

态势感知水平的解析化度量模型

张东戈¹, 孟 辉^{2,3}, 赵慧贇¹

(1. 解放军理工大学指挥信息系统学院, 江苏 南京 210007; 2. 山西大学科学技术哲学研究中心, 山西 太原, 030006; 3. 解放军驻太原铁路局军事代表办事处, 山西 太原 030013)

摘 要: 态势感知研究领域一个尚未解决的重要问题, 是对态势感知程度水平进行解析化计算描述。在 Endsley 态势感知认知模型的基础上, 对态势感知过程中流动的信息包数量、耗费时间和信息处理速度、信息存续时限等进行了量化的定义和描述, 根据现实经验将信息处理的原则特征归纳为 5 条假设, 在此基础上建立了一个能够度量态势感知水平的解析化数学模型, 通过案例计算得到了与实际相符的态势感知水平变化曲线, 检验了模型分析的有效性。

关键词: 态势感知; Endsley 模型; 测度函数; 解析计算

中图分类号: TP 391

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2016.08.15

Analytical measurement model of situation awareness

ZHANG Dong-ge¹, MENG Hui^{2,3}, ZHAO Hui-yun¹

(1. College of Command Information Systems, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Research Center for Philosophy of Science and Technology, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

3. Military Representative Office of Taiyuan Railway Bureau, Taiyuan 030013, China)

Abstract: To analytically describe and calculate the situation awareness of certain operator is an important but still unresolved issue in research of situation awareness. On the basis of the Endsley's situation awareness model, we quantitatively define the number of the flowing information packages, time cost, information processing rate and valid time of the information in the situation awareness process. In addition, we conclude five hypotheses about the principles of the information process based on practical experience, and a mathematical model to analytically measure situation awareness of operators is established according to the hypotheses. Validity of our model is verified by case study.

Keywords: situation awareness; Endsley model; measure function; analytical calculation

0 引言

态势感知(situation awareness, SA)是人机工效学中的一个重要研究领域^[1]。目前, 态势感知的研究方法主要是以各种认知模型为基础, 对具体场景(想定)下操作的动作时间响应进行实验和统计分析^[2-5], 很少能够对模型进行解析化地深入研究, 态势感知研究成果更多地表现为一种“统计经验”, 对态势感知问题的规律认识尚“不够科学”, 这就大大地限制了态势感知理论可分析的对象和可以应用的领域。特别是面对那些复杂庞大的工业系统、军事电子信息系统、人工社会系统等, 传统实验和统计方法无法满足“预先的态势感知参数计算”的应用需要^[6-7]。以战斗机飞行员为例, 统计和实验可以对某一具体类型战斗机飞行员的态

势感知能力进行分析比较^[3], 但是战斗机飞行员在执行任务中属于整个空情、火力、导航和指挥控制等多个系统的一部分, 单单分析战斗机飞行员态势感知能力是远远不够的, 还需要分析整个系统中其他单元的态势感知能力, 进而分析整个体系的态势感知能力, 据此来完成顶层设计。因此, 工程和设计上迫切需要在更加抽象的层次上进行理论分析和参数计算, 唯有这样才有可能对整个系统的态势感知能力给出合理的分配, 从而确保系统和体系能够彼此协同地完成使命任务。

本文在 Endsley 态势感知认知模型的基础上, 对态势感知过程进行了抽象, 将态势感知过程中的关键阶段归纳为 5 条可量化分析的假设, 并在这些假设的基础上建立了一个能够度量态势感知水平的解析化数学模型, 通过计算得

到了与实际相符的态势感知水平变化曲线,检验了该模型分析问题的有效性。

1 研究现状分析

目前,Endsley模型是国际上应用最广的一种态势感知认知模型,它通过统计测量获取系统实验的参数,来建立操作质量、失误率之间的关系,从而确定态势感知的程度和水平^[8],其中,文献[9]提出用相似性尺度,度量团队共享态势感知情况,文献[10]将模糊认知图技术(fuzzy cognitive mapping, FCM)与 Endsley 模型相结合来描述高层次的态势感知情况,此方法,通过数据要素的影响权重来确定步兵中排级分队指挥官的态势感知水平,文献[11]在此基础上进一步分析了人和计算机协作的态势共享模式。上述这些方法对以个体操作为主要对象的态势感知研究,较为有效。然而,这种统计测量技术均仅能应用于特定的场景(想定),这就使得度量态势感知的程度和水平只能处于实际测量阶段^[12-13],它不能有效地实现态势感知程度和水平的“事先估计”,不能在系统设计规划阶段提供有效的态势感知参数支撑。在态势感知测量实验中 Carpenter 发现,在决策任务中,人们的反应时间(reaction time, RT)服从正态分布^[14],该结论得到了一些神经生理学数据的支持^[15],文献[16]进一步用随机微分方程讨论了证据的非线性累积情况。从研究层次上看,该模型是决策反应时间在神经生理学层面的研究,没有具体的环境背景,属心理学中的基础研究;从内容上看,该研究针对的是一次性决策的反应时间,无法应用于事件动态变化环境和持续决策行为。文献[17]研究了战斗机间的协同,分析了不同技术手段下,共享态势感知在时间上可能造成的差异。文献[18]建立了基于网络拓扑结构的态势感知评估方法,并将这种方法应用到 C⁴ISR 网络效能度量上。该研究假定所有网络节点都是彼此合作的,而并未考虑到 C⁴ISR 用户间会存在资源竞争关系,而这种竞争关系有可能会对结果产生巨大的影响。另有文献[19]认为,当有用信息提供的速率超过一定阈值时,态势感知过程会出现混沌现象。在国内,文献[20]提出用户感知是对信息流的感知,而非对单一信息的孤立感知,并在此基础上建立了描述态势感知速度变化的数学模型;文献[21]研究了协同态势感知效能方法;文献[22]提出了无人战斗机的态势感知模型框架;文献[23]进一步明确了战场态势的划分;文献[24]从信息交互角度,结合耗散结构理论对战场态势和态势估计进行了新的诠释;文献[25]针对现有网络态势感知技术无法反映网络整体运行质量的问题,提出了网络运行态势的概念和模型。

上述学者在态势感知问题研究方面取得了重要成果,然而同时也都缺少包含完整信息输入和最终结果输出时间过程的态势感知过程的解析化描述。在复杂的态势感知技术应用场景想定中,先前的态势感知水平以及决策者的行为反应,会反复地影响着后继的态势感知程度和水平。比如,战场指挥员要根据当前态势感知的结果做出一系列复

杂的决策,这些决策所带来的行为结果,又影响着下一步的态势感知程度和水平,假如缺少模型化的解析分析,会让很多重要的态势感知问题缺乏分析手段。

本文将 Endsley 态势感知框架模型向解析计算的方向进行了拓展,建立了衡量态势感知程度水平的一种数学模型,提出了一种评价态势感知程度水平的测度函数,为解析计算研究态势感知问题,提供了一种新的方法。

2 Endsley 模型拓展

Endsley 态势感知模型将态势感知分为 3 个层次^[26-27]。第一层次是对环境中各种要素的“察觉”。因察觉而获得的信息,是态势感知的基础信息,是态势感知加工处理的初始源头信息。第二层次是结合已有知识和资料,对态势要素的“状态参数”进行理解。“理解”建立在察觉的基础上,它描述的是,“一种客观态势参数属性(值)对于观察者意味着什么”。态势感知人员通过对“察觉信息”的感知处理,得到“理解信息”。第三层次是结合资料、知识或经验,综合当前的“察觉信息”、“理解信息”,然后对客观事物走势进行估计,从而形成“预测信息”。通常,只有生成了预测信息,才标志着感知主体完成了一次态势感知循环过程,连续态势感知,就包括着许多个这样的循环过程。

Endsley 框架模型阐明,态势感知的过程就是将外在的客观信息转化为内在的主观认识的过程。在此基础上,如果要想将 Endsley 框架模型发展为一种动态模型,需要解决 3 方面的问题。

(1) 如何体现态势感知信息的时效性。态势感知处理和输出的信息,具有时效性,“感知”总是对当前态势的感知。客观态势如果已经发生了明显可察觉的变化,若相应的态势感知结果输出不能随之发生相应变化,那么态势感知结果因为不能反映真实的态势情况,就会表现为失效。

(2) 如何体现态势感知的动态累积性。随着客观态势的不断变化,在态势感知处理系统中,除了新到达的更新信息外,还包括未失效的尚待处理的察觉信息和理解信息。这些信息会随着时间的变化和感知节奏快慢的不同,而产生前后不同的相互影响和相互作用,会呈现出不同的感知累积效应。累积效应是指,人们对于已知的东西,有了经验的东西认知更为容易,对于未知的东西,没有经验的东西认知更为困难;对于变化慢的东西,因为有更长的反应时间,所以认知更为容易,对于变化快的东西,可供反应的时间短,所以认知更为困难。

(3) 如何体现态势感知的连续性。态势感知的信息输出变化是一个连续的过程,它是关于时间的连续函数。比如面对突发事件,第一阶段到达的察觉信息会让感知主体形成对态势的初步认识,接下来,随着察觉信息到达数量的逐渐增多,同时伴随着态势感知主体不断将察觉信息转换为理解信息,态势的感知者,对态势的认识的规律也会随之改变。

为了探索上述问题,采用的方法是,根据态势感知的不

同阶段各种信息条数数量随时间的变化,来表征当前的感知程度和水平,这样就可以将 Endsley 框架模型拓展为可分析计算的动态数学模型,进而反映态势感知过程中的时效性、动态性和连续性。

3 态势感知动态过程的抽象化分析及模型假设

3.1 态势感知主体的界定

态势感知分析的基础是个体对周围(决策)环境的认识,在复杂系统应用中,感知主体更多时候会是一个团队。一个由很多个体组成的团队在协同决策的时候,如果从外部观察,它会如同一个黑箱,他人所能看到的,只是它的外部特征,而看不到内在细节。因此,在确定态势感知主体的时候,将符合“察觉接收—感知处理—预测输出”模式的个体实体或者团队都称为态势感知主体。这样定义感知主体有两个好处:一是扩大研究涵盖的对象和内容。在快速变化战场态势环境背景想定下,就个体而言,它(他)处理信息的速度大小通常相对固定于某个较窄的区间,而在团队中,态势感知参数会随着团队规模的变化而变化,会随着态势感知工作组织方式的不同而不同。经过这样的拓展,模型不仅可以分析个体,也可分析团体。二是实现了态势感知程度水平的统一度量。以往的态势感知度量都是在特定环境下测量特定人员的态势感知程度和水平,背景想定的差异,导致想要合理比较衡量不同环境和不同感知主体的感知水平较为困难。通过感知行为来界定态势感知主体,可以以时间为尺度来分析态势感知过程。时间的客观唯一性,使得不同态势感知个体之间的比较,有了统一而客观的衡量标准尺度。从该定义出发,对于一个行动指挥部,无论内部有多少人共同参与态势感知,从宏观上看,这个指挥部都只是在完成“察觉接收—感知处理—预测输出”过程,这个行动指挥部就看作一个态势感知主体。需要说明的是,在现实环境中,不同层次的感知主体关注的对象数量和属性不同。例如一名坦克连长关注的可能是所属 10 多辆坦克的位置、战技状态等信息,而一名装甲师长则可以获得数百辆坦克的数据信息。但是由于人的感知能力所限,短时间内感知这些数据是不可能的,装甲师长更关注的是数百辆坦克所属 10 多个装甲分队整体的位置、队形等信息。也就是说,无论是连长还是装甲师长,虽然层次不同,但是对于感知主体而言,所关注对象中包含的态势信息量是一定的。由此,本文所讨论的模型可以适合于不同层次感知主体的分析。

3.2 察觉信息和理解信息的定义分析

在三阶段 Endsley 模型中,察觉信息、理解信息、预测信息的基本含义有定义说明^[8],但是它只是一个定性的概念模型,并未区别 3 种信息的时间属性和特点。在态势感知过程中,察觉信息是由传感器系统提供的一种原始信息,但是这些信息无法直接形成预测信息,需要经过一系列的处理和转化之后才能够生成预测信息。

对于态势感知而言,如果不考虑原始察觉信息的表达

复杂度,在处理上可以将其简化为以条为单位的的信息。在我们的态势感知解析计算模型中,既包括察觉信息,又包括了理解信息,还包括了预测信息,因此,进行初始定义的时候,就需要包括两个不同的内容,即信息的条数定义和信息的内容取值的定义。在信息“理解计算”的时候,本文关心信息的条数,在获得产生预测信息的时候,本文关心信息的内容取值。这样综合起来考虑定义,虽然有些复杂,但是处理起来却会非常简单。它给了一种定义以双重应用,因此这是一种高效率的定义。

设要对客观存在的 O 物体(或者是事物)进行态势感知,这里称 O 为态势感知的客体,而所要感知的内容,则体现在它的属性参数值 α 之中。

定义 1 令 $P_i(O, \alpha)$ 表示某态势感知个体在 t 时刻获得的一条关于 O 客体 α 属性参数值的信息(或者是消息)。如果从时刻 $t=0$ 开始接收察觉信息,每隔 Δt 时间就接收一条察觉信息,则可以知道,到时刻 t 为止,接收的察觉信息的条数合计为

$$N(t) = \frac{t}{\Delta t} =$$

$$|P_0(O, \alpha), P_{\Delta t}(O, \alpha), P_{2\Delta t}(O, \alpha), \dots, P_{N\Delta t}(O, \alpha)| \quad (1)$$

式中, $|P_0(O, \alpha), P_{\Delta t}(O, \alpha), P_{2\Delta t}(O, \alpha), \dots, P_{N\Delta t}(O, \alpha)|$ 为已接收察觉信息集合的基数(集合论中的概念), N 为自然数。已接收察觉信息集合,是一个有限集合。

例如,有雷达每隔 $\Delta t=1$ 秒探测接收一次飞机方位角数据,则 60 s 共接收到 60 次飞机方位角数据,由此 $N(t)=60$, 这些方位角数据的值用 $P_i(O, \alpha)$ 表示,例如,在某个时刻 t , $P_i(O, \alpha)=30$, 即表明了这一时刻的方位角数值为 30。

从时间上看,理解信息是一种瞬时信息,当预测和决策完成后,相应的理解信息就会转变为与时间无关的“资料信息”,会从与时间相关的态势感知过程中丢弃,并被放入经验参数中,这点我们称之为理解信息的时间效应。这也潜在地意味着,本文所谈到的决策是单线索目标决策。一般来说,要想让预测达到一定精度,必须有足够多的理解信息作为支撑,这样才会产生相应精度的预测信息(这点在下面的示例 1 中进行说明)。因此,可以假设理解信息越多,相应的预测和决策质量就越好(本文只关心理解信息预测和决策的影响,因此有此假设,同时非对称博弈理论里面,由于评价的标准不同,这条假设不成立)。这样,本文就可以将同时存在的,未被丢弃的理解信息条数数量作为衡量态势感知水平的标准。

3.3 态势感知过程分析

3.3.1 从察觉信息向理解信息的转换

察觉信息可以是图像、声音、信号等,假定这些声音、图像、信号信息已经经过技术处理,感知主体可以“阅读”这些察觉信息,然后通过复杂的计算和处理,形成理解信息。这个过程,也可以通过计算机的信息识别系统完成,道理和过程类似。将这种“阅读理解”称之为察觉信息向理解信息的转换。

定义2 理解信息转换系数 假设某态势感知主体对 N 条“察觉信息”进行感知处理,可以得到 n 条“理解信息”,则该态势感知主体的“察觉—理解”信息转换系数 γ 为: $\gamma = n/N (\gamma \geq 0)$ 。

理解信息的生成过程,即为“察觉—理解”信息转换过程。若态势感知主体收到 N 条察觉信息后开始处理并转换生成理解信息,设理解信息转换系数 γ 是一常数,则 N 条察觉信息预计可以生成 $\gamma \cdot N$ 条理解信息。

在这里并不需要知道这个过程在生理上是如何完成的(这属于心理学和神经生理学范畴),但是从外在结果看,察觉信息的产生是由态势“变化”引起的,如果假设观测器观测的速度足够快,即 Δt 足够小,可以认为态势变化是连续的^[20]。

3.3.2 理解信息的感知生成系统

认知心理学将人的记忆分为工作记忆和长时记忆,其中工作记忆是指人们在完成认知任务的过程中将信息暂时储存的系统^[28]。一般情况下,工作记忆的容量是同时存储7个组块左右的信息并同时处理2个左右的组块信息,即Miller提出的7+2模型,但是长期记忆却没有这些限制^[29]。文献[30]研究表明,工作记忆的好坏与态势感知表现存在很强的相关性,按照Endsley模型,预测信息由理解信息综合形成,而人们的决策则基于预测信息作出。类似地,我们将感知主体用于储存和处理理解信息的系统称为理解信息感知生成系统(comprehension awareness system, CAS),它和前述工作记忆类似。完成态势感知的个体,它(他)能够同时处理的理解信息的数量有限,超过容量限制之后,由于处理不过来,就只能丢弃。在现实中,我们也会丢弃那些实在处理不过来的东西。由此,我们将CAS中能容纳的最大理解信息条数数量称为态势感知容量(situation awareness capacity, SAC)。

说明性示例1 有司机 P_1 现要驾车到A市B小区,在距离A市还有50 km时,他从广播获得1条察觉信息 a_1 : “A市 r 路拥堵”。假设司机知道,正常情况下到B小区需要经过 r 路,于是形成1条理解信息 b_1 : “ r 路拥堵对自己行程有影响,可能需要改变行进路线,备选方案有...”,10 min后在司机 P_1 行将进入市区时,如果广播中没有更新路况信息,则司机 P_1 产生1条预测信息 c_1 : “拥堵将继续存在”(相当于这期间 $P_1(O, \alpha)$ 数值维持不变),因此他决定改变行车路线。假如,另外有一个对A市交通状况非常熟悉的司机 P_2 ,他也同样从广播中获得了这1条察觉信息 a_1 ,但是由于他有很多预先的经验,知道 r 路拥堵必然连带 v 路拥堵,由此, P_2 从这1条察觉信息 a_1 出发,不仅产生1条理解信息 b_1 ,还将产生1条理解信息 b_2 : “ v 路拥堵”, P_2 的行车路线改变预测,将比 P_1 更加准确。两者差别的原因是, P_2 的感知水平要高于 P_1 。因此,归纳起来,我们可以有如下假设。

假设1 察觉信息转换为理解信息后,会进入CAS, CAS中的理解信息条数反映了感知主体的态势感知水平。单一场景条件下, CAS中的理解信息越多,我们就认为其

感知水平越高。通俗的理解比喻就是,一个人脑子里时效性信息装的越多,这个人对于当下态势的理解力就越强。

定义3 理解信息生成速率 设 Δt 时间内CAS中新生成 Δx 条理解信息,则称 $v_0(t) = \Delta x / \Delta t$ 为理解信息生成速率。

设到 t 时刻为止,已经收到 N 条“察觉信息”,它可以生成 $\gamma \cdot N$ 条理解信息,如果 t 时刻CAS中已经生成的理解信息条数为 $x_0(t)$,则尚未生成的理解信息数量为 $\gamma \cdot N - x_0(t)$ 。因为“生成理解”这个过程需要耗费认知资源(比如处理器时间、存储容量等(在快速变化态势环境和大容量信息条件下,这种时间和空间的消耗,不能忽略。尤其是对于以秒或者是毫秒为单位的战场火力装备环境下,这一问题,比较突出。)),而在理解信息生成的过程中,认知过程会同步生成预测信息(态势感知过程具有连续性)。开始时, CAS中的理解信息少,同步形成预测信息耗费的认知资源就少,理解信息生成速率就较大,随着理解信息数量的不断增加,同步形成预测信息耗费的认知资源增大,用于生成理解信息的资源减少,导致理解信息生成速率下降。因此可以有如下假设。

假设2 在一定时间内,理解信息生成速率 $v_0(t)$ 与尚未生成的理解信息数量 $\gamma \cdot N - x_0(t)$ 成正比。

3.3.3 理解信息的有效时间和理解信息的丢弃

通常当CAS中的理解信息达到生成预测信息要求的基准数量后,感知主体会进入Endsley模型的第三层次阶段,并持续性地形成预测信息。为了计算稳定状态下的态势感知速度,我们可以假设在 $t=0$ 时刻,即已进入第三层次阶段,这种处理,隐含地是相当于进行了时间坐标系的平移处理,这样并不影响结论的普遍性,但是分析起来却更为简单。

人们一旦获得有效的结果之后,相关信息将会成为一种历史经验。与人类记忆的遗忘作用类似,丢弃理解信息的目的在于释放相关资源,因为CAS的容量有限,如果不能及时清除无关或者是冗余的理解信息,例如,在不提供新信息的情况下,“同样的话”人们不用说它两遍,当其数量超过SAC的容量时,就会造成CAS的存储溢出。因此可以有如下假设。

假设3 一旦相关信息使用完成,根据理解信息的时间效应,相关理解信息将会被丢弃。

定义4 理解信息的有效存续时间 设某1条理解信息 a 进入CAS的时刻为 t_1 ,感知主体经过处理,形成预测信息的时刻为 t_2 ,若理解信息 a 在 t_2 时刻被丢弃离开CAS,则称 $t_2 - t_1$ 为这条理解信息 a 的有效存续时间。

定义5 理解信息丢弃速率 若 Δt 时间内CAS中的理解信息数量减少 Δx 条,则称 $v_1(t) = \Delta x / \Delta t$ 为理解信息丢弃速率。

在说明性示例1中,当司机作出改变路线的决定后, CAS中的2条理解信息 b_1 和 b_2 将不再具有现实直接使用价值,感知主体会在使用后将 b_1 和 b_2 这2条信息丢弃。

从 b_1 和 b_2 生成到丢弃的时间间隔就是理解信息的“有效存续时间”。不同环境要求下,理解信息的丢弃速率是不同的。比如,在驾驶过程中,如果司机发现前面车辆传递出“刹车灯亮,并且观察到其速度显著下降”的信号(即司机获得了一条察觉信息),那么司机马上会意识到前方车辆实施了“紧急刹车”这个动作(即相应地生成了 1 条理解信息),接下来会预计到前方车辆“将会完全停止”(形成了预测信息:“速度将趋近于 0”,形式化表示即为 $P_i(O, \alpha) \rightarrow 0$),于是司机采取紧急制动(使用这个信息从而引发一个动作)。在这个场景想定中,整个过程持续时间很短,完成预测和实施过相应动作后,其中所形成的理解信息,马上就会失去现实直接应用价值,由此会马上被丢弃,在这个场景想定中,理解信息的有效存续时间只有数秒,而在示例 1 中,理解信息有效存续时间长达 20 min。因此可以有如下假设。

假设 4 态势环境变化快且响应时间的时限性要求高时,理解信息的丢弃速率较高,如果环境变化慢且响应时间的时限性要求低时,理解信息的丢弃率则较低。

这体现的现实思想是,环境变化越快,信息就越容易“过时”,单条信息的现实参考价值就越低,也就越容易被丢弃。

由于 CAS 容量有限,当 CAS 中的理解信息越多时,为了维持足够的认知资源,理解信息的丢弃率也会相应提高,因此可以有如下假设。

假设 5 理解信息的丢弃速率与 CAS 中的理解信息条数成正比。

根据上述分析,我们将 Endsley 框架模型经过解析化扩展后为如图 1 所示的动态信息流动处理关系过程。

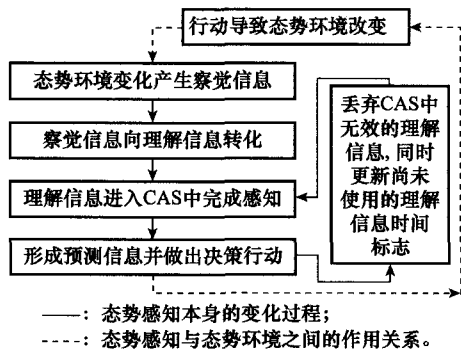


图 1 态势感知中动态信息流动处理关系过程

Fig. 1 Treating process of the dynamic information flow in situation awareness

4 态势感知水平度量的数学模型

4.1 态势感知水平测度函数

定义 6 态势感知水平测度函数 设 $w(t)$ 为 t 时刻 CAS 中理解信息的条数,相应的 SAC 大小设定为 W ,将 $s(t) = w(t)/W$ 称之为态势感知水平测度函数。根据假设 1,对同一态势感知主体而言,测度函数 $s(t)$ 数值越大,则感知水平越高,反之则越小。

4.2 模型的建立

为了计算出理解信息条数数量随时间变化的关系,设 t 时刻 CAS 中已经生成的理解信息条数为 $x_0(t)$,尚未生成的理解信息数量为 $\gamma \cdot N - x_0(t)$,由假设 2 得

$$\frac{dx_0(t)}{dt} = k_0(\gamma N - x_0(t)) \quad (2)$$

我们假设没有预先的理解信息,由此可以令 $x_0(0) = 0$ 。其中, $k_0 > 0$ 为理解信息生成系数,解方程(2)得

$$x_0(t) = \gamma \cdot N(1 - e^{-k_0 t})$$

设 $v_0(t)$ 为理解信息生成速率,则

$$v_0(t) = \frac{dx_0(t)}{dt} = \gamma \cdot k_0 e^{-k_0 t} \quad (3)$$

又根据假设 5 有,理解信息丢弃速率 $v_1(t) = k_1 w(t)$,其中 $k_1 > 0$ 为设定的理解信息丢弃系数,则有

$$\frac{dw(t)}{dt} = v_0(t) - v_1(t)$$

即

$$\frac{dw(t)}{dt} = \gamma \cdot N \cdot k_0 \cdot e^{-k_0 t} - k_1 w(t) \quad (4)$$

假定初始时刻 CAS 中的理解信息数量为零,即 $w(0) = 0$ 解方程(4)得

$$w(t) = \frac{\gamma \cdot N \cdot k_0}{k_0 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_0 t}) \quad (5)$$

根据定义 6,态势感知水平的态势感知测度函数为

$$s(t) = \frac{w(t)}{W} = \frac{\gamma \cdot N \cdot k_0}{W(k_0 - k_1)} (e^{-k_1 t} - e^{-k_0 t}) \quad (6)$$

4.3 模型特性讨论

在态势感知过程中,理解信息生成系数 k_0 与单个感知主体经验、群感知的感知方式有关,它体现的是感知个体态势感知的能力,工程上可以通过常规实验测量的方式获取这一参数。

(1) 当 $k_0 > k_1$ 时, $e^{-k_1 t} - e^{-k_0 t} > 0$,反之,当 $k_0 < k_1$ 时, $e^{-k_1 t} - e^{-k_0 t} < 0$,这一关系保证了 $s(t) > 0$ 恒成立。

(2) 当 $k_0 = k_1$ 时,令 $k_0 \rightarrow k_1$,取极限得

$$s(t) = \frac{\gamma \cdot N \cdot k_0}{W} \cdot t \cdot e^{-k_0 t} \quad (7)$$

从式(7)函数 $s(t)$ 表达式可知其为一个单峰函数。当态势发生变化时,会产生一系列察觉信息,此时感知主体开始对态势进行感知。假如“世界是可通过所给信息而得到(被)充分认识的”,那么如果有充分足够的时间,感知主体一定可以对察觉信息完成感知,并会在某个时刻,达到最佳态势感知程度水平。如果态势环境持续变化,那么在假定态势感知结果不变的条件下,则态势感知结果与实际态势情况的差距,会随着时间的增加而不断变大(换一种解释就是:如果面对的是一个固定的环境,即态势参数不发生变化,那么随着时间的推移,“态势参数不变”的可信度也会随着时间的推移而逐渐变小);如果一直没有新的察觉信息来更新感知,态势感知的程度水平将会逐渐趋近于 0。这体现的思想是:世界如果变化了,若人的认知凝固不变,那么

人们对世界的了解会逐渐趋近于零。这点既与这哲学认识相符,也与实际经验相符。

测度函数性质 如果丢弃系数 k_1 为常数,理解信息生成系数 k_0 ($k_0 \neq k_1$) 越大,式(7)态势测度函数 $s(t)$ 最高水平形成所需的时间就越少。

证明 根据式(1)对 $s(t)$ 求导并令其等于 0 以求极值:

$$\frac{ds(t)}{dt} = \frac{\gamma \cdot N \cdot k_0}{W(k_0 - k_1)} (-k_1 e^{-k_1 t} + k_0 e^{-k_0 t}) = 0$$

即有 $k_1 e^{-k_1 t} = k_0 e^{-k_0 t}$, 两边取对数得

$$\ln k_1 - k_1 t = \ln k_0 - k_0 t$$

解之得

$$t = \frac{\ln k_0 - \ln k_1}{k_0 - k_1}$$

即当 t 取此值时,态势测度 $s(t)$ 达到最高感知水平。

在同一事件中,设丢弃率 k_1 不变,则它可看作常数,由此记

$$t(k_0) = \frac{\ln k_0 - \ln k_1}{k_0 - k_1}$$

对其求导

$$\frac{dt(k_0)}{dk_0} = \frac{1 - \frac{k_1}{k_0} + \ln \frac{k_1}{k_0}}{(k_0 - k_1)^2}$$

令 $g(x) = 1 - x + \ln x$, 则 $g'(x) = 1/x - 1$, $g(1) = 0$, $g'(1) = 0$ 当 $x > 1$ 时, $g'(x) < 0$, $g(x)$ 为减函数,当 $x < 1$ 时, $g'(x) > 0$, $g(x)$ 为增函数,所以 $g(x) \leq g(1) = 0$ 。

当 $x = k_1/k_0$, 得 $1 - k_1/k_0 + \ln k_1/k_0 \leq 0$, 当 $k_0 = k_1$ 时, 等号成立。

由此,当 $k_0 \neq k_1$ 时, $1 - k_1/k_0 + \ln k_1/k_0 < 0$, $(k_0 - k_1)^2 > 0$, 因此 $dt(k_0)/dk_0 < 0$, $t(k_0)$ 为减函数,所以, k_0 越大, 态势测度越早达到高点。证毕

性质表明,理解信息生成系数 k_0 ($k_0 \neq k_1$) 越大,也就是理解信息生成得越快,态势感知达到较高程度水平花费的时间就越少,这与实践经验相符,由此也进一步印证了态势感知测度函数的有效性。

4.4 演算示例分析

假设有 3 个态势感知主体 A、B、C, 其 SAC 值都为 20 条, 在某一态势环境中,各自的理解信息生成速率系数分别取值为 $k_0^1 = 0.7$, $k_0^2 = 0.3$, $k_0^3 = 0.2$, 其丢弃速率系数都为 0.2, 即 $k_1^1 = k_1^2 = k_1^3 = 0.2$, 察觉信息 $N = 100$, 察觉信息转化率 $\gamma = 1$, 根据式(6), 相对应的态势感知测度函数为

态势感知主体 A, 对应曲线 $s_1(t)$:

$$s_1(t) = \frac{100 \times 0.7}{20 \times (0.7 - 0.2)} \cdot (e^{-0.2t} - e^{-0.7t})$$

态势感知主体 B, 对应曲线 $s_2(t)$:

$$s_2(t) = \frac{100 \times 0.3}{20 \times (0.3 - 0.2)} \cdot (e^{-0.2t} - e^{-0.3t})$$

态势感知主体 C, 对应曲线 $s_3(t)$:

$$s_3(t) = \frac{100 \times 0.2}{20} \cdot t \cdot e^{-0.2t}$$

运用 Matlab 7.0 软件计算描绘, 得到三者的态势感知测度函数曲线如图 2 所示。

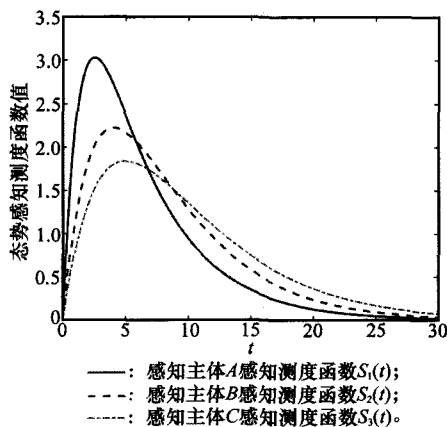


图2 态势感知程度水平测度函数曲线

Fig. 2 Curves of the measure function about operators' situation awareness level

讨论 从图 2 中 $s_1(t)$, $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 这 3 条曲线的变化情况可以得出如下结论。

(1) 丢弃率一定的条件下,生成速率越大,开始时有效态势感知水平增长越快,也就是 $s_1(t)$ 开始增长最快, $s_3(t)$ 开始增长最慢,这体现了性质 1,说明 $s_1(t)$ 达到最佳感知水平的速度最快,从图中的峰值也看出 $s_1(t)$ 达到的态势感知水平最高。

(2) 从 $s_1(t)$, $s_2(t)$ 和 $s_3(t)$ 这 3 条曲线的变化情况可以看到,有效态势感知水平达到最高点后会快速衰减。特别是当 $t > 6$ 之后,较快达到最高态势感知水平的主体 A,其态势感知水平曲线会变得更低。这是因为,对于态势感知主体 A,如果获得的态势感知程度水平高,在生成预测信息后,它(他)会将 CAS 中已经无效的理解信息迅速丢弃,以便有更多感知资源去完成下一步的任务。在利用态势感知测度函数比较态势感知水平时,达到最佳态势感知水平的程度和形成时间是最为关键的两个因素。

5 结束语

本文对态势感知过程的分析及相关数学模型的建立,主要有两方面的意义:①不同于通行的基于情景实验的数理统计分析方法,本文采用了基于量化参数的概念化分析对态势感知能力和态势感知过程进行解析化理论分析,属于是研究方法上的创新。通行的基于统计或者是框架式的概念分析,其优势是可以对特定领域(比如飞行员、网络态势等)的感知特点进行深入分析,缺点是无法在更为广义的层次和对复杂的系统进行解析分析和参数计算,特别是在概念模型设计阶段,统计法不能满足设计所需。同时,以往的文献很少在态势感知基础理论方面开展工作,大多数是以态势感知领域应用最广的 Ensley 概念模型作为基础^[31],开展应用研究。而采用可量化参数的分析思路以及解析化

方法,可以从认知行为机理的角度对整个态势感知过程进行量化分析。②建立了一个符合实际情况的具体可分析计算的态势感知数学模型,从而说明用理论的方法而非统计的方法,解析化分析计算和比较态势感知水平可行。通过对模型算例的分析计算,得到了符合实际预期的结果,虽然这是一种抽象意义上的分析结果,但是这表明了在各种不同系统条件下对态势感知进行一般性的分析计算是可能的,这也为分析各种大型综合信息系统的态势感知能力提供了一种分析方法。

虽然对态势感知的形式化解析计算进行了一些研究,但是还有更多重要问题需要进一步研究,比如,文献[32]指出,体系态势感知的真正挑战在于,复杂的实时交互过程以及大量的循环反馈过程、观察的不确定性、体系的柔性配置等都会对态势感知产生很大影响,如何将本模型应用到不同的体系结构,对其进行态势感知分析仍然是一项重要而复杂的研究任务。

参考文献:

- [1] Paul M S, Neville A S, Guy H W. Measuring situation awareness in complex systems: comparison of measures study[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2009, 39(3):490-500.
- [2] Durso F T, Gronlund S D. *Situation awareness*[M]. Handbook of Applied Cognition. New York: Wiley, 1999:283-314.
- [3] Endsley M R. *Situation awareness in aviation systems*[M]. Handbook of Aviation Human Factors, New York: Erlbaum, 1999: 257-276.
- [4] Hoff D N, Folleso K, Strand-Volden F, et al. Development of a situation awareness measure to evaluate advanced alarm systems in nuclear power plant control rooms[J]. *Ergonomics*, 2007, 38(11):2394-2413.
- [5] Webb J, Ahmad A, Maynard S B, et al. A situation awareness model for information security risk management[J]. *Computers & Security*, 2014, 44(2):1-15.
- [6] Endsley M R, Jones W M. *Situation awareness, information dominance & information warfare*[R]. United States Air Force Armstrong Laboratory, 1997.
- [7] Paul S, Neville S, Guy W, et al. Situation awareness measurement: a review of applicability for C4I environments[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 37(2):225-238.
- [8] Endsley M R, Garland D J. *Situation awareness analysis and measurement*[R]. Mahwah, NJ: Erlbaum, 2000.
- [9] Saner L D, Bolstad C A, Gonzalez C, et al. Measuring and predicting shared situation awareness in teams[J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2009, 3(3):280-308.
- [10] Jones R E T, Connors E S, Mossey M E, et al. Modeling situation awareness for army infantry platoon leaders using fuzzy cognitive mapping techniques[J]. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 2011, 17(3):272-295.
- [11] Kokar M M, Endsley M R. Situation awareness and cognitive modeling[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2012, 27(27):91-96.
- [12] Kirlik A, Strauss R. Situation awareness as judgment I: statistical modeling and quantitative measurement[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2006, 36(5):463-474.
- [13] Kirlik A, Strauss R. Situation awareness as judgment II: experimental demonstration[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2006, 36(5):475-484.
- [14] Carpenter R H S. *Oculomotor procrastination in eye movements: cognition and visual perception*[M]. Eye Movement, 1981:237-246.
- [15] Nakahara H, Nakamura K, Hikosaka O. Extended later model can account for trial-by-trial variability of both pre-and post-processes[J]. *Neural Networks*, 2006, 19(8):1027-1046.
- [16] Martin F. A theory of RT distributions[R]. Laboratoire de Psychologie Cognitive, 2009.
- [17] Kingston G, Martell C. Degrees of shared awareness[C]// *Proc. of the 9th International Command and Control Research and Technology Symposium*, 2004.
- [18] Monsuur H. Assessing situation awareness in networks of co-operating entities: a mathematical approach[J]. *Military Operations Research*, 2007, 12(3):5-15.
- [19] Sharma S, Ivancevic V G. Nonlinear dynamical characteristics of situation awareness[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2010, 11(5):448-460.
- [20] Meng H, Zhang D. Model of situation awareness velocity under continuous changing situation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(12):2909-2913. (孟辉, 张东戈. 连续态势变化条件下态势感知速度模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12):2909-2913).
- [21] Wang X, Yao P Y, Zhou X X, et al. Efficiency model of cooperative situation awareness based on logistic equation[J]. *Electronics Optics & Control*, 2011, 18(10):6-10. (王欣, 姚佩阳, 周翔翔. Logistic方程在协同态势感知效能分析上的应用[J]. 电光与控制, 2011, 18(10):6-10).
- [22] Yang Y L, Gao X G. A model framework of situation awareness for uninhabited combat air vehicle[J]. *Flight Dynamics*, 2003, 21(3):6-9. (杨有龙, 高晓光. 无人战斗机的态势感知模型框架[J]. 飞行力学, 2003, 21(3):6-9).
- [23] Zhao Z G, Li J L, Wang K. The concept, structure and efficiency of battlefield situation assessment[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2010, 5(3):226-230. (赵宗贵, 李君灵, 王珂. 战场态势估计概念、结构与效能[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(3):226-230).
- [24] Li Y, Liu G, Lao S. A new interpretation of battle field situation and battle situation assessment[J]. *Fire Control & Command Control*, 2012, 37(9):1-5. (李赞, 刘钢, 老松杨. 战场态势及态势估计的新见解[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9):1-5).
- [25] Bai J, Xia J, Zhong Y, et al. Network running situation awareness technology and its model[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 16(1):16-22. (柏骏, 夏靖波, 钟赞, 等. 网络运行态势感知技术及其模型[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2015, 16(1):16-22).
- [26] Endsley M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1):32-64.

- [27] Endsley M R. Measurement of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1):65-84.
- [28] Baddeley A D. The episodic buffer: a new component of working memory? [J]. *Trends in Cognitive Science*, 2000, 4(11):417-423.
- [29] Mayer R E. *Multimedia learning* [M]. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2009: 57-59.
- [30] Gonzalez C, Wimsberg J. Situation awareness in dynamic decision making: effects of practice and working memory[J]. *Journal of Cognitive Engineering & Decision Making*, 2007, 1(1):56-74.
- [31] Endsley M R. Situation awareness misconceptions and misunderstandings[J]. *Journal of Cognitive Engineering & Decision Making*, 2015, 9(1):4-32.

- [32] Laar P V D, Tretmans J, Borth M. *Situation awareness with systems of systems* [M]. Springer, 2013: 39-53.

作者简介:

张东戈(1965-),男,教授,主要研究方向为复杂军事系统分析、态势感知理论与技术、军事信息学、军事运筹学。

E-mail:DongGeZhang@hotmail.com

孟 辉(1981-),男,工程师,博士研究生,主要研究方向为科技哲学、军事信息学、军事复杂系统分析。

E-mail:MengHui032200@126.com

赵慧贇(1990-),女,博士研究生,主要研究方向为军事复杂系统分析。

E-mail;zhaohuiyun1819@126.com