

基于知识情感等级 BDI 主体的决策行为模型研究

张晓君^{1,4} 林 颖² 周昌乐^{3,4}

(四川师范大学政治教育学院 成都 610066)¹ (宁德师范学院经济管理系 宁德 352100)²

(厦门大学智能科学与技术系 厦门 361005)³

(福建省仿脑智能系统重点实验室(厦门大学) 厦门 361005)⁴

摘 要 为了将知识、信念、愿望和意图以及害怕、焦虑和自信对决策行为的影响的强烈程度进行形式化,把无穷值的卢卡斯维茨逻辑的真值取值范围从 $[0,1]$ 扩展到 $[-1,1]$ 。知识情感等级 BDI 主体的决策行为通过添加了具体条件的不同背景的不同测度来决定;知识情感等级 BDI 主体模型清晰地表示了主体的知识状态、心智状态和情感状态的不确定性;此模型可以轻易地向其他类型的主体进行推广。在给出了知识情感等级 BDI 模型的语言、语义以及此模型的不同背景之间的相互关系之后,对知识情感等级 BDI 主体的军事决策行为进行了实例分析。此研究旨在为分布式人工智能和军事仿真提供形式支持。

关键词 知识情感等级 BDI 主体,决策行为,知识状态,心智状态,情感状态

中图分类号 TP18/TP302 **文献标识码** A

Modeling Decision-making Behavior Based on Knowledge of Emotional Graded BDI Agents

ZHANG Xiao-jun^{1,4} LIN Ying² ZHOU Chang-le^{3,4}

(College of Political Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)¹

(Department of Economic Management, Ningde Normal University, Ningde 352100, China)²

(Department of Cognitive Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)³

(Fujian Provincial Key Laboratory of Brain-Like Intelligent Systems(Xiamen University), Xiamen 361005, China)⁴

Abstract In order to formalize the degree of influence of knowledge, belief, desire, intention, fear, anxiety and self-confidence on decision-making behavior, we extended the truth value of infinite-valued Łukasiewicz Logic from $[0, 1]$ to $[-1, 1]$. The knowledge of emotional graded BDI agent's decision-making behavior is determined by the different measure of each context which is added by concrete conditions. The knowledge of emotional graded BDI agent model in this paper explicitly represents the uncertainty of knowledge states, mental attitudes and emotional states. This model is general enough to specify other types of agents. After presenting the language and semantics for this model and illustrating interrelations between contexts for the model, an application of the knowledge of emotional graded BDI agent in military decision-making behavior was given. It is hoped that this study will make contribution to provide a formal support for distributed artificial intelligence and military simulation.

Keywords Knowledge of emotional graded BDI (Belief-Desire-Intention) agents, Decision-making behavior, Knowledge states, Mental attitudes, Emotional states

1 引言

主体(agent)是一种通过传感器感知其环境,并通过执行器作用于该环境的实体;主体强调理性作用,已经成为描述机器智能、动物智能和人类智能的统一模型;主体可以定义为一种从感知序列到实体动作的映射。^[1]这一定义使得研究者可

以通过函数和数值对主体行为进行形式刻画。主体和多主体系统的研究是分布式人工智能研究的重点和热点问题之一。近 20 年来,一些学者提出的理论和结构为多主体系统提供了形式支持。其中,典型的形式系统是 Rao 和 Georgeff^[2-4]建立的 BDI(Belief-Desire-Intension)主体模型,此模型能够帮助设计者根据主体的信念、愿望和意图对系统所期望的行为进行

到稿日期:2013-01-06 返修日期:2013-06-15 本文受 2013 年教育部人文社会科学研究规划基金项目:基于 BDI(信念、愿望和意图)逻辑的慎思 Agent 的行为决策研究(13YJA72040001),四川师范大学重点研究课题,国家自然科学基金项目:针对涉身行为的自我意识机器人构建方法及其实(61273338, F030603)资助。

张晓君(1970—),女,博士,副教授,主要研究方向为 Agent 理论与技术、不确定性推理、自然语言逻辑等, E-mail: zhangxj666@yahoo. cn; 林 颖(1963—),女,教授,主要研究方向为现代逻辑等;周昌乐(1959—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为仿脑智能系统、自然语言信息处理、Agent 理论与技术等。

决策和推理。

BDI 主体模型由于易于在计算机中实现,因此受到了计算机科学、人工智能、系统工程等领域的专家的青睐。目前,BDI 的主体模型已经得到了广泛的应用,应用领域包括机场空中交通管制^[5]、计算机生成虚拟兵力^[6]、火星机器人岩石样本的选择^[7]、多主体系统的机器学习^[8]、铁路货运调度^[9]等。

近年来,不少学者对 Rao 和 Georgeff 提出的 BDI 主体模型进行了改进和扩展,较为重要的有:(1)情感(emotional)BDI 主体模型^[10];(2)等级(graded)BDI 主体模型^[11,12];(3)情感等级 BDI 主体模型^[13]。本文的研究是在笔者(2012)提出的情感等级 BDI 主体模型^[13]的基础上,增加知识对主体行为决策和推理的影响这一考察因素,从逻辑学的视角,严格遵循 BDI 的形式化语义,通过定义不同的模态算子来建立知识情感等级 BDI 主体模型。此成果属于原创性成果。

2 知识情感等级 BDI 逻辑

本文提出的知识情感等级 BDI 逻辑(简称 keg-BDI 逻辑)是在笔者(2012)^[13]提出的情感等级 BDI 逻辑(简称 eg-BDI 逻辑)的基础上,增加了表示知识的模态算子,以考察知识、信念、愿望和意图等心智状态,以及害怕、焦虑、自信等情感状态对主体行为决策和推理之间的关系。需要特别指出的是:在 eg-BDI 逻辑中,真值隶属度的取值为介于 0 到 1 之间的所有实数(记作 $[0,1]$);而在 keg-BDI 逻辑中,笔者将其真值隶属度的取值范围扩展为介于-1 到 1 之间的所有实数(记作 $[-1,1]$)。

2.1 知识情感等级 BDI 逻辑的语言

与 eg-BDI 逻辑一样,keg-BDI 逻辑也是建立在命题动态逻辑(Propositional Dynamic Logic)^[14]和无穷值的卢卡斯维茨逻辑(infinite-valued Łukasiewicz Logic)^[15]基础之上的。命题动态逻辑主要处理关于主体的行为和行为决策的推理。无穷值的卢卡斯维茨逻辑承认命题可以部分为真,命题真值的取值范围是 $[0,1]$,其真值函数是 $\neg x = 1-x$ 和 $x \rightarrow y = \min(1, 1-x+y)$,此逻辑能够对概率进行处理。

并非所有知识都是足道的。在本文中:为了简化模型,我们只考虑关键性知识;能够对主体的决策行为产生重要影响的知识称为“关键性知识”;直接用 $K\varphi$ 表示主体知道关键性知识 φ ;关键知识可以有多个;促使主体采取行动的知识称为正向知识,阻止主体采取行动的知识称为反向知识;相应地有正向关键性知识和反向关键性知识。类似地,有正向愿望和反向愿望。目前,绝大部分学者如 Pereira 等人^[10]主要是采取同时引入正向愿望算子和反向愿望算子来处理愿望;这样,即使要处理的因素不多,模型也显得复杂。

笔者认为:为了减少引入模态算子的个数,使得模型简洁,并能够同时处理更多的考察因素,我们有必要把无穷值的卢卡斯维茨逻辑的取值范围从 $[0,1]$ 扩展到 $[-1,1]$ 。这样,正向关键性知识对执行行动 α 的影响程度所对应的真值隶属度的取值范围为 $[0,1]$,反向关键性知识则为 $[-1,0]$ 。对正向愿望和反向愿望的处理与此类似。这样做的另一个好处是:对于要同时处理的相反的知识状态、心智状态和情感状态,我们只需选择其中一个进行处理即可。比如,当我们要同时处理自信与自卑这两种相反的情感对主体决策行为的影响时,可把自信看作正向自信,把自卑看作反向自信。为此,我

们需要统一规定:促使主体采取行动的知识状态、心智状态和情感状态的正向因素所对应的真值隶属度 $\in [0,1]$;阻止主体采取行动的知识状态、心智状态和情感状态的反向因素所对应的真值隶属度 $\in [-1,0]$ 。

笔者提出的 keg-BDI 逻辑是把扩展的无穷值卢卡斯维茨逻辑与命题动态逻辑进行融合后而产生的多模态逻辑。现在,我们为知识情感等级 BDI 主体定义相应的语言 $L_{keg-BDI}$ 。其方法是:向经典命题语言 L 中添加形式为 $[\alpha]$ 的行动模态词(其中 α 是一个行动)和 7 个模糊模态算子 $K, B, D, I, Fear, Anx$ 和 $SConf$ 。

我们规定: $K([\alpha]\varphi, k)$ 表示主体知道关键性知识 φ 后,会促使或阻止主体采取行动 α 的概率测度或强烈程度(简称知识度)为 k ; $B([\alpha]\varphi, b)$ 表示主体相信在执行行动 α 后,进入承载信息 φ 的概率测度或相信 φ 为真的强烈程度(简称信念度)为 b ; $D(\varphi, d)$ 表示“ φ 是主体所愿望的”, d 表示主体所愿望的 φ 为真的强烈程度(简称愿望度); $I([\alpha]\varphi, i)$ 表示主体愿意执行行动 α ,进入承载信息 φ 的意图为真的强烈程度(简称意图度)为 i 。 $Fear\varphi, Anx\varphi$ 和 $SConf\varphi$ 的解释与此类似。 $Fear([\alpha]\varphi, f)$ 表示主体在执行行动 α 后,害怕 φ 的强烈程度(简称害怕度)为 f ; $Anx([\alpha]\varphi, a)$ 表示主体在执行行动 α 后,焦虑 φ 的强烈程度(简称焦虑度)为 a ; $SConf([\alpha]\varphi, s)$ 表示主体在执行行动 α 后,自信 φ 的强烈程度(简称自信度)为 s 。这里的概率测度 b, d, i, f, a, s 也是真值隶属度。

语言 $L_{keg-BDI}$ 有两种类型的表达式:命题 φ, ψ, \dots 以及行动 α, β, \dots 。原子命题的集合、命题的集合、原子行动的集合和行动的集合分别用 Φ_0, Φ, Π_0 和 Π 表示。

(1) $L_{keg-BDI}$ 的公式 φ 可通过如下归纳定义的方式得到:

$$\varphi ::= \varphi | \neg\varphi | \varphi \rightarrow \psi | [\alpha]\varphi | K\varphi | B\varphi | D\varphi | I\varphi | Fear\varphi | Anx\varphi | SConf\varphi$$

即: $L_{keg-BDI}$ 公式是由原子命题、经典算子“否定 \neg ”和“蕴涵 \rightarrow ”、“必然算子 $[\]$ ”和“测试算子 $?$ ”通过归纳的方式得到的。这里 $[\alpha]\varphi$ 表示在当下状态下,每次执行行动 α 后都进入承载信息 φ 的状态。

(2) $L_{keg-BDI}$ 的行动 α 由其相应的原子行动通过如下归纳定义的方式得到:

$$\alpha ::= \alpha^0 | \alpha; \beta | \alpha \cup \beta | \alpha * \beta | \varphi?$$

即: $L_{keg-BDI}$ 行动是由相应的原子行动通过“行动复合算子 $;$ ”、“不确定性选择算子 \cup ”、“迭代算子 $*$ ”和“测试算子 $?$ ”通过归纳的方式得到的。迭代行动 α^n ($n \geq 0$)由 $\alpha^0 = id$ 和 $\alpha^{n+1} = \alpha; \alpha^n$ 通过归纳定义得到。

现在,我们定义一个模态背景(context)语言 ΣC (其中 $\Sigma \in \{K, B, D, I, Fear, Anx, SConf\}$)。为此,需要使用扩展的无穷值的卢卡斯维茨逻辑,由初始模态公式和真值常元 r_c (有理数 $r, r_c \in [-1, 1]$)来构造 Σ -模态:

(3)如果 $\varphi \in L_{keg-BDI}$,则 $\varphi, \Sigma\varphi \in \Sigma C$ 。

(4)如果 $r \in Q \cap [-1, 1]$,则 $r_c \in \Sigma C$,其中 Q 表示有理数的集合。

(5)如果 $\Sigma\varphi, \Sigma\psi \in \Sigma C$,则 $\Sigma\varphi \wedge \Sigma\psi \in \Sigma C$ 且 $\Sigma\varphi \rightarrow \Sigma\psi \in \Sigma C$ 。

例如:当 $\Sigma = K$ 且 $\varphi \in L_{keg-BDI}$ 时,由(3)可知 $\varphi, K\varphi \in KC$ (KC 表示知识背景);当 $\Sigma = K$ 且 $K\varphi, K\psi \in KC$ 时,根据(5)可知 $K\varphi \rightarrow K\psi \in KC$ 且 $K\varphi \wedge K\psi \in KC$ 。其他模态算子的情况与此类似。我们规定:公式 $\Sigma\varphi \rightarrow \Sigma\psi$ 的真值为 1,当且仅当,

$\Sigma\varphi$ 的真值不小于 $\Sigma\psi$ 的真值。模态公式 $r_c \rightarrow \Sigma\varphi$ 表示 φ 的概率至少为 r_c , 简记为 $(\Sigma\varphi, r_c)$ 。

为了把介于 -1 到 1 之间的模糊值公式转变成一个二值的布尔公式, 我们需要使用联结词 Δ 对模糊逻辑进行扩展, 并规定: 对于任意模态公式 $\Sigma\varphi$, 若 $\Sigma\varphi$ 的值小于 1, 则 $\Delta\Sigma\varphi$ 的值为 0; 若 $\Sigma\varphi$ 的值是 1, 则 $\Delta\Sigma\varphi$ 的值也是 1。

2.2 知识情感等级 BDI 逻辑的语义

不同的可能世界对应于主体不同的知识状态、心智状态和情感状态。与通常的模态逻辑一样, 本文提出的 keg-BDI 逻辑的语义也是使用克里普克模型来建立的。为此, 我们只需在 eg-BDI 主体模型的 9 元组克里普克结构^[13]的基础上, 添加对知识进行处理的函数和函数 λ 。即, 为 keg-BDI 主体模型定义一个 10 元组的克里普克结构 $K = \langle W, \nu, \rho, \tau, \theta, \{\mu_w\}_{w \in W}, \lambda, \varepsilon, \eta, \kappa \rangle$, 其中:

(6) W 是任意的可能世界的集合, 且 $w, w' \in W \neq \emptyset$ 。

(7) $\nu: \Phi \times W \rightarrow \{0, 1\}$ 是为每个 $\varphi \in \Phi$ 和每个 $w \in W$ 指派一个二值的布尔值, $\nu(\varphi, w) \in \{0, 1\}$ 。

(8) $\rho: 2^W \rightarrow [-1, 1]$ 是指 W 的子集上的概率测度; 对于 $\varphi \in \Phi_0$, $\{\omega \mid \nu(\varphi, \omega) = 1\}$ 是可测度的。

(9) $\tau: \Pi_0 \rightarrow 2^{W \times W}$ 是指由每个原子行动所引起的两个可能世界之间的转换函数。

(10) $\theta: W \rightarrow [-1, 1]$ 是偏好分布, $|\theta(w)| < |\theta(w')|$ 是指 w' 比 w 受到更多偏好。

(11) $\mu_w: W \rightarrow [-1, 1]$ 是可能性分布。其中 $\mu_w(w') \in [-1, 1]$ 是指主体试图从 w 到 w' 的愿望强烈程度。

(12) $\lambda: W \rightarrow [-1, 1]$ 是关键性知识对决策行为影响程度分布, $|\lambda(w)| < |\lambda(w')|$ 是指 w' 比 w 对主体决策行为影响更大。

(13) $\varepsilon: W \rightarrow [-1, 1]$ 是害怕程度分布, $|\varepsilon(w)| < |\varepsilon(w')|$ 是指 w' 比 w 更令主体害怕。

(14) $\eta: W \rightarrow [-1, 1]$ 是焦虑程度分布, $|\eta(w)| < |\eta(w')|$ 是指 w' 比 w 更令主体焦虑。

(15) $\kappa: W \rightarrow [-1, 1]$ 是自信程度分布, $|\kappa(w)| < |\kappa(w')|$ 是指 w' 比 w 更令主体自信。

keg-BDI 逻辑的语义与 eg-BDI 逻辑^[13] 的语义大致类似, 只是增加了关于知识的语义部分, 而且前者的真值的取值范围已经由 $[0, 1]$ 扩展到 $[-1, 1]$:

(16) $\nu(\Sigma\varphi, w) = \xi(\{w' \in W \mid \nu(\varphi, w') = 1\})$, 对每个 φ 来说, 其中 $\xi \in \{\rho, \theta, \mu_w, \lambda, \varepsilon, \eta, \kappa\}$ 。

(17) 对于所有的 $r \in Q \cap [-1, 1]$ 而言, $\nu(r_c, w) = r$ 。

(18) $\nu(\Sigma\varphi \wedge \Sigma\psi, w) = \max(\nu(\Sigma\varphi) + \nu(\Sigma\psi) - 1, 0)$ 。

(19) $\nu(\Sigma\varphi \rightarrow \Sigma\psi, w) = \min(1 - \nu(\Sigma\varphi) + \nu(\Sigma\psi), 1)$ 。

(20) $\|\Sigma\varphi\|^K = \text{id}_{w \in W} \nu(\Sigma\varphi, w)$, 其中 $\|\Sigma\varphi\|^K$ 表示 $\Sigma\varphi$ 在克里普克结构 $K = \langle W, \nu, \rho, \tau, \theta, \{\mu_w\}_{w \in W}, \lambda, \varepsilon, \eta, \kappa \rangle$ 中的真值隶属度。

(21) 如果 $\nu(\Sigma\varphi, w) = 1$, 则 $\nu(\Delta\Sigma\varphi, w) = 1$ 。

(22) 如果 $\nu(\Sigma\varphi, w) \neq 1$, 则 $\nu(\Delta\Sigma\varphi, w) = 0$ 。

(23) $\text{id}\emptyset = 1$ 。

(24) 对所有的 $w \in W$ 而言, $\nu(\Sigma\perp, w) = 1$ 。

在(20)与(23)中的 id 表示 $\Sigma\varphi$ 在克里普克结构中的真值隶属度。 Σ -公式的真值仅仅依赖于: 公式本身所对应的主体所在的可能世界中的相应测度。

2.3 知识情感等级 BDI 逻辑的公理和演绎规则

我们只要在 eg-BDI 逻辑的公理和演绎规则的基础上^[13] 增加关于知识部分的公理和演绎规则, 就可以得到 keg-BDI 逻辑的公理和演绎规则。这二者几乎完全一样, 只是在 eg-BDI 逻辑^[13] 中, $\Sigma \in \{B, D, I, Fear, Anx, SConf\}$; 而在 keg-BDI 逻辑中, $\Sigma \in \{K, B, D, I, Fear, Anx, SConf\}$, 即后者中的 Σ 还可以取值为 K 。keg-BDI 逻辑的公理由关于非模态公式的所有经典命题逻辑公理, 以及基于卢卡斯维茨逻辑和命题动态逻辑的模态公式 Σ -公理组成。

keg-BDI 逻辑具有完全性与可靠性, 其证明方法与 eg-BDI 逻辑的完全性与可靠性的证明方法^[13] 几乎完全一样, 即, 通过把 keg-BDI 逻辑嵌入(embedding)到卢卡斯维茨逻辑或命题动态逻辑中的方法来证明。

3 知识情感等级 BDI 主体模型的不同背景之间的相互关系

主体根据知识、愿望、信念、情感, 以及行动所带来的可能世界的转变, 制定相应的计划(实际上是复合行动), 并通过行动来达成愿望。知识 K 的背景, 愿望 D 的背景, 信念 B 的背景, 情感 $Fear$ 、 Anx 和 $SConf$ 的背景与计划 P 的背景之间具有这样的关系:

(25) 如果 $K: (K([\alpha]\varphi, k)), D: \rightarrow \Delta \rightarrow (D\varphi, d), B: (B([\alpha]\varphi, b)), Fear: (Fear(\varphi, f)), Anx: (Anx(\varphi, a)), SConf: (SConf(\varphi, s))$ 且 $P: \text{action}(\varphi, Pre, Cost_a)$, 那么 $P: \text{plan}(\varphi, \text{action}(\alpha, Pre, Cost_a), b)$ 。

其中: $\alpha \in \Pi_0$ 是初始行动, Pre 是执行行动 α 的前提条件; $Cost_a \in [-1, 1]$, 表示执行 α 所需付出的代价; k, b, f, a 和 s 分别表示主体通过执行 α 实际达成 φ 时的知识度、信念度、害怕度、焦虑度和自信度。假定当前的世界状态满足执行相应行动的前提条件, 计划必须使得建立计划的相应愿望为真。

若用意图度来换取为达到目标时所付出的代价和获得的利益, 则对每个能够达到目标的复合行动 α 而言, $I\varphi$ 的意图度 i 可以从 $K\varphi$ 的知识度 k 、 $D\varphi$ 的愿望度 d 、 $B\varphi$ 的信念度 b 、 $Fear\varphi$ 的害怕度 f 、 $Anx\varphi$ 的焦虑度 a 、 $SConf\varphi$ 的自信度 s 以及满足 φ 的计划所付出的代价 $Cost_a$ 得到。即 $I\varphi$ 的意图度可以通过下面的函数计算得出:

(26) 如果 $K: (K([\alpha]\varphi, k)), D: (D\varphi, d), B: (B([\alpha]\varphi, b), Fear: (Fear([\alpha]\varphi, f)), Anx: (Anx([\alpha]\varphi, a)), SConf: (SConf([\alpha]\varphi, s))$ 且 $P: \text{plan}(\varphi, \text{action}(\alpha, Pre, Cost_a), b)$, 那么 $I: (I\varphi, F(k, d, b, f, a, s, Cost_a))$ 。

不同的函数 $F(k, d, b, f, a, s, Cost_a)$ 是对不同个体行为的建模。假定在完成 α 后, 完全相信能够达成 φ 。要想知道主体执行行动 α 的意图度 i 的值, 就需要算出函数 $F(k, d, b, f, a, s, Cost_a)$ 的值, 其关键就是要弄清 k, d, f, a, s, b 和代价 $Cost_a$ 各自对意图度 i 的影响究竟有多大。这样利用函数 $F(k, d, b, f, a, s, Cost_a)$, 就可以把知识状态、心智状态(信念、愿望等)、情感状态(害怕、焦虑、自信、后悔等)对决策行为的影响最后都转化成意图度, 即, 意图度承载了其他所有要考察因素所携带的信息。

我们可以根据具体要考察的模型, 为知识状态、心智状态、情感状态对意图度的影响赋予不同的权重, 并根据实践反馈的信息对权重不断修改完善。比如, 对于本文要考察的军

事决策行为模型而言,经过初步研究,我们指派给 k, d, b, f, a, s 和代价 $Cost_a$ 对意图度影响的权重分别为 0.28、0.11、0.13、0.07、0.14、0.18、0.09。这些权重的大小可以根据实际考察的模型制定其相应的调参规则,而且可在实际应用中对其不断修改完善。为此,笔者不妨对函数 $F(k, d, b, f, a, s, Cost_a)$ 做如下定义:

$$(27) F(k, d, f, a, s, b, Cost_a) = 0.28k + 0.11d + 0.13b + 0.07f + 0.14a + 0.18s + 0.09Cost_a$$

假定在所有可供选择的方案中,理性主体选择意图度最强的方案执行。即,如果在所有意图的最强烈的程度 i_{max} 时,理性主体的愿望是达成 φ ,则主体将执行使其达成最为期望的目标的最佳计划,主体据此与环境相互作用。即:

$$(28) \text{如果 } I: (I\varphi, i_{max}) \text{ 且 } P: best\ plan(\varphi, action(a, Pre-, Cost_a), b), \text{ 则 } C: C(does(a)).$$

4 案例分析:对知识情感等级 BDI 主体的军事决策行为的形式刻画

面对高技术战争,军事仿真训练已经成为训练部队、保护和提高军队战斗力的主要手段。“从军事仿真训练中学习战争”已经成为现实^[16]。20 世纪 70 年代以来,美军各军种已经开发了上百种军事仿真训练系统;军事建模和仿真技术已经成为提高军队和经费效率的倍增器^[17]。这些系统虽然在降低训练费用、降低组织联合训练的难度方面发挥了巨大的作用,但都存在这样那样的问题有待改进。军事战略决策是开发军事仿真训练系统的重点研究领域。

现在假设训练我们的知识情感等级 BDI 主体进行军事战略决策。为此,我们指派给该决策主体 3 个关键性知识:敌方增援部队及时赶到、得到敌方的城防图、得到敌方的作战计划。同时,指派给该主体 3 个愿望:一是人员伤亡要少;二是作战时间要短;三是作战地点离本土的距离 ≤ 800 海里。指派给该主体 3 个的情感:一是害怕被包围;二是焦虑指挥系统被摧毁;三是自信能够取得最终胜利。为了决定所要选择的作战方案,主体将根据所获得的关键性知识,综合考虑此作战方案所带来的利益(即人员伤亡少、作战时间短、并取得最终胜利)、害怕和焦虑等负面情感以及所付出的代价。此案例中,不同决策行为就是选择不同的作战方案,假定我们有 5 套方案可供选择:

$$(29) \Pi_0 = \{\text{方案 A、方案 B、方案 C、方案 D、方案 E}\}.$$

在这种情况下, $KC, BC, DC, FearC, AnxC, SConfC$ 和 PC 背景如下:

知识背景(KC):我们可以赋予该主体这样的 3 个关键知识:

- (30) $K([\text{方案 A}] \text{敌方增援部队及时赶到}, k_1 = -0.78)$
- (31) $K([\text{方案 B}] \text{敌方增援部队及时赶到}, k_1 = -0.83)$
- (32) $K([\text{方案 C}] \text{敌方增援部队及时赶到}, k_1 = -0.55)$
- (33) $K([\text{方案 D}] \text{敌方增援部队及时赶到}, k_1 = -0.64)$
- (34) $K([\text{方案 E}] \text{敌方增援部队及时赶到}, k_1 = -0.36)$
- (35) $K([\text{方案 A}] \text{得到敌方的城防图}, k_2 = 0.85)$
- (36) $K([\text{方案 B}] \text{得到敌方的城防图}, k_2 = 0.78)$
- (37) $K([\text{方案 C}] \text{得到敌方的城防图}, k_2 = 0.68)$
- (38) $K([\text{方案 D}] \text{得到敌方的城防图}, k_2 = 0.72)$
- (39) $K([\text{方案 E}] \text{得到敌方的城防图}, k_2 = 0.90)$

- (40) $K([\text{方案 A}] \text{得到敌方的作战计划}, k_3 = 0.80)$
- (41) $K([\text{方案 B}] \text{得到敌方的作战计划}, k_3 = 0.86)$
- (42) $K([\text{方案 C}] \text{得到敌方的作战计划}, k_3 = 0.75)$
- (43) $K([\text{方案 D}] \text{得到敌方的作战计划}, k_3 = 0.79)$
- (44) $K([\text{方案 E}] \text{得到敌方的作战计划}, k_3 = 0.87)$

其中,每种作战方案所对应的真值隶属度表示相应关键性知识对是否采取所对应方案的影响程度,即对意图的影响程度,因为这关系到是否能够最终取得胜利。“敌方增援部队及时赶到”这一关键性知识由于会阻止主体采取行动,属于反向关键性知识,因此所对应的真值隶属度 $\in [-1, 0]$;而“得到敌方城防图”和“得到敌方的作战计划”这两个关键性知识会促使主体采取行动,属于正向关键性知识,故所对应的真值隶属度 $\in [0, 1]$ 。

假定这 3 个关键性知识是随机独立的,为此,根据这 3 个关键性知识在这一实际情境中对意图影响的不同权重,不妨为知识背景 KC 指派这样的推理规则:

$$(45) \text{如果 } K([\alpha] \text{敌方增援部队及时赶到}, k_1) \text{ 且 } K([\alpha] \text{得到敌方的城防图}, k_2) \text{ 且 } K([\alpha] \text{得到敌方的作战计划}, k_3), \text{ 那么 } K([\alpha] \text{敌方增援部队及时赶到} \wedge \text{得到敌方的城防图} \wedge \text{得到敌方的作战计划}, k = 0.22k_1 + 0.37k_2 + 0.41k_3).$$

愿望背景(DC):我们可以赋予该主体这样 3 个愿望:

- (46) $(D(\text{人员伤亡少}), d = 0.81)$
- (47) $(D(\text{作战时间短}), d = 0.76)$
- (48) $(D(\text{人员伤亡少} \wedge \text{作战时间短}), d = 0.92)$
- (49) $(D(\text{作战地点离本土的距离} \leq 800 \text{ 海里}), d = 0.88)$

由于此案例中的 3 个愿望均为正向愿望,所对应的真值隶属度 $\in [0, 1]$ 。真值隶属度的绝对值越大,其对应的愿望就越强烈。本文中的其他所有测度都与此类似。

信念背景(BC):理性作战主体具有所采取的可能行动之间的关系,以及执行这些行动后哪些公式为真的知识。

在此例中, $B([\alpha] \text{人员伤亡少})$ 的强烈程度是指在采取作战方案 α 后,相信己方人员伤亡少的概率或满意程度,属于正向信念,所对应的真值隶属度 $\in [0, 1]$ 。不妨为这一决策主体赋予如下信念:

- (50) $B([\text{方案 A}] \text{人员伤亡少}, b_1 = 0.72)$
- (51) $B([\text{方案 B}] \text{人员伤亡少}, b_1 = 0.86)$
- (52) $B([\text{方案 C}] \text{人员伤亡少}, b_1 = 0.58)$
- (53) $B([\text{方案 D}] \text{人员伤亡少}, b_1 = 0.42)$
- (54) $B([\text{方案 E}] \text{人员伤亡少}, b_1 = 0.66)$

在此例中, $B([\alpha] \text{作战时间短})$ 的信念度是指在采取作战方案 α 后,相信作战时间短的概率,属于正向信念,所对应的真值隶属度 $\in [0, 1]$ 。不妨为这一决策主体赋予如下信念:

- (55) $B([\text{方案 A}] \text{作战时间短}, b_2 = 0.68)$
- (56) $B([\text{方案 B}] \text{作战时间短}, b_2 = 0.80)$
- (57) $B([\text{方案 C}] \text{作战时间短}, b_2 = 0.32)$
- (58) $B([\text{方案 D}] \text{作战时间短}, b_2 = 0.49)$
- (59) $B([\text{方案 E}] \text{作战时间短}, b_2 = 0.63)$

我们假定这两个愿望是随机独立的,为此,根据这两个愿望在这一实际情境中对意图影响的不同权重,为信念背景 BC 指派这样的推理规则:

$$(60) \text{如果 } B([\alpha] \text{人员伤亡少}, b_1) \text{ 且 } B([\alpha] \text{作战时间短}, b_2), \text{ 那么 } B([\alpha] \text{人员伤亡少} \wedge \text{作战时间短}, b = 0.65b_1 +$$

0.35b₂)。

害怕背景(*FearC*):“害怕被包围”由于对采取行动的影响是阻止性的,因此所对应的真值隶属度 $\in[-1,0]$ 。不妨赋予主体这样的害怕测度:

(61)*Fear*([方案 A]被包围, $f=-0.80$)

(62)*Fear*([方案 B]被包围, $f=-0.57$)

(63)*Fear*([方案 C]被包围, $f=-0.71$)

(64)*Fear*([方案 D]被包围, $f=-0.45$)

(65)*Fear*([方案 E]被包围, $f=-0.38$)

焦虑背景(*AnxC*):由于“焦虑指挥系统被摧毁”对采取行动的影响是阻止性的,其真值隶属度 $\in[-1,0]$ 。不妨赋予主体这样的焦虑测度:

(66)*AnxC*([方案 A]指挥系统被摧毁, $a=-0.76$)

(67)*AnxC*([方案 B]指挥系统被摧毁, $a=-0.81$)

(68)*AnxC*([方案 C]指挥系统被摧毁, $a=-0.63$)

(69)*AnxC*([方案 D]指挥系统被摧毁, $a=-0.46$)

(70)*AnxC*([方案 E]指挥系统被摧毁, $a=-0.58$)

自信背景(*SConfC*):“取得最终胜利”由于对采取行动的影响是促进性的,因此所对应的真值隶属度 $\in[0,1]$ 。我们赋予主体这样的自信测度:

(71)*SConf*([方案 A]取得最终胜利, $s=0.62$)

(72)*SConf*([方案 B]取得最终胜利, $s=0.86$)

(73)*SConf*([方案 C]取得最终胜利, $s=0.52$)

(74)*SConf*([方案 D]取得最终胜利, $s=0.68$)

(75)*SConf*([方案 E]取得最终胜利, $s=0.82$)

计划背景(*PC*):付出的代价由于对采取行动的影响是阻止性的,因此所对应的真值隶属度 $\in[-1,0]$ 。假设在此实例中,一系列原子行动如下:

(76)*action*(方案 A, {*dist* = 1200 海里}, {*cost* = 1400 亿元}, $Cost_a = -0.81$)

(77)*action*(方案 B, {*dist* = 700 海里}, {*cost* = 1250 亿元}, $Cost_a = -0.73$)

(78)*action*(方案 C, {*dist* = 600 海里}, {*cost* = 1100 亿元}, $Cost_a = -0.61$)

(79)*action*(方案 D, {*dist* = 1500 海里}, {*cost* = 1700 亿元}, $Cost_a = -0.90$)

(80)*action*(方案 E, {*dist* = 500 海里}, {*cost* = 1000 亿元}, $Cost_a = -0.52$)

现在,理性主体可根据推理来判断应该采取哪个意图,并弄清哪个计划与此意图有关。之后,主体根据愿望,寻找不同的作战方案,并考虑这样的信念:通过不同的作战方案满足人员伤亡少而且作战时间短,并取得最终胜利的目标的概率。由于受到愿望(49)的限制,即作战地点离本土的距离 ≤ 800 海里,主体将放弃计划(76)和(79),即放弃方案 A 和方案 D 这两套作战方案。因此,主体的计划将根据(25)由每个愿望产生。例如,最强烈的偏好愿望是采取的作战方案“人员伤亡少而且作战时间短”,此愿望所产生的计划如下:

(81)*plan*(人员伤亡少 \wedge 作战时间短, *action*(方案 B, {*dist* = 700 海里}, {*cost* = 1250 亿元}, $Cost_a = -0.73$), $b = 0.65b_1 + 0.35b_2 = 0.797$)

(82)*plan*(人员伤亡少 \wedge 作战时间短, *action*(方案 C, {*dist* = 600 海里}, {*cost* = 1100 亿元}, $Cost_a = -0.61$), $b =$

$0.65b_1 + 0.35b_2 = 0.489$)

(83)*plan*(人员伤亡少 \wedge 作战时间短, *action*(方案 E, {*dist* = 500 海里}, {*cost* = 1000 亿元}, $Cost_a = -0.52$), $b = 0.65b_1 + 0.35b_2 = 0.6495$)

现在,主体可以根据计划所对应的知识状态,信念、愿望等心智状态和情感状态来判断意图的强烈程度。由(27)可知,函数 *F* 相对于 *d* 是单调递增的,故理性主体只需要考虑最强烈的偏好愿望,即所采取的作战方案“人员伤亡少而且作战时间短”,其偏好的强烈程度是 0.92。再由(27)可知, $F(k, d, f, a, s, b, Cost_a) = 0.28k + 0.11d + 0.13b + 0.07f + 0.14a + 0.18s + 0.09Cost_a$ 。对于 $a \in \{\text{方案 B, 方案 C, 方案 E}\}$,我们依次得到意图的强烈程度如下:

(84)*I*(人员伤亡少 \wedge 作战时间短, $0.28k + 0.11d + 0.13b + 0.07f + 0.14a + 0.18s + 0.09Cost_a = 0.269018$)

(85)*I*(人员伤亡少 \wedge 作战时间短, $0.28k + 0.11d + 0.13b + 0.07f + 0.14a + 0.18s + 0.09Cost_a = 0.188238$)

(86)*I*(人员伤亡少 \wedge 作战时间短, $0.28k + 0.11d + 0.13b + 0.07f + 0.14a + 0.18s + 0.09Cost_a = 0.349575$)

由此可见:“人员伤亡少且作战时间短并能够取得最终胜利”的作战计划就是执行方案 E,因为其意图的强烈程度最大;方案 B 优于方案 C,方案 E 为最佳方案。这里算出的意图度都不高,这是由于:战争要付出很大的代价,带来诸多负面效果,是不得已而为之的行为。

最后,主体采纳最佳计划,执行行动。由(28)可知:通过选择行动 α ,即执行方案 E,这一行动信息随后就传递给交流背景。

结束语 本研究的主要工作和结论如下:(1)笔者把无穷值的卢卡斯维茨逻辑的取值范围从 $[0,1]$ 扩展到 $[-1,1]$ 后,对知识状态,信念、愿望和意图等心智状态以及害怕、焦虑和自信等情感状态的强烈程度进行了形式化。(2)知识情感等级 BDI 主体模型的行为是通过添加了具体条件的不同背景的不同测度来决定,清晰地表示了主体的知识、心智状态和情感状态的不确定性。(3)知识情感等级 BDI 主体模型可以很轻易地向包括其他知识状态、心智状态和情感状态的主体进行推广。(4)知识情感等级 BDI 逻辑系统是在可能世界语义学和克里普克模型的基础上,将命题动态逻辑和扩展的无穷值的卢卡斯维茨逻辑进行融合后,得到的符号形式演绎和数值计算并存的连续值柔性逻辑系统。

至于以后的工作,我们考虑:(1)将知识情感等级 BDI 主体模型推广到包含诸如沮丧、多疑、愤怒等情感的主体模型中;(2)把该模型扩展到多主体环境中,即让知识情感等级 BDI 主体处理与其他主体各个方面的社会关系;(3)深入挖掘该模型的应用价值,更好地为分布式人工智能和军事仿真服务。

参考文献

[1] 蔡自兴,徐光佑. 人工智能及其应用(第 4 版)[M]. 北京:清华大学出版社,2010:208-209
[2] Rao A S, Georgeff M P. Modeling rational agents within a BDI-architecture [C]//Proc. of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-92). 1991:473-484

- [3] Rao A S, Georgeff M P. BDI agents: from theory to practice [C]// Proc. of the 1st International Conference on Multi-Agents Systems, 1995;312-319
- [4] Rao A S, Georgeff M P. Decision procedures for BDI logic [J]. Journal of Logic and Computation, 1998, 8(3):293-294
- [5] Busetta P, et al. A reliable computational model for BDI agent [C]//1st International Workshop on Safe Agents, 2003;1-10
- [6] 陈中祥. 基于 BDI Agent 的 CGF 主体行为建模理论与技术研究 [D]. 武汉:华中科技大学, 2004
- [7] Bordini R H, Hübner J F. BDI agent programming in agentspeak using Jason [C]// Computational Logic in Multi-Agent Systems. Springer, 2006;143-164
- [8] G-Hernández A, et al. Learning in BDI multi-agent systems [C]// Computational Logic in Multi-Agent Systems. Springer, 2004; 218-233
- [9] 刘刚,等. 基于活动的 BDI 主体形成机制及其应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2009(9 增刊);25-28
- [10] Pereira D, et al. Formal modeling of emotions in BDI agents [C]// Computational Logic in Multi-Agent Systems. Springer, 2008; 62-81
- [11] Casali A, et al. Graded BDI models for agent architecture [C]// Computational Logic in Multi-agent Systems. Springer, 2005; 126-143
- [12] Xiaojun Zhang, et al. Graded BDI models for agent architectures based on Łukasiewicz logic and propositional dynamic logic [C]// Lecture Notes in Computer Science 7529. Springer, 2012; 439-450
- [13] Zhang Xiao-jun. Modelling emotional agents based on graded BDI architectures [C]// Communications in Computer and Information Science 345. Springer, 2012;606-616
- [14] Harel D, et al. Dynamic Logic [M]. The MIT Press, 2000
- [15] Hájek P. Mathematics of Fuzzy Logic [M]. Kluwer, 1998
- [16] Richard W P, Mavor A S. Modeling Human and Organization behavior; Application to Military Simulations [M]. America; National Academic Press, 1998
- [17] Richard W P, Mavor A S. Representation Human Behavior in Military Simulation; Interim Report [M]. America; National Academic Press, 1997

(上接第 201 页)

- [7] Leow-Sehwal Y P, Ingalls R G. Qualitative Discrete Event Simulation [C]// Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Monterey, California; WSC, 2006;648-653
- [8] Shanon C. A mathematical theory of communication [J]. Mobile Computing and Communicating Review, 2001, 5(1):3-55
- [9] Zeigler B P, Chi S. Symbolic Discrete Event System Specification [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1992;22(6):11-17
- [10] Cololri A, Dorigo M, Maniezzo V. Distributed optimization by ant colonies [C]// Proceedings of the First European Conference of Artificial Life. Ned; Elsevier, 1991; 134-142
- [11] Iseda T. Verification, Validation, and Confirmation of Simulation Models [R/OL]. <http://carnap.umd.edu/phil250/oreskes/oreskes.html>
- [12] Altaweel M, Blachowicz D, Bragen M, et al. RePast [CP/OL]. <http://repast.sourceforge.net>
- [13] XJ Technologies. AnyLogic [CP/OL]. <http://www.xjtek.com/>. [Accessed 9 2008]
- [14] Modelica. Modelica Simulation [CP/OL]. <http://modelica.org>
- [15] Benjamin P, Patki M, Mayer R. Using ontologies for simulation modeling [C]// Proceedings of the 38th conference on Winter simulation, Monterey, California; WSC, 2006; 1151-1159
- [16] Rockwell Automation. Arena [CP/OL]. <http://www.arenasimulation.com>
- [17] Dabney J B, Harman T L. Mastering Simulink [M]. New York; Prentice Hall, 1998;81-86
- [18] Jiang G, Hu B, Wang Y. Agent-based simulation of competitive and collaborative mechanisms for mobile service chains [J]. Information Sciences, 2010, 180(2):225-240
- [19] Jiang G, Hu B, Wang Y. Agent-based simulation approach to understanding the interaction between employee behavior and dynamic tasks [J]. Simulation, 2011, 87(5):407-422
- [20] Virtual Action Group. Webbased online simulation [CP/OL]. <http://virtual.cvut.cz/cacs/msa/index.shtml>
- [21] Kuhl F, Weatherly R, Dahmann J. Creating Computer Simulation Systems: An Introduction to the High Level Architecture [M]. New York; Prentice Hall, 1999;3-46
- [22] 陈忱, 王维锋. 基于 SOAP/Web Service 的仿真引擎研究 [J]. 微计算机信息, 2009(7):219-221
- [23] Meijer E. Democratizing the Cloud [C]// Conference on Object Oriented Programming Systems Languages and Applications. Montreal, Canada; ACM, 2007;858-859
- [24] Amazon Corporation. Amazon Elastic Compute Cloud (Amazon EC2) [R/OL]. <http://aws.amazon.com/ec2/>, 2013-02-03
- [25] Microsoft. MS Project [CP/OL]. <http://www.microsoft.com/office>, 2013-02-02
- [26] Dimitri G G. On the distribution of activity time in PERT [J]. Journal of Operational Research, 1998, 39(8):767-771
- [27] Pleguezuelo R H, Perez J G, Rambaud S C. A note on the reasonableness of PERT hypotheses [J]. Operations Research Letters, 2003, 31(1):60-62
- [28] Wang Y T, Hu Bin. Plot Data using SVG [CP/OL]. http://nilnul.com/_apps/nilnul.research.plotPsych, 2012-11-15
- [29] Wang Y T, Hu Bin. Standard Way to Validate Data [CP/OL]. <http://nilnul.com/a/wyt.research.std2Validate.demo> (wonderland), 2013-01-15
- [30] 葛娟. Microsoft Project 2003 项目管理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2006;175-176
- [31] Jason. org. jason object notation [S/OL]. <http://jason.org>, 2013-02-15
- [32] Som T K, Sargent R G. A formal development of event graphs as an aid to structured and efficient simulation programs [J]. Journal of Computing, 1989, 1(1):107-125