DOI:10.27055/j.1674-5590.2026.05.003

基于SART与SMM的飞行机组团队情境意识量化模型构建

汪 磊,刘恬源,龚 然
(中国民航大学安全科学与工程学院,天津 300300)

摘 要: 为同时表征飞行机组成员的个体情境意识(ISA,individual situation awareness)与团队协同状态,本文构建一种团队情境意识(TSA,team situation awareness)量化模型。选取66名飞行员开展高仿真模拟飞行实验,采用情境意识评定技术(SART,situation awareness rating technique)量表和共享心智模型(SMM,shared mental model)问卷分别测量主飞飞行员和监控飞行员的ISA与团队协同状态,并据此构建团队个体情境意识基础与团队协同系数,计算TSA综合得分,开展场景差异、指标相关性和权重敏感性分析。结果表明:正常进近场景下的TSA综合得分显著高于可控飞行撞地和低空风切变场景下的TSA综合得分;团队个体情境意识基础与团队协同系数呈正相关,但二者未表现出高度一致;当团队个体情境意识基础的权重在0.1~0.9范围内调整时,场景比较结论保持一致。本研究所构建模型兼顾成员个体认知基础与团队协同信息,可为飞行机组TSA的量化评价提供参考。

关键词: 团队情境意识(TSA);个体情境意识(ISA);共享心智模型(SMM);团队协同;飞行机组
中图分类号: V328.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)05-0024-07

Construction of a quantitative model of flight crew team situation awareness based on SART and SMM

WANG Lei, LIU Tianyuan, GONG Ran
(*College of Safety Science and Engineering, CAUC, Tianjin* 300300, *China*)

Abstract: To characterize both the individual situation awareness (ISA) and the team coordination state of flight crew members, a quantitative team situation awareness (TSA) model is constructed in this paper. Sixty-six pilots were selected for a high-fidelity flight simulation experiment. The situation awareness rating technique (SART) scale and the shared mental model (SMM) questionnaire were used to measure the ISA and team coordination states of the pilot flying and the pilot monitoring, respectively. On this basis, a team-level individual situation awareness basis and a team coordination coefficient were constructed, and the TSA composite scores were calculated. The scenario differences, indicator correlations and weight sensitivity were then analyzed. The results show that the TSA composite scores in the normal approach scenario are significantly higher than those in the controlled flight into terrain and low-level wind shear scenarios. The team-level individual situation awareness basis is positively correlated with the team coordination coefficient, but the two are not highly consistent. When the weight of the team-level individual situation awareness basis is adjusted within the range of 0.1~0.9, the conclusions of the scenario comparison remain unchanged. The model constructed in this study takes into account both the individual cognitive basis of the members and the team coordination information, and can provide a reference for the quantitative evaluation of flight crew TSA.

Key words: team situation awareness (TSA); individual situation awareness (ISA); shared mental model (SMM); team coordination; flight crew

随着民用飞机驾驶舱自动化程度的不断提高,飞行员的任务逐渐由直接操纵转向系统监控、信息管理与决策,复杂运行环境下的信息变化和任务压力容易影响其对飞行情境的感知、理解与预测。情境意识(SA,situation awareness)是飞行员安全、有效地完成飞行任务的关键认知能力[1],其不足或丧失是导致航空

收稿日期:2026-07-07; **修回日期:**2026-09-08
基金项目:中国商飞-中航大大飞机研究院2026年度创新研究基金项目(202604)
作者简介:汪磊(1982—),中国民航大学,男,安徽霍山人,研究员,博士,研究方向为航空安全与人为因素.

运行人因风险的重要因素之一[2-4]。在现代民航双人制机组中,主飞飞行员(PF,pilot flying)和监控飞行员(PM,pilot monitoring)分别承担飞行操纵与监控职责,并需通过相互配合共同完成飞行任务。飞行安全不仅取决于每名机组成员是否具备良好的个体情境意识(ISA,individual situation awareness),还取决于成员之间能否通过任务协调和共同判断形成良好的团队情境意识(TSA,team situation awareness)[5-7]。因此,研究飞行机组的 TSA,对于评估机组团队的认知状态和提升飞行安全水平具有重要意义。

围绕 TSA 的形成基础及其评价方式,已有学者开展了相关研究。Endsley[8]认为,TSA 既建立在成员履行各自职责所需的个体认知基础之上,也包含成员围绕共同任务形成的团队层面的认知信息;Salas 等[9]指出,TSA 比成员 ISA 的简单合并更为复杂,其形成与保持还受到信息交流、相互监控和协调配合等团队合作过程的影响。在测量方法方面,Prince 等[10]分别采用行为观察和飞行知识问答评价双人制机组的 TSA,并通过汇总两名成员得分形成团队指标;Rosenman 等[11]则依据成员对共同任务问题回答的相似性或一致性评价团队认知状态。此外,Salmon 等[12]指出,共享心智模型(SMM,shared mental model)有助于成员形成对任务、角色及搭档行为的共同理解,为分析团队认知状态提供了理论视角。国内关于 SA 的研究视角也已逐步拓展至团队层面。刘永欣等[13]通过模拟管制实验分析主、辅管制员的协作过程及班组 SA 的形成与保持;石玉生等[14]借鉴 SMM 中团队相关和任务相关的维度划分,从对搭档状态的关注及对团队任务的了解等方面评价 TSA;王燕青等[15]分别测量飞行机组的 ISA、交互意识和交互认知,发现成员交互认知能够提供不同于 ISA 的信息。总体来看,已有研究表明,个体认知与团队层面状态均是 TSA 评价的重要内容,但相关指标通常被分别测量与分析,尚缺少一种能够将二者整合得分,并进一步解释综合得分变化来源的量化方法。

鉴于此,本文以双人制飞行机组为研究对象,结合 ISA 与 SMM,从成员个体认知水平和团队协同状态两个方面构建 TSA 量化模型。本研究依托高仿真模拟飞行实验,考察 TSA 模型在不同进近场景下的变化特征及结果稳定性,并分析模型各组成部分所提供的信息,以期为飞行机组 TSA 的综合评价及后续客观验证提供参考。

1　研究方法

1.1　被试对象

本实验招募 66 名飞行员,两人组成一个双人机组,共形成 33 个机组。所有被试对象均为男性,平均年龄(24.98 ± 1.06)岁,平均总飞行时间为(274.66 ± 41.04) h。被试对象均无色盲、色弱,视力和听力正常,能够正常完成模拟飞行任务。为确保实验数据采集的客观性,要求被试对象在实验前 24 h 内不饮用咖啡、功能性饮料等刺激性饮品,不服用药物。

1.2　实验平台

本研究依托国内某航空公司,以 B737-800 型全动模拟驾驶舱为基础开展实验。该模拟机的视景系统具备高保真特性,采用三通道投影结构,可呈现宽视野、高清晰度的舱外视景。教员控制台可对模拟驾驶舱进行多种参数与情境设定,例如,可设定飞机初始位置、飞机燃油载荷、天气条件及各类系统故障,以满足不同实验场景的测试需求。

1.3　实验设计

1.3.1　实验场景设计

基于 B737-800 型全动模拟驾驶舱,本研究设计了飞机在青岛胶东国际机场进近着陆的模拟飞行任务,包括以下 3 类场景。

1)正常进近场景

飞机初始进近高度设为 1 000 ft(1 ft=0.304 8 m),机组按照标准操作程序继续执行仪表进近,保持稳定的飞行姿态和速度,持续监控航向道、下滑道等关键飞行参数,并完成进近任务。

2)可控飞行撞地场景

可控飞行撞地(CFIT,controlled flight into terrain)场景设置为低云、低能见度气象条件,能见度约为 400 m。飞机按照标准程序执行进近,当高度下降至 500 ft 时,近地警告系统(GPWS,ground proximity warning system)自动触发告警,此时机组需及时识别潜在风险并按照标准操作程序采取改出、复飞等处置措施。

3)低空风切变场景

飞机同样在能见度为 400 m 的条件下执行进近,并在下降至约 120 ft 高度时遭遇突发风切变。机组需迅速识别空速、姿态、航向及下滑轨迹等参数的变化,判断当前进近状态和潜在偏出风险,并根据飞行状态采取推力调整、姿态修正、航向修正或复飞等处置措施。

1.3.2　测量工具

1）情境意识评定技术量表

情境意识评定技术(SART,situation awareness rating technique)量表是由 Taylor 于 1990 年开发的一种主观评估工具[16],最初用于评估飞行员的认知状态。量表包含注意资源需求、注意资源供给和情境理解 3 个维度,共 10 个条目,各条目均采用李克特 7 点评分法。其中,注意资源需求维度反映任务对个体注意资源的占用程度,注意资源供给维度反映个体可用于完成任务的心理资源,情境理解维度反映个体对当前飞行状态的认知和理解程度。每次模拟飞行任务结束后,PF 和 PM 分别填写 SART 量表,据此可获得二者各自的 ISA 得分。

2）SMM 问卷

SMM 问卷采用王燕青等[17]基于 SMM 理论并结合飞行进近任务改编的问卷,用于评估 PF 和 PM 对团队协作状态的认知与评价。该问卷共包含 6 个条目,各条目均采用李克特 7 点评分法。每次模拟飞行任务结束后,PF 和 PM 分别填写 SMM 问卷,据此可获得机组成员对团队协作状态的评价,具体条目如表 1 所示。

表 1　SMM 问卷条目

Tab.1　Items of the SMM questionnaire

序号	条目内容
1	我对搭档所提出的问题都能准确理解
2	就如何完成实验任务,我和搭档有一致的策略及观点
3	对于搭档的需求状况,我能够时刻掌握
4	我能和搭档高效协作制定完成任务所需的全部流程
5	我所做的工作与搭档所要求的一致
6	就如何完成实验任务,我和搭档均具有清醒、准确的认知

1.3.3　实验步骤

在实验开始前,被试对象需签署知情同意书并填写人口统计学量表。研究人员向被试对象介绍模拟飞行任务及量表填写要求,使其熟悉实验流程。为减少需求特征对结果的影响,实验前不向被试对象说明具体研究假设。在正式实验中,每个机组在模拟器中完成 3 种实验场景,3 种场景采用拉丁方设计平衡实施顺序。每个场景结束后,PF 与 PM 须立即独立填写 SART 量表和 SMM 问卷,以获取其对任务过程中 ISA 和团队协作状态的即时评价。完成全部场景及相应量表填写后,实验结束。

1.4　数据处理与统计分析

本研究采用 SPSS 27.0 软件对实验数据进行统计分析。首先,对团队个体情境意识基础 B^*、共同评价水平 L、成员一致性 A、团队协同系数 C 及 TSA 综合得分进行描述性统计,并采用 Cronbach′s α 系数检验 SMM 问卷的内部一致性。其次,采用 Shapiro–Wilk 检验判断数据的正态性;由于部分指标不满足正态分布,采用 Friedman 检验比较 3 类场景下各指标的差异,总体检验显著后采用 Bonferroni 法进行成对比较,并以 Kendall′s W 表示效应量。此外,采用 Spearman 秩相关分析考察 3 类场景下团队个体情境意识基础 B^* 与团队协同系数 C 的关系,通过 5 000 次 Bootstrap 抽样估计 95% 置信区间,并对 3 次相关检验进行 Bonferroni 校正,校正后的显著性水平为 0.017。进一步,在不同权重条件下进行敏感性分析,以检验 TSA 场景比较结果的稳健性。

2　TSA 量化模型的构建

TSA 并非机组成员 ISA 的简单汇总,而是个体认知基础与团队协同状态的综合体现。对于双人制机组而言,PF 与 PM 既需要分别保持对飞行情境的准确感知和理解,也需要在任务执行过程中形成良好的协同状态。因此,本文从个体认知基础和团队协同两个方面构建飞行机组 TSA 量化模型。

具体而言,首先根据 PF 与 PM 的 SART 量表得分计算并归一化团队个体情境意识基础 B^*;其次,基于二者对 SMM 问卷各条目的评分,分别计算共同评价水平 L 和成员一致性 A,并据此构建团队协同系数 C;最后,采用加权几何平均方法综合团队个体情境意识基础 B^* 与团队协同系数 C,得到 TSA 综合得分。为便于表述,设 $i=1,2,\cdots,N$,表示机组编号,本研究中 $N=33$;$s\in\{1,2,3\}$,表示场景编号,分别对应正常进近、CFIT 和低空风切变场景;$r\in\{\mathrm{PF},\mathrm{PM}\}$,表示成员角色;$j=1,2,\cdots,m$,表示 SMM 问卷条目编号,其中 $m=6$。

2.1　团队个体情境意识基础

本文采用 SART 量表对 PF 和 PM 的 ISA 进行测量。SART 量表从注意资源需求、注意资源供给和情境理解 3 个维度进行评价。根据 Taylor 提出的 SART 计分方法[16],对于机组 i 在场景 s 下的成员 r,其 ISA 得分

$$H_{r,is}^{\mathrm{ISA}}=U_{r,is}-(D_{r,is}-S_{r,is}) \tag{1}$$

式中:$U_{r,is}$ 为情境理解维度得分;$D_{r,is}$ 为注意资源需求维度得分;$S_{r,is}$ 为注意资源供给维度得分。

为表征由双人机组成员 ISA 所构成的团队认知基础,本文将 PF 与 PM 的 ISA 信息进行综合,并采用二者得分的等权算术平均值构建机组 i 在场景 s 下的团队个体情境意识基础 B^* 原始得分 B_{is},即

$$B_{is}=\frac{H_{\mathrm{PF},is}^{\mathrm{ISA}}+H_{\mathrm{PM},is}^{\mathrm{ISA}}}{2} \tag{2}$$

为消除该指标与机组 i 在场景 s 下的团队协同系数 C_{is} 之间的量纲差异,对 B_{is} 进行归一化处理,得到机组 i 在场景 s 下的团队个体情境意识基础

$$B_{is}^{*}=\frac{B_{is}-B_{\min}}{B_{\max}-B_{\min}} \tag{3}$$

式中,$B_{\min}$ 和 $B_{\max}$ 分别为团队个体情境意识基础 B^{*} 原始得分 B_{is} 的理论最小值和最大值。

由于本文所采用的 3 维 SART 量表包含 10 个条目,各条目均采用 1~7 点评分,根据式(1),ISA 的理论取值范围为[–14,46]。由于 B_{is} 为 PF 与 PM 的 ISA 得分均值,其理论取值范围相同。

因此,将 $B_{\min}=-14$,$B_{\max}=46$ 代入式(3)可得

$$B_{is}^{*}=\frac{B_{is}+14}{60} \tag{4}$$

式中,B_{is}^{*} 的取值范围为[0,1],数值越高,表示机组 i 的 PF 与 PM 在场景 s 下总体上具有越高的 ISA 水平。

2.2 共同评价水平

Mathieu 等[18]研究表明,团队成员认知结构的趋同有助于形成共同目标并促进成员间的协调。因此,对团队状态进行评价时,不仅应关注成员评价所反映的总体水平,还应考察成员之间评价的一致性。

本文采用包含 6 个条目的 SMM 问卷测量飞行机组 PF 与 PM 对任务协作及共同任务认知状态的评价。首先,通过两名成员评分的均值反映机组对协作状态评价的总体水平。

设机组 i 在场景 s 下,PF 与 PM 对第 j 个 SMM 条目的评分分别为 $x_{\mathrm{PF},isj}$ 和 $x_{\mathrm{PM},isj}$,则该条目的平均评分为

$$M_{isj}=\frac{x_{\mathrm{PF},isj}+x_{\mathrm{PM},isj}}{2} \tag{5}$$

由于 SMM 问卷各条目均采用 1~7 点评分,为使其与模型中的其他指标处于相同量纲,将 M_{isj} 映射至[0,1]区间,得到条目共同评价水平

$$L_{isj}=\frac{M_{isj}-1}{2} \tag{6}$$

式中,L_{isj} 为机组 i 在场景 s 中对第 j 个 SMM 条目的共同评价水平。

进一步对全部 SMM 条目的共同评价水平取平均,得到机组 i 在场景 s 下的共同评价水平,即

$$L_{is}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}L_{isj} \tag{7}$$

式中,L_{is} 数值越高,表示机组 i 在场景 s 下总体上对机组协作及任务认知状态具有越积极的共同评价。

需要指出的是,共同评价水平反映的是两名成员对协作状态评价的整体高低,不能反映二者在具体条目上的评价是否一致。当两名成员的评分存在较大差异时,该平均值会掩盖双方实际存在的评价差异。因此,还需进一步构建成员一致性指标以衡量成员评价的一致程度。

2.3 成员一致性与团队协同系数

在共同评价水平的基础上,本文进一步考察 PF 与 PM 对各 SMM 条目评价的一致程度,参考 Cicchetti 等[19]提出的线性权重形式,在每个 SMM 条目上分别计算二者评分的绝对差异,并将其转换为条目成员一致性,即

$$A_{isj}=1-\frac{\left|x_{\mathrm{PF},isj}-x_{\mathrm{PM},isj}\right|}{K-1} \tag{8}$$

式中:K 为评分等级数,本研究中 $K=7$;A_{isj} 的取值范围为[0,1],当 PF 与 PM 的评分完全一致时,$A_{isj}=1$,当一名成员评分为 1 分、另一名成员评分为 7 分时,$A_{isj}=0$,A_{isj} 数值越高,表示两名成员在该条目上的评价越一致。

对全部 SMM 条目的条目成员一致性取平均,得到机组 i 在场景 s 下成员一致性表示为

$$A_{is}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}A_{isj} \tag{9}$$

式中,A_{is} 数值越高,表示 PF 与 PM 对团队状态的总体评价差异越小。

成员一致性较高并不必然意味着团队协同状态良好。例如,PF 与 PM 可能一致认为当前团队协作状态较差。同样,中等的共同评价水平也可能由两名成员一高一低的评分形成。因此,团队协同状态的表征需要同时考虑共同评价水平与成员一致性,以此构建团队协同系数。

本文首先在每个条目内部将共同评价水平与成员一致性相结合,得到条目协同值,即

$$C_{isj}=L_{isj}\cdot A_{isj} \tag{10}$$

在此基础上,对 6 条 SMM 条目的协同值取平均,形成机组 i 在场景 s 下的团队协同系数,即

$$C_{is}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}C_{isj} \tag{11}$$

式中,C_{is} 的取值范围为[0,1],数值越高,表示 PF 与 PM 不仅对团队协作状态的评价总体较高,且在具体协作内容上的评价较为一致。

先在条目层面结合共同评价水平与成员一致性,再进行总体汇总,可避免不同条目的高共同评价与高成员一致性发生跨条目补偿。只有当同一条目的共同评价水平和成员一致性均较高时,该条目才会对团队

协同系数 C_{is} 产生较大贡献。

2.4　TSA 综合模型

经过上述处理，机组 i 在场景 s 下的团队个体情境意识基础 B_{is}^{*} 和团队协同系数 C_{is} 均处于[0,1]区间，分别反映机组成员的团队个体情境意识基础和团队协同状态。为综合这两个组成部分，本文采用加权几何平均构建飞行机组 TSA 综合得分

$$H_{is}^{\mathrm{TSA}}(\omega)=(B_{is}^{*})^{\omega}(C_{is})^{1-\omega}\times 100 \tag{12}$$

式中：$\omega\in(0,1)$，ω 为 B_{is}^{*} 的相对权重，$1-\omega$ 为 C_{is} 的相对权重；乘数 100 用于将综合结果转换为较直观的百分制分数。

与算术平均相比，加权几何平均对不同组成指标之间的补偿具有一定限制。当 B_{is}^{*} 或 C_{is} 中任一指标较低时，另一指标的较高取值不能对其进行完全补偿；当任一指标取值为 0 时，TSA 综合得分也为 0。因此，只有团队个体情境意识基础和团队协同状态均处于较高水平时，机组才能获得较高的 TSA 综合得分。

本文将团队个体情境意识基础与团队协同系数视为 TSA 的两个核心组成部分，采用等权设定，即 $\omega=0.5$，后续通过权重敏感性分析检验不同权重条件下模型结果的稳定性。将 $\omega=0.5$ 代入式(12)，得到 TSA 量化模型公式

$$H_{is}^{\mathrm{TSA}}=\sqrt{B_{is}^{*}C_{is}}\times 100 \tag{13}$$

式中，H_{is}^{TSA} 为机组 i 在场景 s 下的 TSA 综合得分，取值范围为[0,100]。TSA 综合得分越高，表示该机组的团队个体情境意识基础和团队协同状态总体越好，TSA 水平越高。

3　研究结果

基于所构建的 TSA 量化模型，计算 33 个机组在正常进近、CFIT 场景和低空风切变场景下的团队个体情境意识基础 B^{*}、共同评价水平 L、成员一致性 A、团队协同系数 C 及 TSA 综合得分，并对各指标的场景差异、相关关系及模型稳健性进行分析。

3.1　SMM 问卷内部一致性

为考察 SMM 问卷在本研究中的内部一致性，分别计算 3 类场景下 PF 与 PM 对 6 个 SMM 条目评分的 Cronbach′s α 系数，结果如表 2 所示。

不同场景下 PF 与 PM 问卷的 Cronbach′s α 系数为 0.897 0~0.969 0，均高于 0.80，表明问卷具有良好的内部一致性。

表 2　SMM 问卷内部一致性检验结果

Tab.2　Internal consistency test results of the SMM questionnaire

场景	Cronbach′s α	
	PF	PM
正常进近	0.949 0	0.961 0
CFIT	0.959 0	0.897 0
低空风切变	0.969 0	0.914 3

3.2　TSA 综合得分及其组成指标的场景差异

3 类场景下 TSA 综合得分及其组成指标的描述性统计和 Friedman 检验结果如表 3 所示，其中，χ^{2} 为 Friedman 检验统计量，括号内数值为自由度，p 值为显著性水平，Kendall′s W 用于表征效应量。

表 3　TSA 综合得分及其组成指标的描述性统计与场景差异检验

Tab.3　Descriptive statistics and scenario difference tests of the TSA composite scores and its component indicators

指标	Mean±SD			$\chi^{2}(2)$	p	Kendall′s W
	正常进近	CFIT	低空风切变			
B^{*}	0.714±0.090	0.591±0.077	0.597±0.089	28.551	<0.001	0.433
L	0.870±0.110	0.814±0.136	0.833±0.135	8.397	0.015	0.127
A	0.881±0.113	0.822±0.088	0.856±0.079	5.737	0.057	0.087
C	0.773±0.165	0.677±0.154	0.719±0.157	9.650	0.008	0.146
得分	73.950±11.510	62.920±9.980	65.120±10.160	26.727	<0.001	0.405

Friedman 检验显示，3 类场景下的 TSA 综合得分存在显著差异($\chi^{2}(2)=26.727$，$p<0.001$，Kendall′s $W=0.405$)。经 Bonferroni 校正的成对比较显示，正常进近场景的 TSA 综合得分显著高于 CFIT 场景和低空风切变场景，调整后 p 均小于 0.001；CFIT 场景与低空风切变场景之间差异不显著。

在组成指标中，团队个体情境意识基础 B^{*} 在 3 类场景间存在显著差异($\chi^{2}(2)=28.551$，$p<0.001$，Kendall′s $W=0.433$)，且其变化趋势与 TSA 综合得分高度一致。Bonferroni 校正后的结果显示，正常进近场景的团队个体情境意识基础 B^{*} 水平均显著高于 CFIT 场景和低空风切变场景，而两类异常场景之间差异不显著。

共同评价水平 L 和团队协同系数 C 均达到统计显著水平。其中：L 的检验结果为 $\chi^{2}(2)=8.397$，$p=0.015$，Kendall′s $W=0.127$；C 的检验结果为 $\chi^{2}(2)=9.650$，$p=0.008$，Kendall′s $W=0.146$。成对比较显示，正常进近场景下的共同评价水平 L 和团队协同系数 C 均显著高于 CFIT 场景，其他成对比较均未达到显著水平。

成员一致性 A 在 3 类场景间的差异未达到显著水平($\chi^{2}(2)=5.737$，$p=0.057$，Kendall′s $W=0.087$)，虽然其均值同样呈现正常进近场景最高、低空风切变场

景居中、CFIT 场景最低的趋势,但统计证据不足以支持 3 类场景之间存在稳定差异。

3.3 团队个体情境意识基础与团队协同的关系

为进一步考察团队个体情境意识基础与团队协同是否反映相同的信息,分别对 3 类场景中的团队个体情境意识基础 B^* 与团队协同系数 C 进行 Spearman 秩相关分析,结果如表 4 所示,其中,ρ 值为 B^* 与 C 的 Spearman 秩相关系数。

表 4　不同场景下 B^* 与 C 的相关分析结果

Tab.4　Correlation analysis results between B^* and C in different scenarios

场景	ρ	p	Bootstrap 95%置信区间
正常进近	0.555	<0.001	[0.249,0.802]
CFIT	0.375	0.031	[–0.011,0.667]
低空风切变	0.331	0.060	[–0.060,0.648]

表 4 结果显示,3 类场景下团队个体情境意识基础 B^* 与团队协同系数 C 均呈正相关关系。正常进近场景下,二者的相关系数为 0.555,$p < 0.001$;CFIT 场景下,二者的相关系数为 0.375,$p = 0.031$;低空风切变场景下,二者的相关系数为 0.331,$p = 0.060$。对 3 个场景的相关检验进行 Bonferroni 校正后,显著性水平为 0.017,仅正常进近场景下的相关性达到校正后的显著性标准。CFIT 场景和低空风切变场景的 Bootstrap 95% 置信区间均包含 0。

3.4 权重敏感性分析

为考察权重变化对 TSA 综合得分结果的影响,将团队个体情境意识基础 B^* 的权重 ω 由 0.1 调整至 0.9,步长为 0.1,团队协同系数 C 的权重 $1-\omega$ 相应改变,并计算各权重条件下的 TSA 综合得分。3 类场景的 TSA 综合得分均值随团队个体情境意识基础 B^* 权重的变化如图 1 所示。随着权重 ω 增加,各场景 TSA 综合得分的均值均呈下降趋势,但场景间的相对关系保持稳定。

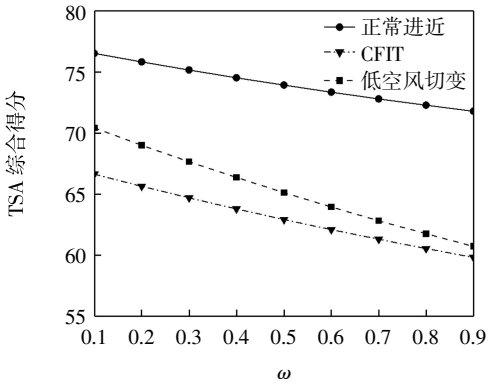


图 1　不同权重条件下 3 类场景 TSA 综合得分变化

Fig.1　Variation of the TSA composite scores of three scenarios under different weight conditions

不同权重条件下的 Friedman 检验结果如表 5 所示。从表 5 结果可看出,各权重条件下 3 类场景的总体差异均具有统计学意义($p < 0.001$),Kendall's W 为0.268~0.508。Bonferroni 校正后的成对比较结果均一致:正常进近场景的 TSA 综合得分显著高于 CFIT 场景和低空风切变场景,两类异常场景间的差异均不显著。

表 5　不同权重条件下 TSA 综合得分的场景差异检验结果

Tab.5　Scenario difference test results of the TSA composite scores under different weight conditions

B^* 权重(ω)	C 权重($1-\omega$)	$\chi^2(2)$	p	Kendall's W
0.1	0.9	17.697	< 0.001	0.268
0.2	0.8	19.152	< 0.001	0.290
0.3	0.7	19.152	< 0.001	0.290
0.4	0.6	22.545	< 0.001	0.342
0.5	0.5	26.727	< 0.001	0.405
0.6	0.4	26.727	< 0.001	0.405
0.7	0.3	33.515	< 0.001	0.508
0.8	0.2	33.515	< 0.001	0.508
0.9	0.1	30.970	< 0.001	0.469

4　讨论

在正常进近场景下,TSA 综合得分与团队个体情境意识基础 B^* 水平均高于 CFIT 场景和低空风切变场景,且团队个体情境意识基础 B^* 的场景效应最为明显,表明异常场景下 TSA 综合得分的降低主要与机组成员个体情境意识基础的下降有关。正常进近的飞行状态和任务进程相对稳定,机组能够按照既定分工持续监控关键信息;而两类异常场景则在低能见度条件下叠加突发威胁,需要机组在有限时间内完成风险识别、状态判断和处置决策,加剧了注意资源竞争和信息整合负担。已有研究[20-21]表明,低能见度及异常场景进近处置会改变飞行员的视觉搜索和状态监控方式,并加重认知与决策负荷,对成员的情境感知、理解和预测提出了更高要求,这与本研究中团队个体情境意识基础 B^* 与 TSA 综合得分在异常场景下同步降低的结果相符。

进一步分析团队协同相关指标发现,CFIT 场景和低空风切变场景在共同评价水平 L、成员一致性 A 和团队协同系数 C 上表现出不同的变化特征。在 CFIT场景下共同评价水平 L 和团队协同系数 C 均低于正常进近场景,而成员一致性 A 未发生显著变化。GPWS

告警出现后,机组由稳定进近迅速转入复飞和避险处置,操纵、监控及程序执行任务随之集中调整,增加了团队协调和任务转换要求,因而可能降低成员对当前协作状态的共同评价。与此同时,明确的告警信息可能有助于 PF 与 PM 形成相近的风险判断,因此成员分歧未明显增加。相比之下,在低空风切变场景下,机组可能仍主要沿用原有职责分工和协作方式,其影响更多表现为飞行状态快速变化对成员信息感知与处理的要求提高,进而导致团队个体情境意识基础 B^* 下降,而其共同评价水平 L、成员一致性 A 和团队协同系数 C 与正常进近场景差异不显著。由此可见,不同异常任务对 TSA 综合得分的影响并非完全来自同一组成部分,分项指标能够进一步反映综合得分变化的来源。

相关分析显示,3 类场景下团队个体情境意识基础 B^* 与团队协同系数 C 均呈正相关,但仅正常进近场景达到显著水平。在正常进近过程中,任务状态和机组分工相对稳定,成员对飞行情境的感知与理解能够较直接地支持相互监控和任务配合,因此,团队个体情境意识基础 B^* 较高的机组通常也表现出较高的团队协同系数 C。在异常场景中,快速变化的飞行状态和紧急处置要求会分别作用于成员认知与团队协同:ISA 可能因信息加工负荷增加而下降,而团队仍可依靠既定分工维持协同;团队协同也可能因任务转换而发生变化,但成员本身对飞行状态仍保持一定把握。因此,在异常场景下二者的变化未必同步,其相关程度相对较弱。总体来看,团队个体情境意识基础 B^* 与团队协同系数 C 虽存在正相关,但未表现出高度一致,说明二者存在一定联系,但 ISA 并不能替代团队层面的协同信息。该结果与 Artman[22]提出的 TSA 由成员共同构建、包含共享与分布信息,并非 ISA 简单加和的观点一致。

权重敏感性分析表明,当团队个体情境意识基础 B^* 的权重在 0.1~0.9 范围内变化时,3 类场景的相对关系及成对比较结论均保持一致,说明主要场景的比较结论对权重变化具有较好的稳健性。

5 结语

本文结合 SART 量表与 SMM 问卷构建飞行机组 TSA 量化模型,并对不同进近场景下的 TSA 综合得分及其组成指标进行分析,主要结论如下:

(1)团队个体情境意识基础与团队协同分别反映机组成员个体认知与团队协作层面的信息,二者结合能够从不同层面表征飞行机组的 TSA;

(2)正常进近场景下的 TSA 综合得分显著高于 CFIT 场景和低空风切变场景,且分项指标能够进一步反映 TSA 综合得分差异的来源;

(3)权重敏感性分析结果表明,模型的场景比较结果具有较好的稳定性。

后续研究可结合眼动及行为指标对模型进行进一步检验,并考察其在不同飞行任务和机组群体中的适用性。

参考文献:

[1] 卢天娇, 汤梦晗, 江涛, 等. 飞行员情景意识的影响因素剖析: 基于 Endsley 的三级理论[J]. 应用心理学, 2020, 26(3): 195–207.

[2] Munoz–Cordero F. Integrating human factors into operational safety in Latin American military aviation[J]. Estudios y Perspectivas Revista Científica y Académica, 2025, 5(2): 2592–2605.

[3] Moon J Y, Lee J R. The effect of studying flight training materials utilizing encoding techniques on situational awareness capabilities of students in PPL training[J]. Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 2020, 28(4): 154–163.

[4] Endsley M R. Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review[M]//Endsley M R, Garland D J. Situation Awareness Analysis and Measurement. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates, 2000: 3–32.

[5] 术守喜, 马文来. 人为因素与机组资源管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.

[6] Salas E, Rozell D, Mullen B, et al. The effect of team building on performance: an integration[J]. Small Group Research, 1999, 30(3): 309–329.

[7] Weller J M, Mahajan R, Fahey–Williams K, et al. Teamwork matters: team situation awareness to build high–performing healthcare teams, a narrative review[J]. British Journal of Anaesthesia, 2024, 132(4): 771–778.

[8] Endsley M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. Human Factors, 1995, 37(1): 32–64.

[9] Salas E, Prince C, Baker D P, et al. Situation awareness in team performance: implications for measurement and training[J]. Human Factors, 1995, 37(1): 123–136.

[10] Prince C, Ellis E, Brannick M T, et al. Measurement of team situation awareness in low experience level aviators[J]. The International Journal of Aviation Psychology, 2007, 17(1): 41–57.

[11] Rosenman E D, Dixon A J, Webb J M, et al. A simulation–based approach to measuring team situational awareness in emergency medicine: a multicenter, observational study[J]. Academic Emergency Medicine, 2018, 25(2): 196–204.

[12] 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.

(下转第 42 页)

pressing lithium–ion battery fires[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101801.

[67] Li Xiutao, Zhang Mengjie, Zhou Zhenyang, et al. A novel dry powder extinguishant with high cooling performance for suppressing lithium ion battery fires[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 42: 102756.

[68] Zhang Lin, Duan Qiangling, Meng Xiangdong, et al. Experimental investigation on intermittent spray cooling and toxic hazards of lithiumion battery thermal runaway[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115091.

[69] Liu Yubin, Gao Qing, Wang Guohua, et al. Experimental study on active control of refrigerant emergency spray cooling of thermal abnormal power battery[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116172.

[70] Yao Yongzheng, Jiang Yi, Chen Fang, et al. Experimental study of the strategy of $C_6F_{12}O$ and water mist intermittent spray to suppress lithium–ion batteries thermal runaway propagation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 91: 105407.

[71] Zhang Lin, Duan Qiangling, Xu Jiajia, et al. Experimental investigation on suppression of thermal runaway propagation of lithium–ion battery by intermittent spray[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106434.

[72] Gao Xinzeng, Kong Depeng, Huo Juntao, et al. Experimental study on fire extinguishing of lithium–ion batteries by alternating synergistic strategies of water mist and liquid nitrogen under low–temperature conditions[J]. Journal of Energy Storage, 2025, 134: 117986.

[73] Weng Jingwen, Ouyang Dongxu, Yang Xiaoqing, et al. Optimization of the internal fin in a phase–change–material module for battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114698.

[74] Hussain A, Shahid H, Ali I, et al. Passive thermal management system of lithium–ion batteries employing metal foam/PCM composite for the development of electric vehicles[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(1): 505–522.

[75] Ping Ping, Dai Xinyi, Kong Depeng, et al. Experimental study on nano–encapsulated inorganic phase change material for lithium–ion battery thermal management and thermal runaway suppression[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 463: 142401.

[76] Yao Zhubin, Xie Jiekai, Fu Tieqiang, et al. One–pot preparation of phase change material employing nano–scaled resorcinol–furfural frameworks[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 484: 149553.

（责任编辑：刘雅婷）

（上接第 30 页）

[13] 刘永欣, 王含柏. 雷达管制班组协作模型[J]. 中国民航大学学报, 2014, 32(4): 5–8.

[14] 石玉生, 田志强, 黄伟芬. 基于团队和任务维度的团队情境意识评价方法[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 216–223.

[15] 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.

[16] Taylor R M. Situational awareness rating technique (SART): the development of a tool for aircrew systems design[M]//Situational Awareness. London: Routledge, 2017: 111–128.

[17] 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.

[18] Mathieu J E, Heffner T S, Goodwin G F, et al. The influence of shared mental models on team process and performance[J]. Journal of Applied Psychology, 2000, 85(2): 273–283.

[19] Cicchetti D V, Allison T. A new procedure for assessing reliability of scoring EEG sleep recordings[J]. American Journal of EEG Technology, 1971, 11(3): 101–110.

[20] Gao Shan, Wang Lei. How flight experience impacts pilots′ decision–making and visual scanning pattern in low–visibility approaches: preliminary evidence from eye tracking[J]. Ergonomics, 2024, 67(10): 1284–1300.

[21] Dehais F, Behrend J, Peysakhovich V, et al. Pilot flying and pilot monitoring′s aircraft state awareness during go–around execution in aviation: a behavioral and eye tracking study[J]. The International Journal of Aerospace Psychology, 2017, 27(1/2): 15–28.

[22] Artman H. Team situation assessment and information distribution[J]. Ergonomics, 2000, 43(8): 1111–1128.

（责任编辑：孟　欣）