

文章编号:1674-8190(2023)01-027-11

## 飞行员情境意识定量测量研究综述

白雪<sup>1,2</sup>, 张丽霞<sup>2,3</sup>, 肖玮<sup>1</sup>, 吴迪<sup>1</sup>, 周悦<sup>1</sup>

(1.空军军医大学 军事医学心理学系, 西安 710032)

(2.陕西中医药大学 公共卫生学院, 西安 712046)

(3.北京大学 回龙观临床医学院, 北京 100096)

**摘要:** 情境意识是飞行员驾驶飞机所需的关键能力之一,而量化评估飞行员的情境意识则是许多研究关注的重点。为了厘清过往飞行员情境意识方面的研究,本文首先总结了六种传统测量方式,包括冻结探测技术、实时探测技术、实验后自评技术、观察者评分技术、绩效表现评估及生理指标评估;然后,介绍了采用数学建模测量飞行员情境意识的方式,这种测量方式更加精细,且具有很强的预测性;最后,详细总结归纳了飞行员情境意识的过往研究中所采用的主要测量手段,对其发展方向进行展望,为该领域的后续研究提供了一定参考。

**关键词:** 情境意识;航空飞行;心理测量;定量分析;数学建模

中图分类号: V328

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.01.03

### Review of research on quantitative assessment of pilots' situation awareness

BAI Xue<sup>1,2</sup>, ZHANG Lixia<sup>2,3</sup>, XIAO Wei<sup>1</sup>, WU Di<sup>1</sup>, ZHOU Yue<sup>1</sup>

(1. Department of Military Medical Psychology, Air Force Military Medical University, Xi'an 710032, China)

(2. School of Public Health, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xi'an 712046, China)

(3. School of Huilongguan Clinical Medicine, Peking University, Beijing 100096, China)

**Abstract:** Situation awareness is one of the key competencies required by pilots to fly aircraft, and quantitative assessment of pilots' situation awareness is the focus of many studies. To clarify past research on pilots' situation awareness, six traditional measurement approaches are firstly summarized in this paper, including freeze-probe technique, real-time probe technique, post-trial self-rating technique, observer scoring technique, performance evaluation and physiological index evaluation. Secondly, a mathematical modeling approach is introduced to measure pilots' situation awareness, which is more refined and highly predictive. Finally, a detailed summary of the main measures used in past studies of pilots' situation awareness is summarized, and its development direction is discussed to provide some reference for subsequent research in this area.

**Key words:** situation awareness; aviation flight; psychometrics; quantitative analysis; mathematical modeling

收稿日期: 2022-02-21; 修回日期: 2022-07-31

基金项目: “十三五”军队后勤科研计划重点项目(BWS16J012); 空军军医大学航空医学重大问题科技攻关项目(2019ZTD05)

通信作者: 肖玮, xiaowei7304@outlook.com

引用格式: 白雪, 张丽霞, 肖玮, 等. 飞行员情境意识定量测量研究综述[J]. 航空工程进展, 2023, 14(1): 27-37.

BAI Xue, ZHANG Lixia, XIAO Wei, et al. Review of research on quantitative assessment of pilots' situation awareness[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(1): 27-37. (in Chinese)

## 0 引言

“知其然,知其所以然”——这句话是情境意识(Situation Awareness,简称SA)最好的写照之一。1995年,M. R. Endsley<sup>[1]</sup>系统性地总结了情境意识的过往研究成果,建立了动态决策中的情境意识模型,将研究推进到了更加广泛而复杂的层面。目前,情境意识的概念为在一定的时间和空间内,对情境中元素的感知(Perception),对其意义的理解(Comprehension)以及对将来的预测(Projection)<sup>[2]</sup>。如果进行进一步地阐述,“感知”指对关键信息的观察,“理解”是对关键信息的整合和解释,而“预测”则是对未来事件的推断和估计<sup>[3]</sup>。这一领域的研究脉络在心理学<sup>[4]</sup>、医学<sup>[5]</sup>、交通运输<sup>[6]</sup>等学科的交织推进之中延续至今,不仅横贯军事<sup>[7]</sup>、体育<sup>[8]</sup>、航空<sup>[9]</sup>、急救<sup>[10]</sup>等多个方向,还发展出了个人<sup>[1,11]</sup>、团体<sup>[12-13]</sup>和系统<sup>[14-16]</sup>等一系列纵向研究。

尽管情境意识的研究已经涉及许多领域,但航空飞行中的情境意识仍然是不少研究者关注的重点。波音公司的统计数据 displays,从1999—2008年,全球商业航空喷气式飞机造成死亡的事故有50%发生在进近着陆期间,而情境意识的丧失是造成可控飞行撞地(CFIT)的主要原因之一<sup>[17]</sup>。因此,增强情境意识一直是飞行训练中的重点项目之一。历史的经验教训使得航空业不断加强对飞行安全的管理训练,虽然努力初见成效,但全世界仍有70%的航空事故/事件是由飞行员的行为失误造成的<sup>[18]</sup>。自20世纪20年代到21世纪初,可控飞行撞地已经导致超35 000人的死亡<sup>[19]</sup>。因此,测量和评估飞行员的情境意识是必要的,因为这直接关系到飞行员的飞行表现乃至航空业的安全运行<sup>[20-22]</sup>。

本文以飞行员情境意识为核心,总结了六种传统的测量方法,虽然这些方法各有优缺点,但都能在一定程度上满足量化的需求;聚焦于数学建模这种系统化的途径,总结了近年来飞行员情境意识测量的新进展。

## 1 传统情境意识评估方式

研究的科学性很大一部分在于其可量化性,只有用数字精确衡量某种特质或状态,才能对这

种特质或状态进行进一步的研究。因此,情境意识的量化,一直是该领域中的关注重点,本文具体介绍情境意识测量在研究中的应用,根据这些应用的共同点和差异性,将其分为六大测量技术。

### 1.1 冻结探测技术

在飞行训练时,按照设定好的程序冻结(显示器黑屏)模拟任务,询问被试者一系列与情境意识相关的问题,被试者根据对当前情境(“冻结点”)的认知和理解来回答问题。主试者将被试者的回答与实际情况相比较,量化评估情境意识分数。在探测飞行员情境意识的研究中,常用的冻结探测技术为情境意识全面评估技术(Situation Awareness Global Assessment Technique,简称SAGAT)<sup>[3,23-24]</sup>,自1988年提出后,在情境意识测量领域内得到了广泛的应用。S. Cak等<sup>[25]</sup>招募36名飞行员,采用情境意识全面评估技术评估他们在飞行中的表现,结果显示这种技术可以有效探测出飞行员对于飞行环境的了解程度,飞行员的工作记忆和专业水平可以显著预测SAGAT的得分;S. Mamessier等<sup>[26]</sup>通过校准在线情境意识评估系统和对情境意识认知过程的测量模型,充分验证了SAGAT的可靠性和虚拟技术对现实的重构能力;M. P. Snow等<sup>[27]</sup>为了对比SAGAT(客观)与情境意识主观工作负荷测验(Situation Awareness-Subjective Workload Dominance Technique,简称SA-SWORD)(主观)技术之间的差别,招募12名飞行员在仿真模拟的驾驶环境中进行航行的检测,结果证明,这两种方式都能够预测飞行员的表现情况。

冻结探测技术广泛应用于情境意识的测量中,既能消除实验后收集数据的麻烦,又能减少因被试者的主观情况而带来的问题。然而,这种评估方式也有其缺点:一是,冻结对任务的高度干扰使得实验难以在现实中开展;二是,这种技术的有效性还待进一步考证,该技术评估的不是情境意识,而是工作记忆。随着这门技术在各类情境意识研究中的不断发展,虽然研究者提出了一些改进措施,但仍然没有很好地解决“冻结”的应用问题。

### 1.2 实时探测技术

专家在任务前或任务中准备问题,于特定的

时间点发问,记录被试者的回答和反应时,然后换算出他们的情境意识得分。目前,在飞行员情境意识测量的领域,实时探测技术主要为情境即时评估技术(Situation Present Assessment Method,简称SPAM)<sup>[23,28]</sup>。在前面的表述中,讨论了情境意识全面评估技术的应用情况,而情境即时评估技术同样不遑多让,专业知识、注意广度和抑制控制可以预测飞行员在SPAM的得分情况<sup>[25]</sup>。将SPAM与SAGAT结合使用可全面测量情境意识,因此对于情境意识的测量,实时探测技术同样不可或缺。

实时探测技术的主要指标为被试者的反应时间和准确性。与冻结探测技术所采用的任务不同,实时探测技术会在探测前给被试者提示,让他们思考后再回答。实时探测技术可以即时提问,剔除了冻结带来的影响。但是,由于问题还是在任务中出现的,依然无法确定侵入性降低了多少;另外,问题可能会引导被试者注意到相关信息,造成结果上的偏差<sup>[29]</sup>;而且,问题必须根据任务情况产生,因此很难在变化的真实情境中应用这些技术;这种方式难以在团队情境意识或共享情境意识的评估中应用。

### 1.3 实验后自评技术

在任务执行后,根据评分表上的指标,每个被试者对自己的情境意识进行主观评估。实验后自评技术有许多具体的评估方法,包括情境意识评分技术(Situation Awareness Rating Technique,简称SART)<sup>[30]</sup>、情境意识评分量表技术(Situation Awareness Rating Scales Technique,简称SARS)<sup>[31]</sup>、克兰菲尔德情境意识量表(Cranfield Situation Awareness Scale,简称CSAS)<sup>[32]</sup>、机组意识评分量表(Crew Awareness Rating Scale,简称CARS)<sup>[33-34]</sup>、任务意识评分量表(Mission Awareness Rating Scale,简称MARS)<sup>[35]</sup>和情境意识定量分析(Quantitative Analysis of Situational Awareness,简称QUASA或QASA)模型<sup>[36-37]</sup>。T. Z. Strybel等<sup>[38]</sup>通过仿真模拟的方式,要求仪表飞行员在达拉斯—沃斯堡(Dallas-Fort Worth)机场完成自动ILS进近的同时,监测进近路线附近的车辆运行状态。所设计的某些探测问题可以预测情境意识评分技术的分数,但有效性还需要结合情境

的发展具体考量。P. M. Salmon等<sup>[39]</sup>详细讨论了克兰菲尔德情境意识量表(CSAS)在分布式情境意识测量中的作用,证明其在定量研究中的价值性;H. Van Dijk等<sup>[40]</sup>在通用研究飞机驾驶舱环境中进行模拟飞行,将眼动轨迹测量、瞬时自我评估量表(Instantaneous Self-Assessment rating scale,简称ISA)与机组意识评分量表(CARS)结合起来,以空速差异为假设故障,明确了在飞行中机组对危机情境的认知变化;G. K. Edgar等<sup>[37]</sup>在信号检测论的基础上构建了情境意识定量分析模型,验证了主观情境意识与客观情境意识的相关性。

该技术的优点是快速易用,对任务没有任何干扰,不需要邀请专家人员,也不需要昂贵的模拟器,更不需要进行复杂的训练准备——这样就大幅降低了施测的成本。而且,在团队情境意识的评估中,每个团队成员可以采用实验后自评技术评价自我的表现<sup>[41]</sup>。然而,这种技术也有一些问题:首先,评估时被试者可能会遗忘自己的不佳表现,给予自己良好的评价<sup>[3]</sup>;其次,人类的记忆会随着时间而消退变化,实验后自评技术只能在任务结束后不久的时间内使用;最后,自我评价易受个体影响,如果被试者的情境意识先天不良,那么他就很难准确评价自己的情况,因为他可能从未了解到好的情境意识是什么样的。

### 1.4 观察者评分技术

在任务中,专家通过观察被试者表现来评定等级。主要使用的量表为情境意识行为评级表(Situation Awareness Behavioral Rating System,简称SABARS)<sup>[35]</sup>、情境意识评估系统(Situation Awareness Rating System,简称SARS)<sup>[42]</sup>、情境意识支持系统(Situation Awareness Support System,简称SASS)<sup>[43]</sup>和触觉情境意识系统<sup>[44]</sup>(Tactile Situation Awareness System,简称TSAS)。专家使用情境意识行为评级表有效预测了个人的决策和绩效水平,可作为一种培训评估工具使用。另外,为了讨论航空飞行中的重大危险情况,J. C. Brill等<sup>[44]</sup>开发了触觉情境意识系统(TSAS),有望帮助听力受损的直升机飞行员实现悬停定位,避免事故后进一步造成不可挽回的生命和财产损失。

观察者评分技术的主要优点是非侵入性和真实性(可以在真实生活场景中使用)。但是,无法

确定建立情境意识的内部过程,是这项技术的一个问题;另外,表现好不等同于情境意识良好,观察到的行为不能解释情境意识的真实情况;而且,如果观察无法单盲,则可能产生霍桑效应,被试者会因主试者的观察而改变自己的行为;此外,这项技术需要较长时间内由多个专家共同参与,成本较高。

### 1.5 绩效表现评估

绩效表现评估比其他技术更加实用。主试者可以根据任务不同,选取衡量绩效的几个标准,建立评分体系,获得被试者的成绩,间接测量情境意识。P. M. Salmon等<sup>[45]</sup>以法航447为例,用情境意识评估系统详细分析了整个机舱的情境意识的崩溃过程;M. Naderpour等<sup>[43]</sup>为了确保航空安全系统的运行安全,采用情境意识支持系统来处理不确定的情况。这种非侵入的测量直接以任务的完成情况作为参考情况,通常为其他技术的辅助指标。然而,假设好的表现对应好的情境意识,反之亦然——对于一个经验丰富的被试来说,即使他的情境意识不良,也可能表现不错。相反,新手由于缺乏经验,可能情境意识好,但表现还是较差。

### 1.6 生理指标评估

生理指标评估可以辅助展现被试者建立情境意识的过程,眼动轨迹<sup>[46-48]</sup>和脑电图<sup>[49-50]</sup>是常用的生理指标。眼动轨迹可以确定被试者关注的情境元素,评估被试者的注意力分配,而脑电图可以用于测量不同脑区对情境的处理情况。C. M. Muehlethaler等<sup>[51]</sup>采用眼动设备采集飞行学员对当前情境的关注点,帮助飞行教练实时捕捉飞行学员的行动状态;S. A. Hernández等<sup>[52]</sup>采用了脑电图(EEG)测量飞行员工作负荷的表征情况,可分类任务中不同心理工作负荷的EEG特征;E. R. Saus等<sup>[53]</sup>研究了心率变异性(HRV)与情境意识的相关情况,通过飞行模拟器测试了飞行学员表现与情境意识之间的关系。

这种方式也有其缺点,首先,测量该类数据可能会受设备的限制,而且大量的数据分析占据了主试者的精力;其次,它的机动性较差,很难在实验室之外使用专业设备;最后,这类指标的测量有“只看不察”(Look But Not See)的特点<sup>[54]</sup>,被试者可能仅是看到某个情境元素,但没有感知到它。

六种传统测量方式总结如表1所示。

表1 情境意识六种传统测量方式  
Table 1 Six traditional measures of situation awareness

测量方式	具体项目	基本过程	优点	缺点
冻结探测技术	情境意识全面评估技术	按照设定好的程序冻结模拟任务,询问被试一系列与情境意识相关的问题	消除实验后收集数据的麻烦,还减少了因被试者的主观情况而带来的问题	难以在现实应用;有效性还需要进一步考证
实时探测技术	情境意识即时评估技术	专家在任务前或任务中准备问题,于特定的时间点发问	即时提问,部分剔除了冻结带来的影响	难以在现实中应用;无法确定侵入性的降低程度;有一定的暗示性;难以评估团队情境意识或共享情境意识
实验后自评技术	情境意识评分技术、情境意识评分量表技术、克兰菲尔德情境意识量表、机组意识评分量表、任务意识评分量表和情境意识定量分析模型	被试者根据评分表上的指标主观评估自己的情境意识	快速易用,对任务没有干扰;可以用于团队情境意识评估	有自我评价偏差;必须在任务结束后马上使用;自我评价易受个体影响
观察者评分技术	情境意识行为评级表、情境意识评估系统、情境意识支持系统和触觉情境意识系统	任务中,专家通过观察被试者表现来评定等级	非侵入;可在现实生活中使用	无法确定建立情境意识的内部过程;不能完全解释情境意识的真实情况;可能产生霍桑效应;成本较高
绩效表现评估	通常为其他技术的辅助指标	选取衡量绩效的标准评价被试者表现	以任务的完成情况为参考,通常为其他技术的辅助指标	受被试者的经验影响较大
生理指标评估	眼动轨迹、脑电图	眼动轨迹评估被试者的注意力分配;脑电图测量不同脑区对情境的处理情况	可探索建立情境意识的过程	设备机动性较差;数据分析不易;被试容易“只看不察”

## 2 定量评估情境意识的新进展

经典测量方式支持了过往很多情境意识的研究,近年来许多研究者将其组合、衍生,产生了新的测量方法,力求能够对情境意识做出更加精确的评估。

### 2.1 生理指标的应用

基于研究者初步开发出的眼动轨迹和脑电图这两种测量方式。在研究的不断前进中,研究者越来越倾向于将生理指标结合起来,进行进一步应用方面的探索。G. F. Wilson<sup>[55]</sup>指出,心理生理学的客观性和连续性能够和情境意识的研究很好地结合在一起;J. L. Lobo等<sup>[56]</sup>将眼动轨迹与EEG互相结合,根据飞行员的状态和表现进行不同级别的情境认知分类,未来可用以飞行员情境意识的告警和预测;F. H. Tim等<sup>[57]</sup>采用连续的EEG评估三阶段情境意识,结果显示这种措施可以显著区分不同阶段的情境意识;A. Ziccardi等<sup>[58]</sup>采用ERP分析不同年龄的飞行员听觉情境意识差别。结果表明,年长飞行员在情境意识任务上的表现更差,且更不能从高音调的无线电中获取信息。另外,在通用航空领域,A. Ziccardi等<sup>[59]</sup>提出了听觉可视化的改善措施;K. A. Gluck等<sup>[60]</sup>将眼动与言语记录相结合,验证飞行员的认知模型。在驾驶飞机时,主试者要求被试者大声说出思考过程,并对这些内容进行转录和编码。这一方法还用于驾驶<sup>[61-62]</sup>、手动操作<sup>[63]</sup>和信任的形成过程<sup>[64]</sup>的研究上。

### 2.2 数学建模的应用

与以上研究不同,还有一些研究主要通过数学建模的方式来精确量化情境意识。这种研究方式的优点在于能够用数字清晰地仿真模拟出真实情境下的可能情况,给出明确的量化数据,使研究者能够直观地看到不同阶段的变化;然而,这种研究方法也有其不足之处,由于模型的初始建立往往基于某一种特定的理论,因此在建模完成后,模型的使用会受到条件限制,并非适用于所有情境。

A. Kirlik等<sup>[65]</sup>认为,情境意识是感知与真实环境之间的对应程度,研究将情境意识分解成7个测量部分进行量化,即:

$$S_s = (R_{OT} V_{TX} G V_{UX} R_{YU})^2 - [r_{Y0} - (S_Y/S_0)]^2 - [(\bar{Y} - \bar{O})/S_0]^2 \quad (1)$$

式中: $S_s$ 为情境意识得分; $R_{OT}$ 为环境的可预测性; $V_{TX}$ 为模拟系统的仿真度; $G$ 为对所在环境具有的知识; $V_{UX}$ 为信息获取的一致性; $R_{YU}$ 为信息处理的一致性; $[r_{Y0} - (S_Y/S_0)]^2$ 为回归偏差; $[(\bar{Y} - \bar{O})/S_0]^2$ 为基本率偏差。

该研究讨论了该模型和测量方法对现有的情境意识模型、人机交互模型和自然决策模型的补充作用。另外,H. B. Yim等<sup>[66]</sup>基于贝叶斯理论,用持续记忆、不持续记忆和推理转换三个元素建立了情境意识图形计算模型(Computational Representation of Situation Awareness with Graphical Expressions,简称CoRSAGE),结果证明该模型对假设情境的变化有很好的仿真拟合作用。

在航空飞行中,飞行员对外界环境的错误感知使得飞行事故不断发生,为了解决这类问题,D. Foyle等<sup>[67]</sup>提出了注意力情境意识(Attention-Situation Awareness,简称A-SA)的概念,其中包括注意力分配和未来状态推断两个部分,公式为

$$P(A) = sS - efE_F + (exE_X \times vV) \quad (2)$$

式中: $P(A)$ 为注意到某事件的概率; $S$ 为引起注意的事件; $E_F$ 为转移注意力所需要的努力; $E_X$ 和 $V$ 为在某环境中注意到有价值事件的期望。

在此基础上,C. D. Wickens等<sup>[68]</sup>在飞机滑行的情况下,结合由综合视觉系统支持的情境意识和重审后的综合视觉系统模型将模型修正为

$$P(A) = sS - efE_F + (exE_X + vV) \quad (3)$$

在注意力情境意识的研究中,B. Mcguinness<sup>[36]</sup>引入了感知自信这一维度,结合情境意识全面评估技术,衡量被试者对于环境内元素的真实感知情况;G. K. Edgar等<sup>[37]</sup>则采用信号检测论的原理,探索了实际情境意识和感知情境意识之间的关系;B. L. Hooey等<sup>[69]</sup>采用情境元素(Situation Element,简称SE)搭建模型,情境意识由被试者感知理解的情境元素数量(实际情境意识)和完成任务所需的情境元素数量(最佳情境意识)之间的比率衡量,这个数值介于0(无情境意识)和1(情境意识最好)之间,代表已知情境元素的比例,即:

$$S_{ARatio}(t_i) = S_{AActual}(t_i) / S_{Aoptimal}(t_i) \quad (4)$$

式中： $t_i$ 为某时间段内； $S_{AActual}(t_i)$ 为实际情境意识； $S_{Aoptimal}(t_i)$ 为最佳情境意识。

该情境意识模型在研究中得到了验证，实验表明，模型可以很敏感地探测出显示设计和飞行员感受之间的差异。这项研究的初步结果证明，基于该模型开发的工具可以用于探测不同程序和显示设计下的情境意识。

Liu S 等<sup>[70]</sup>根据注意力分配模型(Attention Allocation Model)研究了信息重要程度、情境元素的认知状态和贝叶斯条件概率论对情境意识的作用情况。在时间  $t$ ，情境意识可以通过注意力分配量化如下：

$$S_A(t_j) = \sum_{i=1}^n u_i \bar{p}_i = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - 0.5k_i) u_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

式中： $u_i$ 为任务重要性； $\bar{p}_i$ 为期望认知水平； $k_i$ 为不能理解同期发生事件的概率； $A_i$ 为分配给某一情境元素的注意力资源。

该模型预测的情境意识与操作表现、测量指标的正确率和生理评估指标有很大的相关性<sup>[70]</sup>，该模型可以预测任务中情境意识的变化趋势。

将注意力分配模型进一步扩展和优化，加入认知过程分析，诠释了情境意识的理性思维适应性调控(Adaptive Control of Thought-Rational, 简称 ACT-R)的内部过程，理性思维适应性调控和飞行员三阶段情境意识之间的关系如图 1 所示。

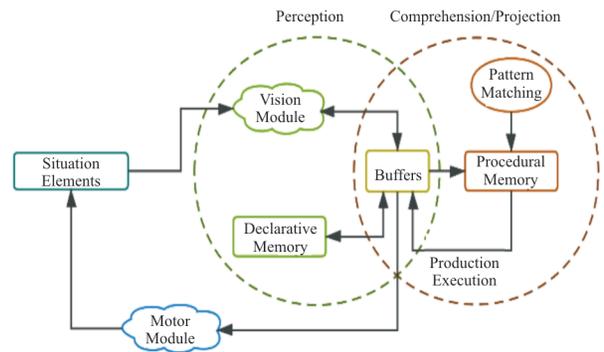


图 1 理性思维适应性调控和情境意识之间的关系<sup>[70]</sup>  
Fig. 1 The relationship between ACT-R and situation awareness<sup>[70]</sup>

视觉模块(Vision Module)接收到情境元素所蕴含的信息,这些信息经过选择性注意(Selective Attention)过滤,记录在短期感觉存储器中。缓冲区域(Buffers)获得相应的信息,就在陈述性记忆(Declarative Memory)中搜寻合适的内容,当这些信息的激活水平大于一定阈值,搜寻成功,被试者才会感知到情境元素的存在。和陈述性记忆不同的是,程序性记忆(Procedural Memory)储存着行为的执行模式,当感知到的信息与缓冲区域的内容相符合时,模式匹配(Pattern Matching)就会从程序性记忆中选择相应的模式执行对应的行为,即以特有的运动模式(Motor Module)在客观实在的世界中采用一系列行动,对情境元素进行下一步作用,具体加工过程如图 2 所示。

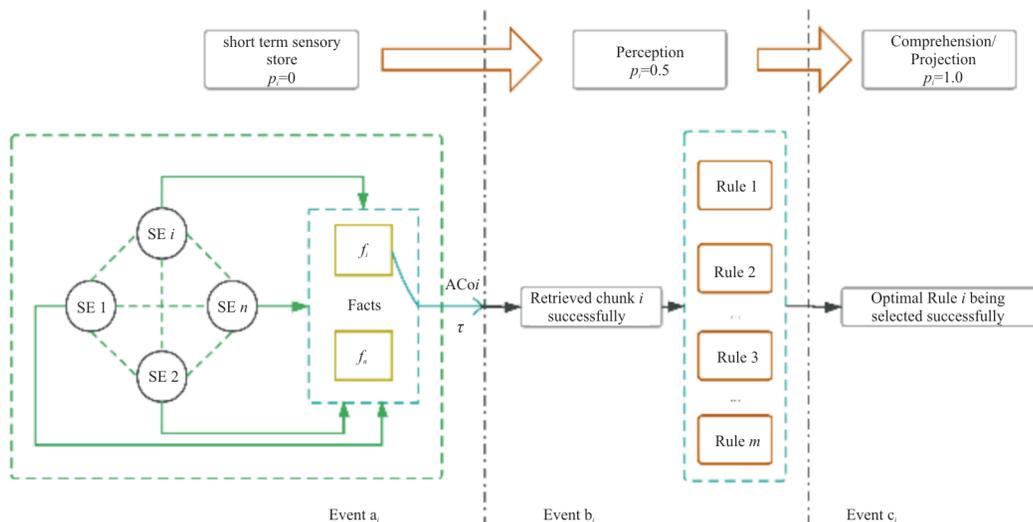


图 2 情境意识加工模型<sup>[23]</sup>  
Fig. 2 Situation awareness processing model<sup>[23]</sup>

$$S_A = \sum_{i=1}^n e_i \bar{p}_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{e^{U_i/\theta}}{\sum e^{U_i/\theta}} + 0.5 \right) \times \frac{u_i f_i}{1 + e^{-(A_{Ci} - \tau)/s}} \quad (6)$$

式中:  $\bar{p}_i$  为期望认知水平;  $U_i$  为效用最大的规则;  $u_i$  为任务重要性;  $f_j$  为情境元素分配的注意力比例;  $A_{Ci}$  为激活级别;  $\tau=1.0$ 。

为了验证这个模型, Liu S 等<sup>[70]</sup>、Chen H 等<sup>[71]</sup>使用了四种方式来测量情境意识, 包括冻结探测技术、实验后自评技术、绩效表现评估和生理评估指标。实证结果表明, 该情境意识模型可以准确测量飞行员的表现情况。

飞行员情境意识建模测量方式如表 2 所示。

表 2 飞行员情境意识建模测量方式  
Table 2 Pilot situation awareness model measures

模型原理	公式	变量参数	应用
感知与真实环境之间的对应程度	$S_S = (R_{OT} V_{TX} G V_{UX} R_{YU})^2 - [r_{YO} - (S_Y/S_O)]^2 - [(\bar{Y} - \bar{O})/S_O]^2$	$S_S$ : 情境意识得分 $R_{OT}$ : 环境的可预测性 $V_{TX}$ : 模拟系统的仿真度 $G$ : 对所在环境具有的知识 $V_{UX}$ : 信息获取的一致性 $R_{YU}$ : 信息处理的一致性 $[r_{YO} - (S_Y/S_O)]^2$ : 回归偏差 $[(\bar{Y} - \bar{O})/S_O]^2$ : 基本率偏差	该模型和测量方法对现有的情境意识模型、人机交互模型和自然决策模型有一定补充作用
注意力情境意识	$P(A) = sS - efE_F + (exE_X \times vV)$ $P(A) = sS - efE_F + (exE_X + vV)$	$P(A)$ : 注意到某事件的概率 $S$ : 引起注意的事件 $E_F$ : 转移注意力所需要的努力 $E_X$ 和 $V$ : 在某环境中注意到有价值事件的期望	用注意力分配和被试者对未来状态的推断来测量情境意识 根据以上模型, 在飞机滑行的情况下, 结合由综合视觉系统支持的情境意识和重审后的综合视觉系统模型进行修正, 结果可较好预测感知情况
被试感知理解的情境元素数量和完成任务所需的情境元素数量之比	$S_{ARatio}(t_i) = S_{AActual}(t_i) / S_{Aoptimal}(t_i)$	$t_i$ : 某时间段内 $S_{AActual}(t_i)$ : 实际情境意识 $S_{Aoptimal}(t_i)$ : 最佳情境意识	基于该模型开发的工具可用于探测不同程序和显示设计下的情境意识
注意力分配模型	$S_A(t_j) = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \bar{p}_i}{\sum_{i=1}^n A_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (1 - 0.5k_i) u_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i}$ $S_A = \sum_{i=1}^n e_i \bar{p}_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{e^{U_i/\theta}}{\sum e^{U_i/\theta}} + 0.5 \right) \times \frac{u_i f_i}{1 + e^{-(A_{Ci} - \tau)/s}}$	$u_i$ : 任务重要性 $\bar{p}_i$ : 期望认知水平 $k_i$ : 不能理解同期发生事件的概率 $A_i$ : 分配给某一情境元素的注意力资源 $\bar{p}_i$ : 期望认知水平 $U_i$ : 效用最大的规则 $u_i$ : 任务重要性 $f_j$ : 情境元素分配的注意力比例 $A_{Ci}$ : 激活级别 $\tau=1.0$	该模型预测的情境意识与操作表现、测量指标的正确率和生理评估指标有很大的相关性, 可预测任务中情境意识的变化趋势 研究者对注意力分配模型进一步扩展和优化, 加入了认知过程分析, 可以更准确测量飞行员的表现情况

### 3 测量手段分析与展望

由于情境意识的形成涉及工作记忆、注意、逻辑推理等众多领域, 如何测量这种复合型功能, 一直是研究者探讨的问题。

(1) 传统的量表测量是一个不错的选择, 有直观易用的特点, 然而这种方法有一个无法避免的问题——它们的结果只能反映出情境意识的结

果, 无法反映出情境意识的过程, 甚至还不能确定它们呈现的结果是否能够完全对应到情境意识的表现中。例如, F. M. Lichacz<sup>[72]</sup>、T. Price 等<sup>[73]</sup>的研究指出, 在急性应激的情况下, 被试者有可能会出现过度的自信现象, 即在量表测定中无意识夸大自己的情境意识水平, 而实际的绩效表现却不如人意, 这与自动化加工有一定关系<sup>[74]</sup>。眼动、脑电图等生理手段, 虽然能够反映情境意识的建立

过程,但生理指标的表现该如何与情境意识形成和变化的过程相对应,依然有继续探索和研究的空間。

(2) 在近期的实验研究中,研究者通常将量表测量与生理指标结合起来,共同佐证,使得研究过程更加准确和令人信服<sup>[75-76]</sup>。然而,从以认知心理学为主导的第一次认知革命到以认知系统工程和系统性思维为主导的第二次认知革命,情境意识的概念本身也在不断变化着。根据 M. R. Endsley<sup>[77]</sup>的研究,情境意识中的感知、预测和理解这三个阶段并非线性的递进关系,而是一种复杂的复杂关系,这就为研究提出了新的要求,需要研究人员转变思路,与新的研究进展相适应。总而言之,情境意识是一种涉及元素众多的心理功能,研究工作依然任重道远,发展空间无限。

(3) 为了朝着精准性不断迈进,许多研究者采用了建模的方式,与上面提到的两类测量方式相结合<sup>[37]</sup>。这种研究方式不仅可以量化数据,也可以模块化情境意识,将其细分为注意、记忆等功能的组合。情境意识最早提出于航空飞行领域,因此上述研究也大多开展于该领域中。模型量化可以为预测被试者的情境意识水平提供一定参考,然而,模型的复杂化导致外部效度有所减少,推广到汽车驾驶、航空管制等领域,仍然需要一定调整。上述研究主要基于个人情境意识,对于团队情境意识和系统情境意识的测量,应该是该研究的可继续发展之处。

在过去的研究中,情境意识主要是采用多种技术相结合的方式对这个特质进行量化的考核。这是由于情境意识的复杂性和层次性所共同决定的。采用某一种测量方式,通常显得太单薄,不具有说服力,多种测量方式的共同结合,既能取长补短、准确量化,又能借此讨论不同测量方式的侧重点和差异性。在未来的发展中,情境意识将继续沿用这种相得益彰的探索方式,深化研究这种心理特质。值得注意的是,目前在情境意识的研究之中,主要采用了“任务+量表+生理指标”这三部分来搭建研究的框架,只是选择的任务、量表和生理指标或有不同。这种方式固然能够保证单个研究的内部逻辑完善而缜密,然而由于情境定义下的具体内容非常丰富(如飞行、驾驶、雷达管制等),而且即使研究的情境在同一方向上,研

究者也很难保证情境元素的完全相同,这在一定程度上影响了研究的外部效度,导致在一个情景下的研究情况不一定能够很好地迁移到与之差异较大的其他情境之中。

## 4 结束语

本文在分析六种传统飞行员情境意识测量方式的基础上,总结了过往研究中采用的主要测量手段,指出了多种测量方式的结合是未来研究的重点。在未来,一方面情境的仿真度将逐渐趋向于现实场景;另一方面,对于情境元素的分类量化也将更加精细,模型构建也会更加精细全面。随着神经科学的不断发展,情境意识的研究不会仅局限于行为方面的考察,而是将大脑功能研究和人因工程研究相结合,探索未来应用的发展之路。

### 参考文献

- [1] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 1995, 37(1): 32-64.
- [2] ENDSLEY M R. Situation awareness [R]. US: FAA, 2021.
- [3] ENDSLEY, MICA R. Measurement of situation awareness in dynamic systems[J]. Human Factors, 1995, 37(1): 65-84.
- [4] ENDSLEY M R. Situation awareness misconceptions and misunderstandings[J]. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 2015, 9(1): 4-32.
- [5] SIREVAG I, TJOFLAT I, HANSEN B S. A Delphi study identifying operating room nurses' non-technical skills [J]. Journal of Advanced Nursing, 2021(2): 1-7.
- [6] SALMON P M, LENNE M G, WALKER G H, et al. Exploring schema-driven differences in situation awareness between road users: an on-road study of driver, cyclist and motorcyclist situation awareness [J]. Ergonomics, 2014, 57(2): 191-209.
- [7] STANTON N A. Representing distributed cognition in complex systems: how a submarine returns to periscope depth[J]. Ergonomics, 2014, 57(3): 403-418.
- [8] BOURBOUSSON J, POIZAT G, SAURY J, et al. Description of dynamic shared knowledge: an exploratory study during a competitive team sports interaction [J]. Ergonomics, 2011, 54(2): 120-138.
- [9] SALMON P M, WALKER G H, STANTON N A. Broken components versus broken systems: why it is systems not people that lose situation awareness[J]. Cognition Technology & Work, 2015, 17(2): 179-183.

- [10] SEPPANEN H, MKEL J, LUOKKALA P, et al. Developing shared situational awareness for emergency management[J]. *Safety Science*, 2013, 55: 1-9.
- [11] ENDSLEY M R. *Expertise and situation awareness* [M]. 2nd ed. New York, NY, US: Cambridge University Press, 2018.
- [12] ANNETT J. Team work: a problem for ergonomics?[J]. *Ergonomics*, 2000, 43(8): 1045.
- [13] STANTON N A, SALMON P M, WALKER G H, et al. Is situation awareness all in the mind?[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2010, 11(1/2): 29-40.
- [14] NEVILLE T J, SALMON P M. Never blame the umpire: a review of situation awareness models and methods for examining the performance of officials in sport [J]. *Ergonomics*, 2016, 59(7): 962-975.
- [15] SALMON P M, PLANT K L. Distributed situation awareness: from awareness in individuals and teams to the awareness of technologies, sociotechnical systems, and societies [J]. *Applied Ergonomics*, 2022, 98: 103599.
- [16] ENDSLEY M R. Final reflections: situation awareness models and measures[J]. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2015, 9(1): 101-111.
- [17] Boeing. *Statistical summary of commercial jet airplane accidents*[R]. US: Boeing, 2015.
- [18] HELMREICH R L, FOUSHEE H C. *Why crew resource management? Empirical and theoretical bases of human factors training in aviation*[R]. US: Academic Press, 1993.
- [19] BATEMAN C. *The introduction of enhanced ground-proximity warning systems (EGPWS) into civil aviation operations around the world*[R]. US: FAA, 1999.
- [20] SALMON P, STANTON N, WALKER G, et al. Situation awareness measurement: a review of applicability for C4i environments[J]. *Applied Ergonomics*, 2006, 37(2): 1-5.
- [21] SALMON P M, STANTON N A, WALKER G H, et al. What really is going on? Review of situation awareness models for individuals and teams[J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2008, 9(4): 297-323.
- [22] SALMON P M, STANTON N A, WALKER G H, et al. Measuring situation awareness in complex systems: comparison of measures study[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2009, 39(3): 490-500.
- [23] ENDSLEY M R. A systematic review and meta-analysis of direct objective measures of situation awareness: a comparison of SAGAT and SPAM[J]. *Human Factors*, 2021, 63(1): 124-150.
- [24] STRYBEL T Z, LYU K P, KRAFT J, et al. Assessing the situation awareness of pilots engaged in self spacing [C]// 2008 the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. [S.l. : s.n. ], 2008: 11-15.
- [25] CAK S, SAY B, MISIRLISOY M. Effects of working memory, attention, and expertise on pilots' situation awareness[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2019, 22(1): 85-94.
- [26] MAMESSIER S, DREYER D, OBERHAUSER M. Calibration of online situation awareness assessment systems using virtual reality [C]// International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. Berlin: Springer, 2014: 124-135.
- [27] SNOW M P, REISING J M. Comparison of two situation awareness metrics: SAGAT and SA-SWORD [C]// 2000 Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. [S.l. ]: Springer, 2000: 49-52.
- [28] DURSO F T, HACKWORTH C A, TRUITT T R, et al. Situation awareness as a predictor of performance for en route air traffic controllers[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 1998, 6(1): 1-20.
- [29] BACON L P, STRYBEL T Z. Assessment of the validity and intrusiveness of online-probe questions for situation awareness in a simulated air-traffic-management task with student air-traffic controllers[J]. *Safety Science*, 2013, 56: 89-95.
- [30] TAYLOR R M. *Situational awareness rating technique (SART): the development of a tool for aircrew systems design* [M]// *Situational Awareness*. US: Springer, 1990: 111-128.
- [31] WAAG W L, HOUCK M R. Tools for assessing situational awareness in an operational fighter environment [J]. *Aviation Space Environment Medical*, 1994, 65(5): 13-19.
- [32] DENNEHY K. *Cranfield situation awareness scale: users manual*[M]. Cranfield: Cranfield University, 1997.
- [33] MCGUINNESS B, FOY L. A subjective measure of SA: the crew awareness rating scale (CARS)[C]// *The Human Performance, Situational Awareness and Automation Conference*. [S.l. ]: Springer, 2000: 14-19.
- [34] MCGUINNESS B, EBBAGE L. Assessing human factors in command and control: workload and situational awareness metrics [C]// 2002 the Command & Control Research & Technology Symposium. Savannah: SA Technologies, Inc. , 2002: 1-7.
- [35] MATTHEWS M D, BEAL S A. *Assessing situation awareness in field training exercises*[R]. US: Military Academy West Point NY Office of Military Psychology and Leadership, 2002.
- [36] MCGUINNESS B. Quantitative analysis of situational awareness (QUASA): applying signal detection theory to true/false probes and self-ratings[R]. US: Oklahoma State University, 2004.
- [37] EDGAR G K, CATHERWOOD D, BAKER S, et al. Quantitative analysis of situation awareness (QASA): modelling and measuring situation awareness using signal detec-

- tion theory [J]. *Ergonomics*, 2018, 61(6): 762-777.
- [38] STRYBEL T Z, LYU K P, DWYER J P, et al. Predicting perceived situation awareness of low altitude aircraft in terminal airspace using probe questions [C]// 2007 International Conference on Human-Computer Interaction. [S. l.]: Springer, 2007: 939-948.
- [39] SALMON P M, STANTON N A, WALKER G H, et al. Distributed situation awareness: theory, measurement and application to teamwork[M]. US: CRC Press, 2017.
- [40] VAN DIJK H, VAN DE MERWE K, ZON R. A coherent impression of the pilots' situation awareness: studying relevant human factors tools [J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2011, 21(4): 343-356.
- [41] ENDSLEY M R. Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review [J]. *Situation Awareness Analysis and Measurement*, 2000, 32: 145-156.
- [42] STRATER L D, ENDSLEY M R, PLEBAN R J, et al. Measures of platoon leader situation awareness in virtual decision-making exercises[M]. US: Springer, 2001.
- [43] NADERPOUR M, LU J, ZHANG G. A safety-critical decision support system evaluation using situation awareness and workload measures [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016, 150: 147-159.
- [44] BRILL J C, LAWSON B D, RUPERT A. Tactile situation awareness system (TSAS) as a compensatory aid for sensory loss [C]// 2014 the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Los Angeles, CA: SAGE Publications Sage CA, 2014: 1-7.
- [45] SALMON P M, WALKER G H, STANTON N A. Pilot error versus sociotechnical systems failure: a distributed situation awareness analysis of Air France 447 [J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2016, 17(1): 64-79.
- [46] MOORE K, GUGERTY L. Development of a novel measure of situation awareness: the case for eye movement analysis [C]// 2014 the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Los Angeles: SAGE Publications Sage CA, 2014: 135-145.
- [47] DE WINTER J C, EISMA Y B, CABRALL C, et al. Situation awareness based on eye movements in relation to the task environment [J]. *Cognition, Technology & Work*, 2019, 21(1): 99-111.
- [48] 刘志方, 苏衡, 吕飒飒, 等. 歼击机模拟作战飞行任务中的情境意识测量与比较: 基于眼动的证据 [J]. *人类工效学*, 2015, 21(6): 17-21.  
LIU Zhifang, SU Heng, LYU Sasa, et al. Measurement and comparison of situation awareness in air combat environment: evidence from eye movement [J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2015, 21(6): 17-21. (in Chinese)
- [49] CATHERWOOD D, EDGAR G K, NIKOLLA D, et al. Mapping brain activity during loss of situation awareness: an EEG investigation of a basis for top-down influence on perception [J]. *Human Factors*, 2014, 56(8): 1428-1452. (in Chinese)
- [50] 冯传宴, 完颜笑如, 刘双, 等. 不同脑力负荷水平下的情境意识研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(3): 610-618.  
FENG Chuanyan, WANYAN Xiaoru, LIU Shuang, et al. Study on situation awareness under different mental workloads [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(3): 610-618. (in Chinese)
- [51] MUEHLETHALER C M, KNECHT C P. Situation awareness training for general aviation pilots using eye tracking [C]// The 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems. Kyoto: IFAC, 2016: 66-71.
- [52] HERNÁNDEZ S A, YAURI J, FOLCH P, et al. Recognition of the mental workloads of pilots in the cockpit using EEG signals [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(5): 2298-2304.
- [53] SAUS E R, JOHNSEN B H, EID J, et al. Who benefits from simulator training: personality and heart rate variability in relation to situation awareness during navigation training [J]. *Computers in Human Behavior*, 2012, 28(4): 1262-1268.
- [54] BROWN I D. Review of the 'looked but failed to see' accident causation factor [J]. *Behavioural Research in Road Safety Eleventh Seminar*, 2002, 23: 1-3.
- [55] WILSON G F. Strategies for psychophysiological [J]. *Situation Awareness Analysis and Measurement*, 2000, 3: 175-180.
- [56] LOBO J L, SER J D, DE SIMONE F, et al. Cognitive workload classification using eye-tracking and EEG data [C]// 2016 International Conference on Human-Computer Interaction. [S. l.]: ACM, 2016: 1-8.
- [57] TIN F H, CLARKE E, POMEROY D, et al. Psychophysiological measures of situation awareness [R]. [S. l.]: ACM, 2017.
- [58] ZICCARDI A, VAN BENTHEM K, HERDMAN C M. A language-oriented analysis of situation awareness in pilots in high-fidelity flight simulation [M]. US: Springer, 2020: 639-646.
- [59] ZICCARDI A, VAN BENTHEM K, HERDMAN C M. Electroencephalographic signals and pilot situation awareness during simulated flight: a case for enhanced digital technology in general aviation [C]// 2021 International Conference on Human-Computer Interaction. US: Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, 2021: 101-115.
- [60] GLUCK K A, BALL J T, KRUSMARK M A. Cognitive control in a computational model of the predator pilot [R]. US: Springer, 2012.
- [61] MILES, THOMAS, NATASSIA, et al. Can we talk about speed? The effect of verbal protocols on driver speed and perceived workload-sciencedirect [J]. *Procedia Manufac-*

- turing, 2015, 3: 2629-2634.
- [62] SALMON P M, GOODE N, SPIERTZ A, et al. Is it really good to talk? Testing the impact of providing concurrent verbal protocols on driving performance [J]. *Ergonomics*, 2016, 60(6): 770-779.
- [63] RYAN B, HASLEGRAVE C M. Use of concurrent and retrospective verbal protocols to investigate workers' thoughts during a manual-handling task [J]. *Applied Ergonomics*, 2007, 38(2): 177-190.
- [64] KOMIAK SY X, BENBASAT I. A two-process view of trust and distrust building in recommendation agents: a process-tracing study [J]. *Journal of the Association for Information Systems*, 2008(12): 1-22.
- [65] 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.
- [66] YIM H B, LEE S M, SEONG P H. A development of a quantitative situation awareness measurement tool: computational representation of situation awareness with graphical expressions (CoRSAGE) [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, 65: 144-157.
- [67] FOYLE D, GOODMAN A, HOOEY B. NASA aviation safety program conference on human performance modeling of approach and landing with augmented displays [R]. US: National Aeronautics and Space Administration, 2003.
- [68] WICKENS C D, MCCARLEY J S, ALEXANDER A L, et al. Attention-situation awareness (A-SA) model of pilot error [J]. *Human Performance Modeling in Aviation*, 2008, 34: 213-329.
- [69] HOOEY B L, GORE B F, WICKENS C D, et al. Modeling pilot situation awareness [EB/OL]. [2022-02-21]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=1975E620765497E5D49CF446731205F2?doi=10.1.1.206.2400&rep=rep1&type=pdf>.
- [70] LIU S, WANYAN X, ZHUANG D. Modeling the situation awareness by the analysis of cognitive process [J]. *Bio-medical Materials and Engineering*, 2014, 24(6): 2311-2317.
- [71] CHEN H, LIU S, PANG L, et al. Developing an improved ACT-R model for pilot situation awareness measurement [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 122113-122124.
- [72] LICHACZ F M. Augmenting understanding of the relationship between situation awareness and confidence using calibration analysis [J]. *Ergonomics*, 2008, 51(10): 1489-1502.
- [73] PRICE T, TENAN M, HEAD J, et al. Acute stress causes over confidence in situation awareness [C] // 2016 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support. Diego: IEEE, 2016: 1675-1682.
- [74] ENDSLEY M R. Automation and situation awareness [EB/OL]. [2022-02-21]. <http://209.238.175.8/Papers/pdf/SA%26Auto-Chp.pdf>.
- [75] 王燕青, 周士琦, 刘超群. 飞行学员注视方式对团队情境意识的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(18): 7784-7789.
- WANG Yanqing, ZHOU Shiqi, LIU Chaoqun. The influence of fixation pattern of student pilots on team situational awareness [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(18): 7784-7789. (in Chinese)
- [76] 王燕青, 刘超群, 李苗. 基于交互认知模型的飞行机组团队情境意识实验研究 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(13): 305-311.
- WANG Yanqing, LIU Chaoqun, LI Miao. Experimental study on flight crew's team situation awareness based on team mutual belief model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(13): 305-311. (in Chinese)
- [77] ENDSLEY M R. Situation awareness misconceptions and misunderstandings [J]. *Journal of Cognitive Engineering & Decision Making*, 2015, 9(1): 4-32.

#### 作者简介:

白雪(1998—),女,硕士研究生。主要研究方向:情境意识的测量与应用。

张丽霞(1970—),女,硕士,主任医师、心理治疗师。主要研究方向:心理咨询和治疗。

肖玮(1973—),男,博士,教授。主要研究方向:风险决策,理性思维,飞行员情境意识。

吴迪(1989—),男,博士,讲师。主要研究方向:风险决策及其应用。

周悦(1996—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行员情境意识和执行功能的关系。

(编辑:丛艳娟)