

文章编号: 1001-0920(2013)07-1002-05

基于 IFTL 的不确定时间推理方法

郑寇全^{1,2}, 雷英杰¹, 王睿¹, 邢雅琼¹

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 中国人民解放军 68331 部队, 陕西 华阴 710042)

摘要: 针对现有时序逻辑对复杂不确定时间信息描述和推理方面的局限性, 定义了直觉模糊不确定时间区间与时间间隔, 构造了未知时刻的直觉模糊时序逻辑 (IFTL) 预测模型, 提出了基于 IFTL 的不确定时间推理方法, 较好地解决了时间推理精度不高的问题. 同时, 定义了直觉模糊集间的重叠度, 并提出了基于此的知识模型及时间网络的一致性检验方法. 最后通过典型实例验证了所提出的时间推理方法的有效性和优越性.

关键词: 直觉模糊集; 时序逻辑; 时间推理

中图分类号: TP182; TP391

文献标志码: A

Method of uncertain temporal reasoning based on IFTL

ZHENG Kou-quan^{1,2}, LEI Ying-jie¹, WANG Rui¹, XING Ya-qiong¹

(1. Air Defense and Antimissile Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit of 68331, PLA, Huayin 714200, China. Correspondent: ZHENG Kou-quan, E-mail: zhengkouquan0421@163.com)

Abstract: To the limitation of the description and the reasoning for complicated and uncertain temporal knowledge, the intuitionistic fuzzy uncertain temporal interzone and temporal interval are defined, and the temporal reasoning forecast model of the unknown time and reasoning method based on intuitionistic fuzzy temporal logic (IFTL) are proposed, by using which, the reasoning precision matter is solved better. The method of testing the consistency of the knowledge model and the temporal nets based on the intuitionistic fuzzy serried degree is developed. Finally, a classical instance shows the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: intuitionistic fuzzy set; temporal logic; temporal reasoning

0 引言

随着现代战争样式的日益多样化和各种电子战手段的综合运用, 未来战场将存在大量的不确定性时间和空间信息, 作战单元经常难以准确判断事件发生的时间关系, 从而无法形成实时正确的战场感知. 军事事件间的时间及其时态限制关系对于正确推断敌方意图起着关键性的作用, 因此是否具有不确定时间推理能力已经成为现代化军事态势评估系统至关重要的决定因素, 在学术界和工程技术领域已引起许多学者的广泛关注.

近年来, 国内外学者针对时间推理进行了大量研究, 提出了多种描述时间关系的模型及其分析推理方法. Allen 于 1983 年提出了时段时序逻辑 (ITL) 的概念^[1], 之后又进一步提出了点-时段时序逻辑 (PITL) 理论. 文献 [2-3] 在 PITL 的基础上, 提出了扩展时段时

序逻辑理论, 通过扩展时段结束的最早和最晚时刻来表述持续时段结束时间不确定的情形. 文献 [4] 研究了两个端点不明确的时间间隔表示及其时态运算方法, 并建立了基于概率的时间推理模型. 然而, 目前的研究大都基于 Allen 提出的确定时间区间之间的 13 种关系, 运用统计方法对不确定性时间信息进行推理研究. 该统计方法要求时间变量之间统计独立, 而已知时间变量的先验知识在许多情况下是较难准确得到的, 并且由于系统的随机性、缺乏相关属性 (参数) 或信息不精确等原因, 时段的开始时间也可能没有被预先确定, 这就在很大程度上限制了传统时间推理方法的应用范围. 为此, 文献 [5-6] 在研究模糊理论的基础上提出了时间点和时间区间的模糊表示方法, 定义了模糊时间点和时间区间, 利用模糊理论描述不确定时段信息, 较好地反映了客观世界的不确定性本质, 在一定程度上解决了传统方法过度依赖先验知识

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-05-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60773209, 61272011); 国家重点实验室基金项目 (2012ADL-DW0301).

作者简介: 郑寇全 (1983-), 男, 博士生, 从事智能信息处理的研究; 雷英杰 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能信息处理等研究.

的缺陷. 但是, 文献 [5-6] 提出的模糊时间推理方法均存在隶属度单一的问题, 而且计算结果的精确度难以有效满足战场精确打击评估的精度要求, 无法全面解决不精确时间逻辑推理问题. 文献 [7] 在改进模糊隶属函数的基础上提出一种模糊时间推理方法, 并建立了时间点的模糊预测模型, 但其隶属度函数设定只适用于正态可能性分布且为单峰曲线的情形, 不能解决普遍的不确定时间信息冗余的难题, 而且其推理方法运算量大, 容易形成误差累积. 文献 [8] 针对模糊时序逻辑推理的局限性, 将直觉模糊集 (IFS) 与时序逻辑推理理论相融合, 首次提出了基于 IFS 的不确定时序逻辑模型, 利用 IFS 同时考虑隶属度、非隶属度与犹豫度的信息优势以及对不确定信息具有更强的表现能力, 初步构建了直觉模糊时序逻辑推理模型, 为不确定时间推理提供了新的思路和方向, 但该研究缺乏进一步的针对未知时刻直觉模糊时间推理方法的探讨, 并且文中将犹豫度对隶属度与非隶属度的贡献影响平均化, 这样便限制了直觉模糊理论优势的发挥, 从而在一定程度上降低了直觉模糊时序逻辑推理的准确性.

鉴于此, 本文在定义直觉模糊不确定时间区间与时间间隔的基础上, 构建了未知时刻的直觉模糊时序逻辑预测模型, 提出一种基于 IFTL 的时间推理及时间网络一致性检验方法, 从而扩展了时间推理对不精确、不完备等粗糙信息的处理功效, 为解决复杂不确定时间推理问题提供了行之有效的理论支持.

1 基本定义

不确定时间段是由开始和结束两个不确定时刻限制的, 而且开始时刻与结束时刻的区间可能会出现重叠, 从而可以表达更加复杂的不确定时间信息. 由于点时序逻辑只是时段时序逻辑在起始时间和结束时间落在同一区间的特殊情况, 因此本文重点研究时段时序逻辑.

定义 1 (直觉模糊不确定时间区间) 假设事件开始时刻落在区间 α 上, 结束时刻落在区间 β 上, 则直觉模糊不确定时间区间 T_{IF} 可定义为

$$T_{IF} = (\langle \alpha, \beta \rangle, A(i), B(j)). \quad (1)$$

其中: $A(i) = \{\langle i, \mu_A(i), \gamma_A(i), \pi_A(i) \rangle | i \in \alpha\}$ 为开始时刻落在区间 α 上的直觉模糊集, $B(j) = \{\langle j, \mu_B(j), \gamma_B(j), \pi_B(j) \rangle | j \in \beta\}$ 为结束时刻落在区间 β 上的直觉模糊集.

若对于某一时刻 i 或 j , 当 $\mu_A(i) + \mu_A(i)\pi_A(i)$ 接近于 1 时表示事件在 i 时刻开始的可能性很大; 同样, 若 $\mu_B(j) + \mu_B(j)\pi_B(j)$ 接近于 1 则表示事件在 j 时刻结束的可能性很大. 而当 $\gamma_A(i) + \gamma_A(i)\pi_A(i)$ 接近

于 1 时表示事件在 i 时刻开始的可能性很小; 同样, 当 $\gamma_B(j) + \gamma_B(j)\pi_B(j)$ 接近于 1 时表示事件在 j 时刻结束的可能性很小.

特别地, 当 $i = m, j = n$ 时, $\mu_A(i) + \mu_A(i)\pi_A(i) = 1, \mu_B(j) + \mu_B(j)\pi_B(j) = 1$; 当 $i \neq m, j \neq n$ 时, $\mu_A(i) + \mu_A(i)\pi_A(i) = 0, \mu_B(j) + \mu_B(j)\pi_B(j) = 0$, 不确定时段便转化为确定时段 $\langle m, n \rangle$. 当 $\alpha = \beta, A(i) = B(j)$ 时, 则表示不确定时刻 t 落在时间区间 α 上的直觉模糊集为 $A(x)$. 可见, 确定时段及不确定时刻均是不确定时段的特殊形式.

当两事件发生的不确定时间间隔 Δt_{ij} 已知时, 它们的基本时间关系可表示为 $t_i + \Delta t_{ij} = t_j$. 若 t_i, t_j 表示直觉模糊不确定时刻, 则结合定义 1 可以定义直觉模糊时间间隔 ΔT_{IF} .

定义 2 (直觉模糊时间间隔) 假设不确定时间间隔 Δt 落在不确定时间区间 $\sigma = [\tau_1, \tau_2]$ 上, 则直觉模糊时间间隔 ΔT_{IF} 可表示为

$$\Delta T_{IF} = (\sigma, F(k)). \quad (2)$$

其中: $F(k) = \{\langle \mu_F(k), \gamma_F(k), \pi_F(k) \rangle | k \in \sigma\}$ 为区间 σ 上的直觉模糊集, τ_1 和 τ_2 表示时间数值.

2 基于 IFTL 的时间推理方法

2.1 未知时刻预测模型

因为定义 1 和定义 2 中的 t_i, t_j 和 Δt_{ij} 均由直觉模糊集表示, 所以可借助直觉模糊集间运算法则解决未知时间及其时态关系运算问题^[9-10]. 因此, 可分别用直觉模糊集 T_i, T_j 和 ΔT_{ij} 表示不确定时刻 t_i, t_j 和不确定时间间隔 Δt_{ij} 的模糊取值.

若 $t_i \in \alpha = [t_1, t_2]$ 和 Δt_{ij} 已知, 则预测事件结束的不确定时刻 t_j 称为基于 IFTL 的正向时间推理, t_j 的直觉模糊预测值 T_j 可以表示为

$$T_j = T_i \oplus \Delta T_{ij}. \quad (3)$$

其中: $t_j \in \beta = [t_1 + \tau_1, t_2 + \tau_2]$, \oplus 为直觉模糊扩展加法. 则 t_j 在区间 β 上的直觉模糊集 T_j 的隶属度和非隶属度可表示为

$$\begin{cases} \mu_{T_j}(j) = \bigvee_{i+k=j} [\mu_{T_i}(i) + \mu_{\Delta T_{ij}}(k)]/2, \\ \gamma_{T_j}(j) = \bigwedge_{i+k=j} [\gamma_{T_i}(i) + \gamma_{\Delta T_{ij}}(k)]/2. \end{cases} \quad (4)$$

若 $t_j \in \beta = [t_3, t_4]$ 和 Δt_{ij} 已知, 则预测事件开始的不确定时刻 t_i 称为基于 IFTL 的负向时间推理, t_i 的直觉模糊预测值 T_i 可以表示为

$$T_i = T_j \oplus (-\Delta T_{ij}), \quad (5)$$

其中 $t_i \in \alpha = [t_3 - \tau_2, t_4 - \tau_1]$, 且直觉模糊集 $-\Delta T_{ij}$ 的隶属度和非隶属度函数分别满足

$$\mu_{-\Delta T_{ij}}(x) = \mu_{\Delta T_{ij}}(-x),$$

$$\gamma_{-\Delta T_{ij}}(x) = \gamma_{\Delta T_{ij}}(-x).$$

则 t_i 在区间 σ 上的直觉模糊集 T_i 的隶属度和非隶属度可表示为

$$\begin{cases} \mu_{T_i}(i) = \bigvee_{j-k=i} [\mu_{T_i}(j) + \mu_{-\Delta T_{ij}}(k)]/2, \\ \gamma_{T_i}(i) = \bigvee_{j-k=i} [\gamma_{T_i}(j) + \gamma_{-\Delta T_{ij}}(k)]/2. \end{cases} \quad (6)$$

在知识模型中, 态势评估可以分解成由各子任务(事件)按一定逻辑关系组成的层次结构, 其中一些子任务的输出可以(或者模糊)作为其他子任务的输入, 每个子任务均可用时间谓词 $T(t, t_0)$ 表示一个逻辑时间关系, 其中时间变量 $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ 表示子任务各输入事件发生的不确定时间, t_0 表示子任务输出事件发生的不确定时间. 因为直觉模糊逻辑关系具有时态传递性^[10], 所以可以建立未知时刻直觉模糊时序逻辑预测模型 $\Psi_{IF} : \forall i, j, k \in N$.

$$\begin{aligned} &\Psi_{IF}(t_i, \Delta T_{ij}, t_j) \wedge \Psi_{IF}(t_j, \Delta T_{jk}, t_k) \rightarrow \\ &\Psi_{IF}(t_i, \Delta T_{ij} \oplus \Delta T_{jk}, t_k). \end{aligned} \quad (7)$$

利用模型 Ψ_{IF} 可以将直觉模糊时间谓词 $T_{IF}(t, t_0)$ 分解为不同参数的预测关系合成运算进行处理.

2.2 直觉模糊时间推理方法

根据式(7), 正向时间推理中直觉模糊时间谓词 $T_{IF}(t, t_0)$ 可分解为

$$T_{IF}(t, t_0) \rightarrow \bigwedge_{k=1}^n \Psi_{IF}(t_k, \Delta t_{k0}, t_0). \quad (8)$$

式(8)表示 t_0, t_1, \dots, t_n 之间的时序逻辑是由 n 个关于 t_0 的预测关系组成的, 只要给定 t_k 落在区间 $[t_{k1}, t_{k2}]$ 的直觉模糊估计值 T_k 和 Δt_{k0} 落在区间 $[\tau_{k1}, \tau_{k2}]$ 的直觉模糊估计值 ΔT_{k0} , 按式(4)计算即可获得 t_0 的 n 个直觉模糊局部预测值, 分别记为 $\tilde{T}_{k0}(k = 1, 2, \dots, n)$, 则 t_0 的最终预测值 T_0 需同时满足这 n 个时间逻辑关系, 从而 T_0 的隶属度和非隶属度可以表示为

$$\begin{cases} \mu_{T_0}(x) = \bigwedge_{k=1}^n \mu_{\tilde{T}_{k0}}(x), \\ \gamma_{T_0}(x) = \bigvee_{k=1}^n \gamma_{\tilde{T}_{k0}}(x), \end{cases} \quad (9)$$

其中 $x \in \bigcap_{k=1}^n [t_{k1} + \tau_{k1}, t_{k2} + \tau_{k2}]$. 这里假设 n 个预测关系是一致的, 这样便保证了直觉模糊集的运算结果仍为直觉模糊集, 即直觉模糊运算的封闭性. 模型的一致性检验将在下节讨论.

同理, 在负向时间推理中, 直觉模糊时间谓词 $T_{IF}(t_0, t)$ 可分解为

$$T_{IF}(t_0, t) \rightarrow \bigwedge_{k=1}^n \Psi_{IF}(t_0, \Delta t_{0k}, t_1). \quad (10)$$

根据式(6), 给定 $t_{0k}, \Delta t_{0k1}$ 分别落在区间 $[t_{k1}, t_{k2}], [\tau_{k1}, \tau_{k2}]$ 上的直觉模糊估计值 T_{0k} 和 ΔT_{0k1} , 即可获得 t_1 的 n 个直觉模糊局部预测值, 记为 $\tilde{T}_{0k1}(k = 1, 2, \dots, n)$, 则 t_1 最终预测值 T_1 的隶属度和非隶属度为

$$\begin{cases} \mu_{T_1}(x) = \bigwedge_{k=1}^n \mu_{\tilde{T}_{0k1}}(x), \\ \gamma_{T_1}(x) = \bigvee_{k=1}^n \gamma_{\tilde{T}_{0k1}}(x), \end{cases} \quad (11)$$

其中 $x \in \bigcap_{k=1}^n [t_{k1} - \tau_{k2}, t_{k2} - \tau_{k1}]$.

对于更加复杂的直觉模糊时间谓词, 均可根据上述方法化简为若干个相互之间存在时序关联的正负向时间推理相结合的形式进行推理运算.

2.3 知识模型的一致性检验

专家知识模型是以专家知识为基础的, 而领域专家提供的知识往往存在某些不一致、不完整, 甚至错误的信息, 这样必然影响到知识库的一致性, 从而出现知识矛盾、冲突等现象, 所以在时间推理过程中必须考虑知识库的一致性问题. 态势评估中, 一致性表征了从子任务间的时间关系特征方面推断、观测到的时间和对应子任务的符合程度, 也表征了对应的子任务出现的可能性, 因此时间网络的一致性检验是时间推理必不可少的先验环节.

如图1所示, 运用直觉模糊时序逻辑预测模型对直觉模糊时间谓词 $T_{IF}(t, t_0)$ 进行分解时, 时间推理预测关系可简化为一个有向图, 时间变量对应图中结点, 每个直觉模糊时间预测模型对应一条有向弧.

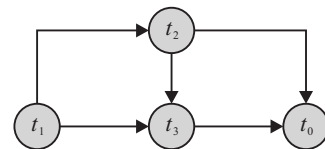


图 1 时间知识模型有向图

图1表示的4个时间变量间的直觉模糊时态关系可表示为

$$\begin{aligned} &T_{IF}(t_1, t_2, t_3, t_0) \rightarrow \\ &\Psi_{IF}^1 \wedge \Psi_{IF}^2 \wedge \Psi_{IF}^3 \wedge \Psi_{IF}^4 \wedge \Psi_{IF}^5. \end{aligned} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} \Psi_{IF}^1 &= \Psi_{IF}(t_1, \Delta T_{12}, t_2), \quad \Psi_{IF}^2 = \Psi_{IF}(t_1, \Delta T_{13}, t_3), \\ \Psi_{IF}^3 &= \Psi_{IF}(t_2, \Delta T_{23}, t_3), \quad \Psi_{IF}^4 = \Psi_{IF}(t_2, \Delta T_{20}, t_0), \\ \Psi_{IF}^5 &= \Psi_{IF}(t_3, \Delta T_{30}, t_0). \end{aligned}$$

由此可见, 从 t_1 到 t_0 有3条不同路径: (t_1, t_2, t_0) , (t_1, t_3, t_0) 和 (t_1, t_2, t_3, t_0) . 运用预测模型的传递性可知 $\Delta T_{10}^1 = \Delta T_{12} + \Delta T_{20}$, $\Delta T_{10}^2 = \Delta T_{13} + \Delta T_{30}$, ΔT_{10}^3

$= \Delta T_{12} + \Delta T_{23} + \Delta T_{30}$. 这样便出现同一对时间点间有 3 个直觉模糊预测模型 $\Psi_{IF}(t_1, \Delta T_{10}^1, t_0)$, $\Psi_{IF}(t_1, \Delta T_{10}^2, t_0)$ 和 $\Psi_{IF}(t_1, \Delta T_{10}^3, t_0)$. 如何判断这 3 种模型能够在一定程度上保持一致, 这就需要研究知识模型的一致性检验方法. 本文借助直觉模糊范数的性质, 在定义直觉模糊集间重叠度的基础上给出一种基于此的时间网络知识一致性检验方法.

任意给定两个不确定时间变量 t_i 和 t_j , 其时间谓词 $T_{IF}(t, t_0)$ 经分解可获得 m 个 t_i 与 t_j 之间不同的直觉模糊关系, 对应 m 个不同的直觉模糊时间间隔 ΔT_{ij}^m , 其隶属度与非隶属度可表示为

$$\begin{cases} \mu_{\Delta \tilde{T}_{ij}}(x) = \bigwedge_{k=1}^m \mu_{\Delta T_{ij}^k}(x), \\ \gamma_{\Delta \tilde{T}_{ij}}(x) = \bigvee_{k=1}^m \gamma_{\Delta T_{ij}^k}(x), \end{cases} \quad (13)$$

其中 $x \in [\tau_1, \tau_2]$.

定义 3 (直觉模糊重叠度) 对于两个直觉模糊集 $\Delta \tilde{T}_{ij}$ 和 ΔT_{ij}^k , 其相互间的重叠度可表示为

$$\rho(\Delta \tilde{T}_{ij}, \Delta T_{ij}^k) = \frac{\|\Delta \tilde{T}_{ij} \cap \Delta T_{ij}^k\|}{\|\Delta \tilde{T}_{ij} \cup \Delta T_{ij}^k\|}. \quad (14)$$

借鉴文献 [9] 关于直觉模糊逻辑运算的定义, $\Delta \tilde{T}_{ij} \cap \Delta T_{ij}^k$ 的隶属度与非隶属度可表示为

$$\begin{aligned} \mu_{\Delta \tilde{T}_{ij} \cap \Delta T_{ij}^k} &= \bigwedge(\mu_{\Delta \tilde{T}_{ij}}, \mu_{\Delta T_{ij}^k}), \\ \gamma_{\Delta \tilde{T}_{ij} \cap \Delta T_{ij}^k} &= \bigvee(\gamma_{\Delta \tilde{T}_{ij}}, \gamma_{\Delta T_{ij}^k}); \end{aligned}$$

同理可得

$$\begin{aligned} \mu_{\Delta \tilde{T}_{ij} \cup \Delta T_{ij}^k} &= \bigvee(\mu_{\Delta \tilde{T}_{ij}}, \mu_{\Delta T_{ij}^k}), \\ \gamma_{\Delta \tilde{T}_{ij} \cup \Delta T_{ij}^k} &= \bigwedge(\gamma_{\Delta \tilde{T}_{ij}}, \gamma_{\Delta T_{ij}^k}). \end{aligned}$$

根据式 (13), 式 (14) 可化简为

$$\rho(\Delta \tilde{T}_{ij}, \Delta T_{ij}^k) = \frac{\|\Delta \tilde{T}_{ij}\|}{\|\Delta T_{ij}^k\|}, \quad (15)$$

其中直觉模糊范数

$$\|\Delta \tilde{T}_{ij}\| = \int_{\tau_1}^{\tau_2} (\mu_{\Delta \tilde{T}_{ij}}(x) + (1 - \gamma_{\Delta \tilde{T}_{ij}}(x))) / 2 dx.$$

由于在构成时间谓词 $T_{IF}(t, t_0)$ 的各个预测关系中 $t_k (k = 1, 2, \dots, n)$ 对 t_0 的约束程度会有所不同, 在知识模型一致性的前提下, ΔT_{ij}^k 与 $\Delta \tilde{T}_{ij}$ 的重叠度越高, 说明 T^k 与 $T_{IF}(t, t_0)$ 的符合程度越高. 设定接受门限 τ , 当 $\max_{k=1}^m \rho(\Delta \tilde{T}_{ij}, \Delta T_{ij}^k) \geq \tau$ 时, 认为该知识模型是一致的; 否则, 是不一致的, 不能进行正负向推理. 因此, 若知识模型中有 n 个时间变量时, 最多需进行 $(n(n-1))/2$ 次检验, 以保证其满足知识的一致性.

3 实例分析

为了验证算法的可行性, 下面根据文献 [7] 中的数据模拟战场态势评估的分析实例, 利用直觉模糊集对其不确定时间信息进行描述.

由红方防空部队雷达情报获悉, 一架蓝方侦察机已起飞, 起飞时间无法肯定, 现要求根据逐步到来的情报推测蓝方可能展开攻击的时间. 假定蓝方要进行导弹攻击, 则需要对蓝方可能的一些关键事件间的时间关系进行估计, 包括蓝方侦察机起飞、发现红方、蓝方攻击机部署完毕、攻击机进入攻击阵位、发射导弹等, 其事件时间关系如图 2 所示.

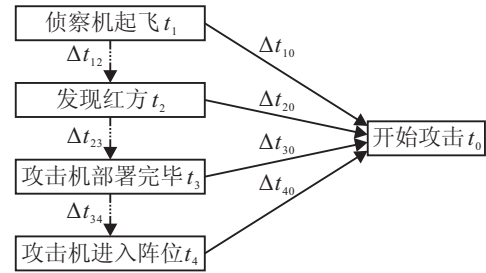


图 2 关键事件间时间关系

对各时间的估计, 主要是基于飞机携带油量、飞行路线、最可能的导弹发射位置、最大飞行高度以及专家经验等因素确定. 利用本文方法对各个不确定时间以及时间间隔用直觉模糊集进行描述, 其隶属度、非隶属度函数采用梯形分布函数表达, 有

$$\mu_k(x) = \begin{cases} \frac{1}{a}(x - m_1), & n_1 \leq x < n_2; \\ \frac{1}{b}(x - m_2), & n_2 \leq x < n_3; \\ 1, & n_3 \leq x < n_4; \\ \frac{1}{c}(m_3 - x), & n_4 \leq x < n_5; \\ \frac{1}{d}(m_4 - x), & n_5 \leq x < n_6. \end{cases} \quad (16)$$

$$\gamma_k(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\tau a}(x - m_1), & n_1 \leq x < n_2; \\ 1 - \frac{1}{\tau b}(x - m_2), & n_2 \leq x < n_3; \\ 0, & n_3 \leq x < n_4; \\ 1 - \frac{1}{\tau c}(m_3 - x), & n_4 \leq x < n_5; \\ 1 - \frac{1}{\tau d}(m_4 - x), & n_5 \leq x < n_6. \end{cases} \quad (17)$$

其中: n_i 为取值控制因子; m_i, a, b, c, d 为函数因子, 各参数均可通过连续观测样本计算其期望值获取; τ 为调节因子, 用来调节犹豫度, 当 $\tau = 1$ 时, 犹豫度 $\pi = 0$. 为便于描述, 本文令 $\tau = 1$. 对于观测样本数据分析, 本文采用梯形有效三段逻辑建模, 因此未知参数中只有 $c, d, m_2, m_3, n_2, n_3, n_4, n_5$ 在观测序列中有意义, 其取值如表 1 所示.

在进行推理之前需验证知识模型的一致性. 在图 2 中共有 5 个时间变量, 因此需要 $5 \times (5-1)/2 = 10$ 次运算检验, 而事实上只有 3 对时间点之间存在多条路径, 即 (t_1, t_0) 、 (t_2, t_0) 和 (t_3, t_0) , 故只需对这 3 对时间进行检验.

表 1 关键事件直觉模糊描述参数对照表

参数	c	d	m_2	m_3	n_2	n_3	n_4	n_5
T_1	30	60	800	900	800	830	840	900
T_2	80	10	1040	1140	1040	1120	1130	1140
T_3	c	10	1140	1210	1140	1140	1200	1210
T_4	10	10	1450	1460	1440	1450	1450	1460
ΔT_{10}	170	140	400	900	400	570	760	900
ΔT_{20}	70	140	260	560	260	330	420	560
ΔT_{30}	90	20	210	370	210	300	350	370
ΔT_{40}	10	10	50	100	50	60	90	100
ΔT_{12}	80	30	120	400	120	200	370	400
ΔT_{23}	c	100	30	200	30	30	100	200
ΔT_{34}	30	140	70	400	70	100	260	400

首先, t_1 到 t_0 有 4 条路径: (t_1, t_0) , (t_1, t_2, t_0) , (t_1, t_2, t_3, t_0) 和 $(t_1, t_2, t_3, t_4, t_0)$. 由此可得出 $\Delta T_{10}^1 = \Delta T_{10}$, $\Delta T_{10}^2 = \Delta T_{12} \oplus \Delta T_{20}$, $\Delta T_{10}^3 = \Delta T_{12} \oplus \Delta T_{23} \oplus \Delta T_{30}$, $\Delta T_{10}^4 = \Delta T_{12} \oplus \Delta T_{23} \oplus \Delta T_{34} \oplus \Delta T_{40}$. 根据式 (4) 计算, 可得到直觉模糊时间间隔 ΔT_{10}^i 的隶属度和非隶属度各参数取值如表 2 所示. 由式 (13) 可知, $\mu_{\Delta \tilde{T}_{ij}}(x) = \mu_{\Delta T_{10}^i}(x)$, 故 $\max_{1 \leq k \leq 4} \rho(\Delta T_{10}, \Delta T_{10}^k) = 1$. 同理, 经计算可知 $\max_{1 \leq k \leq 3} \rho(\Delta T_{20}, \Delta T_{20}^k) = 1$, $\max_{1 \leq k \leq 2} \rho(\Delta T_{30}, \Delta T_{30}^k) = 1$. 由此可见, 该知识模型是一致的, 可以进行时间推理.

表 2 直觉模糊知识库检验及时间推理参数对照表

参数	ΔT_{10}^1	ΔT_{10}^2	ΔT_{10}^3	ΔT_{10}^4	$\Delta \tilde{T}_{10}$	$\Delta \tilde{T}_{20}$	$\Delta \tilde{T}_{30}$	$\Delta \tilde{T}_{40}$
a	a	140	a	a	340	140	a	a
b	170	160	340	240	60	160	180	20
c	140	280	200	200	280	280	20	20
d	d	60	100	360	120	20	40	d
m_1	400	380	360	270	1200	1300	1350	1490
m_2	400	370	190	150	1340	1290	1350	1490
m_3	900	1070	1020	1020	1880	1830	1570	1540
m_4	900	960	970	1100	1800	1700	1580	1560
n_1	400	380	360	270	1200	1300	1350	1490
n_2	400	450	360	270	1370	1370	1350	1490
n_3	570	530	530	390	1440	1450	1440	1510
n_4	760	790	820	820	1600	1550	1550	1540
n_5	900	930	920	920	1740	1690	1560	1560
n_6	900	960	970	1100	1800	1700	1580	1560

根据式 (4), 利用直觉模糊正向时间推理方法计算的直觉模糊时间间隔预测值 $\Delta \tilde{T}_{i0}$ 如表 2 所示.

由推理计算公式 (9) 可知, 蓝方开始攻击时间的直觉模糊预测隶属度函数为

$$\mu_{\tilde{T}_{i0}}(x) = \bigwedge_{k=1}^4 \mu_{\tilde{T}_{k0}} = \begin{cases} \frac{x-1490}{20}, & 1490 \leq x < 1510; \\ 1, & 1510 \leq x < 1540; \\ \frac{x-1540}{20}, & 1540 \leq x < 1560. \end{cases} \quad (18)$$

因此, 随着对 t_0 约束较强报告的获得, t_0 的可能范围逐渐缩小, 最后得到一个模糊度较小的直觉模糊值. 从关键事件的时间关系模式上分析, 蓝方发动攻击的

可能性非常大, 而且已经精确到数值范围之内. 利用直觉模糊时间推理方法计算的结果与文献 [7] 一致, 但整个计算过程避免了由于简单的梯形函数边界运算而造成的误差累积, 而且计算过程大大简化, 这更加符合实际需求. 尤其对于复杂的不确定时间信息, 通过各种形式的隶属度函数和非隶属度函数进行描述和推理, 将更能体现该方法的优越性.

4 结 论

本文提出的基于 IFTL 的时间推理方法充分利用了直觉模糊集对不确定性时间在描述和推理方面的巨大优势, 可以更好地处理各类复杂的不确定时间信息, 并通过隶属度和非隶属度函数之间的直觉模糊逻辑运算进行推理, 使得推理结果更加可信, 在很大程度上提高了态势评估的准确性, 不论在专家系统还是在指挥控制等应用领域均有很好的发展前景. 如何使推理方法更加智能、快捷将是今后研究的重点.

参考文献(References)

- [1] Allen J F. Maintaining knowledge about temporal intervals[J]. Communications of ACM, 1983, 26(11): 832-843.
- [2] 刘婷, 林闯, 刘卫东. 扩展时段时序逻辑的推理机制[J]. 计算机学报, 2002, 25(6): 637-644.
(Liu T, Lin C, Liu W D. The inference engine of extended interval temporal logic[J]. Chinese J of Computers, 2002, 25(6): 637-644.)
- [3] 林闯, 曲扬, 李雅娟. 扩展时段时序逻辑的模型、一致性和推理[J]. 计算机学报, 2002, 25(12): 1338-1346.
(Lin C, Qu Y, Li Y J. Modeling, consistency and inference of extended interval temporal logic[J]. Chinese J of Computers, 2002, 25(12): 1338-1346.)
- [4] 郑琪. 有效时间不确定的时态数据的关联规则挖掘研究[D]. 广州: 暨南大学计算机科学系, 2003.
(Zheng Q. The research on valid-time indeterminacy in temporal association rules[D]. Guangzhou: Department of Computer Science, Ji'nan University, 2003.)
- [5] Schockaert S, De Cock M, Kerre E E. Fuzzifying Allen's Temporal interval relations[J]. Trans on Fuzzy Systems, 2008, 16(2): 517-533.
- [6] Dubois D, Prade H. Processing fuzzy temporal knowledge[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(4): 729-744.
- [7] 姚春燕, 杨宏文, 胡卫东, 等. 态势估计中一种模糊时间推理方法[J]. 模糊系统与数学, 2000, 14(3): 66-71.
(Yao C Y, Yang H W, Hu W D, et al. A fuzzy temporal reasoning method in actuation assessments[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(3): 66-71.)

(下转第1012页)