4 所示。

在决策值 q_0 下各属性的继承度分别为: $\text{InA}(g_2 | g_1) = 3/10, \text{InA}(g_3 | g_2) = 1/5, \text{InA}(g_4 | g_3) = 1/5, \text{InA}(g_5 | g_4) = 3/10, \text{InA}(g_6 | g_5) = 3/10$ 。各属性的支持度分别为: $\text{Sup}_D(a | q_0) = 1/2, \text{Sup}_D(b | q_0) = 2/3, \text{Sup}_D(c | q_0) = 1/2, \text{Sup}_D(d | q_0) = 1, \text{Sup}_D(e | q_0) = 1/3, \text{Sup}_D(h | q_0) = 1/3, \text{Sup}_D(k | q_0) = 2/3, \text{Sup}_D(l | q_0) = 1/2, \text{Sup}_D(m | q_0) = 1/2, \text{Sup}_D(n | q_0) = 1/2$ 。 $\overline{C}_{f_{\text{oss}}}^+ = \{d\}, \overline{C}_{f_{\text{oss}}}^- = \{a, b, c, e, h, k, l,$

$m, n \}, \bar{C}_{f_{(6)}} = \emptyset$ 。

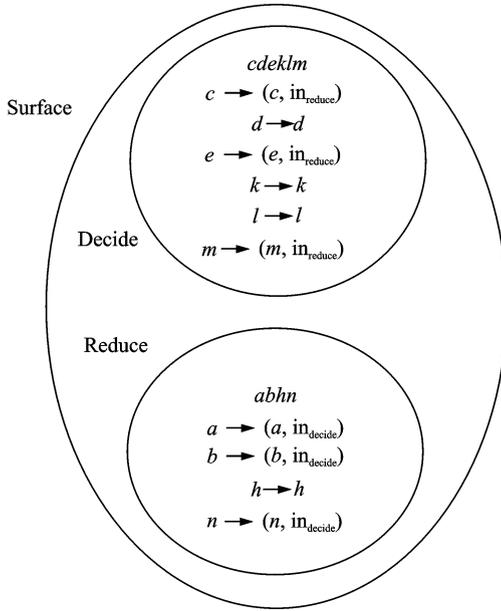


图 4 时间粒 g_5 到 g_6 的实体膜结构

Fig. 4 Real membrane structure of decision evolution sets from time granule g_5 to g_6

将决策 q_0 下各属性的继承度组成序列 $I = \{3/10, 1/5, 1/5, 3/10, 3/10\}$, 在时间序列 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i, t_{i+1}\}$ 的时间点 t_{i+1} 下新增加的时间粒 g_7 对 g_6 的属性继承度 $InA = 13/50$, 所以 $Cont_{i+1}$ 中非零元素的个数 $\in [2, 3]$ 。支持度向量 $st_{(6,7)} = (1/2, 2/3, 1/2, 1, 1/3, 1/3, 2/3, 1/2, 1/2, 1/2)$, 预测向量

$$fore_{(6,7)1} = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0),$$

$$fore_{(6,7)2} = (0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0),$$

$$fore_{(6,7)3} = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0),$$

所以

$$\cos\theta_1 = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0) \cdot (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1) / \|(0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0)\| \cdot \|(1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1)\| = 2/(\sqrt{2} \cdot \sqrt{6}) = \sqrt{3}/3,$$

$$\cos\theta_2 = (0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0) \cdot (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1) / \|(0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1)\| \cdot \|(1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1)\| = 2/(\sqrt{3}) = \sqrt{3}/3,$$

$$\cos\theta_3 = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0) \cdot (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1) / \|(0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1)\| \cdot \|(1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1)\| = 3/(\sqrt{3} \cdot \sqrt{6}) = \sqrt{2}/2.$$

所以在时间点 t_i 给出的下一个时间点 t_{i+1} 新增时间粒 g_7 的条件属性向量为 $Con_{g_7} = (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)$, 预测夹角 $\theta = 45^\circ$ 。预测的膜结构如图 5 所示。

在时间点 t_{i+1} 由新增时间粒 g_7 得到的决策规则如表 3 所示。由表 3 可得 $\cos\alpha = (0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1) \cdot (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1) / \|(0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1)\| \cdot \|(1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1)\| = 3/\sqrt{6} \cdot \sqrt{6} = 1/2$, 所以演化夹角 $\alpha = 60^\circ$ 。 $\cos\beta = (0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1) \cdot (0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0) / \|(0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1)\| \cdot \|(0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0)\| = 1/\sqrt{6} \cdot \sqrt{3} = 0.2357$, 所以偏移夹角 $\beta = 76.37^\circ$ 。

得到演化矩阵

$$E_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

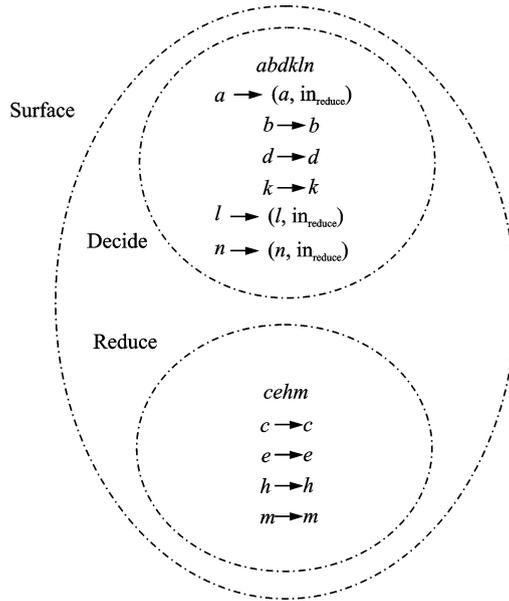


图 5 时间粒 g_6 到 g_7 的预测膜结构

Fig. 5 Forecast membrane structure of decision evolution sets from time granule g_6 to g_7

表 3 时间粒 g_7 的决策规则

Tab. 3 Decision rule for time granule g_7

粒	决策规则
	$c_1 d_0 e_2 h_2 l_0 n_1 \rightarrow q_0$
g_7	$a_2 b_1 c_2 k_1 m_0 n_0 \rightarrow q_1$
	$b_1 c_0 d_1 e_2 k_2 l_0 n_1 \rightarrow q_2$

所以对于决策 q_0 , 得到的实际的时间粒 g_6 到时间粒 g_7 的膜结构如图 6 所示。

在时间点 t_{i+2} , 由新增时间粒 g_8 得到的决策规则如表 4 所示。由表 4 可得 $\cos\alpha = (0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1) \cdot (0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1) / \|(0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1)\| \cdot \|(0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1)\| = 3/\sqrt{6} \cdot \sqrt{6} = 1/2$, 所以演化夹角 $\alpha = 60^\circ$ 。从而得到演化矩阵

$$E_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

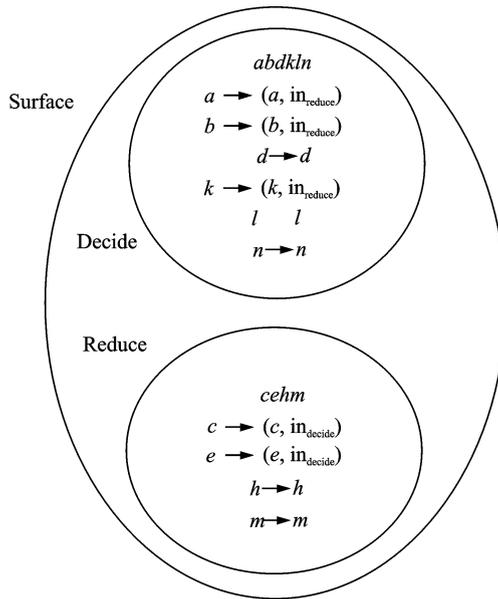


图 6 时间粒 g_6 到 g_7 的实体膜结构

Fig. 6 Real membrane structure of decision evolution sets from time granule g_6 to g_7

表 4 时间粒 g_8 的决策规则

Tab. 4 Decision rules for time granule g_8

粒	决策规则
g_8	$b_0 d_0 h_1 k_1 m_2 n_1 \rightarrow q_0$
	$b_1 c_0 d_2 l_2 m_0 \rightarrow q_1$
	$c_0 d_2 e_1 h_0 k_0 m_2 \rightarrow q_2$

所以对于决策 q_0 得到的实际的 g_7 到时间粒 g_8 的膜结构如图 7 所示。图 3 所示的决策演化集膜结构在本例中就具体化为图 8。其中演化夹角 $\alpha_1 = 60^\circ$ ，偏移夹角 $\beta = 76.37^\circ$ ，预测夹角 $\theta = 45^\circ$ ，演化夹角 $\alpha_2 = 60^\circ$ 。

3 决策演化集膜结构特点

文献[15]提出了决策演化集的概念,并且给出了演化轨迹的定义,但对于具有 n 个条件属性的决策

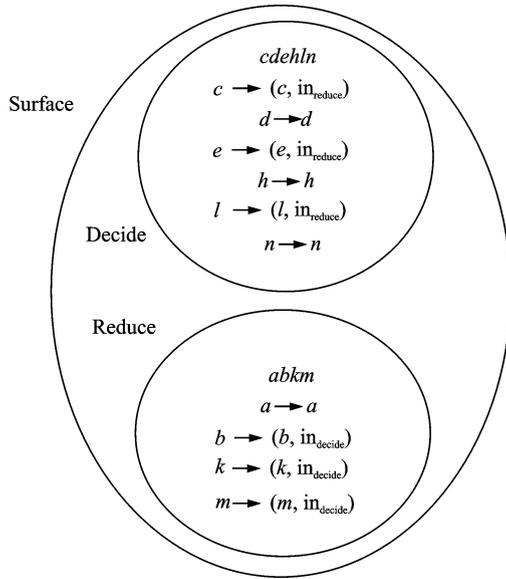


图 7 时间粒 g_7 到 g_8 的实体膜结构

Fig. 7 Real membrane structure of decision evolution sets from time granule g_7 to g_8

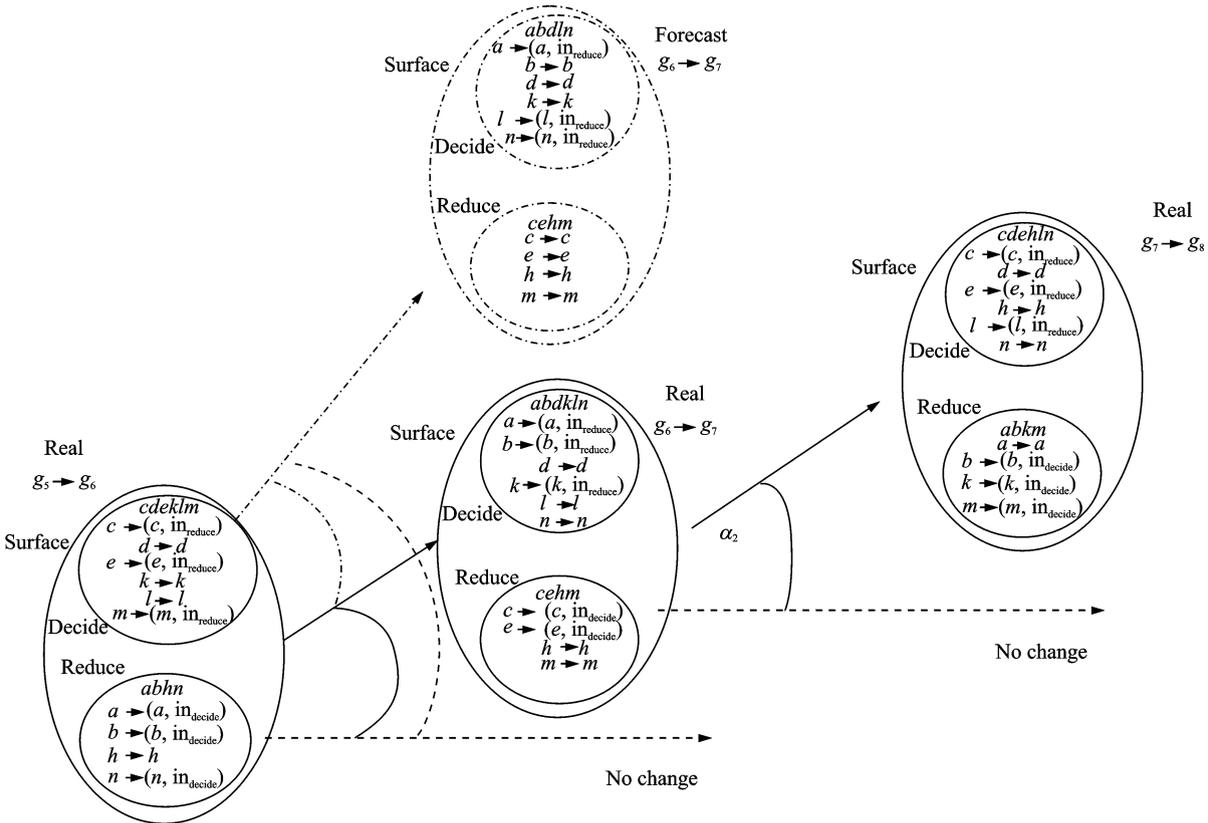


图 8 决策演化集的膜结构实例演化流程图

Fig. 8 Illustration of evolution process of membrane structure of decision evolution sets

信息系统,其演化轨迹是一个 n 维空间下的路径,虽然存在,但很难具体地描绘出来。而使用膜结构对决策演化集进行描述后,决策信息系统的演化轨迹得以具象化,其演化轨迹可以清晰地展示出来。同时由于在膜结构中存在决策膜(Decide)和约简膜(Deduce),在演化轨迹得以具现化的同时,也将在演化过程中的数据交换过程展现出来。在传统的对决策信息系统的研究中,通常注意到时间粒里面的某些条件属性决定了一个决策,而另外的一些条件属性则被约简。而这些条件属性在下一个时间粒里对于决策属性的权重则会改变,而这些改变的过程虽然在文献[15]中进行了研究,但是却没有实际展示出来,而利用膜结构则可以把这个属性转换的过程直观地表示出来。

同时,在膜结构下,演化轨迹中的每一个实体膜的背后,还隐藏着一个预测膜,如图 3 和图 6 所示。在文献[19]中,研究了粒度决策演化模型的决策稳定性问题,并且利用博弈论的方法,对预测结果和实际结果之间进行了评估,同时指出预测结果和实际结果会对决策信息系统的稳定造成影响,但同样的没有具象化这种现象。而在膜结构下,一个膜结构节点下,存在着实体膜和预测膜,从而将文献[19]所描述的预测结果和实际结果之间的这种关系展现了出来,可以清楚地看到决策信息系统在某个节点的稳定状态。在演化轨迹具象化之后,相应的预测夹角、演化夹角和偏移夹角都可以具象化出来,这对于观察演化轨迹的走势很有帮助,也能更为方便地研究决策信息系统的演化态势。

4 结束语

本文提出的决策演化集的膜结构解决了决策信息系统演化轨迹的具象化问题,然而对于决策演化集来说,在膜结构下依然还有很多的问题要解决,例如膜结构下每个规则的进化优先次序,促使膜结构下进化规则产生的促进剂,以及当预测膜和实际膜不同时产生不稳定的抑制剂问题,膜结构下决策演化集的计算能力和计算效率等问题都非常值得继续研究。

参考文献:

- [1] 黄海, 王国胤, 吴渝. 一种不完备信息系统的直接约简方法[J]. 小型微型计算机系统, 2005, 26(10): 1761-1769.
Huang Hai, Wang Guoyin, Wu Yu. Direct reduction method for incomplete information system [J]. Mini-Micro System, 2005, 26(10): 1761-1769.
- [2] 王国胤. 决策表核属性的计算方法[J]. 计算机学报, 2003, 26(5): 611-615.
Wang Guoyin. Calculation methods for core attributes of decision table[J]. Chinese Journal of Computer, 2003, 26(5): 611-615.
- [3] 赵军, 王国胤, 吴中福. 一种高效的属性核计算方法[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(11): 1950-1953.
Zhao Jun, Wang Guoyin, Wu Zhongfu. An efficient approach to compute the feature core[J]. Mini-Micro System, 2003, 24(11): 1950-1953.
- [4] 闫德勤. 不相容信息系统的规范化格式与差别矩阵[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(36): 45-46.
Yan Deqin. Standardization of discontent information systems and discernibility matrix[J]. Computer Engineering and Application, 2004, 40(36): 45-46.
- [5] 徐凤生, 李海军. 不相容决策表的求核方法[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(11): 84-85.
Xu Fengsheng, Li Haijun. A method of finding the core for inconsistent decision tables[J]. Computer Engineering & Science, 2007, 29(11): 84-85.
- [6] Matsumoto Yoshiyuki, Watada Junzo. Knowledge acquisition from time series data through rough sets analysis[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and control, 2009, 5(12): 4885-4897.
- [7] Pancierz Krzysztof, Lewicki Arkadiusz, Tadeusiewicz Ryszard. Ant based clustering of time series discrete data—A rough set approach[C]//2nd International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing. Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India: Springer Verlag, 2011: 645-653.
- [8] Luo Aibao, Jia Xiuyi, Shang Lin, et al. Granular-based partial periodic pattern discovery over time series data[C]// 6th International Conference on Rough Sets and Knowledge Technology. Banff, AB, Canada: Springer Verlag, 2011: 706-711.
- [9] Kong Lingshuang, Yang Chunhua, Wang Yalin, et al. Generic phase space reconstruction method of multivariate time series

- [C]//2009 Chinese Control and Decision Conference. Guilin, China: IEEE Computer Society, 2009: 3752-3755.
- [10] Kaneiwa Ken, Kudo Yasuo. Local pattern mining from sequences using rough set theory[C]//2010 IEEE International Conference on Granular Computing. San Jose, CA, United States: IEEE Computer Society, 2010: 247-252.
- [11] Cheng Chingsue, Chen Tailiang, Wei Liangying. A hybrid model based on rough sets theory and genetic algorithms for stock price forecasting[J]. Information Sciences, 2010,180(9):1610-1629.
- [12] Bang Y K, Lee C H. Design of adaptive prediction system based on rough sets[C]//2009 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Jeju Island, Korea:IEEE,2009:1914-1919.
- [13] Perfilieva Irina, Yarushkina Nadezhda, Afanasieva Tatiana, et al. Time series analysis using soft computing methods[J]. International Journal of General Systems, 2013,42(6):687-705.
- [14] 胡玉文, 徐久成, 张倩倩. 多粒度时间序列下粒度决策的演化模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(20): 117-120.
Hu Yuwen, Xu Jiucheng, Zhang Qianqian. Research on evolution model of granular decision based on multiple time granularity[J]. Computer Engineering and Application, 2011, 47(20): 117-120.
- [15] 胡玉文, 徐久成, 孙林. 决策演化集研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2013, 31(3): 23-29.
Hu Yuwen, Xu Jiucheng, Sun Lin. Decision Evolution Sets[J]. Journal of Guangxi Normal University(Natural Science), 2013, 31(3):23-29.
- [16] 胡玉文. 时间序列下决策表信息系统演化模型研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2010.
Hu Yuwen. Research on evolvement model of information system of decision table based on time series [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2010.
- [17] 胡玉文, 徐久成, 张倩倩. 决策表信息系统演化模型的回归分析预测算法[J]. 煤炭技术, 2010, 29(9): 152-153.
Hu Yuwen, Xu Jiucheng, Zhang Qianqian. Pre-sentient algorithm of regression analysis based on evolvement model of information system of decision table[J]. Coal Technology, 2010, 29(9): 152-153.
- [18] 胡玉文, 徐久成, 李双群. 粒度决策演化模型的博弈选择研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(29): 51-54.
Hu Yuwen, Xu Jiucheng, Li Shuangqun. Research on game selection of evolution model of granular decision[J]. Computer Engineering and Application, 2012, 48(29): 51-54.
- [19] 胡玉文, 徐久成, 孙林. 粒度决策演化模型的决策稳定性研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(12): 233-236.
Hu Yuwen, Xu Jiucheng, Sun Lin. Research on decision stability of evolution model of granular decision[J]. Computer Science, 2012, 39(12): 233-236.
- [20] Gheorghe Păun. Membrane Computing[M]. Wuhan, China: Huazhong University of Science & Technology Press, 2012:2-4.

作者简介:



胡玉文(1982-),男,工程师,研究方向:粗糙集理论、粒计算和数据挖掘, E-mail: huyuwen611 @ qq.com。



徐久成(1963-),男,博士,教授,研究方向:粗糙集理论、粒计算和数据挖掘, E-mail: xjch3701@sina.com。



徐天贺(1986-),女,助教,研究方向:粗糙集理论、粒计算和数据挖掘, E-mail: tianhe1107@163.com。

