

中文引用格式:刘威成,孙有朝,金恒,等. 基于改进 CREAM 的着舰阶段复杂任务环境飞行员人因失误预测[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(2): 44-51.

英文引用格式:LIU Weicheng, SUN Youchao, JIN Heng, et al. Prediction of pilot human errors during the carrier landing phase under complex task environments based on an improved CREAM method [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(2): 44-51.

基于改进 CREAM 的着舰阶段复杂任务环境 飞行员人因失误预测*

刘威成^{1,2}, 孙有朝^{**1}教授, 金恒¹, 陈梓畅^{1,2}

(1 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2 中国航空无线电电子研究所, 上海 202241)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.02.0102

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空局民航联合基金资助(U2033202, U1333119);国家自然科学基金资助(52172387);中央高校基本科研业务费(ILA220321A23);中国航空科学基金资助(2022Z071052001)。

【摘要】 为提高着舰阶段安全性,基于认知可靠性和失误分析法(CREAM)开展着舰阶段复杂任务环境下飞行员人因失误预测研究。结合着舰阶段飞行员动作流程,修正原始 CREAM 方法中共同绩效因子(CPC)定义,提出基于改进 CREAM 方法的飞行员人因失误概率预测方法,描述着舰阶段飞行员所处的情景环境;引入环境影响指数与效应影响指数,表征不同任务环境对飞行员认知功能的影响;结合着舰阶段实际情景环境,设计并开展模拟着舰评估试验;通过分析被试人员的脑电、眼动、心电、肌电数据及美国航空航天局任务负荷指数(NASA-TLX)量表数据等特征指标,评估被试人员在不同环境下的负荷水平,进而计算不同认知功能的效应影响指数,预测人因失误概率。研究结果表明:所提出的飞行员人因失误概率预测方法,使用客观数据评估替代专家主观评价,能够提高预测结果真实性,该方法可以预测 20 种不同环境因素影响下飞行员人因失误概率。

【关键词】 认知可靠性和失误分析法(CREAM); 着舰阶段; 飞行员; 复杂任务环境; 人因失误; 认知功能

Prediction of pilot human errors during the carrier landing phase under complex task environments based on an improved CREAM method

LIU Weicheng^{1,2}, SUN Youchao¹, JIN Heng¹, CHEN Zichang^{1,2}

(1 College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China; 2 Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 202241, China)

Abstract: To improve the safety of aircraft landing phase, this study investigates the prediction of pilot human error during the carrier landing phase complex task environments based on CREAM. Based on the pilot operational workflows during the carrier landing phase, this work recalibrates the original Common Performance Condition (CPC) factors in CREAM, and proposes an improved approach for predicting the probability of human error in pilots based on the improved CREAM method, describing the situational

* 文章编号:1003-3033(2026)02-0044-08; 收稿日期:2025-09-21; 修稿日期:2025-12-02

** 通信作者:孙有朝(1964—),男,河南南阳人,博士,教授,主要从事可靠性与适航技术方面的研究。E-mail: sunyc@nuaa.edu.cn。

environment in which the pilot is located during the carrier landing phase. It introduces an Environmental Impact Index and Effect Impact Index to characterize the influence of various task environments on pilots' cognitive functions. A simulated carrier landing assessment experiment is designed and conducted based on the actual situational environment during the carrier landing phase. By analyzing characteristic indicators such as electroencephalogram (EEG), eye-tracking, electrocardiogram (ECG), and electromyography (EMG) data, and National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) scale data of the subjects, the load level of the subjects in different environments is assessed, and then the effect impact index of different cognitive functions is calculated to predict the probability of human error. The results demonstrate that the proposed method for predicting probability of human error in pilots can improve the accuracy of prediction results by using objective data assessment, which instead of experts' subjective evaluations. This method can predict the probability of human error in pilots under the influence of 20 different environmental factors.

Keywords: cognitive reliability and error analysis method (CREAM); carrier landing phase; pilot; complex task environments; human error; cognitive function

0 引言

航母是衡量国家综合实力的象征之一^[1-3]。舰载机承担着对海打击、电子对抗等攻击和防御任务^[4-5]。然而,由于海上环境的复杂性,舰载机起降一直被视为极具挑战性的任务,其中,着舰过程更是伴随着巨大风险。据统计,约 80% 的舰载机飞行事故发生在着舰任务过程中^[6],而这一阶段的持续时间仅占整个任务时间的约 4%^[7]。同时,随着自动着舰系统的迅速发展,由机械故障导致的飞行事故频率已大幅降低,人因失误已成为影响着舰阶段安全性的最大风险因素^[8]。相比其他机组成员,飞行员承担着最大的操作压力,是人因失误的最主要来源,针对飞行员人因失误开展研究具有重大意义^[9]。

现有研究主要通过生理数据或结合人因可靠性分析方法开展飞行员人因失误相关研究。李丽等^[10]基于心电、眼动和呼吸等生理指标和支持向量机识别飞行员疲劳状态;汪磊等^[11]开展模拟飞行试验,记录不同特情下飞行员眼动数据,研究飞行员视觉注意分配机制;YANG Kun 等^[12]使用人为差错率预测法分析了起飞阶段机组人员的人因失误,基于任务分解结果,计算每个子任务失效概率。GUO Yundong^[13]等人将人误评估与减少技术 (Human Error Assessment and Reduction Technique, HEART) 和模糊层次分析法相结合,通过模糊判断矩阵处理专家评估结果,提高飞行过程中人因失误概率的预测精度;HIROSE^[14]将认知可靠性和失误分析法 (Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM) 与功能共振方法相结合,基于事故分析结

果,定义新的共同绩效因子 (Common Performance Condition, CPC),分析人因失误发生原因;结合着舰阶段复杂任务环境,SUN Guoqiang 等^[15]通过引入情感比例参数优化 HEART 模型,改进人因失误风险评估过程;ZHAO Jianyu 等^[16]将舰载机动力学仿真模型与人因可靠性模型相结合,建立着舰过程驾驶员人因失误分析模型,但研究更倾向于舰载机的飞行性能。综上所述,现有关于飞行员人因失误的研究主要通过模拟试验采集生理数据,或基于事故分析及专家评估等方式溯因与预测人因失误,这些研究方法相对成熟。然而,针对着舰复杂任务环境下飞行员人因失误的研究相对较少,现有人因可靠性分析方法虽已有应用,但在定性与定量分析结合方面仍较为薄弱,存在改进空间。

因此,笔者拟基于 CREAM 方法,通过修正 CPC 因子定义,提出复杂任务环境下飞行员人因失误概率预测方法;考虑复杂任务环境,设计模拟试验,采集不同环境因素下飞行员生理数据,评估负荷水平,计算效应影响指数,以预测飞行员人因失误概率。

1 CREAM 方法

CREAM 方法以人的认知操作过程模型为基础,通过分析任务环境,预测操作者认知操作动作的可靠性^[17]。CREAM 方法将影响具体认知活动的因素称为 CPC 因子,分为基本法和扩展法。

CREAM 基本法将操作人员克服或者适应情景环境所必需的能力或者付出的努力称为控制模式,分为混乱型、机会型、战术型和战略型。CREAM 扩展法对操作人员在任务过程中的认知行为进行了认知功能划分,认知功能具体划分为 4 大类,观察、解

释、计划、执行,并确定了 15 种认知行为。同时,4 种认知功能均有其对应的失效模式,每种失效模式也都有相应的基本失效概率值,见表 1。

表 1 认知功能失效模式与基本失效概率

Table 1 Cognitive function failure modes and basic failure probabilities		
认知功能	失效模式	基本失效概率值
观察	观察目标错误	0.001
	错误辨识	0.007
	观察没有进行	0.007
解释	决策失误	0.01
	延迟解释	0.01
	诊断失误	0.02
计划	优先权不正确	0.01
	计划不当	0.01
执行	动作方式不正确	0.003
	动作时间不正确	0.003
	动作目标错误	0.000 5
	动作顺序错误	0.003
	动作遗漏	0.003

2 面向复杂任务环境的改进 CREAM 方法

CREAM 方法中定义了 9 个 CPC 因子,描述操作员发生错误行为的原因,主要用于核电厂的概率安全评估,但着舰复杂任务环境与核电厂工作环境有明显不同,需要修正 CPC 因子。

2.1 面向复杂任务环境的 CPC 因子修正

使用 CREAM 方法预测飞行员人因失误概率时,首先应确定着舰阶段中飞行员动作序列,针对着舰任务高风险、时间紧迫等特点,修正 CPC 因子,以满足分析要求。

舰载机着舰任务通常分为 5 个阶段^[1]:归航阶段、待机阶段、进场阶段、下滑阶段与拦阻阶段。归航与待机阶段的飞行操作与常规飞行任务较为相似,进场阶段、下滑阶段与拦阻阶段飞行员着舰操作更加典型,故选择进入着舰航线后(即进场阶段、下滑阶段与拦阻阶段)飞行员的操作进行分析。详细

分析以上 3 个阶段的飞行任务,得到飞行员的动作流程,并修正原始 CREAM 方法中的 9 个 CPC 因子,提出面向复杂任务环境的 CPC 因子体系。修正后 CPC 因子及定义见表 2,飞行员动作流程见表 3。

表 2 修正后 CPC 因子及定义

Table 2 Modified CPC factors and definitions	
CPC 因子名称	定义
着舰指导的完善性	驾驶舱内部的显示、告警信息等着舰指导信息的完善程度
着舰任务工作环境	不同的物理环境因素对于飞行员执行着舰任务的影响程度
人机界面显示元素的合理性	座舱内部人机界面设计方案对飞行员信息获取效率及人机交互能力的影响
着舰外界条件的复杂性	执行着舰任务时外界海况和天气条件对于飞行员的影响
需要同时关注的目标数	飞行员需同时关注的目标点数量的变化,对着舰任务产生的影响
着舰任务的可用时间	飞行员从开始进场到最终接触甲板所能利用的时间长短对着舰任务的影响
着舰任务时段	飞行员在一天中不同时段执行着舰任务对于安全性的影响
飞行员培训和经验的充分性	飞行员在执行着舰任务前的飞行经验及所接受的培训程度
着舰任务各成员的合作质量	飞行员与舰上机组人员间的沟通水平、交流质量对着舰任务的影响

2.2 复杂任务环境下的飞行员人因失误概率预测

CREAM 方法中定义,人的认知行为共有 4 种功能,即观察、解释、计划和执行^[18]。着舰任务过程中,飞行员各动作均受 9 个 CPC 因子影响,认知功能失效概率直接影响人因失误概率,且随着认知功能的复杂性和任务压力增加,这种影响更加显著,故首先分析复杂任务环境下飞行员每一项动作,划分其包含的认知功能,“√”表示飞行员动作中包含该认知功能,飞行员动作流程及认知功能划分结果见表 3。

表 3 飞行员动作流程及认知功能划分

Table 3 Pilot action process and cognitive function classification					
任务阶段	飞行员动作	观察	解释	计划	执行
进场阶段	调整油门杆,维持速度	—	—	√	√
	操纵中央驾驶杆,保持着舰参考高度与迎角	—	—	√	√
	完成着舰相关检查,放下尾钩和起落架,切断武器开关	—	√	—	√
	监控飞机速度、高度、迎角等飞行参数	√	—	—	—

续表 3

任务阶段	飞行员动作	观察	解释	计划	执行
下滑阶段	横向操纵中央驾驶杆,转弯	—	—	√	√
	监控姿态、航向等	√	—	—	—
	判断着舰点距离	—	√	—	—
	与着舰指挥官沟通,沿正确下滑道下滑	√	—	—	√
	观察菲涅尔透镜,保持飞机高度	√		√	—
	控制驾驶杆对准着舰跑道中线	—	—	√	√
拦阻阶段	接触航母甲板后,将油门推到最大,勾住拦阻索,关闭发动机,完全制动	—	—	—	√
	若接收复飞指令,保持油门最大再次起飞	—	√	√	√

修正后的 CPC 因子具有改进、不显著和降低 3 种期望效应,表示当 CPC 因子处于该层级等级时,复杂任务环境下飞行员执行着舰任务的人因失误概率变化分别为降低、维持与升高。为方便人因失误概率计算,定义 CPC 因子效应量化值如下:

$$CPC_i = \begin{cases} 1 & \text{改进} \\ 0 & \text{不显著 } i = 1, 2, \dots, 9 \\ -1 & \text{降低} \end{cases} \quad (1)$$

式中*i*为对应的 CPC 因子。

引入环境影响指数 $\theta^{[19]}$,它与飞行员在不同任务环境下的认知功能水平相关。任务环境对飞行员的影响程度越大时, θ 越大,对人因失误概率影响越严重。引入效应影响指数 π ,表示 CPC 因子对人的 4 种认知功能(观察、解释、计划、执行)失效概率的影响程度,各 CPC 因子的 π 取决于当前的情景环境。 θ 的修正式如下:

$$\theta = \sum_{i=1}^9 \pi_{ji} m_i \quad (2)$$

式中;*j*为对应的认知功能失效模式(观察、计划、解释、执行);*i*为对应的 CPC 因子; π_{ji} 为对应的 CPC 因子各认知功能失效模式的效应影响指数;*m_i*为对应 CPC 因子的效应量化值。

CREAM 方法认为,人因失误是由认知失效引起的,将人因失误概率称为认知失效概率(Cognitive Failure Probability,CFP)。为便于分析,文中将人因失误概率统称为 CFP,定义表 1 中给出的基本失效概率为基本人因失误概率 CFP₀。

CFP、CFP₀ 和环境影响指数 θ 之间关系式如下:

$$\lg(CFP/CFP_0) = k\theta \quad (3)$$

CFP 的计算公式表示为:

$$CFP = CFP_0 \times 10^{k\theta} \quad (4)$$

式中*k*为不同环境因素对人因失误概率的影响程度,*k*由环境影响指数 $\theta_{\max}$ 、 $\theta_{\min}$,以及人因失误概率 CFP_{max}、CFP_{min} 确定:

$$\theta_{\max} = \lg(CFP_{\max}/CFP_0)/k \quad (5)$$

$$\theta_{\min} = \lg(CFP_{\min}/CFP_0)/k \quad (6)$$

把上述公式相减,得到关系式:

$$k = \lg(CFP_{\max}/CFP_{\min})/(\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (7)$$

$$CFP_0 = CFP_{\max}/10^{k\theta_{\max}} \quad (8)$$

分析可知:人因失误概率与环境影响指数 θ 直接相关。若想计算不同任务环境下飞行员的人因失误概率,需要确定各 CPC 因子的效应量化值与效应影响指数。

以往基于 CREAM 方法的人因失误概率预测相关研究中,多通过专家评估确定 CPC 因子期望效应值,主观性影响较大。针对此问题,基于模拟着舰试验中飞行员生理数据及主观量表数据确定 CPC 因子期望效应值及效应影响指数,可更加客观准确地预测飞行员人因失误概率。

3 基于模拟试验的人因失误预测

根据第 2 节的相关分析,基于修正后的 CPC 因子定义,考虑着舰阶段中飞行员动作流程,设计复杂任务环境,开展模拟着舰任务研究。

3.1 CPC 因子评估试验设计

CPC 因子是对人的行为产生影响的情景环境因素,评估着舰阶段中 CPC 因子不同认知功能的效应量化值,就是评估复杂任务环境对飞行员的影响程度。基于表 2 中给出的修正后 CPC 因子定义,针对不同因子调整任务环境设置,分别设计试验,收集任务过程中飞行员各项生理数据特征指标,开展负荷评估,衡量各因子对飞行员人因失误概率的影响程度。评估以下 6 个 CPC 因子,CPC 因子及对应环境因素设置见表 4。

其中,告警形式 2、常温、有噪声、正常文字、图符、轻微波浪、小雨、正常模式、日间航行环境下的模拟着舰任务环境与真实着舰任务环境较为接近,以上述环境因素设置下的模拟着舰任务为基准,认为

表 4 试验环境因素设置

Table 4 Environment factor settings in experiment	
CPC 因子	环境因素设置
着舰指导的完善性	告警形式 1(告警文字闪烁)
	告警形式 2(告警文字常亮)
	告警形式 3(告警文字闪烁伴有语音提示)
	告警形式 4(仅有语音提示)
着舰任务工作环境	低温(座舱温度 20 ℃)
	常温(座舱温度 25 ℃)
	高温(座舱温度 30 ℃)
	有噪声
	无噪声
人机界面显示元素的合理性	小号文字、图符
	正常文字、图符
	大号文字、图符
着舰条件的复杂性	平静海面
	轻微波浪、小雨
	大海浪、大雨
需要同时关注的目标数	正常模式
	简化模式(仅保留关键数值)
着舰任务时段	日间航行
	夜间航行

此时 CPC 因子对应的期望效应为不显著,在此基础上分别调整单一环境变量进行研究。

每次试验首先对被试进行着舰流程及相关操作培训,随后进行 2 组常规着舰任务与 6 组 CPC 因子评估试验。第 1 次常规着舰任务作为适应组,该组试验用于被试熟悉模拟器操作,适应操控装置、显示设置等,提高着舰任务完成度,试验数据不用于统计分析。各组 CPC 因子评估试验根据环境因素设置的不同,进行 1~3 次模拟着舰任务,每次任务时间约 7 min。

3.2 飞行员认知功能的效应影响指数计算

根据原始 CREAM 方法中认知功能相关定义,结合着舰任务复杂环境,建立 4 种认知功能与任务过程中飞行员不同种类负荷的对应关系,见表 5。通过对比飞行员在复杂环境下与常规环境下执行着舰任务的负荷情况,确定 CPC 因子的期望效应值。相比常规环境下,总体负荷水平上升,说明该任务环境下飞行员执行着舰任务的人因失误概率升高,相应 CPC 因子的期望效应值为降低,反之同理。

为有效反映飞行员相应认知功能效应差异,选取生理数据特征指标。现有研究中,通过眼动相关指标可反映飞行员的视觉负荷变化,随着视觉负荷增加,注视时间逐渐增长^[20],瞳孔直径逐渐增大^[21]。脑电 α 波段^[22]与 β 波段功率谱密度值^[23]

表 5 认知功能与负荷种类

Table 5 Cognitive functions and types of load		
认知功能	认知功能定义	负荷种类
观察	飞行员对环境、任务信息等的观察和监控能力	视觉负荷
解释	飞行员对观察到的信息进行分析和理解的过程	脑力负荷
计划	飞行员根据解释的信息制定行动策略或应对方案	心理负荷
执行	飞行员将规划好的策略付诸实施的过程	操作负荷

已被证明随脑力负荷的增加而增加。FAN Xiaoli 等^[24]设计了不同负荷等级的监控任务,发现心电数据中 R 波时间间隔的均方根(Root Mean Square of Successive Differences, RMSSD)随着心理负荷的增加而显著降低。ZHOU Biyun 等^[25]通过研究模拟战斗机驾驶舱环境中的战斗任务,发现随着操作负荷增加,中值频率(Median Frequency, MF)随之降低。此外,美国航空航天局任务负荷指数(National Aeronautics and Space Administration Task Load Index, NASA-TLX)量表已被证明能够从主观层面有效评估视觉负荷、脑力负荷、心理负荷与操作负荷水平^[26-27],量表总得分越高时,认为飞行员承受的负荷越高。各认知功能的效应影响指数计算如下:

$$\pi_o = \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^n \frac{A_z}{a_z} + \sum_{z=1}^n \frac{E_z}{e_z} \quad \pi_p = \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^n \frac{B_z}{b_z} + \sum_{z=1}^n \frac{E_z}{e_z}$$
$$\pi_q = \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^n \frac{c_z}{C_z} + \sum_{z=1}^n \frac{E_z}{e_z} \quad \pi_r = \sum_{y=1}^n \sum_{z=1}^n \frac{d_z}{D_z} + \sum_{z=1}^n \frac{E_z}{e_z}$$

(9)

式中: π_o 、 π_p 、 π_q 、 π_r 分别为飞行员观察、解释、计划、执行 4 项认知功能的效应影响指数。a、b、c、d 分别为常规试验时飞行员的眼动数据、脑电数据、心电数据、肌电数据;A、B、C、D 分别为进行 CPC 因子评估试验时对应的各项特征指标值;e 为进行常规试验时飞行员 NASA-TLX 量表得分;E 为进行 CPC 因子评估试验时飞行员 NASA-TLX 量表得分;y 为生理数据的各项指标;z 为对应的各组试验。

3.3 着舰阶段模拟试验被试及设备

被试人员均为具有模拟器飞行经验的男性,且人体尺寸处于我国要求的飞行员第 50 百分位人体尺寸附近。为确保试验结果具有足够的统计显著性水平,使用 G*power 软件,采用统计检验效能分析方法估算各 CPC 因子评估试验所需最小样本数量,设定显著性水平为 0.05、检验效能为 0.95。经检

验,各试验均满足最小样本量要求。

试验平台由飞行模拟器、视景仿真模块与计算机主控制台组成,包含中央驾驶杆、操纵杆、脚蹬等操纵控件及平视显示仪、下视显示器等显示装置,可全面真实地模拟舰载机着舰环境。生理数据采集设备如图 1 所示。



图 1 生理数据采集设备

Fig. 1 Physiological data acquisition device

3.4 复杂任务环境因素期望效应计算与分析

计算每项试验中各被试人员的生理数据特征指

标及 NASA-TLX 量表总分后,取平均值用于评估期望效应,并计算效应影响指数。

以 CPC 因子着舰指导的完善性评估试验为例,介绍期望效应分析过程,不同告警形式下的被试人员眼动数据、脑电数据、心电数据、肌电数据及 NASA-TLX 量表总分变化情况如图 2 所示。以默认环境因素设置“告警形式 2”下被试人员的负荷情况为对照,综合分析视觉负荷、脑力负荷、心理负荷、操作负荷变化情况。处于告警形式 2 时,CPC 因子着舰指导的完善性的期望效应为不显著,效应影响指数为 1,基于负荷评估结果,告警形式 1 的期望效应对应于“降低”,告警形式 3、4 对应于“改进”,结合式(9)计算各告警形式的效应影响指数。其他 CPC 因子认知功能的效应影响指数分析及计算过程同上,各 CPC 因子期望效应见表 6。

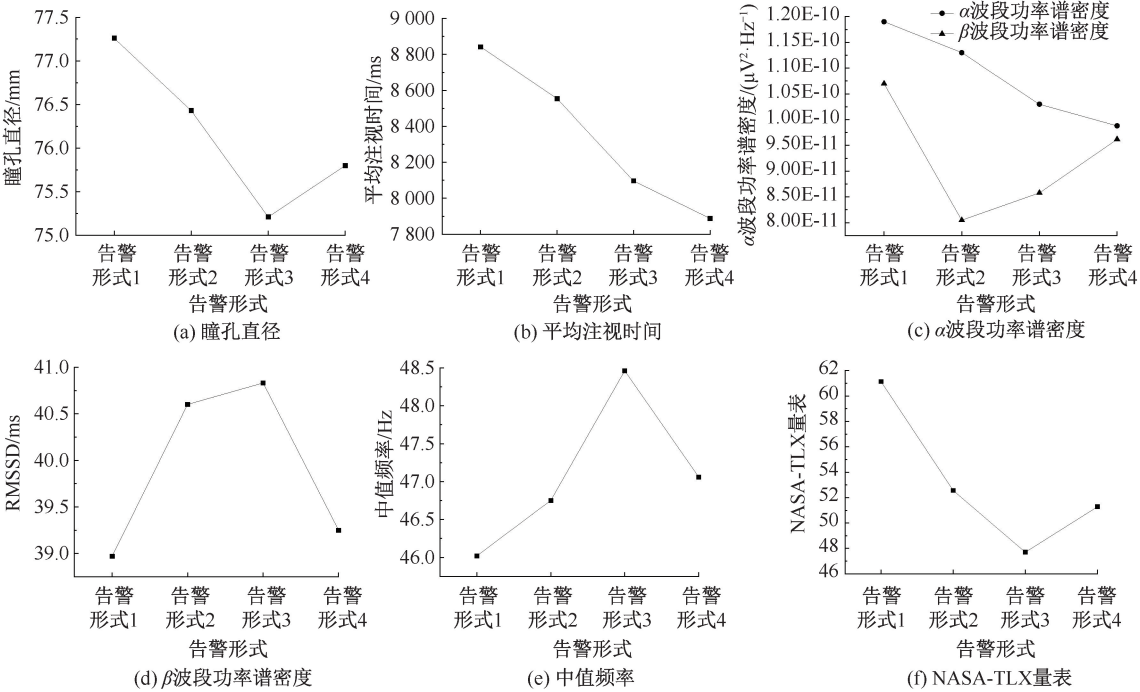


图 2 不同告警形式的生理数据及 NASA-TLX 量表数据

Fig. 2 Physiological data and NASA-TLX scale data under different alarm formats

表 6 CPC 因子及期望效应

Table 6 CPC factors and expected effects

CPC 因子	环境因素	期望效应	效应量化值	认知功能的效应影响指数			
				观察	解释	计划	执行
着舰指导的完善性	告警形式 3	改进	-1	0.95	0.96	0.95	0.94
	告警形式 4	改进	-1	0.96	1.02	1.01	0.98
	告警形式 2	不显著	0	1	1	1	1
	告警形式 1	降低	1	1.07	1.18	1.10	1.09
着舰任务工作环境(温度)	低温	改进	-1	0.89	0.78	0.91	0.73
	高温	改进	-1	1.03	0.95	1.09	0.88
	常温	不显著	0	1	1	1	1

续表 6

CPC 因子	环境因素	期望效应	效应量化值	认知功能的效应影响指数			
				观察	解释	计划	执行
着舰任务工作环境(噪声)	无噪声	改进	-1	1.16	0.89	0.88	0.80
	有噪声	不显著	0	1	1	1	1
人机界面显示元素的合理性	小号文字、图符	改进	-1	1.04	0.86	0.90	1.02
	正常文字、图符	不显著	0	1	1	1	1
	大号文字、图符	不显著	0	0.96	2.90	0.98	0.90
着舰条件的复杂性	轻微波浪、小雨	不显著	0	1	1	1	1
	平静海面	降低	1	1.08	1.12	1.17	1.16
	大海浪、大雨	降低	1	1.04	1.12	1.18	1.16
需要同时关注的目标数	正常模式	不显著	0	1	1	1	1
	简化模式	降低	1	1.04	1.30	1.05	1.25
着舰任务时段	日间航行	不显著	0	1	1	1	1
	夜间航行	降低	1	1.19	1.18	1.05	1.14

3.5 飞行员人因失误概率预测

由表 6 可知: $\theta_{\max}=4$ 、 $\theta_{\min}=4$,由表 1 可知: $CFP_{\max}=0.02$, $CFP_{\min}=0.000\ 5$,结合式(7)、式(8)可得到 $k=0.903$,飞行员人因失误概率预测公式如下:

$$CFP = CFP_0 \times 10^{0.903\theta} \tag{10}$$

结合效应影响指数 π 的影响,更新式(2),修正环境影响指数 θ ,计算公式如下:

$$\theta = \sum_{i=1}^7 \pi_i m_i \tag{11}$$

根据上述分析,修正表 1 中给出的基本失效概率值,预测复杂任务环境下飞行员各项动作的人因失误概率。

4 结 论

1) 提出面向着舰阶段复杂任务环境的 CPC 因子体系,该体系可以更加有效完善地反映着舰任务的情景环境。

2) 提出着舰阶段复杂任务环境下的飞行员人因失误概率预测方法,该方法使用客观数据评估替代专家主观评价,可以预测 20 种不同环境因素影响下飞行员人因失误概率。

3) 下一步将尝试分析更多的环境因素,对其余 3 个 CPC 因子开展评估试验,进一步完善预测方法。

参 考 文 献

[1] 张志冰,甄子洋,江驹,等. 舰载机自动着舰引导与控制综述[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(6):734-744.
ZHANG Zhibing, ZHEN Ziyang, JIANG Ju, et al. Review on development in guidance and control of automatic carrier landing of carrier-based aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics& Astronautics, 2018, 50(6): 734-744.

[2] 甄子洋,王新华,江驹,等. 舰载机自动着舰引导与控制研究进展[J]. 航空学报,2017,38(2): 127-148.
ZHEN Ziyang, WANG Xinhua, JIANG Ju, et al. Research progress in guidance and control of automatic carrier landing of carrier-based aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(2): 127-148.

[3] 邓金来,张志冰,王家兴. 基于直接力的舰载机着舰控制技术研究[J]. 飞机设计,2020,40(2): 6-10.
DENG Jinlai, ZHANG Zhibing, WANG Jiaying. Reasarch on the control technology of carrier aircraft based on direct force[J]. Aircraft Design, 2020, 40(2): 6-10.

[4] 甄子洋. 舰载无人机自主着舰回收制导与控制研究进展[J]. 自动化学报,2019,45(4): 669-681.
ZHEN Ziyang. Research development in autonomous carrier-landing/ship-recovery guidance and control of unmanned aerial vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(4): 669-681.

[5] 万辉,张建,刘秋红,等. 美军航母担负的卫勤任务及保障需求[J]. 海军医学杂志,2011,32(1): 72-73.

[6] 曲浩,段卓毅,郭润兆. E-2D 预警机与舰载战斗机着舰难度对比研究[J]. 西北工业大学学报,2017,35(增 1): 63-69.
QU Hao, DUAN Zhuoyi, GUO Runzhao. Comparative study on the landing difficulty between E-2D early warning aircraft and carrier-based fighter aircraft [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2017, 35(S1): 63-69.

[7] NATOPS landing signal officer reference manual (REV. B)[S],1999.

[8] LIN Ye, PAN Xing, HE Congjiao. Human reliability analysis in carrier-based aircraft recovery procedure based on

- CREAM[C]. 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE). IEEE, 2015: 1-6.
- [9] 汪磊, 安佳宁, 赵新斌, 等. 基于 QAR 数据的飞行员个体超限风险精细化评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 35-42.
- WANG Lei, AN Jianing, ZHAO Xinbin, et al. Refined evaluation model for pilot's individual exceedance risk based on QAR data[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 35-42.
- [10] 李丽, 曹玉宽, 陈瑶, 等. 基于多生理信号的飞行警戒疲劳检测[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(2): 225-232.
- LI Li, CAO Yukuan, CHEN Yao, et al. Flight alert fatigue detection based on multi-physiological signals [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(2): 225-232.
- [11] 汪磊, 王朔, 高杉, 等. 面向特情的航线飞行员视觉注意分配研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 214-220.
- WANG Lei, WANG Shuo, GAO Shan, et al. A study on airline pilots visual attention allocation during emergency[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(1): 214-220.
- [12] YANG Kun, TAO Liquan, BAI Jie. Assessment of flight crew errors based on THERP[J]. Procedia Engineering, 2014, 80: 49-58.
- [13] GUO Yundong, SUN Youchao. Flight safety assessment based on an integrated human reliability quantification approach[J]. Plos One, 2020, 15(4): DOI:10.1371/journal.pone.0231391.
- [14] HIROSE T, SAWARAGI T, HORIGUCHI Y. Safety analysis of aviation flight-deck procedures using systemic accident model[J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(19): 19-24.
- [15] SUN Guoqiang, ZENG Shengkui, GUO Jianbin, et al. A quantitative evaluation method of pilot errors during landing process of carrier-based aircraft[C]. 2015 First International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE). IEEE, 2015: 1-6.
- [16] ZHAO Jianyu, SUN Guoqiang, ZENG Shengkui, et al. The reliability assessment of human systems interaction for aircraft carrier landing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30: 4 465-4 469.
- [17] HOLLNAGEL E. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM) [M]. Amsterdam: Elsevier, 1998: 246-248.
- [18] SHERIDAN T B. Human-robot interaction: status and challenges[J]. Human Factors, 2016, 58(4): 525-532.
- [19] FUJITA Y, HOLLNAGEL E. Failures without errors: quantification of context in HRA[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 83(2): 145-151.
- [20] JUST M A, CARPENTER P A. A theory of reading: from eye fixations to comprehension[J]. Psychological Review, 1980, 87(4): 329-354.
- [21] BEATTY J, LUCERO W B. Handbook of psychophysiology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 120-135.
- [22] LANG W, LANG M, KORNHUBER A, et al. Event-related EEG-spectra in a concept formation task[J]. Human Neurobiology, 1988, 6(4): 295-301.
- [23] DEIBER M P, MISSONNIER P, BERTRAND O, et al. Distinction between perceptual and attentional processing in working memory tasks: a study of phase-locked and induced oscillatory brain dynamics[J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 2007, 19(1): 158-172.
- [24] FAN Xiaoli, ZHAO Chaoyi, ZHANG Xin, et al. Assessment of mental workload based on multi-physiological signals[J]. Technology and Health Care, 2020, 28(S1): 67-80.
- [25] ZHOU Biyun, CHEN Bo, SHI Huijuan, et al. SEMG-based fighter pilot muscle fatigue analysis and operation performance research [J]. Medicine in Novel Technology and Devices, 2022, 16: DOI: 10.1016/j.medntd.2022.100189.
- [26] RUBIO S, DÍAZ E, MARTÍN J, et al. Evaluation of subjective mental workload: a comparison of SWAT, NASA-TLX, and workload profile methods[J]. Applied Psychology, 2004, 53(1): 61-86.
- [27] VON J N, KRAUS J, ENGELN A, et al. A subjective one-item measure based on NASA-TLX to assess cognitive workload in driver-vehicle interaction[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 86: 210-225.



作者简介: 刘威成 (2000—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要研究方向为人机交互、人机工效等。E-mail: liuweicheng@nuaa.edu.cn。