

中文引用格式:郝红勋,赵泽海,黄城,等.飞行学员情景意识评价的组合权重云模型[J].中国安全科学学报,2025,35(10):36-43.

英文引用格式:HAO Hongxun, ZHAO Zehai, HUANG Cheng, et al. Situational awareness evaluation of flight trainees based on combined weighting cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 36-43.

飞行学员情景意识评价的组合权重云模型*

郝红勋¹讲师, 赵泽海², 黄城², 徐佳惠²

(1 中国民航大学 飞行分校, 天津 300300; 2 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300)

中图分类号: X949; V328.1

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.0243

资助项目: 西藏自治区科技计划重点研发计划(XZ202401ZY0102); 西藏自治区科技计划重点研发计划揭榜挂帅专项(XZ202403ZY0019)。

【摘要】 为提升飞行学员的飞行训练能力, 辨识和评价飞行学员情景意识。依据扎根理论建立飞行学员情景意识评价指标体系, 采用博弈论对序关系法和结合变异系数法改进的指标相关性的权重确定法(CRITIC)分别确定主、客观赋权结果, 并进行组合权重计算, 提出评价飞行学员情景意识的组合权重云模型, 将评价指标云数字特征值输入云发生器, 获得飞行学员情景意识评级结果, 并通过实例进行验证。结果表明: 云模型能整体评价飞行学员情景意识, 学员A情景意识综合评价为优秀等级。其中, 飞行作风指标评价结果最好, 能对情景意识的保持起到较大的正向作用。飞行操作指标评价结果介于最好与最差之间, 专业知识指标评价结果最差, 2个一级评价指标中的特情处理能力、运行环境适应力存在较大的不足, 不利于情景意识的保持。

【关键词】 飞行学员; 情景意识评价; 组合权重; 云模型; 飞行训练

Situational awareness evaluation of flight trainees based on combined weighting cloud model

HAO Hongxun¹, ZHAO Zehai², HUANG Cheng², XU Jiahui²

(1 Flight Academy, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2 College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to enhance the flight training capabilities of trainees, identify and evaluate flight trainees' situational awareness, an index system for evaluating flight trainees' situational awareness was established based on grounded theory. The combined weights were calculated using game theory to integrate subjective weights, which were determined by the G1 method, and objective weights, which were derived from the criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method improved by the coefficient of variation method. Subsequently, a combined weighting cloud model was proposed: the digital characteristic values of the evaluation indices were input into a cloud generator to obtain situational awareness ratings, and the model was verified for the use of an example to evaluate the situation awareness of a flight trainee. The results indicate that the cloud model can comprehensively evaluate the situational awareness of flight trainees. The overall situational awareness of Trainee A was rated as excellent. Among the indicators, the flight discipline metric yielded the best evaluation result, contributing significantly to the maintenance of situational awareness. The flight operation skills metric was rated between the best and the poorest, while the professional knowledge indicator received the lowest score. Major deficiencies were

identified in two primary evaluation indicators, emergency handling capability and adaptability to operational environments, which were found to adversely affect the maintenance of situational awareness.

Keywords: flight trainee; situational awareness assessment; combination weighting; cloud model; flight training

0 引 言

飞行学员良好的情景意识对飞行训练安全发挥重要作用^[1-2]。在飞行学员训练阶段,因丧失“情景意识”导致的不安全事件屡见不鲜。因此,研究影响飞行学员情景意识并进行综合评价,进而通过培训使其更好地保持情景意识,可为未来入职航司后的机组资源管理(Crew Resource Management, CRM)训练打下坚实基础。

诸多学者对此开展了研究,ENDSLEY^[3-6]系统总结了情景意识研究成果并分析了情景意识产生流程,提出三级信息加工过程,建立了动态决策中的情景意识模型,随后,学者们研究情景意识变得更为广泛。在情景意识影响因素方面,DURSO 等^[7]把情景意识作为指标评价空管人员的绩效,证实情景意识对绩效有直接影响;黄圣等^[8]提出飞行员情景意识水平与飞行状态、设备故障、外部环境的影响紧密相关,需在 CRM 训练中加强飞行员的情景意识训练;李秀易等^[9]以民航典型事故案例为基础,构建了情景意识贝叶斯网络模型,分析出因飞行员个人理解偏差导致情景意识丧失的关键因素,但因数据局限无法全面分析出更多因素。在情景意识评价方面,MUEHLETHALER 等^[10]使用眼动仪采集飞行学员的情景观测点,以实时获取的飞行学员眼动状态数据反映其情景意识水平;丁松滨等^[11]运用物元理论建立了飞行安全综合评估模型,能有效降低如情景意识水平这种高模糊属性对象的评价不确定性;SAUS 等^[12]通过测量飞行学员在模拟机上的心率变异性,建立飞行任务绩效与情景意识之间的关系,间接反映出飞行学员情景意识水平;陈琳等^[13]采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和灰色关联法构建飞行学员核心胜任力评价模型,评价了情景意识、沟通协作等方面。综上,国内外学者大部分聚焦于单一维度对情景意识的影响,缺乏对情景意识影响因素的综合系统研究,未能建立多维度的情景意识评价框架。

鉴于此,笔者拟以飞行学员为对象,基于扎根理论^[14]系统研究飞行训练期情景意识多维度的影响因素并建立评价指标体系,提出基于序关系法和结合变

异系数法改进的基于指标相关性的权重确定法(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC)的博弈论组合权重-云模型,直观展现影响学员情景意识的主要因素,并通过实例验证提出方法的可行性与可靠性,以期提升飞行学员的飞行训练能力。

1 飞行学员情景意识评价指标体系构建

访谈飞行学员,筛选不安全事件、训练事故报告,最终形成分析资料集。使用 NVIVO14 软件^[15]对资料集进行编码,提取飞行学员飞行训练阶段的情景意识影响因素,建立情景意识评价指标体系。

1.1 资料收集整理

1.1.1 访谈资料

参考《航线运输驾驶员整体课程训练大纲》与克兰菲尔情景意识量表,设计飞行学员情景意识评价指标半结构化访谈提纲。

采用目的性抽样方法,选取的访谈对象分别处于私照、商照、仪表训练各阶段的共 8 名飞行学员,访谈前需阅读并思考提纲问题,采用线下(或线上)形式,时长约 1 h;结束后被试需核实访谈内容,确保资料与其观点的一致性。按此方法,收集到 8 篇共 5 万多字的访谈资料。

1.1.2 不安全事件、事故报告资料

航空安全自愿报告系统有大量与人为因素关联度高的信息,因其具有非处罚性和保密性,确保了资料的真实性和有效性;中国民航安全信息系统中有详细事故调查报告,具有高权威性与准确性。因此,在 2 个系统收集与飞行学员情景意识高关联度的资料,共收集到 30 条不安全事件和 5 篇国内训练事故的详细调查报告。

1.2 飞行学员情景意识评价编码

使用 NVIVO14 对资料集进行三级编码,生成飞行学员情景意识评价指标体系。

1.2.1 开放式编码

依据国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)10106 文件提出情景意识 6 大可观测行为,删除资料集内与情景意识不相关、相

互矛盾,出现数少于3次的基本范畴,最终形成166个基本概念与48个基本范畴,部分编码过程见表1。

表1 部分开放式编码过程示例

原始编码材料	基本概念	基本范畴
B-9518号飞机起飞后发动机转速下降,机组意识到发动机异常。因一边跑道施工,且发动机未完全失去动力,机组决定提前转弯试图尽早返场或寻找更合适迫降场地	处在飞机发动机失效、跑道环境复杂情况下的进退决策失误	特情决策能力
本次事故发生的直接原因为飞行教员在实施夜间目视返场过程,机组未对山区地形保持有效目视,未采取安全的越障飞行动作	对关键任务没有保持有效关注	注意力分配
⋮	⋮	⋮

1.2.2 主轴编码

在开放式编码基础上归纳基本范畴间的相似性联系,构建基本范畴间的类属关系。将48个基本范畴反复归纳,得到情景意识的15个评价指标。主轴编码结果见表2。

表2 主轴编码结果

二级评价指标	基本范畴
特情处理能力	特情决策能力;特情处理及时性;特情评价正确性
复杂信息处理能力	复杂信息整合;未来状况预判
运行环境适应力	外界天气情况;特殊天气处置;非常规环境
飞行操作熟练度	操作准确程度;持续培训;非期望航空器状态
个性特征	粗心大意;过于主观
危机意识程度	安全意识薄弱;警觉意识
心理复原力	不良心态;操作压力;精神压力;自信心建立
注意力管理	注意力分配合理性;注意力集中程度
飞行知识储备与理解	专业知识积累;飞行知识覆盖广
机组沟通协作能力	有效沟通;团队协作;沟通受阻
规章遵守及应用	严格执行SOP;交叉检查;标准程序执行准确性;飞行前准备工作
飞行经验累积程度	操作经验少;飞行经验少
飞行状态监控能力	飞行状态掌握情况;机械故障;飞行状态动态调节
多任务管理能力	多任务并行操作;工作分配不当
应急决策能力	错误决策;犹豫不决

1.2.3 选择性编码

《机组资源管理(CRM)训练指南》指出,从知识、技能、态度3方面提高受训人员CRM能力,将情景意识15个评价指标间的关系进一步聚拢,得到专业知识水平、飞行操作能力、飞行运行作风3个一级评价指标。

1.2.4 饱和度检验

为确保指标归纳的完整性与准确性,随机回访3位被试,收集整理二次访谈记录。在航空安全报告系统数据库再筛选20例因情景意识导致的飞行训练不安全事件,汇总成检验资料集;依次进行三级编码,经检验未有新的情景意识评价指标产生。

1.3 指标体系构建

以资料集的三级编码结果为基础,构建情景意识的评价指标体系,见表3。

表3 飞行学员情景意识评价指标体系
Table 3 Index system of factors influencing flight trainees' situational awareness

一级指标	二级指标
专业知识 B_1	知识储备与理解 B_{11}
	特情处理 B_{12}
	飞行经验 B_{13}
飞行操作 B_2	复杂信息处理 B_{21}
	多任务管理 B_{22}
	应急决策与执行 B_{23}
	沟通协作 B_{24}
	运行环境适应力 B_{25}
	飞行操作熟练度 B_{26}
	飞行状态监控 B_{27}
飞行作风 B_3	规章遵守及应用 B_{31}
	心理复原力 B_{32}
	注意力管理 B_{33}
	危机意识 B_{34}
	个性特征 B_{35}

2 飞行学员情景意识评价指标组合赋权

主观赋权法受个人主观影响,客观赋权法^[16]易受数据干扰。因此,使用序关系法和改进CRITIC法的博弈论组合赋权法,解决赋权不准确的问题。

2.1 基于序关系法的主观赋权

序关系法^[17]需对各指标依次进行重要度排序,具体计算步骤:

1) 指标重要度排序。邀请 m 位专家,对 n 个飞行学员情景意识评价指标重要程度打分。根据结果

得出指标序关系数据 $L_1, L_2, \cdots, L_n$ 。

2) 计算相邻指标 L_{k-1} 和 L_k 的重要程度比值 R_k :

$$R_k = \frac{L_{k-1}}{L_k} (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{1}$$

3) 计算指标权重,如下式:

$$\eta_n = \left[1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n R_k \right]^{-1} \tag{2}$$

$$\eta_{k-1} = R_k \eta_k = \frac{L_{k-1}}{L_k} (k = 1, 2, \cdots, n) \tag{3}$$

式中 η_k 为第 k 项指标的主观权重。

2.2 基于改进 CRITIC 法的客观赋权

CRITIC 法^[18]利用各指标间的冲突性大小和对比度进行赋权,对比度由标准差值衡量,指标信息内容大小由变异系数反应。具体计算步骤如下:

1) 数据标准化。收集 M 条指标的数据样本,每个样本包含 N 个评价指标。

计算各指标比的变异系数 Q_j 为:

$$Q_j = \frac{S_j}{\bar{b}_j} \quad (j = 1, 2, \cdots, N) \tag{4}$$

$$\bar{b}_j = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M b_{ij} \tag{5}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (b_{ij} - \bar{b}_j)^2} \tag{6}$$

式中: b_{ij} 为第 i 个数据样本的第 j 个评价指标; $\bar{b}_j$ 为第 j 项指标均值; S_j 为第 j 项指标标准差。

2) 计算信息系数 λ_j :

$$\lambda_j = Q_j \sum_{i=1}^N (1 - r_{ij}) \quad (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{7}$$

式中: r_{ij} 为 Pearson 相关系数。

3) 确定各指标 j 的客观权重 σ_j :

$$\sigma_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^N \lambda_j} \quad (j = 1, 2, \cdots, N) \tag{8}$$

2.3 基于博弈论的组合赋权

基于博弈论的组合赋权法以纳什均衡为目标,构造最优对策模型与线性方程组,极小化主观权重和客观权重间的离差,确定最优线性组合,归一化处理后得出综合权重^[19]。

2.4 情景意识各评价指标赋权

邀请 10 位航校飞行教员对各指标赋权,考虑专家系数,按式(1)一式(3)计算得出 η_k ,据式(4)一式(8)得到 σ_j ,再基于博弈论的组合赋权法得到各

指标组合权重,归一化处理后的计算结果见表 4。

表 4 各指标权重结果

Table 4 Secondary indicator weighting values			
指标	η_k	σ_j	组合权重
B_{11}	0.049 0	0.101 7	0.069 3
B_{12}	0.062 2	0.076 7	0.067 7
B_{13}	0.125 0	0.036 2	0.090 9
B_{21}	0.033 6	0.048 3	0.039 4
B_{22}	0.053 7	0.077 6	0.063 2
B_{23}	0.088 6	0.062 9	0.079 0
B_{24}	0.047 8	0.048 3	0.048 0
B_{25}	0.036 2	0.045 7	0.039 8
B_{26}	0.062 2	0.054 8	0.059 3
B_{27}	0.043 5	0.064 2	0.051 0
B_{31}	0.106 4	0.069 7	0.092 2
B_{32}	0.083 3	0.073 8	0.079 6
B_{33}	0.087 1	0.068 0	0.079 7
B_{34}	0.062 2	0.069 7	0.065 1
B_{35}	0.059 1	0.102 5	0.075 5
B_1	0.257 3	0.318 7	0.282 5
B_2	0.401 3	0.284 4	0.353 4
B_3	0.341 4	0.396 9	0.364 1

3 飞行学员情景意识评价云模型构建

云模型是实现定性概念和定量表示间转换的数学模型,引入期望、熵和超熵 3 个特征数字计算得到标准云与评价云,将两者对比后得到对应指标评价结果。

3.1 云模型算法

云模型通过计算期望、熵、超熵实现情景意识定性概念与定量云数字特征值的相互转化。

云滴在系统空间分布的期望值 E_x 为:

$$E_x = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{9}$$

云滴分布的模糊性熵 E_n 表示为:

$$E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \tag{10}$$

反映云层厚度,度量熵的不确定性,以超熵 H_e 表示为:

$$H_e = \sqrt{|S^2 - E_n^2|} \tag{11}$$

3.2 评价标准云构建

为构建评价等级标准云,引入具有内在数学和谐性的黄金分割比来平衡模型的不确定性,避免出现过度拟合的状况,使模型更加稳定^[20]。各等级分值区间、云数字特征值见表 5。

表 5 评价等级区间划分与标准云云数字特征

Table 5 Evaluation class interval division and standard
cloudy numerical features

等级	区间划分	E_{x_e}	E_{n_e}	H_{e_e}
优秀 V_1	(8.0,10.0]	10.00	1.031	0.183
较好 V_2	(6.0,8.0]	6.91	0.637	0.113
中等 V_3	(4.0,6.0]	5.00	0.394	0.070
较差 V_4	(2.0,4.0]	3.09	0.637	0.113
极差 V_5	(0,2.0]	0.00	1.031	0.183

将云数字特征输入 Matlab 软件,得到情景意识评价标准云图(云滴数 $N=1\ 000$)。

3.3 评价综合云计算

评价指标体系有 3 个层级,依次计算出二级指标、一级指标的云数字特征值,最终得出飞行学员情景意识综合评价云数字特征值,生成综合评价云图。

综合云数字特征值计算如下:

$$\begin{cases} E_{x_h} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i E_{x_i}}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \\ E_{n_h} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i^2 E_{n_i}}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2} \\ H_{e_h} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i^2 H_{e_i}}{\sum_{i=1}^n \omega_i^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: E_{x_h} 、 E_{n_h} 、 H_{e_h} 分别为综合评价云的期望、熵、超熵值; E_{x_i} 、 E_{n_i} 、 H_{e_i} 分别为第 i 个指标的期望、熵、超熵值; ω_i 为组合权重值。

4 飞行学员情景意识评价云模型实证分析

选取某航校男性飞行学员为研究对象,该学员已完成筛选检查考试、单飞及特课训练,目前处于商照训练阶段,通过构建的模型评价其情景意识。

4.1 指标云数字特征值确定

航校教员承担飞行学员全过程的飞行训练任务,熟悉学员能力及情景意识等知识技能。因此,邀请 9 位教员依据表 5 评分等级,对学员实际训练过程中展现的各项二级指标能力进行评分。由式(9)一式(11) 得到各二级指标云数字特征值,并

按升序排列,结果见表 6。

按式(12) 计算情景意识评价一级指标云数字特征值,结果见表 7。

表 6 二级指标云数字特征值结果

Table 6 Values of cloud digital eigenvalue for
secondary indicators

二级指标	$E_{x_{h2}}$	$E_{n_{h2}}$	$H_{e_{h2}}$	排序结果
B_{11}	8.016 7	0.292 4	0.127 9	5
B_{12}	7.794 4	0.188 7	0.163 8	3
B_{13}	8.188 9	0.297 1	0.110 6	8
B_{21}	8.205 6	0.338 9	0.126 8	9
B_{22}	8.166 7	0.408 5	0.096 8	7
B_{23}	8.477 8	0.372 9	0.151 3	11
B_{24}	8.122 2	0.337 3	0.114 4	6
B_{25}	7.655 6	0.329 6	0.040 7	2
B_{26}	7.966 7	0.441 0	0.109 4	4
B_{27}	8.772 2	0.623 6	0.061 2	14
B_{31}	8.483 3	0.506 0	0.064 3	12
B_{32}	7.594 4	0.190 3	0.068 4	1
B_{33}	8.438 9	0.280 1	0.125 7	10
B_{34}	8.605 5	0.312 6	0.044 3	13
B_{35}	8.783 3	0.529 2	0.106 2	15

表 7 一级指标云数字特征值结果

Table 7 Values of cloud digital eigenvalue for
first-level indicators

一级指标	$E_{x_{h1}}$	$E_{n_{h1}}$	$H_{e_{h1}}$
B_1	8.019 3	0.267 7	0.090 8
B_2	8.226 3	0.411 0	0.110 1
B_3	8.371 9	0.513 9	0.113 6

4.2 计算结果分析

4.2.1 二级指标结果分析

据表 6、表 7 得到的云数字特征值,用 Matlab 绘制评价云与标准云的对比图。以飞行操作熟练度为例,如图 1 所示。

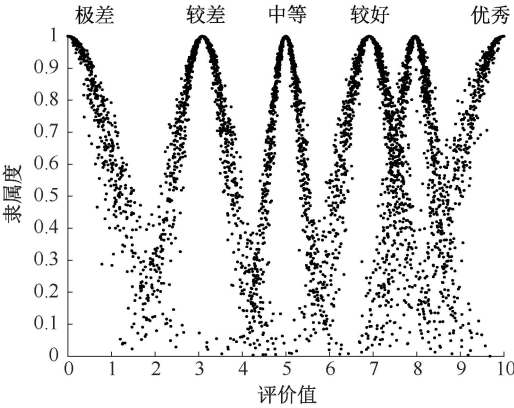


图 1 部分二级指标评价云图

Fig. 1 Evaluation cloud for selected secondary indicators

由图 1 和表 6 可知:二级指标中, B_{27} 、 B_{34} 、 B_{35} 的评级结果为情景意识优秀, B_{11} 、 B_{12} 、 B_{13} 、 B_{21} 、 B_{22} 、 B_{23} 、 B_{24} 、 B_{25} 、 B_{26} 、 B_{31} 、 B_{32} 、 B_{33} 的评级结果为情景意识较好。其中, B_{32} 、 B_{25} 、 B_{12} 的期望值较低,说明心理复原力、运行环境适应力、特情处理能力的不足更突出,对各一级指标产生负面影响。

4.2.2 一级指标结果分析

一级指标代表的情景意识等级评级云图如图 2 所示。

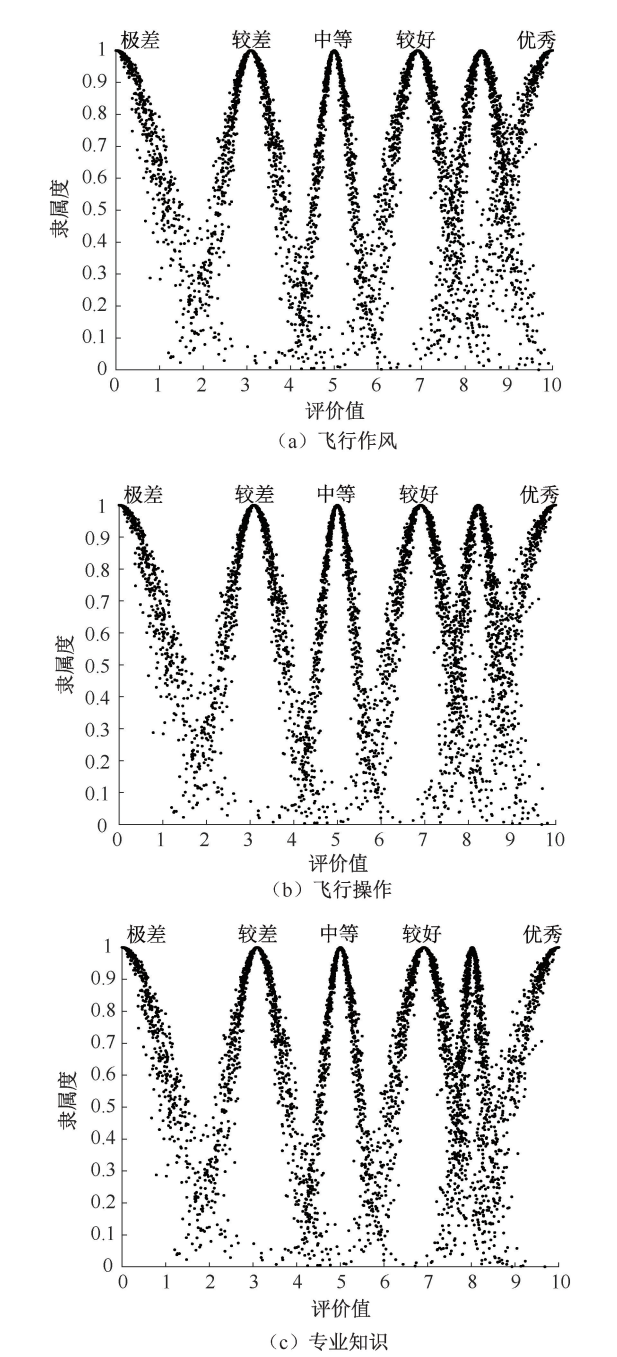


图 2 一级指标评价云图

Fig. 2 Evaluation cloud for first-level indicators

从图 2、表 7 可以看出,各一级指标期望值由小到大排序依次为 B_1 、 B_2 、 B_3 ,一级指标均处在较好与优秀等级区域,表明这些指标代表的能力较高。 B_3 期望值是一级指标中评价值最高项;而 B_1 期望值是一级指标中能力得分最低项,对综合评价结果产生负面影响。

4.2.3 综合指标结果讨论

综合级指标代表的情景意识等级评级云图如图 3 所示。

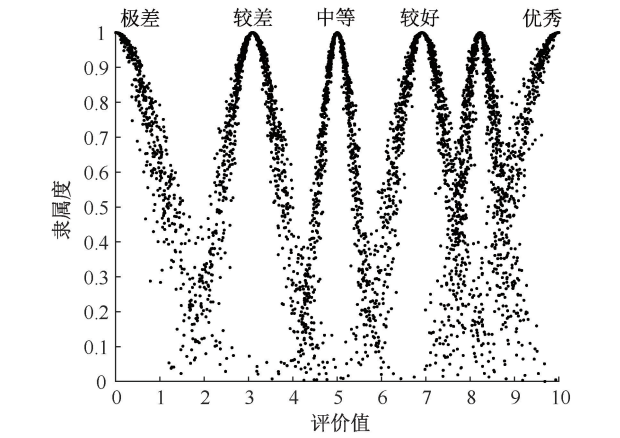


图 3 情景意识综合评价云图

Fig. 3 Comprehensive evaluation cloud of flight trainee's situational awareness

将指标权重和一级指标云数字特征值代入式 (12),计算得到学员情景意识综合评价云数字特征值 E_{x_h} 为 8.220 8。从图 3 可以看出,综合云滴位于 $[7.0, 9.0]$,分布较为集中,说明情景意识介于较好与优秀之间。同时, En_h 值 0.4175, He_h 值 0.106 9,数值均较低,云厚度较小,表明评价一致性较高,结果稳定可靠。

依据模型得到评价结果,说明该学员的情景意识水平为优秀,但存在不足之处。该学员后续训练应增加心理复原力、运行环境适应力和特情处理能力的训练。

4.3 评价方法对比分析

为验证云模型方法的有效性、可靠性,与模糊综合评价法^[21]进行对比。以前述 9 位教员对各指标的评分确定隶属度矩阵,并与表 4 中的一级指标组合权重相乘,得一级指标综合评价矩阵。结合评语集等级区间中位数计算得到评价值,见表 8。

2 种方法评价结果近似,但模糊综合评价法选取隶属度函数时没有统一参考标准,而云模型方法避免了因隶属度不确定性带来的误差,且从云图上直观得出各指标评价结果,解决了情景意识影响因

表 8 2 种评价方法结果对比

Table 8 Comparison of the results of the two evaluation methods

一级指标	云模型	模糊综合评价法
飞行作风	8.371 9	8.444 4
飞行操作	8.226 3	8.315 3
专业知识	8.019 3	8.184 7

素模糊性与随机性问题。

5 结 论

1) 采用扎根理论逐层分析提炼情景意识评价指标,建立多维度飞行学员情景意识评价指标体系,该指标体系包含 3 个一级指标、15 个二级指标;运

用序关系法和 CRITIC 法分别计算各级评价指标的主客观权重值,再基于博弈论法得到指标综合权重,兼顾主客观权重,确保评价指标权重的合理性。

2) 引入云模型结合组合权重对飞行学员 A 开展情景意识评价,得到各级指标和综合评价云图,结果表明:该学员一级指标中专业知识评价结果最差,二级指标中特情处理能力、运行环境适应力存在明显不足。

3) 未来可引入机器学习算法优化提出的模型,以提升复杂情景下的评价精度;同时,使用优化后的模型,评价飞行(学)员的其他几个非技术能力,可扩大模型的应用范围。

参 考 文 献

[1] PARMAR S, THOMAS R P. Effects of probabilistic risk situation awareness tool (RSAT) on aeronautical weather-hazard decision making[J]. *Frontiers in Psychology*, 2020, 11:DOI:10.3389/FPSYG.2020.566780.

[2] WEI Hengyang, ZHUANG Damin, WANYAN Xiaoru, et al. An experimental analysis of situation awareness for cockpit display interface evaluation based on flight simulation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(4): 884-889.

[3] ENDSLEY M R. Situation awareness misconceptions and misunderstandings[J]. *Journal of Cognitive Engineering & Decision Making*, 2015, 9(1):4-32.

[4] ENDSLEY M R. Measurement of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1):65-84.

[5] ENDSLEY M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 37(1):32-64.

[6] ENDSLEY M R, RADWIN R G. A systematic review and meta-analysis of direct objective measures of situation awareness: a comparison of SAGAT and SPAM[J]. *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, 2021, 63(1):124-150.

[7] DURSO F T, HACKWORTH C A, TRUITT T R, et al. Situation awareness as a predictor of performance in en route air traffic controllers[J]. *Air Traffic Control Quarterly*, 1998, 6(1):1-20.

[8] 黄圣. 情景意识在飞行教学和训练中的重要性[J]. *中国高新区*, 2017(2):74.

[9] 李秀易,张荣昊,陈曦. 民航飞行员情景意识理解偏差影响因素分析[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2024, 35(3): 5-9, 15.

LI Xiuyi, ZHANG Ronghao, CHEN Xi. Analysis on the factors influencing the deviation of civil aviation pilots' situational awareness understanding[J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2024, 35(3): 5-9, 15.

[10] MUEHLETHALER C M, KNECHT C P. Situation awareness training for general aviation pilots using eye tracking[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(19): 66-71.

[11] 丁松滨,谷倩倩. 航空公司飞行安全综合评估方法研究[J]. *航空工程进展*, 2017, 8(4):381-387.

DING Songbin, GU Qianqian. Research on comprehensive evaluation method of airline flight safety[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2017, 8(4):381-387.

[12] SAUS E, JOHNSEN H B, 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):1 262-1 268.

[13] 陈琳,米永胜. 民航飞行学员核心胜任力模型构建研究[J]. *综合运输*, 2022, 44(6):58-63.

CHEN Lin, MI Yongsheng. Research on the construction of core competency model of civil aviation flight cadets[J]. *China Transportation Review*, 2022, 44(6):58-63.

[14] 罗凤娥,赵琪,齐放,等. 基于 CBTA 的签派员岗位胜任力模型的构建研究[J]. *综合运输*, 2021, 43(4):88-94, 116.

LUO Feng'e,ZHAO Qi,QI Fang, et al. Construction of dispatcher post competency model based on CBTA. [J]. China Transportation Review,2021,43(4):88-94,116.

[15] 郑秀梅,田晓康,罗茜,等. 地方政府交通运输安全生产政策注意力研究[J]. 中国安全科学学报, 2023,33(5): 74-80.

ZHENG Xiumei,TIAN Xiaokang,LUO Qian, et al. Research on attention of local government's transportation work safety policy[J]. China Safety Science Journal,2023,33(5):74-80.

[16] 陈双赢,邬晓光,韩伟,等. 基于最小二乘的 AHP-CRITIC 组合赋权的砼梁桥技术状况指标权重确定[J]. 沈阳大学学报:自然科学版, 2024,36(2):171-178.

CHEN Shuangying, WU Xiaoguang, HAN Wei, et al. Determination of weights of concrete girder bridge technical condition indicators based on least squares AHP-CRITIC combination assignment[J]. Journal of Shenyang University: Natural Science,2024,36(2):171-178.

[17] ZHOU Zhiyong, KIZIL M, CHEN Zhong, et al. A new approach for selecting best development face ventilation mode based on G1-coefficient of variation method[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(10): 2 462-2 471.

[18] 聂兴信,高赵祥,刘哲伟,等. 基于组合赋权法-云模型的采矿工作面热湿度风险等级评定[J]. 安全与环境学报, 2022,22(4):1 957-1 969.

NIE Xingxin,GAO Zhaoxiang,LIU Zhewei, et al. Study on evaluation of heat and humidity risk level of mining face based on combination weighting method and cloud model[J]. Journal of Safety and Environment,2022,22(4):1 957-1 969.

[19] 毕娟,李希建. 基于博弈论组合赋权灰靶模型的煤矿安全综合评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2019,15(7): 113-118.

BI Juan,LI Xijian. Comprehensive evaluation of coal mine safety based on grey target model with combination weighting of game theory[J]. Journal of Safety Science and Technology,2019,15(7):113-118.

[20] 田延飞,周欣蔚,陈立家,等. 水上通航环境危险度云模型及其应用[J]. 浙江海洋大学学报:自然科学版, 2021, 40(6):547-554.

TIAN Yanfei,ZHOU Xinwei,CHEN Lijia, et al. Risk cloud model and an application for evaluation of nautical navigational environment[J]. Journal of Zhejiang Ocean University:Natural Science, 2021,40(6):547-554.

[21] 钟虹,何沙. 基于贝叶斯网络的连续管作业人因失误风险因素评价分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5):144-150.

ZHONG Hong,HE Sha. Evaluation and analysis on risk factors of human error in coiled tubing operation based on Bayesian network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023,19(5):144-150.

作者简介： 郝红勋 （1977—）,男,河南新乡人,博士,讲师,主要从事飞行技术、低空技术及工程、飞机加装及适航取证等方面的研究。E-mail:hxxhao@ cauc. edu. cn。