

6-4-2020

Attention Mechanism in Battlefield Situation Awareness

Yisi Kong

National Defense University, Beijing 100091, China;

Xiaofeng Hu

National Defense University, Beijing 100091, China;

Zhu Feng

National Defense University, Beijing 100091, China;

Jiuyang Tao

National Defense University, Beijing 100091, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Attention Mechanism in Battlefield Situation Awareness

Abstract

Abstract: Battlefield situation awareness (BSA) is the basis of C2 and decision making. Research on BSA can clarify the mechanism and lay the foundation for designing intelligent model and algorithm to assist commanders with situation awareness. Taking attention mechanism as the point, the relevant discussion in psychology was summarized, *a framework of the attention mechanism in BSA was put forth, and its application in operational target value assessment was explored.*

Keywords

battlefield situation awareness, attention mechanism, operational target, value assessment

Recommended Citation

Kong Yisi, Hu Xiaofeng, Zhu Feng, Tao Jiuyang. Attention Mechanism in Battlefield Situation Awareness[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2233-2241.

战场态势感知中的注意力机制探析

孔亦思, 胡晓峰, 朱丰, 陶九阳

(中国人民解放军国防大学, 北京 100091)

摘要: 战场态势感知是指挥决策的基础。开展对战场态势感知机制的研究, 可以从理论上厘清机理, 为将来设计智能认知模型与算法, 辅助指挥员进行态势感知奠定基础。从注意力机制入手, 综述了心理学和态势感知理论中注意力机制的理论研究以及建模方法, 提出了战场态势感知中的注意力机制的概念和框架, 并展望了在作战目标价值评估中的应用。

关键词: 战场态势感知; 注意力机制; 作战目标; 价值评估

中图分类号: TP183 文献标识码: B 文章编号: 1004-731X (2017) 10-2233-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710001

Attention Mechanism in Battlefield Situation Awareness

Kong Yisi, Hu Xiaofeng, Zhu Feng, Tao Jiuyang

(National Defense University, Beijing 100091, China)

Abstract: Battlefield situation awareness (BSA) is the basis of C2 and decision making. Research on BSA can clarify the mechanism and lay the foundation for designing intelligent model and algorithm to assist commanders with situation awareness. Taking attention mechanism as the point, the relevant discussion in psychology was summarized, a framework of the attention mechanism in BSA was put forth, and its application in operational target value assessment was explored.

Keywords: battlefield situation awareness; attention mechanism; operational target; value assessment

引言

战场态势感知(battlefield situation awareness, BSA)是指挥员进行指挥决策的前提与基础。当前信息化条件下, 战场数据爆炸式增长, 作战节奏明显加快、战机稍纵即逝, 参战力量多元交互、跨域融合, 都给指挥员进行战场态势感知带来巨大的挑战。海量的战场数据导致信息过载, 快速的作战节奏要求快速感知, 复杂的作战体系加大认知难度。因此, 需要开展指挥员战场态势感知机制的研究,

从理论上厘清指挥员指挥决策过程中进行态势感知的机理, 为将来设计智能认知模型与算法, 辅助指挥员进行态势感知奠定基础。

注意力机制(attention)是人观察和认识世界的一项重要机制, 是聚焦于重点的能力。注意力机制研究起源于 19 世纪的实验心理学, 20 世纪中期发展起来的认知心理学和神经生理学进一步推动了注意力机制研究。但是长期以来, 注意力只是被视为个人在觉察、理解外部刺激的过程中生理和心理表现出的一种官能, 重点表现在视觉、听觉等感官上。20 世纪 90 年代, Endsley 提出的态势感知理论(Situation Awareness, SA)将注意力机制进一步拓展, 范围从个人内在的心智活动拓展到对周围的动态环境以及他人行为和意图的感知, 并融合到认知、决策和行动的闭环中。



收稿日期: 2017-05-16 修回日期: 2017-07-15;
基金项目: 国家自然科学基金(61374179), 中国博士后科学基金(2016M602996), 国家自然科学基金青年科学基金(61703412);
作者简介: 孔亦思(1991-), 女, 江苏江阴, 硕士生, 研究方向为战场态势感知; 胡晓峰(1957-), 男, 山东栖霞, 硕士生, 教授, 研究方向为战争模拟。

<http://www.china-simulation.com>

• 2233 •

在作战时,注意力机制体现在指挥员指挥决策的过程中。例如,指挥员会倾向于关注重点作战目标、重点作战任务等,并相应地在决策和行动上予以更多侧重。指挥员作为个人,本身就受视觉、听觉等注意力机制影响。但是,本文研究的,是指挥决策群体所体现出的共性的对于作战态势的有重点的关注,是基于心理学和态势感知理论等研究基础,对战场态势感知中的注意力机制的探索分析。本文首先综述了注意力机制理论及建模方法的相关研究,然后提出了战场态势感知中的注意力机制框架,展望了基于注意机制的作战目标价值评估应用。

1 注意力机制理论和建模方法

1.1 注意力机制理论研究

1.1.1 心理学研究

注意力机制的研究起源于早期的实验心理学。从最早的实验心理学家开始,多数心理学专著都会专门论述注意力^[1]。总结早期知名实验心理学家关于注意力的论述,可以得出:(1)注意力可以分为两种形式:被动反应式的,和主动自发式的。(2)注意力的作用就是聚焦于重点。而被注意的事物必须在被注意到之前已经存在,而不是被注意力所创造。

20 世纪 50 年代,先后提出的过滤器理论、衰减理论等都将注意力看作是信息处理系统的瓶颈。后来,在瓶颈理论的基础上,注意力被进一步看作是资源分配,认为是由许多可以被系统地分配用来处理新异刺激的认知过程构成。处理类型包括两种:(1)数据驱动处理:自下而上,搜集和处理零碎信息,最后汇集到工作记忆中。(2)概念驱动处理(conceptually-driven):自上而下,可以看作期望或计划^[2]。

至今,对注意力还没有形成统一的认识,因而也没有统一的定义。贝斯特在其论著中给出的注意力定义是“心理努力的集中和聚焦,是一种有选择

性、转移性和可分解性的集中^[2]。”陈焜之认为,注意力是“在容量有限的前提下,个体选择性地对认知处理施用于部分信息的过程”,选择是注意最根本最主要的特性^[3]。其强调了注意作为一种内在的认知过程,主要的功能为认知资源的选择与分配,且容量和资源是有限的。本文认为,注意力不应看成一种固定的事物,也不仅是一种心理、生理的官能,对注意力的认识应当随着其具体应用领域而拓展。

1.1.2 态势感知理论研究

态势感知理论最早由美国空军首席科学家 Endsley 于 1988 年提出,指感知一定时空范围内环境中的要素,理解其意义,并预测其短期未来的状态^[4]。Endsley 于 1995 年提出了一个通用的态势感知三层模型^[5](见图 1),第一层是觉察(perception),获取所需的重要信息,形成觉察态势(SP);第二层是理解(comprehension),综合集成并理解所获取的信息,形成理解态势(SU);第三层是预测(projection)未来状态和趋势,形成预测态势。态势感知与决策、行动是不同的阶段,是决策和行动的前提。本文认为,在动态系统中,理解与预测层次之间界限相对模糊,理解现在通常就直接暗示未来,故可把理解和预测相结合,统称为认知(cognition)。由此将态势感知三层模型简化成两层:一是觉察态势(SP),二是认知态势(SC)。在战争复杂系统中,可以用两层的战场态势感知模型来分析。

态势感知理论中,注意力机制是一项重要内容,而且是对心理学中关于注意力研究的进一步拓展与创新。心理学中对注意力研究,都是基于个人觉察、理解某些刺激的背景。而态势感知理论中,注意力是意识到自己周围广阔、动态的环境;试图理解他人行为和意图;采取与对他人未来行动的心理预测相一致的行动^[1]。主要内容包括^[5-10]:

1、资源限制

注意力资源有限,需要分配。注意力超限问题:复杂动态环境中,信息过载、任务复杂、多

重任务都会导致超过注意力限度, 从而导致人面临信息过载的问题。注意力不足问题: 注意力不足会导致形成的态势感知存在偏差, 进一步导致错误决策和行动。

2、作用阶段

注意力机制作用在态势感知到决策和行动的各个阶段(见图 2)。如, 作用在形成第一层态势觉察的阶段时, 在心智模型的指导下, 注意力被集中到环境的关键要素上, 用来对同时觉察多个要素加以限制, 以形成第一层态势觉察。

对没有经验的决策者而言, 或者是处在不熟悉的新环境新态势下, 注意力是制约人实现态势感知和决策的主要因素。在缺乏历史数据和专家知识库时, 要靠注意力机制来实现聚焦。

3、处理流程

(1) 数据驱动(data-driven): 自下而上的处理流程。如, 预注意阶段的感觉记录器并行处理环境特征, 为进一步集中注意力提供线索(cue)。线索关乎

到要注意环境中的哪些要素从而形成第一层的态势觉察。此外, 还需要根据环境的变化来向上调整目的和计划。

(2) 目的驱动(goal-driven): 自上而下的处理流程。目的、计划、期望等会影响注意力集中于哪些信息, 并根据目的来理解这些信息, 形成高层的态势认知。此外, 还要根据计划和目的做出决策和行动。

这两种处理流程在动态环境中切换和平衡。

4、与其他认知机制的关系(见图 3)

(1) 与心智模型(mental model)的关系: 心智模型通过训练和历史经验形成, 存储在长期记忆(long-term memory)中, 取决于当前态势并随时间而不断更新, 可视为系统的图式(schema), 用于模拟系统的行为。心智模型在引导注意力上十分重要, 能够自上而下指导注意力集中到环境的关键要素(线索)上, 形成第一层态势觉察。

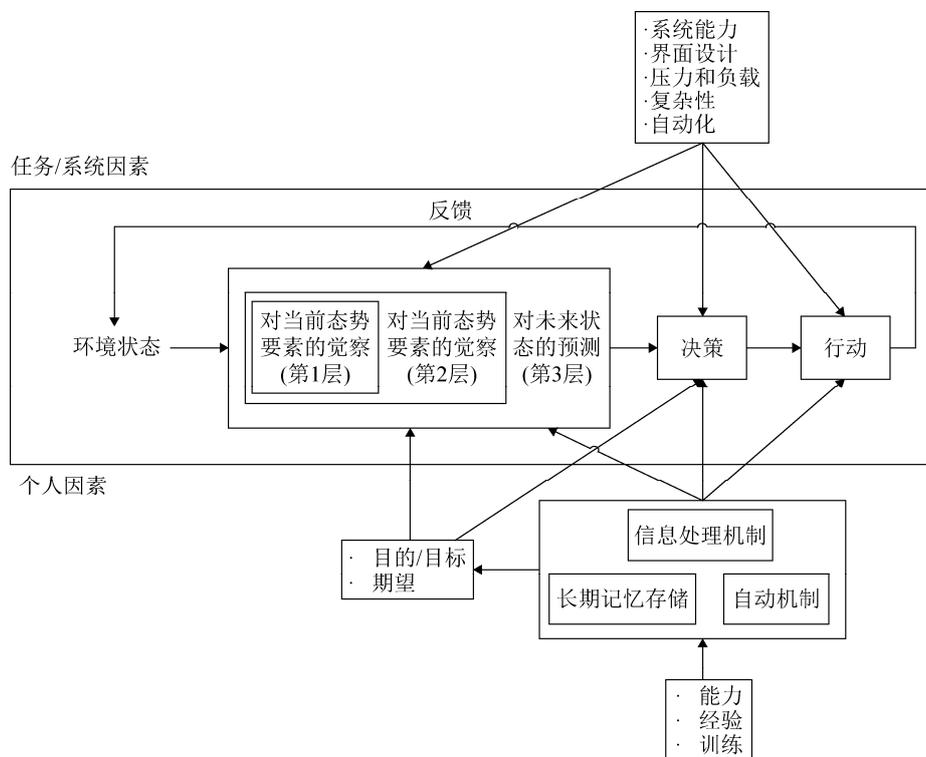


图 1 在动态决策环境中的态势感知模型^[5]
Fig. 1 Situation awareness model in dynamic decision environment

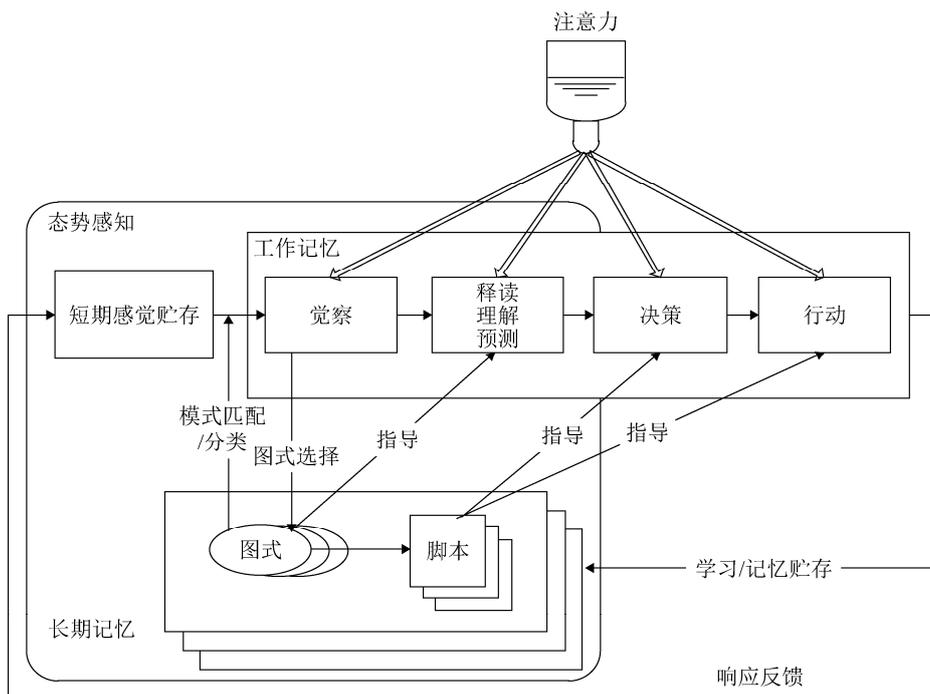


图 2 态势感知和注意力机制的关系^[5]
Fig. 2 Relationship between SA and attention

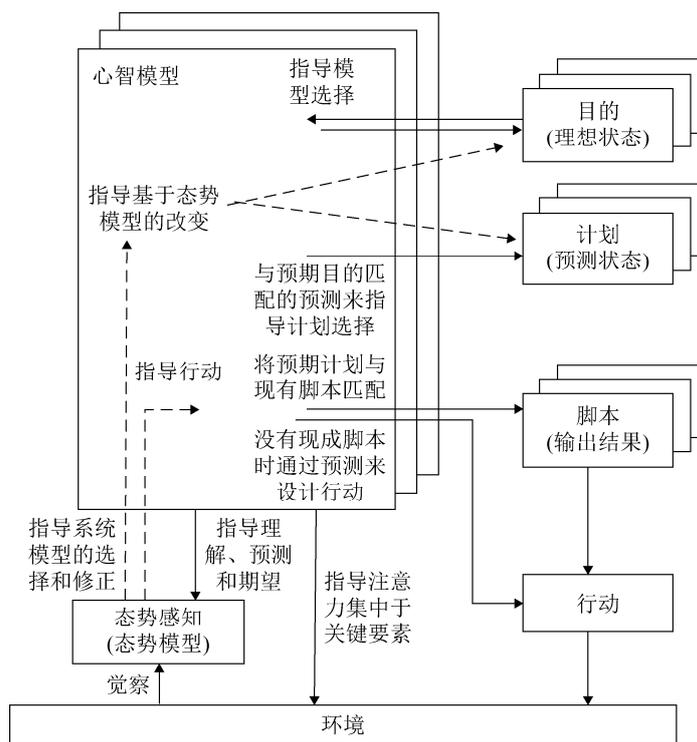


图 3 目的、心智模型与态势感知的关系^[5]
Fig. 3 Relationship between Goal, MM and SA

(2) 与目的(goal)的关系: 目的可视为希望能实现的理想状态。目的往往不止一个。当前目的, 是从互相竞争的一系列目的中被选出来的最重要的

一个, 用于选择与之相应的心智模型。多个目的互不矛盾时, 可以同时选择好几个; 不相容时, 其对应已知态势类别的相对优先性决定了该选择哪个。

目的会影响注意力指向。人观察当前环境状态时, 由当前目的选择对应的心智模型, 由心智模型来集中注意力到关键环境要素上。

(3) 与期望(expectation)的关系: 期望由当前的心智模型的预测机制产生, 存储在长期记忆中, 表明了信息的相对优先性以及信息变化频率。在一个环境中重复练习会使人形成对未来的期望。因此, 通过模拟任务可以形成期望, 并在真实的场景中自上而下影响注意力指向。

(4) 与预注意(pre-attentive)机制的关系: 按注意力是否介入, 可以区分成注意力尚未介入的预注意阶段, 以及注意力介入的注意阶段^[3]。预注意机制是自下而上处理信息的, 从环境中输入的基础信息最初由预注意感觉存储器快速、平行处理, 以发现颜色、位置、大小等简单特征, 为进一步集中注意力提供线索。随后, 基于预注意机制所抽取的特征, 最显著的要素会进一步被注意力机制处理, 予以关注从而这些要素会组成第一层态势觉察的基础。

(5) 与自动处理(automaticity)的关系: 将环境中的关键线索和已知态势模型中的要素进行匹配, 进而直接与长期记忆中已有的脚本(script)相关联, 直接检索合适的行动。自动处理能够克服注意力有限的问题, 能够在注意力分配最少下, 使得整体有良好的表现, 但是可能会存在忽视新状况的问题。

1.2 注意力机制建模方法研究

在注意力机制的理论研究基础上, 关于可计算模型和算法的研究也是方兴未艾, 最具有代表性的就是基于显著性的模型。Koch 等^[11]给出了一个选择性注意力计算模型, 首次提出了显著图(saliency maps)的概念, 通过颜色、方向等一系列基础特征构造一组特征图, 进一步融合形成一张中心显著图, 作为选择性视觉注意力的表达。Itti 等基于上述模型架构以及特征融合理论, 提出了基于显著性的视觉注意力模型。具体分为三个阶段: (1)把输入的图像通过线性滤波, 分成颜色、方向、亮度等 3 种特征图, 通过高斯滤波分别生成颜色、方向、亮度高斯

金字塔。(2)利用中央-周边差减算子, 在中心和周边所对应的特征金字塔分量图之间求差值, 得到各凸显图。(3)将凸显图进行归一化以及线性组合处理, 得到显著图, 通过“赢者通吃”(WTA)动态神经网络提取关注区域。该模型提出后成为选择性注意力计算模型的典型, 相继出现一系列对该模型的改进研究^[12-13]。Itti 模型是生物启发式模型, 但当前还未能完全了解人类视觉系统认知原理, 故该方法具有很大局限性。且该模型运算结果严重依赖于参数选取, 计算复杂, 资源消耗较大。

除了模拟人的认知过程, 还有探索利用数学方法建立注意力机制模型。提出基于频域分析的 SR 模型^[14], 通过去除原图像的冗余信息, 得到图像的显著区域。该方法计算速度快, 结果不依赖于参数选择, 但是频域转换到空域的显著图会丢失大量细节信息。Bruce 等认为^[15-16]人倾向于注意不可预测性较高的区域, 并提出第一个完全基于信息论的 AIM 视觉注意力模型, 通过计算该区域相对于整体的自信息来度量显著性。Zhang 等^[17]提出了显著性的定义 SUN, 自下而上进行目标搜索时显著性用自信息来度量, 自上而下的显著性则用互信息来度量。

除了显著性, 还有关于其他影响注意力分配的因素建模的研究。Wickens 等^[18-20]提出了 SEEV 模型, 认为信息显著性(S)、努力(EF)、期望(EX)、价值(V, 任务相关度)四个因素影响注意力的分配, 这四个因素的线性加权和就是对一个视觉区域给予注意的概率 $P(A)=sS-efEF+(exEX+vV)$ 。这是一个静态模型, 只能用来估计对不同感兴趣区域(AOI)给予的注意力在一个长期阶段平均分配的结果。其计算简单, 但是不能估计注意力分配随时间变化的结果。2007 年, Wickens 等^[21]又提出了一个动态的 A-SA 模型, 包括两个模块: (1) 注意力模块: 对应态势觉察阶段, 每个事件都有显著性和价值, 而事件发生频率决定了期望。显著性和期望决定每个事件受到多少注意。EF 防止注意力大幅转移。注意力会受到时间衰减的心理负载模型影响, 随着时间推进人注意力会自动减少。(2) 信念模块(Belief Module): 对应态势认知阶段, 被予以关注的事件会进入该模

块, 输入结果是一个态势感知(SA)值(0-1), 1 表明形成的 SA 很完美, 0 表明没有形成 SA。结果会通过期望反馈到注意力模块, 用于指导未来注意力的分配。动态 A-SA 模型可以多次迭代, 可估计注意力转移的平均频率, 以及每个感兴趣区域的注意力分配概率。吴旭等^[22] 基于混合熵最大化模型, 应用主观希望效能理论和 SEEV 模型的思想, 设计了注意力分配模型, 为设计飞机驾驶座舱提供参考。吴旭等^[23] 在此基础上又引入注意控制空间和资源分配空间的概念, 并通过空间映射建立注意力分配的预测模型, 用模糊层次分析法进行结算。

近两年, 注意力机制与深度神经网络结合, 被引入图像识别、自然语言处理等领域中, 并取得了很好的效果^[24-26]。

2 战场态势感知中的注意力机制研究

2.1 注意力机制框架

目前为止, 军事领域中的注意力机制研究主要集中在目标定位识别等方面^[27]。没有从指挥员指挥决策时进行态势感知的角度来研究注意力机制。实际上, 在作战过程中, 指挥员会倾向于关注重点作战目标、重点作战任务等, 并相应地在决策和行动上予以更多侧重。因此, 须对注意力机制内涵和作用范畴进行拓展。

基于心理学和态势感知理论中关于注意力机制的研究, 本文从指挥员进行战场态势感知的角度, 将注意力机制定义为: 在作战过程中, 指挥决策者将关注重心集中到关键的战场态势要素上的一种态势感知机制, 关注重心会随着作战进程而动态变化, 是为形成指挥决策者对于战场态势的高层次认知结果而服务, 并为后续决策和行动奠定基础。

战场态势感知中注意力机制有两个层面: (1) 指挥员作为个人, 本身就受视觉、听觉等注意力机制影响, 这也是一个研究的角度, 但属于心理学的研究范畴。(2) 从作战角度考虑, 指挥员在指挥作战时, 对于全局态势会有重点得予以关注。不同的指挥员会有性格、情绪等个体差异, 但是其对于战场局势的关注和认知有作战指挥的共性原则。而最

后落实到决策以及行动上的, 是指决策团体的群体性认知结果, 是不同决策个体之间差异经过冲突与协商得以解决及中和的结果。本文所研究的注意力机制, 旨在探索给定战场态势和作战任务条件下, 指挥决策群体判断要关注重点的内在逻辑和规律。

本文认为, 战场态势感知中的注意力机制有两种(见图 4), 自上而下的目的驱动式(Goal-Driven, GD)和自下而上的数据驱动式(Data-Driven, DD)。体现为两类模型: 目的驱动注意模型(GD-AM)和数据驱动注意模型(DD-AM)。注意模型都由心智模型(Mental Model, MM)指导而作用到态势感知模型(SA)上。即, 作战目的和任务、战场数据等通过心智模型指导注意模型, 从而才能影响态势感知。注意力机制作用于两个阶段:

(1) 形成觉察态势(SP)阶段: 是目的一数据双驱动的注意力分配流程。

自下而上的战场数据驱动: 类似于预注意机制, 在对不同传感器搜集的多源异构的初始战场数据进行预处理的过程中, 发现位置、方向等简单特征, 作为进一步融合数据形成态势的基础。而错误、冗余的数据直接被清洗掉。

自上而下的目的驱动: 根据作战目的和作战任务选择要予以关注的战场数据, 作为形成觉察态势的基础。例如, 军种指挥员会根据自己军种的任务, 在通用态势图(觉察态势产品)上隐去与本军种无关的信息。

(2) 形成认知态势(SC)阶段: 是目的一数据双驱动的注意力分配流程。

自下而上的态势数据驱动: 根据当前已有的觉察态势(通用态势图), 对态势信息上凸显的重点予以更多关注(包括对我威胁大的临机目标、战场突发的意外情况等)。

自上而下的目的驱动: 根据当前的作战目的和任务, 对相关的重点予以更多关注(包括重点目标、重点行动、重点地域等)。

要强调的是, 心智模型(MM)体现指挥者的心理个性, 而态势感知模型(SA)体现指挥者的认知共性。例如, 在作战时, 指挥者都遵循指挥决策的基

本认知规律,但也会根据保守或是激进的个性,倾向于不同的关注点,从而产生不同的认知结果。而

对战场态势的认知结果又会修正指挥者的心态。整体形成了一个动态的闭环。

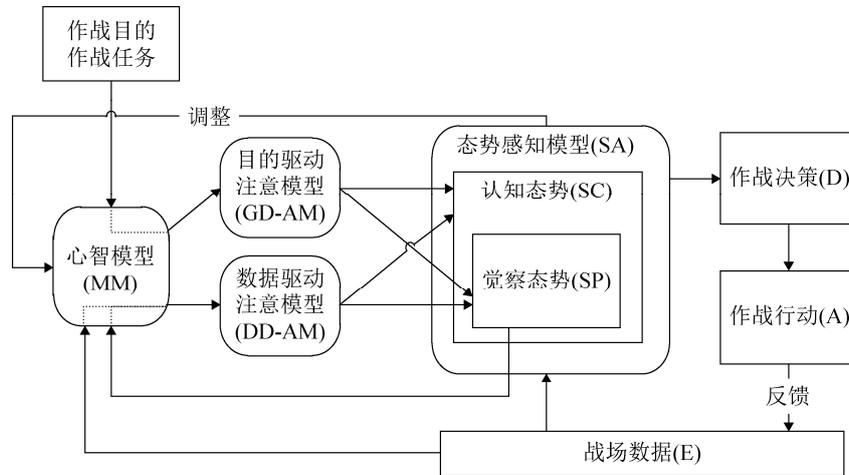


图 4 战场态势感知中的注意力机制示意图

Fig. 4 Battlefield situation awareness attention model

2.2 作战目标价值评估

形成认知态势阶段的注意力机制应该是研究的重点。具体可以从基于注意力机制的作战目标价值评估问题切入。

目标价值评估,就是对作战地域内的目标进行分析、权衡,得到目标价值结果,以便进一步形成目标打击清单的一种认知活动,贯穿于作战的整个过程。目标价值评估受指挥员主观认知影响,得到的目标价值结果体现了指挥员对目标的群体认知。在当前信息化条件下,指挥员从错综复杂的战场态势中快速准确地认知目标并实施有效指挥控制,将目标认知优势转化为决策优势进而变为行动优势,已经成为制胜关键。因此,研究基于注意力机制目标价值评估方法不仅是研究战场态势感知机制的一个入口,更是辅助指挥决策的迫切需要。

目前为止,国内已有大量关于目标价值评估方法的研究。主要包括使用专家打分法、层次分析法、模糊综合评判法、灰色关联法等多种方法用于目标价值评估。经过二十年的发展,目标价值评估领域所用的基本方法仍旧以这些为主,在具体算法上做了优化^[28-30]。这些主要是基于小样本和还原论的分析方法,只能适用于战术层次目标较少的想定下,以及不涉及作战过程的静态分析,难以有效应对数

据爆炸增长、作战节奏“秒杀”、参战力量跨域交互的复杂信息化战争。因此,研究基于注意力机制的目标价值评估需要探索新的技术方法,必须要综合体现客观评估标准,以及指挥员主观的认知判断。

3 结论

本文基于心理学和态势感知理论对注意力机制的研究,从战场态势感知的角度重新定义了注意力机制的概念,并提出了一个框架。形成认知态势阶段的注意力机制应该是今后的研究重点,可以从基于注意力机制的作战目标价值评估研究展开。根据形成认知态势阶段的任务-数据双驱动流程,探索自下而上的目标威胁度定义及评估方法,以及自上而下的目标与作战任务关联度评估方法。而自上而下的任务关联分析难度比较大。

从注意力机制入手,开展指挥员战场态势感知的机制研究,不仅可以从理论上厘清指挥员指挥决策过程中进行态势感知的机理,还可以为将来设计智能认知模型与算法,辅助指挥员进行态势感知奠定基础。

参考文献:

- [1] Hoffman R. Origins of Situation Awareness: Cautionary Tales from the History of Concepts of Attention [J].

- Journal of Cognitive Engineering & Decision Making (S1555-3434), 2015, 9(1): 73-83.
- [2] 贝斯特. 认知心理学 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000. (Best J B. Cognitive Psychology [M]. Beijing, China: China Light Industry Press, 2000.)
- [3] 陈焯之. 认知心理学 [M]. 广东: 广东高等教育出版社, 2006. (Chen Hengzhi. Cognitive Psychology [M]. Guangdong, China: Guangdong Higher Education Press, 2006.)
- [4] Endsley M R. Design and Evaluation for Situation Awareness Enhancement [J]. Human Factors & Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings (S1071-1813), 1988, 32: 97-101.
- [5] Endsley M R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society (S0018-7208), 1995, 37(1): 32-64.
- [6] Endsley M, Jones W M. Situation Awareness Information Dominance & Information Warfare [R/OL]. (1997) [2017-08-30]. https://www.researchgate.net/publication/235167825_Situation_Awareness_Information_Dominance_Information_Warfare.
- [7] Endsley M R. Theoretical Underpinnings of Situation Awareness: A Critical Review [J/OL]. (2000) [2017-08-30]. https://www.researchgate.net/publication/230745477_Theoretical_underpinnings_of_situation_awareness_A_critical_review.
- [8] Endsley M R. Situation Awareness Misconceptions and Misunderstandings [J]. Journal of Cognitive Engineering & Decision Making (S1555-3434), 2015, 9(1): 4-32.
- [9] Salmon P M, Walker G H, Ladva D, et al. Measuring Situation Awareness during Command and Control Activity: A Comparison of Measures Study [C]// European Conference on Cognitive Ergonomics: Invent! Explore!, London, UK, 2007: 27-34.
- [10] Endsley M R. Designing for Situation Awareness in Complex System [J/OL]. (2001) [2017-08-30]. https://www.researchgate.net/publication/238653506_Designing_for_situation_awareness_in_complex_system.
- [11] Koch C, Ullman S. Shifts in Selective Visual Attention: Towards the Underlying Neural Circuitry[J]. Matters of Intelligence. Springer Netherlands, 1987, 4 (4): 219.
- [12] Wang Y, Fan X, Li H, et al. A Hybrid Visual Attention Method Based on Itti Model [C]// Digital Media and Digital Content Management. IEEE, 2011: 261-265.
- [13] He D, Zhang Y, Song H. A Novel Saliency Map Extraction Method Based on Improved Itti's Model [C]// International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering (cctae 2010), 2010: 323-327.
- [14] Hou X, Zhang L. Saliency Detection: A Spectral Residual Approach[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2007: 1-8.
- [15] Bruce N D B, Tsotsos J K. Saliency Based on Information Maximization[C]// International Conference on Neural Information Processing Systems. MIT Press, 2005: 155-162.
- [16] Bruce N D B. Saliency, Attention and Visual Search: an Information Theoretic Approach [J]. Journal of Vision (S1534-7362), 2009, 9(3): 1-24.
- [17] Zhang L, Tong M H, Marks T K, et al. SUN: A Bayesian framework for saliency using natural statistics [J]. Journal of Vision (S1534-7362), 2008, 8(7): 1-20.
- [18] Horrey W J, Wickens C D, Consalus K P. Modeling Drivers' Visual Attention Allocation While Interacting With In-Vehicle Technologies [J]. Journal of Experimental Psychology Applied (S1076-898X), 2006, 12(2): 67-78.
- [19] Wickens C D, Goh J, Helleberg J, et al. Attentional Models of Multitask Pilot Performance Using Advanced Display Technology [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society (S0018-7208), 2003, 45(3): 360-380.
- [20] Wickens C D, Helleberg J, Goh J, et al. Pilot Task Management: Testing an Attentional Expected Value Model of Visual Scanning [J/OL]. (2001) [2017-08-30]. <http://usd-apps.usd.edu/coglab/schieber/psyc792/workload/Wickens-etal-2001.pdf>.
- [21] Wickens C D, Mccarley J S, Alexander A L. Attention-Situation Awareness (A-SA) Model of Pilot Error [J/OL]. (2007) [2017-08-30]. https://www.researchgate.net/publication/249884590_Attention-Situation_Awareness_ASA_Model_of_Pilot_Error.
- [22] 吴旭, 完颜笑如, 庄达民. 多因素条件下注意力分配建模 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1086-1090. (Wu Xu, Wanyan Xiaoru, Zhuang Damin. Attention Allocation Modeling under Multi-Factor Condition [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 39(8): 1086-1090.)
- [23] 吴旭, 完颜笑如, 庄达民. 基于空间映射的视觉注意力分配预测模型 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12): 1713-1718. (Wu Xu, Wanyan Xiaoru, Zhuang Damin. Pilot Visual Attention Allocation Modeling Based on Spatial Mapping [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 40(12): 1713-1718.)

(下转第 2246 页)

<http://www.china-simulation.com>

• 2240 •