

引用格式: 刘海光, 潘爽, 张源原. 远程 AUV 区间值直觉模糊 Petri 网自主决策方法研究[J]. 电光与控制, 2017, 24(11): 11-15. LIU H G, PAN S, ZHANG Y Y. Methodology for remote AUV autonomous decision-making based on interval-valued intuitionistic fuzzy Petri net[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(11): 11-15.

远程 AUV 区间值直觉模糊 Petri 网自主决策方法研究

刘海光^{1,2}, 潘爽¹, 张源原³

(1. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266199; 2. 海军航空工程学院青岛校区, 山东 青岛 266045;
3. 海军航空兵学院, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 由于感知能力限制, 远程 AUV 自主决策属性模糊隶属度不明确, 传统模糊 Petri 网决策方法无法进行知识的表达与推理。将模糊 Petri 网的模糊集进行拓展, 提出了区间值直觉模糊 Petri 网的概念, 并重新设计了推理方法和决策步骤; 在此基础上, 建立了远程 AUV 行动决策模型, 通过算例实现了远程 AUV 自主行动决策。决策过程形象、快速、清晰, 决策结果验证了方法的有效性。该方法可为多属性决策问题提供新的参考思路。

关键词: 远程 AUV; Petri 网; 区间值直觉模糊集; 自主决策

中图分类号: U674.7⁺ 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2017.11.003

Methodology for Remote AUV Autonomous Decision-Making Based on Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Petri Net

LIU Hai-guang^{1,2}, PAN Shuang¹, ZHANG Yuan-yuan³

(1. Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China; 2. Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao 266045, China; 3. Naval Aviation Academy, Huludao 125000, China)

Abstract: Due to the limitation of sensing ability, the fuzzy membership of the remote AUV autonomous decision-making attribute is not clear, thus the traditional fuzzy Petri net decision-making method can not implement knowledge representation and reasoning. This paper expands the fuzzy set of fuzzy Petri nets, puts forward the concept of interval-valued intuitionistic fuzzy Petri net, and redesigns the reasoning methods and decision-making process. Based on the interval-valued intuitionistic fuzzy Petri net, the remote AUV action decision-making model is established, and the remote AUV autonomous action decision-making is realized by using an example. The decision-making process is eloquent, rapid and clear, and the result of the decision-making proves the validity of the method. This method gives a new thought to multi-attribute decision-making.

Key words: remote AUV; Petri net; interval-valued intuitionistic fuzzy set; autonomous decision-making

0 引言

直觉模糊集利用隶属度与非隶属度来描述模糊性, 可表达支持、中立和反对 3 种状态, 与模糊集相比, 直觉模糊集更能够全面描述事物的自然属性。随着人类活动向海洋的扩展, 无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 将发挥越来越重要的作用, 远程 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 是一种可以远

距离自主航渡到任务海域, 自主执行任务的 UUV。远程 AUV 能够依靠自身携带的传感器识别环境态势和目标信息, 依据决策程序实现自主决策功能, 这其中的关键是基于环境感知数据的知识表达与推理。由于 AUV 对环境 (特别是空中目标) 感知能力有限及使用经验的缺乏, 决策属性的模糊性强, AUV 在进行自主决策时很难确定属性的隶属度与非隶属度的精确值, 只能确定其取值范围 (区间)。为描述属性的这个特性, GARGOV 教授在直觉模糊集的基础上又提出了区间值直觉模糊集的概念^[1], 进一步提升了对事物属性表达的准确性。模糊集理论与 Petri 网结合而成的模糊 Petri 网具备知识表达、推理与决策能力, 它使得决策过程清晰可见, 能形象表达条件与结论间的逻辑关

收稿日期: 2016-11-30 修回日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金 (61473306)

作者简介: 刘海光 (1975—), 男, 山东济宁人, 博士, 讲师, 研究方向为水中兵器保障与作战应用。

系,在评估、识别及决策方面取得了广泛应用^[2-4],但传统模糊 Petri 网无法处理属性隶属度不明确的决策问题^[5]。为此,本文将模糊 Petri 网的模糊集拓展至区间值直觉模糊集,提出区间值直觉模糊 Petri 网的概念,并给出了推理规则和实施步骤。将该方法应用于 AUV 自主决策,建立了远程 AUV 的决策模型,并进行了算例运算与分析,结果证明了方法的有效性,并可为自主决策问题提供新的参考。

1 区间值直觉模糊 Petri 网

1.1 区间值直觉模糊集^[6]

定义 1 设 X 为一给定的论域,模糊集 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle | x \in X \}$ 确定了一个区间值直觉模糊集,其中, $\mu_A(x) \subset [0, 1], \nu_A(x) \subset [0, 1]$, 且 $\sup \mu_A(x) + \sup \nu_A(x) \leq 1, x \in X$ 。常用 $IVIFSs(X)$ 表示定义在 X 上的所有区间值直觉模糊集。

$\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 分别为元素 x 属于 A 的区间值隶属度和区间值非隶属度。 $\mu_A(x)$ 的取值由下端点 $\mu_{AL}(x)$ 和上端点 $\mu_{AU}(x)$ 确定; $\nu_A(x)$ 的取值范围由下端点 $\nu_{AL}(x)$ 和上端点 $\nu_{AU}(x)$ 确定,区间对 $\langle \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle$ 为区间值直觉模糊数。

设两个区间值模糊集 $A, B, A = \{ \langle x, [\mu_{AL}(x), \mu_{AU}(x)], [\nu_{AL}(x), \nu_{AU}(x)] \rangle | x \in X \}, B = \{ \langle x, [\mu_{BL}(x), \mu_{BU}(x)], [\nu_{BL}(x), \nu_{BU}(x)] \rangle | x \in X \}, \lambda > 0$ 为任意的实数,定义运算关系如下。

1) 包含。

若 $\mu_{AL}(x) \leq \mu_{BL}(x), \mu_{AU}(x) \leq \mu_{BU}(x), \nu_{AL}(x) \geq \nu_{BL}(x)$ 且 $\nu_{AU}(x) \geq \nu_{BU}(x)$, 则 $A \subseteq B$ 。

2) 补。

$\bar{A} = \{ \langle x, [\nu_{AL}(x), \nu_{AU}(x)], [\mu_{AL}(x), \mu_{AU}(x)] \rangle | x \in X \}$ 。

3) 和。

$A + B = \{ \langle x, [\mu_{AL}(x) + \mu_{BL}(x) - \mu_{AL}(x)\mu_{BL}(x), \mu_{AU}(x) + \mu_{BU}(x) - \mu_{AU}(x)\mu_{BU}(x)], [\nu_{AL}(x)\nu_{BL}(x), \nu_{AU}(x)\nu_{BU}(x)] \rangle | x \in X \}$ 。

4) 积。

$AB = \{ \langle x, [\mu_{AL}(x)\mu_{BL}(x), \mu_{AU}(x)\mu_{BU}(x)], [\nu_{AL}(x) + \nu_{BL}(x) - \nu_{AL}(x)\nu_{BL}(x), \nu_{AU}(x) + \nu_{BU}(x) - \nu_{AU}(x)\nu_{BU}(x)] \rangle | x \in X \}$ 。

5) 数乘。

$\lambda A = \{ \langle x, [1 - (1 - \mu_{AL}(x))^\lambda, 1 - (1 - \mu_{AU}(x))^\lambda], [(\nu_{AL}(x))^\lambda, (\nu_{AU}(x))^\lambda] \rangle | x \in X \}$ 。

易证 $A + B, AB, \lambda A \in IVIFSs(X)$ 。

定义 2 设某个区间值直觉模糊数为 $a = \langle [\mu_{aL}(x),$

$\mu_{aU}(x)], [\nu_{aL}(x), \nu_{aU}(x)] \rangle$, 则数值 $M(a) = (\mu_{aL}(x) + \mu_{aU}(x) - \nu_{aL}(x) - \nu_{aU}(x))/2$ 称为区间值直觉模糊数 a 的得分值。数值 $\Delta(a) = (\mu_{aL}(x) + \mu_{aU}(x) + \nu_{aL}(x) + \nu_{aU}(x))/2$ 称为 a 的精确值。

区间值直觉模糊集的得分值排序法和普通模糊集相同,此处不再赘述。

1.2 区间值直觉模糊 Petri 网

1.2.1 区间值直觉模糊 Petri 网定义

满足以下条件的 8 维数组 $\Sigma = (P, T; F, I, O, T_h, C_F, \theta)$ 称为区间值直觉模糊 Petri 网。

1) $N = (P, T; F)$ 是经典 Petri 网,为基网;

2) $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ 为库所到变迁的 $n \times m$ 维输入矩阵,如果 $I(p_i, t_j) = ((1, 1), (0, 0))$, 表示从 p_i 到 t_j 有一输入弧; 否则 $I(p_i, t_j) = ((0, 0), (1, 1))$;

3) $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ 为变迁到库所的 $n \times m$ 维输出矩阵,如果 $O(t_i, p_j) = ((1, 1), (0, 0))$, 表示从 t_i 到 p_j 有一输出弧; 否则 $O(p_i, t_j) = ((0, 0), (1, 1))$;

4) $T_h = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)^T$ 为变迁阈值,其中 t_i 的阈值 $\lambda_i = ((\alpha_{iL}, \alpha_{iU}), (\beta_{iL}, \beta_{iU}))$ 是一个区间值直觉模糊数;

5) $C_F = \text{diag}(C_{F_1}, C_{F_2}, \dots, C_{F_m})$ 为 $m \times m$ 维规则可信度矩阵,其中 R_i 的可信度 $C_{F_i} = ((C_{\mu_{iL}}, C_{\mu_{iU}}), (C_{\nu_{iL}}, C_{\nu_{iU}}))$ 为一区间值直觉模糊数;

6) $\theta^j = (\theta_1^j, \theta_2^j, \dots, \theta_n^j)^T$ 为库所真值,其中 $\theta_i^j = ((\mu_{iL}^j, \mu_{iU}^j), (\nu_{iL}^j, \nu_{iU}^j))$ 为一区间值直觉模糊数,为 p_i 在第 j 次转换时的真值。

1.2.2 推理规则

基于模糊推理规则的简单式、合取式、析取式 3 种算法及 Petri 网触发规则^[7-8], 给出对应的区间值直觉模糊 Petri 网推理规则。

1) 简单式。

图 1 中条件库所 p_i^t 及结论库所 p_k^t 在 t 次推理下的真值为 $\theta_i^t = ((\mu_{iL}^t, \mu_{iU}^t), (\nu_{iL}^t, \nu_{iU}^t)), \theta_k^t = ((\mu_{kL}^t, \mu_{kU}^t), (\nu_{kL}^t, \nu_{kU}^t))$; 规则变迁 t_j 的阈值 $\lambda_j = ((\alpha_{jL}, \alpha_{jU}), (\beta_{jL}, \beta_{jU}))$; 规则可信度为 $C_{F_j} = ((C_{\mu_{jL}}, C_{\mu_{jU}}), (C_{\nu_{jL}}, C_{\nu_{jU}}))$ 。

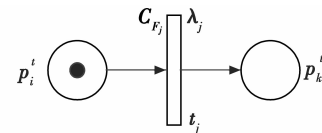


图 1 简单式推理

Fig. 1 Simple type reasoning

由模糊 Petri 网触发条件可知, t_j 触发的充要条件是: $\alpha_{jL} \leq \mu_{iL}^t, \alpha_{jU} \leq \mu_{iU}^t, \beta_{jL} \geq \nu_{iL}^t$ 和 $\beta_{jU} \geq \nu_{iU}^t$ 同时满足, p_k 真值 $\theta_k^{t+1} = ((\mu_{kL}^{t+1}, \mu_{kU}^{t+1}), (\nu_{kL}^{t+1}, \nu_{kU}^{t+1}))$, 式中

$$\begin{cases} \mu_{kl}^{i+1} = \mu_{il}^i C_{\mu_{\mu}} \\ \mu_{ku}^{i+1} = \mu_{iu}^i C_{\mu_{\mu}} \\ \nu_{kl}^{i+1} = \nu_{il}^i + C_{\gamma_{\mu}} - \nu_{il}^i C_{\gamma_{\mu}} \\ \nu_{ku}^{i+1} = \nu_{iu}^i + C_{\gamma_{\mu}} - \nu_{iu}^i C_{\gamma_{\mu}} \end{cases} \quad (1)$$

2) 合取式。

图 2 中条件库所集 $\{p_{i1}^i, p_{i2}^i, \dots, p_{im}^i\}$ 可分为可确定包含关系的库所集 $p_{\tau 1}^i, p_{\tau 2}^i, \dots, p_{\tau n}^i$, 不可确定包含关系的库所集 p_{π}^i 。

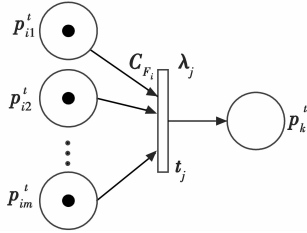


图 2 合取式推理

Fig. 2 Conjunctive type reasoning

在 $p_{\tau 1}^i, p_{\tau 2}^i, \dots, p_{\tau n}^i$ 中找到最小区间值直觉模糊数, 分别为 $\min(p_{\tau 1}^i), \min(p_{\tau 2}^i), \dots, \min(p_{\tau n}^i)$, 其最小值为 $\min(p_{\tau}^i)$; 在 p_{π}^i 中找到最小区间值直觉模糊数 $\min(p_{\pi}^i)$; 计算 $p_{il}^i = \min(\min(p_{\tau}^i), \min(p_{\pi}^i))$, p_{il}^i 的真值为 $((\mu_{il}^i, \mu_{iu}^i), (\nu_{il}^i, \nu_{iu}^i))$; 当且仅当 $\alpha_{\mu} \leq \mu_{il}^i, \alpha_{\nu} \leq \mu_{iu}^i, \beta_{\mu} \geq \nu_{il}^i$ 和 $\beta_{\nu} \geq \nu_{iu}^i$, t_j 触发, p_k 真值为 $\theta_k^{i+1} = ((\mu_{kl}^{i+1}, \mu_{ku}^{i+1}), (\nu_{kl}^{i+1}, \nu_{ku}^{i+1}))$, 式中

$$\begin{cases} \mu_{kl}^{i+1} = \mu_{il}^i C_{\mu_{\mu}} \\ \mu_{ku}^{i+1} = \mu_{iu}^i C_{\mu_{\mu}} \\ \nu_{kl}^{i+1} = \nu_{il}^i + C_{\gamma_{\mu}} - \nu_{il}^i C_{\gamma_{\mu}} \\ \nu_{ku}^{i+1} = \nu_{iu}^i + C_{\gamma_{\mu}} - \nu_{iu}^i C_{\gamma_{\mu}} \end{cases} \quad (2)$$

3) 析取式。

析取式推理如图 3 所示。

① 由简单式推理, 在 m 条支路中找到有效支路;

② 利用式 (1) 计算有效支路触发后真值 $\theta^{i+1} = ((\mu_{L}^{i+1}, \mu_{U}^{i+1}), (\nu_{L}^{i+1}, \nu_{U}^{i+1}))$;

③ 设 $\theta_{\tau 1}^{i+1}, \theta_{\tau 2}^{i+1}, \dots, \theta_{\tau n}^{i+1}$ 为 θ^{i+1} 中有包含关系库所集合, θ_{π}^{i+1} 为无包含关系库所集合;

④ $\theta_{\tau 1}^{i+1}, \theta_{\tau 2}^{i+1}, \dots, \theta_{\tau n}^{i+1}$ 最大区间值模糊数为 $\max(\theta_{\tau 1}^{i+1}), \max(\theta_{\tau 2}^{i+1}), \dots, \max(\theta_{\tau n}^{i+1})$; 计算它们的最大值为 $\max(\theta_{\tau}^{i+1})$, 计算 θ_{π}^{i+1} 的最大区间值直觉模糊数 $\max(\theta_{\pi}^{i+1})$;

⑤ 设 $\theta_i^{i+1} = \max(\max(\theta_{\tau}^{i+1}), \max(\theta_{\pi}^{i+1}))$, 其真值为 $((\mu_{il}^{i+1}, \mu_{iu}^{i+1}), (\nu_{il}^{i+1}, \nu_{iu}^{i+1}))$;

⑥ 结论库所 p_k 的真值 $\theta_k^{i+1} = ((\mu_{kl}^{i+1}, \mu_{ku}^{i+1}), (\nu_{kl}^{i+1}, \nu_{ku}^{i+1}))$, 式中

$$\begin{cases} \mu_{kl}^{i+1} = \mu_{il}^{i+1} C_{\mu_{\mu}} \\ \mu_{ku}^{i+1} = \mu_{iu}^{i+1} C_{\mu_{\mu}} \\ \nu_{kl}^{i+1} = \nu_{il}^{i+1} + C_{\gamma_{\mu}} - \nu_{il}^{i+1} C_{\gamma_{\mu}} \\ \nu_{ku}^{i+1} = \nu_{iu}^{i+1} + C_{\gamma_{\mu}} - \nu_{iu}^{i+1} C_{\gamma_{\mu}} \end{cases} \quad (3)$$

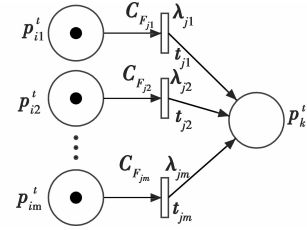


图 3 析取式推理

Fig. 3 Disjunctive type reasoning

2 推理方法

2.1 辅助算子和向量

为便于简洁描述推理过程, 本文引入 3 个算子: \oplus, \otimes 和 \odot 。

\oplus 算子: A, B, C 都是 $m \times n$ 维矩阵, $A \oplus B = C$, C 的元素 $c_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$ 。

\otimes 算子: A, B, C 分别为 $m \times p, p \times n, m \times n$ 维矩阵, $A \otimes B = C$, C 的元素 $c_{ij} = \max_{1 \leq k \leq p} \{a_{ik}, b_{kj}\}$ 。

\odot 算子: A, B, C 都是 $m \times n$ 维矩阵, $A \odot B = C$, C 的元素 c_{ij} 为

$$c_{ij} = \begin{cases} a_{ij} & a_{ij} \geq b_{ij} \\ 0 & a_{ij} < b_{ij} \end{cases} \quad \circ$$

用 $\hat{1}$ 表示 $((1, 1), (0, 0))$, $\hat{0}$ 表示 $((0, 0), (1, 1))$, 同时引入以下向量:

1) 标识向量 $M = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$, 若 $m_i = \hat{1}$, 意为库所 P_i 含有非 $\hat{0}$ 真值, 如果 $m_i = \hat{0}$, 意为库所 P_i 真值为 $\hat{0}$;

2) 激活向量 $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$, 若 $\omega_i = \hat{1}$, 意为变迁 T_i 的全部前集库所含有非 $\hat{0}$ 真值, T_i 可被激活; 若 $\omega_i = \hat{0}$, 意为 T_i 不可激活;

3) 中继向量 $P = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)^T, \rho_j = \min_{p_i \in t_j} \{x_i \mid x_i = \theta_i, I(p_i, t_j) = \hat{1}\}$, 其中, $t_i = \{p_i \mid I(p_i, t_j) = \hat{1}\}$, ρ_j 表示可被激活变迁 t_j 所有前集库所的最小真值;

4) 控制向量 $P' = (\rho'_1, \rho'_2, \dots, \rho'_m)^T, \rho'_j = \rho_j \odot \lambda_i$ 。

2.2 推理算法和步骤

下面给出具体的推理算法和步骤:

1) 判断模型中是否有回路, 如果有回路, 则退出^[9-10];

- 2) 初始化 I, O 矩阵;
- 3) $t=0$, 初始化 $\theta^t = \{\theta_1^t, \theta_2^t, \dots, \theta_n^t\}^T$;
- 4) $t=0$, 初始化标识向量 M^t ;
- 5) 重复按下式更新向量 Ω, P, P', M 及真值 θ , 直至 $\theta^{t+1} = \theta^t$, 完成推理。

$$\begin{cases} \Omega^t = I^T \otimes \overline{M^t} \\ P^t = \overline{(I^T \otimes (M^t \oplus \theta^t)) \oplus (M^t \oplus \theta^t)} \\ P'^t = P^t \odot T_h \\ M^{t+1} = M^t \oplus \overline{I^T \otimes M^t} \\ \theta^{t+1} = \theta^t \oplus [O \otimes (C_F \cdot P'^t) \oplus \overline{(C_F \cdot P'^t)}] \end{cases} \quad (4)$$

3 远程 AUV 行动决策建模

远程 AUV 远距离航渡到达任务海域, 在自主执行任务的过程中, 依据装订的任务载荷, 不断通过自身携带的传感器探测外界环境状态、目标状态、态势信息, 并以此作为自主决策的属性, 并利用前述推理方法不断做出恰当的行动决策。

3.1 远程 AUV 行动及属性分析

3.1.1 行动样式及决策属性

1) AUV 行动样式。AUV 行动样式包括执行任务 (P_{10})、待机 (P_{20}) 和任务结束 (P_{30}) 3 种。执行任务包括执行水下任务 (P_{40}) 和执行水面任务 (P_{50}) 2 种, 待机包括水下待机 (P_{60}) 和水面待机 (P_{70}) 2 种。

2) AUV 样式决策属性。远程 AUV 决策属性主要有空中目标特征 (P_1, P_2), 水下目标特征 (P_3, P_4), AUV 航程余量 (P_5), 基指指示信息 (P_6), 环境信息 (P_7)。

3.1.2 行动方式及决策属性

1) AUV 任务行动。

水下任务包括: 隐蔽行动 (P_{81}), 横向持续行动 (P_{82}), 纵向持续行动 (P_{83}), 被动示形行动 (P_{84}) 和主动示形行动 (P_{85})。

水面任务行动包括: 近水面被动行动 (P_{86}), 近水面主动行动 (P_{87})。

水下待机方式包括: 水下静止待机 (主动 P_{88} 、被动 P_{89}) 和水下机动待机 (主动 P_{90} 、被动 P_{91})。

水面待机方式包括: 近水面静止待机 (主动 P_{92} 、被动 P_{93}), 近水面机动待机 (主动 P_{94} 、被动 P_{95})。

2) AUV 任务行动决策属性。

待机决策属性: 地理位置信息 (P_{16}), 海况 (P_{17}), 待机总时间 (P_{18}), 环境态势信息 (P_{19})。

水下待机方式决策属性: 水下待机时间 (P_{61}), 水下待机模式 (P_{62}, P_{63})。

水面待机方式决策属性: 水面待机时间 (P_{71}), 位

置偏移 (大 P_{72} , 小 P_{73})。

任务执行决策属性: 目标属性 (P_8, P_9, P_{10}), 任务属性 (P_9, P_{11}, P_{12})。

水下任务行动决策属性: 水下目标距离 (近 P_{41} , 远 P_{42}), 水下目标方位 (P_{43}), 单项行动执行时间 (P_{44}), 单次任务执行时间 (P_{45})。

水面任务行动决策属性: 空中目标距离 (远 P_{51} , 近 P_{52}), 水面任务执行时间 (P_{53})。

3.2 远程 AUV 行动决策建模

上文描述了远程 AUV 的行动方式及决策属性, 远程 AUV 的行动决策属于多属性决策, 其部分决策属性模糊度较高, 且无法给出具体的模糊度, 只能给出大致范围, 因此可以用区间值直觉模糊集来表示, 根据属性与行动方式间的逻辑关系, 建立图 4 所示的区间值直觉模糊 Petri 网自主决策模型。

4 应用案例

为验证决策模型有效性, 设某时刻一枚远程 UUV 正处于水下机动待机状态, 通过自身携带传感器感受自身及目标状态, 同时接收基指发出的指令信息, 利用隶属度函数方法并结合专家意见, 确定属性隶属度, 给出属性值如下所述。

目标特性: $p_1 = \hat{0}$, $p_2 = ((0.75, 0.85), (0.10, 0.15))$; 航程余量: $p_3 = ((0.65, 0.65), (0, 0))$; 基指信息: $p_4 = ((0, 0), (0, 0))$; 任务执行属性: $p_8 = ((0.85, 0.85), (0, 0))$, $p_9 = ((1, 1), (0, 0))$; 目标距离: $p_{41} = ((0.65, 0.75), (0.1, 0.18))$, $p_{44} = ((0.15, 0.25), (0.65, 0.75))$; 目标方位: $p_{43} = ((0.85, 0.95), (0, 0))$; 任务执行时间: $p_{44} = p_{45} = \hat{0}$ 。

利用图 4 的决策模型, 第一次推理 T_1 触发, $C_{F_1} = ((0.95, 0.95), (0.0, 0.0))$, $\lambda_1 = ((0.4, 0.6), (0.1, 0.2))$, 推理结果为执行任务 $p_{10} = ((0.665, 0.76), (0.1, 0.2))$; 第二次推理 T_{10} 触发, $C_{F_{10}} = ((0.90, 0.90), (0.0, 0.0))$, 阈值为 $\lambda_{10} = ((0.5, 0.55), (0.1, 0.15))$, 推理结果为执行水下任务 $p_{40} = ((0.725, 0.768), (0.1, 0.2))$; 第三次推理 T_{24} 触发, $C_{F_{24}} = ((0.85, 0.85), (0.0, 0.0))$, $\lambda_{24} = ((0.35, 0.45), (0.2, 0.25))$, 推理结果为隐蔽行动 $p_{81} = ((0.765, 0.796), (0.15, 0.2))$ 。决策结果表明, 远程 AUV 在水下待机的过程中, 发现水下目标信号, 立即由待机模式转入水下任务模式, 当目标距离较近时实施隐蔽行动, 经过三次推理完成 AUV 自主决策功能, 通过形象化的图形模型表示, 决策的过程清晰明确, 决策结果符合 AUV 的实际行动要求。

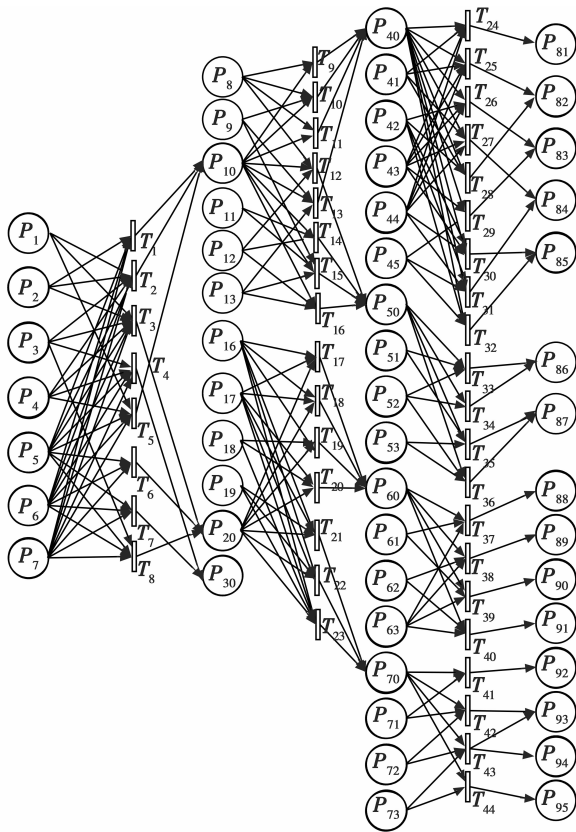


图 4 远程 AUV 自主决策模型

Fig. 4 Remote AUV autonomous decision-making model

5 结束语

由于远程 AUV 状态感知能力有限,且缺乏有效使用经验,在实施自主决策时很难确定决策属性隶属度的精确值,往往可以确定取值区间,经典模糊决策理论无法解决属性模糊隶属度不明确的远程 AUV 自主决策问题。本文在分析区间值直觉模糊集特点的基础上,借助 Petri 网对推理过程的清晰表达能力,将模糊 Petri 网扩展到区间值直觉模糊集,给出了区间值直觉模糊 Petri 网的定义,依据模糊 Petri 网推理规则提出区间值直觉模糊 Petri 网推理规则,提出了推理方法和步骤。在完成远程 AUV 自主决策建模的基础上,将本方法应用于远程 AUV 自主行动决策,算例表明决策过程

形象、快速、清晰,决策结果验证了方法的有效性。本文所提方法拓展了模糊 Petri 网的功能,也为多属性自主决策问题提供了新的参考思路。

参考文献

- [1] ATANASSOV K, GARGOV G. Interval value intuitionistic fuzzy sets[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 31(3):343-349.
- [2] TANG Y, ZHOU M C, GAO M M. Fuzzy-Petri-net-based disassembly planning considering human factors [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics-Part A: Systems & Humans*, 2006, 36(4):718-726.
- [3] HASSAN K S, MOSTAFA A. Energy harvesting aware clustering and opportunistic transmission with fuzzy Petri net reasoning [J]. *EAI Endorsed Transactions*, 2015, 2(5):124-135.
- [4] SERAFINI A, LESER R, HOCH T, et al. Towards data-based assessment of individual tactics skills in team sports based on fuzzy Petri nets [J]. *Ifac Paperonline*, 2015, 48(1):782-783.
- [5] CHEN S M, KE J S, CHANG J F. Knowledge representation using fuzzy Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Knowledge & Data Engineering*, 1990, 2(3):311-319.
- [6] 李登峰. 直觉模糊集决策与对策分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [7] 单冬. 模糊控制原理与应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1995.
- [8] CHEN G R, PHAM T T. Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems[M]. New York: CRC Press, 2001.
- [9] 周创明,申晓勇,雷英杰. 基于直觉模糊 Petri 网的敌意图识别方法研究[J]. *计算机应用*, 2009, 29(9):2464-2467.
- [10] BANDYOPADHYAY S, SURAJ Z, GROCHOWALSKI P. Modified generalized weighted fuzzy Petri net in intuitionistic fuzzy environment [C]//International Joint Conference on Rough Sets, 2016,342-351.

订 正

《电光与控制》2017年第24卷第9期第31页,作者简介中,肖连,“男”应为“女”,特此订正。