

基于人因可靠性的民机驾驶舱人机界面评价方法

谢凝^{1,2}, 陈登凯^{1,2}, 周焱^{1,2}, 张献^{1,2}

(1.西北工业大学 工业设计研究所, 陕西 西安 710072;
2.工业设计与人机工效工信部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘 要:为降低民机驾驶舱人因失误概率,基于 SHEL 模型对影响人机界面人因可靠性的行为形成因子(PSF)进行分类并构建 PSF 体系,利用解释结构模型(ISM)建立相应的邻接矩阵,得到多层次递阶结构,同时,引入 Noisy-OR 模型来构建贝叶斯网络,以此建立新的人机界面评价方法。通过对实际案例的贝叶斯网络因果推理验证了所得方法的有效性。研究提出了一套适用于民机驾驶舱人机界面的人因可靠性评价方法,为人因可靠性评估提供了新思路。

关 键 词:驾驶舱;人因失误;解释结构模型;贝叶斯网络
中图分类号:TM623 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2022)06-1250-11

民机驾驶舱人机界面指操作员进行人机信息交流的一切领域,是飞行员与飞机之间的人机交互接口,是执行飞行任务的核心枢纽。研究指出,人机界面事故发生的主要原因为人因失误^[1]。驾驶舱空间封闭、结构复杂且作业精度要求高,更易引起人因事故的发生。学者对人机界面人因可靠性的研究有很多,Evica 等^[2]采用系统人因失误预测的方法对驾驶舱人机界面进行了分析,结果表明界面人因可靠性较低是飞行员人因失误的主要原因。张爱琳等^[3]建立改进的 CREAM (cognitive reliability and error aanalysis method, CREAM) 模型,为船舶引航员的界面人因可靠性分析提供了定量评估数据。袁乐平等^[4]基于德尔菲诺法与贝叶斯网络提出了一种新的面向管制员界面人因可靠性分析方法,并通过实例验证了该方法的可靠性。罗凤娥和赵振武等^[5-6]通过改进 CREAM 方法,分别确定了管制员与飞行员之间、签派员与飞行员之间人机界面的人因可靠性评估模型。郝红勋^[7]以飞机驾驶舱人机界面的人因可靠性设计需求为基础,结合认知行为学的基础理论,从定性与定量的角度分别建立了飞行员人因失误分析模型。Wang 等^[8]通过构建基于 CPC (common performance condition) 效应模糊集和

扩展 CREAM 的方法计算飞行员认知故障概率,以此提升飞机驾驶舱人机界面人因可靠性。朱荟群^[9]使用模糊推理及 BP 神经网络、前后向算法实现了民机驾驶舱着陆阶段人机界面的可靠性计算。也有学者对影响人因可靠性的本质行为形成因子(performance shaping factor, PSF) 进行研究, Kim 等^[10]指出对不同情境下的 PSFs 进行研究,可以显著提高核电站人机界面人因可靠性。Liu 等^[11]基于专家修正法对核电站控制室的 4 类 PSF 进行重新定义,并成功降低了人因失误概率。Santoso 等^[12]利用 CREAM 分析方法对核电厂人机界面 PSFs 进行分析,结果显示人机界面优化设计和充分的培训有助于提高操作员的绩效。刘建桥等^[13]对标准化核电厂风险分析-人因可靠性分析方法 (SPAR-H) 进行改进,为定量研究 PSFs 间的因果关系建立了基础。杨越等^[14]以空中管制行为形成因子作为根节点,构建贝叶斯网络,对管制员在多任务中的人因失误概率进行预测,结果表明,贝叶斯网络在研究该问题时更具优势。可见,大部分学者都对影响人因可靠性的本质 PSFs 进行了分析,但很少有学者对 PSFs 之间的相互作用进行研究,Bandeira 等^[15]指出 PSFs 之间的相关性在复杂民用航空运输系统中普

遍存在,其对飞行员绩效和飞行程序相关任务的成功或失败有显著影响。可见,对 PSFs 之间的相关性进行探究,也是提高人机界面人因可靠性的关键之一。

综上所述,研究从民机驾驶舱人机界面 PSFs 之间的相互作用出发,建立了一种更加全面系统的评价方法来提高民机驾驶舱人机界面人因可靠性,从而在降低民机安全事故的同时,也为人机界面的设计提供更加科学有效的指导。

1 驾驶舱人机界面 PSF 体系构建

1.1 行为形成因子识别

利用航空安全领域经常使用的 SHEL 模型^[16],

将民机驾驶舱人机界面涵盖要素分为系统人员(L)、系统软件操作规范(S)、系统硬件(H)、系统环境(E)4 个方面,评估内容确定为 L-L、L-S、L-H、L-E 之间的关系研究,通过文献总结与专家访谈共得到 28 项 PSFs,如表 1 所示。

1) L-L 关系:飞行员与机组人员之间的信息交流、作业协作能力关系研究。

2) L-H 关系:飞行员与硬件作业设备之间的交互关系研究。

3) L-S 关系:飞行员与机组管理、技术培训及操作规范制度等人机关系研究。

4) L-E 关系:飞行员与驾驶舱的作业环境的关系研究。

表 1 民机驾驶舱人机界面 PSFs 汇总

要素	PSFs	说明	来源
L-L 关系	①身体素质	个人身体素质是否良好,比如视力、肢体协调性等良好程度	文献[17-22]
	②疲劳程度	个人对身体疲乏程度的主观感受	
	③情绪状态	个人心理情绪的表现,比如冷静、兴奋等	
	④知识技能及业务能力	个人对相关飞行知识的储备量、对飞行技能的掌握水平以及对情景意识的认知和决策水平等	
	⑤注意力集中程度	个人对待工作的专注程度	
	⑥工作责任意识	个人对于工作的责任意识与态度等良性感受	
	⑦人员选拔及配置合理性	机组人员选拔以及机组内部岗位配置的合理性	
	⑧人员分工及职责明确性	机组人员对于自身角色的定位以及工作职责的明确程度	
	⑨团队协作程度	机组人员间信息交流质量和操作配合质量等	
L-H 关系	①数字界面信息传达	数字界面重要信息显示的突出性,获取信息的快捷性,文本、图标符号的清晰性、易读性及可靠性等	文献[23-26]
	②指示标志	显控面板中相关指示符号与标志的准确性以及区分性等	
	③显控装置布局	显示装置的可见性、控制装置的位置可达性、显控组合布局的对应关系,功能划分是否符合人员经验与期望等	
	④空间总体布局	作业区域、通道以及活动空间等的结构尺寸	
	⑤驾驶舱座椅	座椅结构与坐姿操作的相匹配程度、人体脊柱舒适性	
	⑥通讯设备	通信设备工作状况的良好程度、沟通信号的稳定与清晰度	
	⑦驾驶舱报警	驾驶舱告警信号是否清晰、含义明确	
	⑧系统化自动化水平	自动化系统的可靠性、设备复杂性	

续表 1

要素	PSFs	说明	来源
L-S 关系	①操作规范制度完备性	组织管理、操作规范制度等是否科学完善	文献[7, 23-24, 27-28]
	②奖惩制度合理性	奖惩制度是否可以有效调动飞行员操作软件的积极性	
	③工作培训充分性	工作培训和实际飞行状况是否相近,是否覆盖全部工作情景	
	④机组作业规程完备性	驾驶舱机组执行操作任务的流程与规范是否完备	
	⑤工作时间合理性	机组人员工作与休息时间安排、持续工作时长的合理性	
	⑥应急演练与预案	应急演练的频率、质量、应对突发事件的安全方案是否完备	
	⑦安全监管与教育	相关部门对航空安全的监管以及安全文化的宣传教育	
	⑧机组工作氛围	驾驶舱氛围融洽	
L-E 关系	①微小气候	气压、温度、湿度、通风等构成的微小气候是否有利于人员的生理舒适度,提高作业效率等	文献[26-27, 29]
	②照明、色彩	照明、色彩是否有利于人员的视觉识别功能、视觉信息交流等	
	③噪声、振动	噪声、振动是否利于人员听觉敏感度、操纵准确度、情绪状态	

1.2 行为形成因子问卷调研

为构建民机驾驶舱人机界面人因可靠性 PSF 体系,采用调查问卷的方式对得到的 28 项行为形成因子进行调研。对具有民机驾驶舱操作经验(即民航飞行员、民航飞行学院在校生等)且平均年龄在 35 岁左右的男性人群发放问卷,通过问卷数据分析,为构建 PSF 体系提供有力支持。

本次调查问卷的主要信息包括基本信息与影响人因可靠性的 PSFs 调查,采用李克特 5 级量表,1 表示“影响程度极小”,5 表示“影响程度极大”。正式问卷发放前进行小样本预调查来保证问卷的有效性。正式问卷共回收 204 份,其中有效问卷 201 份,对回收的问卷进行可靠性检验来保证数据的有效性。

对回收的问卷进行信效度检验:① 通过 SPSS 软件得到问卷的总体信度为 0.981,且 4 个维度的信度系数分别为 0.941 (L-L), 0.964 (L-H), 0.923 (L-S), 0.858 (L-E),可见问卷各维度具有良好的一致性;② 对问卷内容效度、关联校标效度、结构效度进行检验,问卷数据的 KMO 检验值为 0.807, Bartlett 球形检验近似卡方值为 1 968.566,由此可知该量表适合做因子分析。使用最大方差法对初始的成分矩阵进行旋转,得到旋转后的成分矩阵。删除旋转矩阵中因子载荷小于 0.6,多重载荷大于 0.2 的因子,即删除 $S_1, S_{17}, S_{23}, S_{25}$,删除上述因子后,重新进行 KMO 值与 Bartlett 球形检验,计算得到 KMO 值为 0.933, Bartlett 值为 1 477.033。

1.3 行为形成因子体系

通过问卷数据分析,最终确定包含 4 个维度的 PSF 体系,这套指标体系可以反映民机驾驶舱人机界面对飞行员操作行为的影响,如图 1 所示。

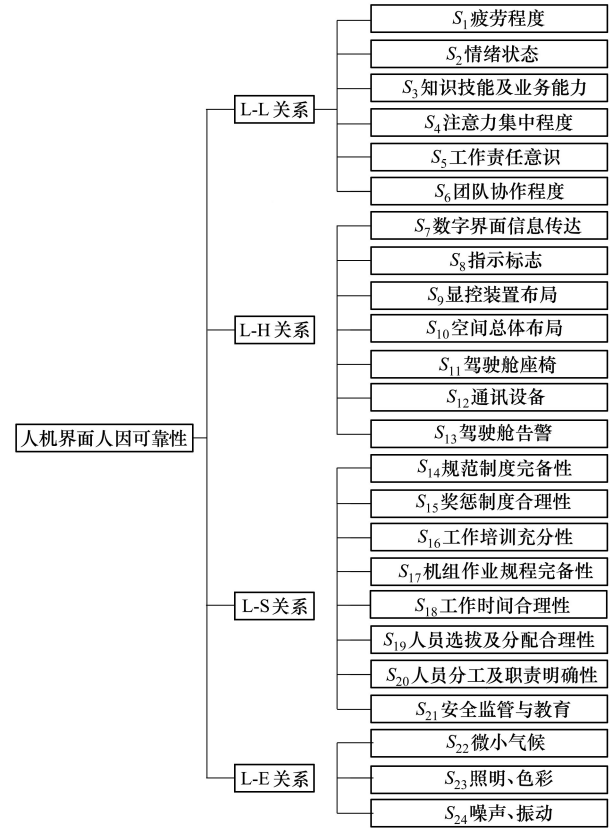


图 1 行为形成因子(PSF)体系

2 驾驶舱人机界面人因可靠性评价模型构建

为明确各因子之间的作用机理,将解释结构模型与贝叶斯网络相结合进行 PSF 关系建模,通过解释结构模型获取层次结构,从而将模型映射到贝叶斯网络中,完成拓扑结构的构建,在此基础上获取根节点的先验概率以及条件概率完成贝叶斯网络数据填充,建立完备的贝叶斯网络模型以量化行为形成因子之间耦合关系强度。

2.1 PSF 解释结构模型建立

解释结构模型(ISM)可以对复杂无序的系统进行梳理分析,它通过建立元素之间的关联关系,借助矩阵运算、有向图等实现多层阶梯模型的构建,从而明确系统的结构与层次。利用 ISM 对影响人因可靠性的 PSF 进行了梳理,确定各 PSF 因子之间的相互作用关系,并建立可达矩阵。基于可达矩阵完成 PSF 级位划分,通过有向弧将相关 PSF 因子进行连接,建立民机驾驶舱人机界面的 PSF 解释结构模型,如图 2 所示。

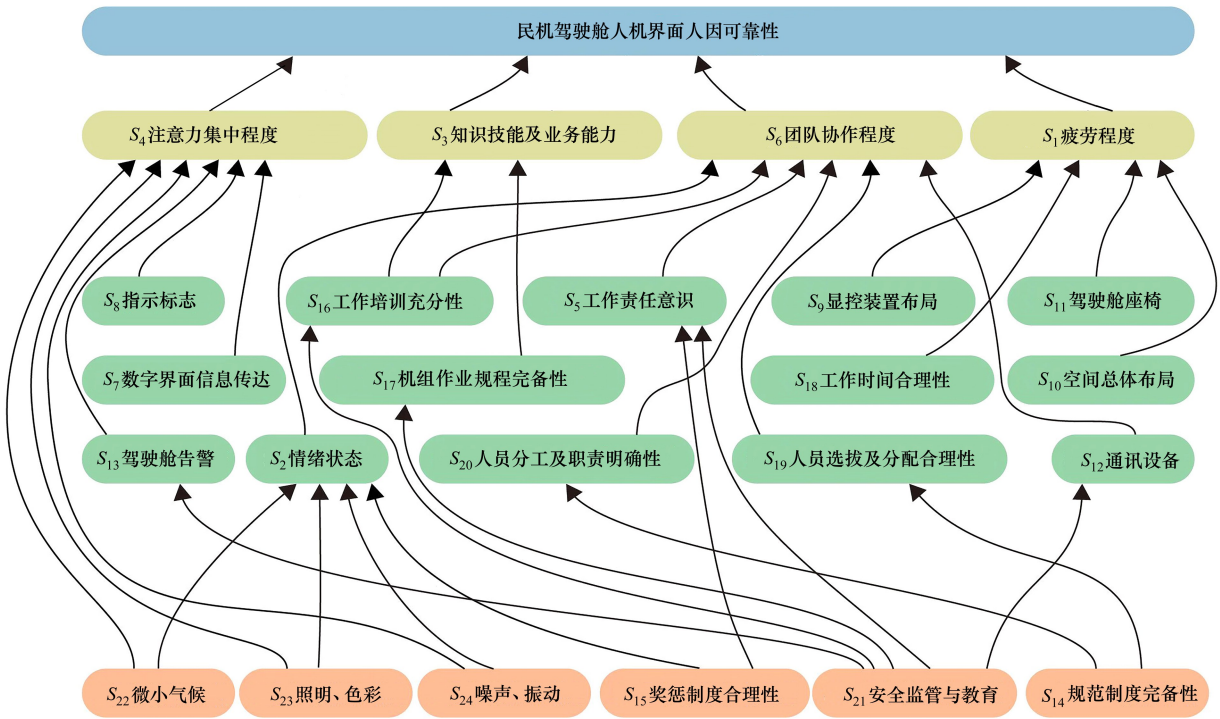


图 2 PSF 解释结构模型

由图 2 可知,PSF 解释结构模型分为 3 个层级,各层级由下往上存在层层递阶解释关系,结合 PSF 体系划分的 L-L、L-H、L-S、L-E 4 个维度对该解释结构模型进行分析:

- 1) 第 1 层是造成失误的直接原因,包括飞行员注意力集中程度、知识技能与业务能力、疲劳程度、团队协作程度等,这些因子可以直接引发飞行员的失误。
- 2) 第 2 层是造成失误的间接原因,包括情绪状态、工作责任意识等 L-L 维度,数字界面信息传达、指示标志、显控装置布局、空间总体布局、驾驶舱座

椅、通讯设备、驾驶舱报警等 L-H 维度,工作培训充分性、机组作业规程完备性、工作时间合理性、人员选拔及配置合理性、人员分工及职责明确性等 L-S 维度。

- 3) 第 3 层是造成失误的深层原因,包括组织管理机制、安全监管与教育、奖惩制度等 L-S 维度,微小气候以及照明、色彩环境等 L-E 维度等。

2.2 基于贝叶斯网络的人因可靠性分析

- 1) 节点发生概率模糊化
参考 Prakash 的因果图修正法^[30],对模型进行调整,最终建立基于解释结构模型的贝叶斯网络拓

扑结构。研究假设网络层次中的每个节点由 2 个状态组成,即对人因可靠性的积极与消极影响、节点状态设置与含义,如表 2 所示。引入自然语言变量描

述方法,建立了自然语言变量与模糊数的映射关系,语言变量与三角模糊数的对应关系如表 3 所示。

表 2 各节点状态含义

PSFs	$S_i=0$	$S_i=1$	PSFs	$S_i=0$	$S_i=1$
S_1 疲劳程度	不显著的	显著的	S_{13} 驾驶舱告警	良好的	效果差
S_2 情绪状态	积极的	消极的	S_{14} 规范制度完备性	良好的	效果差
S_3 知识技能及业务能力	充分的	不充分	S_{15} 奖惩制度合理性	良好的	效果差
S_4 注意力集中程度	良好的	欠缺的	S_{16} 工作培训充分性	饱和的	不足的
S_5 工作责任意识	良好的	欠缺的	S_{17} 机组任务规程完备性	有效的	效果差
S_6 团队协作程度	良好的	不足的	S_{18} 工作时间合理性	合理的	不适当
S_7 数字界面信息传达	良好的	不当的	S_{19} 人员选拔及分配合理性	良好的	不足的
S_8 指示标志	明确的	模糊的	S_{20} 人员分工及职责明确性	良好的	不足的
S_9 显控装置布局	有效的	效果差	S_{21} 安全监管与教育	充分的	不足的
S_{10} 空间总体布局	良好的	效果差	S_{22} 微小气候	支持的	不适当
S_{11} 驾驶舱座椅	舒适的	效果差	S_{23} 照明、色彩	支持的	不适当
S_{12} 通讯设备	良好的	效果差	S_{24} 噪声、振动	支持的	不适当

表 3 自然语言变量与三角模糊数对应关系

序号	语义值	三角模糊数
1	非常低(VL)	(0,0,0.1)
2	低(L)	(0,0.1,0.3)
3	较低(ML)	(0.1,0.3,0.5)
4	中等(M)	(0.3,0.5,0.7)
5	较高(MH)	(0.5,0.7,0.9)
6	高(H)	(0.7,0.9,1.0)
7	非常高(VH)	(0.9,0.9,1.0)

2) 模糊概率的合成

由于专家的教育背景、知识储备、认知水平存在差异性,在群体决策过程中可能会出现意见冲突,为了降低单一个体的影响,采用相似度聚合方法(similarity aggregation method,SAM)处理专家意见以使得专家意见达成共识^[31]。SAM 的步骤如下:

①评估专家对意见的相似度。假设专家集合为 $E_k(k=1,2,\cdots,n)$,采用 R_u 和 R_v 表示任意 2 位专家的意见,则 $\tilde{R}_u=(r_{u1},r_{u2},r_{u3})$ 和 $\tilde{R}_v=(r_{v1},r_{v2},r_{v3})$,专家 E_u 与专家 E_v 的相似函数 S_{uv} 如(1) 式所示。相似函数的取值范围在 0 ~ 1 之间,并且数值越大,代表相似度越高。

$$S_{uv}=1-\frac{1}{3}\sum_{i=1}^3|r_{ui}-r_{vi}|$$

(1)

式中: $\tilde{R}_u$ 和 $\tilde{R}_v$ 为专家意见的标准三角模糊数。

② 计算专家的平均一致性。平均一致性

$A_A(E_k)$ 描述为(2)式

$$A_A(E_k)=\frac{1}{k-1}\sum_{\substack{v=1\\u\neq v}}^kS_{uv}$$

(2)

③计算专家相对一致性。相对一致性 $A_R(E_k)$ 描述为(3)式

$$A_R(E_k)=\frac{A_A(E_k)}{\sum_{k=1}^nA_A(E_k)}$$

(3)

④计算专家的一致性系数,如公式(4)所示

$$C(E_k)=\beta\cdot w(E_k)+(1-\beta)\cdot A_R(E_k)$$

(4)

式中: $w(E_k)$ 为专家的权重; β 是松弛因子,在不考虑专家权重时, $\beta=0$;

⑤ 专家意见的聚合,如公式(5) 所示。

$$\tilde{R}_{AG}=C(E_1)\cdot\tilde{R}_1+C(E_2)\cdot\tilde{R}_2+\cdots+C(E_k)\cdot\tilde{R}_k$$

(5)

以行为形成因子 S_{14} 的聚合为例进行说明,首先收集专家对于节点 S_{14} 处于“ $S_i=1$ ”的模糊评判语义值,然后按照上述方法进行数学计算,经过专家意见的聚合, S_{14} 的三角模糊数为(0.000 00, 0.060 64, 0.221 28)。

3) 解模糊处理

解模糊就是对模糊概率进行数学计算得到一个精确的数值。采用均值面积法进行解模糊,其中 (a,m,b) 代表一组模糊数, P 为解三角模糊数后的值,则解模糊的公式如(6) 式所示

$$P=\frac{a+2m+b}{4}$$

(6)

以根节点 S_{14} 为例

$$P = \frac{0.000\ 00 + 2 \times 0.060\ 64 + 0.221\ 28}{4} = -\ 0.086$$

4) 贝叶斯网络条件概率获取

采用 Noisy-OR 模型来描述事故原因与其相应的共同影响之间的相互作用,其优点在于能够大幅度降低贝叶斯网络中 CPT 填充时所需要的参数数量。假设一个二元变量 Y ,它是由 n 个二元父节点 X_i 组成,每个变量均有 0,1(0 代表不发生,1 代表发生)2 种状态。

在获取父节点独立影响子节点的条件概率之后,可以计算多父节点共同作用下的条件概率。计算公式为

$$P(Y \leftarrow X_i) = P(\mid B \mid \bar{X}_1, \bar{X}_2, \cdots, \bar{X}_i, \cdots, \bar{X}_n) \tag{7}$$
$$P(Y) = 1 - P(y \leftarrow X_p) = \prod_{X_i \in X_p} (1 - P(y \leftarrow x_i)) \tag{8}$$

式中: X_i 表示节点 X_i 发生, $\bar{X}_i$ 表示节点 X_i 不发生; X_p 表示同时发生父节点结合; $P(Y \leftarrow X_i)$ 表示父节点 X_i 独立影响时 Y 节点的发生概率。

以节点 S_2 为例进行说明,在父节点单独影响下的条件概率为 $P(S_2 \leftarrow S_{22}) = 0.339, P(S_2 \leftarrow S_{23}) = 0.265, P(S_2 \leftarrow S_{24}) = 0.500, P(S_2 \leftarrow S_{15}) = 0.652$, 计算多父节点共同作用的条件概率,将 $P(S_2 \leftarrow S_{22}), P(S_2 \leftarrow S_{23}), P(S_2 \leftarrow S_{24}), P(S_2 \leftarrow S_{15})$ 代入 Noisy-OR 公式中,计算过程如(9) 式所示。

$$P(S_2 \leftarrow S_{22}, S_{23}, S_{24}, S_{15}) =$$
$$1 - [1 - P(S_2 \leftarrow S_{22})] \cdot [1 - P(S_2 \leftarrow S_{23})] \cdot$$
$$[1 - P(S_2 \leftarrow S_{24})] \cdot [1 - P(S_2 \leftarrow S_{15})] =$$
$$1 - (1 - 0.339) \times (1 - 0.265) \times (1 - 0.500) \times$$
$$(1 - 0.652) = 0.915 \tag{9}$$

3 事例分析

事例选自某航空公司发布的年度航空安全案例汇编。一架北京飞往西宁的飞机,在进近过程未放襟翼 30°(不在着陆构型),致使飞机处于无线电高 228 英尺时触发 TOO LOW SLAPS 的警戒,构成一件飞行安全严重差错事件。根据事故报告显示,该航班的飞机型号 B737-800。

3.1 概率获取

为获取节点状态,研究邀请 5 位领域专家进行访谈,专家根据实际经验以及事件基本资料给出 PSF 处于“ $S_i=1$ ”时模糊评判值,计算在不同父节点组合影响下的条件概率。通过 Netica 的诊断推理获取后验概率,假设民机驾驶舱人机界面的人因可靠性低,处于消极状态,即设置节点 S_0 的状态 $P(S_0=1)=100\%$,更新网络的概率参数,得到此时各节点的后验概率,各节点先验概率与后验概率对比如表 4 所示。

表 4 贝叶斯网络各节点概率对比

节点	节点变量	先验概率	后验概率	变化百分比/%	节点	节点变量	先验概率	后验概率	变化百分比/%
S_1	疲劳程度	0.443 6	0.621 6	17.80	S_{13}	驾驶舱告警	0.066 2	0.108 8	4.26
S_2	情绪状态	0.158 9	0.226 7	6.78	S_{14}	组织管理机制	0.0862	0.1201	3.39
S_3	知识技能及业务能力	0.098 4	0.161 9	6.35	S_{15}	奖惩制度合理性	0.115 9	0.154 4	3.85
S_4	注意力集中程度	0.297 4	0.469 4	17.20	S_{16}	工作培训充分性	0.089 7	0.147 2	5.75
S_5	工作责任意识	0.122 5	0.186 3	6.38	S_{17}	机组任务规程完备性	0.099 2	0.162 1	6.29
S_6	团队协作程度	0.275 8	0.422 7	14.69	S_{18}	工作时间合理性	0.377 3	0.489 8	11.25
S_7	数字界面信息传达	0.107 0	0.158 1	5.11	S_{19}	人员选拔及分配合理性	0.055 0	0.080 9	2.59
S_8	指示标志	0.105 6	0.149 9	4.43	S_{20}	人员分工及职责明确性	0.055 0	0.080 2	2.52
S_9	显控装置布局	0.1375	0.1783	4.08	S_{21}	安全监管与教育	0.106 0	0.172 9	6.69
S_{10}	空间总体布局	0.064 4	0.074 4	1.01	S_{22}	微小气候	0.085 6	0.106 9	2.13
S_{11}	驾驶舱座椅	0.085 6	0.114 0	2.84	S_{23}	照明、色彩	0.125 0	0.150 4	2.54
S_{12}	通讯设备	0.021 2	0.034 8	1.36	S_{24}	噪声、振动	0.115 9	0.154 4	3.84

3.2 贝叶斯因果推理

利用 Netica 软件计算该驾驶舱人机界面的人因可靠性概率为 39.8%,如图 3 所示,这与该航班运行过程状态基本吻合。该航班在飞行过程中,机长忽视了未放襟翼 30°,副驾驶对襟翼核实不到位,随机

出现 TOO LOW SLAPS 的警戒,在警戒之后机组认识到错误进行了复飞,后续正常落地,没有酿成重大错误。这验证了本研究提出的基于解释结构模型的贝叶斯网络方法在民机人机界面人因可靠性评价方面具有一定的适用性。

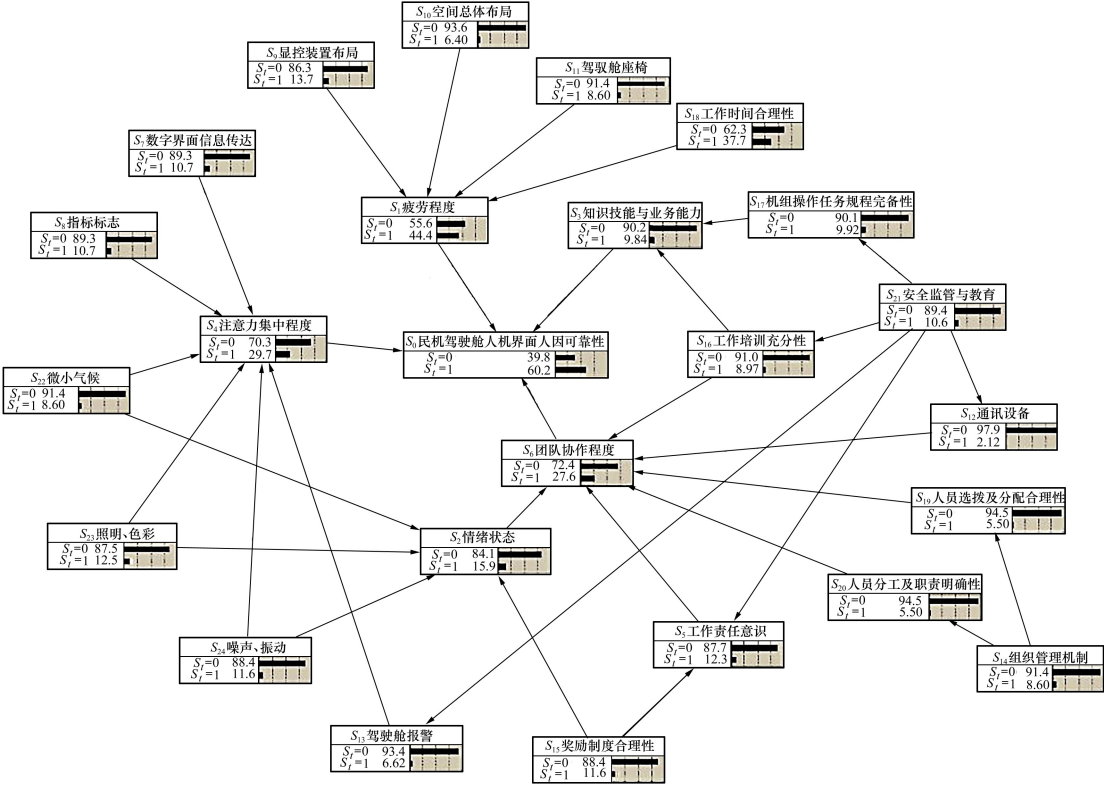


图 3 因果推理示意图

3.3 风险节点改进

由于 PSF 隶属于 L-L、L-H、L-S、L-E 不同维度,若将不同种类的 PSF 进行敏感度比较,则缺乏可比性,得到的结论缺乏说服力。为了更加客观地分析

数据并确定敏感因子,依据所确定的 PSF 体系,从 L-L、L-H、L-S、L-E 4 个维度分别进行讨论,并绘制出先验概率与后验概率变化差异的条形图,直观表现节点概率的变化,如图 4 所示。

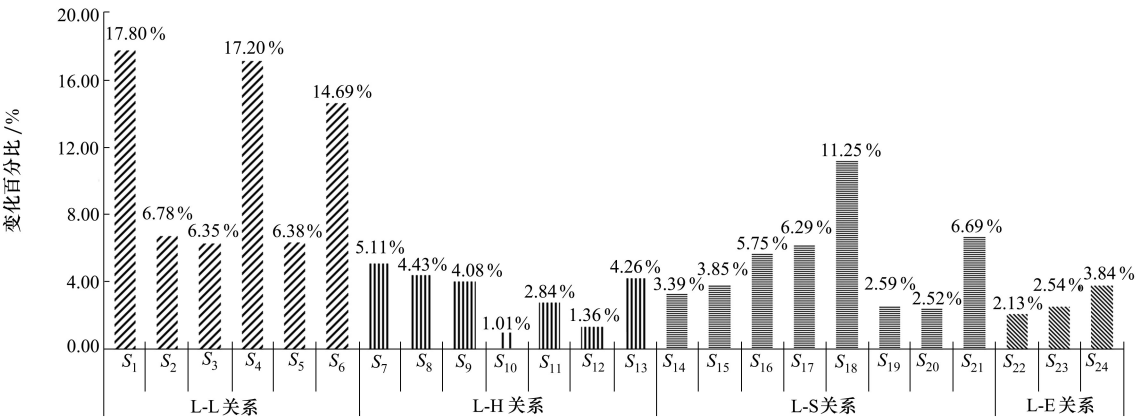


图 4 4 个维度关系因子敏感度数据

1) 在 L-L 关系中,飞行员的疲劳程度因素敏感度最高。

研究表明暂时远离任务的时间会提高工作人员的机敏性,适时的休息可以作为一种风险管理措施^[32],飞行前进行疲劳测试以确定飞行员是否做好飞行准备,飞行员应坚持科学、有条理的生活方式。注意力集中程度的敏感度处于第二位,在复杂的飞行过程中存在大量的外部环境和机舱内部信息,飞行员必须立即获取、扫视并选择大量信息,这时飞行员的注意力程度成为决定性因素。团队协作程度的敏感度处于第三位,在任务复杂性、信息不确定性超出个人能力,一旦产生错误便会造成严重后果的环境下,往往需要团队合作,征求群体意见,进行多方面权衡最终做出决策。情绪状态的影响是多方面的,比如烦躁、忧伤等负面情绪会导致飞行员信息处理能力下降,也会导致机组工作氛围冷淡与压抑从而影响团队沟通与交流,而过分亢奋的情绪容易造成注意力转移。知识技能与业务能力是衡量一名飞行员是否合格的基础,如果缺乏对知识、技能的掌握,那么在执行飞行任务时,会缺失处理各种情况的科学依据,不能正确执行相关程序,从而产生失误。工作责任意识体现了一个人的使命感,其不仅是飞行员在日常工作中的自我约束力,更考验了飞行员在关键时刻的奉献精神。

2) 在 L-H 关系中,数字界面信息传达因素敏感度最高。

在飞行任务中,飞行员通过视觉获得了所需信息的 85%^[33],显示器的合理显示与布局可以有效提高飞行员视觉信息的处理效率,减少资源占用和认知成本。指示标志的指向是否明确、含义是否清晰对信息传递具有重要作用。告警系统是驾驶舱的重要听觉来源,其设计应保证不同信号之间存在优先级顺序、较强的区分度等,以减轻飞行员的认知负荷。显控装置布局主要关系到飞行员是否可以顺畅地获取有效信息并完成规定的操纵任务,并对飞行员的疲劳程度产生影响,飞行员在驾驶舱需要依靠上肢完成一系列操纵任务,长时间保持不良的工作姿势或者重复某几个动作会使得肌肉处于高张力状态极易造成肌肉疲劳积累。驾驶舱座椅对飞行员的人身安全具有保护作用,同时座椅对飞行员的身体疲劳及舒适性有一定程度的影响。通讯设备的可靠性则关系到机组人员与地面人员的沟通与交流,在飞行安全方面发挥着不可替代的作用。空间总体布

局主要指驾驶舱过道、入口以及辅助设施的排布,对人因可靠性敏感度较低。

3) 针对 L-S 关系,工作时间合理性因素的敏感度最高。

目前国际民航组织成员国中大多数国家仅仅对飞行员的最大飞行时间和单次工作持续时间做出规定^[34],缺乏细致的限制与安排。飞行员与软件系统进行人机交互时,应考虑昼夜节律的影响,针对白天与夜间飞行员节律的不同,进行区别对待,使飞行员保证充分的睡眠时间。机组操作任务规程完备性是飞行员进行操纵任务的参考标准,只有保证操作程序的人性化、完备性,飞行员的任务执行才有望达到高效与安全的高度统一,减少飞行过程中出错率。工作培训充分性一般包括软件理论教学与模拟机操作,其与飞行员技能掌握具有密切关系,只有保证充分、严格的培训,飞行员才有可能具备完备的领域知识以应对各种飞行情景。奖惩制度合理性关系到飞行员对工作的积极性与主动性,在正确操作系统并完成飞行任务后得到奖励有利于提高飞行员的工作责任意识以及对安全飞行的忠诚度。

4) 针对 L-E 关系,噪声、振动因素敏感度最高。

控制噪声源声压级,比如增大涡扇发动机的涵道比;控制噪声的传播路径^[35],使噪声在传播过程中的损失增大,主要包括在舱内合理布置一些隔声与吸声材料、隔振与吸振结构等。照明、色彩的敏感度处于第二位,光环境会对显示器的显示工效产生影响,从而加大飞行员对显示器信息读取的误差,而且光环境的不同会造成人眼生理状态的不同,对飞行员的视觉工效产生影响。色彩环境具有较强的意象性,对人的情绪状态有重要影响。微小气候在人因可靠性分析中的敏感度较低,主要关系到飞行员的体感舒适度。

4 结 论

对民机驾驶舱人机界面的人因可靠性研究有很多,并且建立了一些评价方法,但传统方法未考虑 PSFs 相互之间的影响。文中提出的驾驶舱人机界面人因可靠性评价方法,可以更加全面且科学地对驾驶舱人机界面人因可靠性进行评估,使民机驾驶舱人机界面的发展更加安全高效。

本文所建立的评价模型主要依靠问卷与专家打分来对各因素进行评估,而客观的生理、心理与绩效

等数据可以更加真实地反映飞行员当下飞行的状态,因此,未来将通过实验与仿真的方法对民机驾驶舱人机界面 PSFs 状态进行评估,减少专家评分的主

观性,以更加客观的数据来对驾驶舱人因可靠性进行评价。

参考文献:

- [1] 蒋建军, 张力, 王以群, 等. 基于人因可靠性的核电厂数字化人机界面功能布局优化方法研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(9): 1666-1672
JIANG Jianjun, ZHANG Li, WANG Yiqun, et al. Function layout optimal method research of digital human-computer interface in nuclear power plant based on human reliability[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(9): 1666-1672 (in Chinese)
- [2] EVICA Stojiljkovic, BOJAN Bijelic, MIROLJUB Grozdanovic, et al. Pilot error in process of helicopter starting[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2018, 90(1): 158-165
- [3] 张爱琳, 刘晓佳. 改进 CREAM 模型的船舶引航员人因可靠性预测[J]. 中国航海, 2021, 44(1): 32-37
ZHANG Ailin, LIU Xiaojia. Improved CREAM model for human factors reliability prediction of ship pilots[J]. China Sailing, 2021, 44(1): 32-37 (in Chinese)
- [4] 袁乐平, 张兴俭. 空中交通管制员人因可靠性分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(9): 98-103
YUAN Leping, ZHANG Xingjian. Human factors reliability analysis methodology for air traffic controllers[J]. Chinese Journal of Safety Science, 2017, 27(9): 98-103 (in Chinese)
- [5] 罗凤娥, 郭爽. 基于改进 CREAM 的签派员与飞行员间人因可靠性分析[J]. 现代电子技术, 2015, 38(2): 18-21
LUO Feng'e, GUO Shuang. Human factors reliability analysis between dispatchers and pilots based on improved CREAM[J]. Modern Electronics, 2015, 38(2): 18-21 (in Chinese)
- [6] 赵振武, 张微. 基于改进 CREAM 的管制员与飞行员间人因可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 185-188
ZHAO Zhenwu, ZHANG Wei. Human factors reliability analysis between controllers and pilots based on improved CREAM[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(1): 185-188 (in Chinese)
- [7] 郝红勋. 民航飞行员人因失误评价模型研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017
HAO Hongxun. A study of a human factors error evaluation model for civil aviation pilots[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017 (in Chinese)
- [8] WANG Lijing, WANG Yanlong, CHEN Yingchun, et al. Methodology for assessing dependencies between factors influencing airline pilot performance reliability: a case of taxiing tasks[J]. Journal of Air Transport Management, 2020, 1(3): 89-95
- [9] 朱荟群. 民机着陆阶段驾驶舱人机交互风险评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019
ZHU Huiqun. Risk assessment method for cockpit human-machine interaction during landing phase of civil aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019 (in Chinese)
- [10] KIM Yochan, PARK Jinkyun, PRESLEY Mary. Selecting significant contextual factors and estimating their effects on operator reliability in computer-based control rooms[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2021, 3(5): 213-224
- [11] LIU Jianqiao, ZOU Yanhua, WANG Wei, et al. A study on assigning performance shaping factors of the SPAR-H method for adequacy human reliability analysis of nuclear power plants[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2021, 11(2): 81-87
- [12] SANTOSO Sigit, TAKAHASHI Makoto, KITAMURA Masaharu. A case study on the designing of human machine interface for industrial process control system[J]. Correspondences on Human Interface, 2002, 4(4): 417-420
- [13] 刘建桥, 张力, 邹衍华, 等. SPAR-H 方法中行为形成因子间的相关性识别[J]. 核动力工程, 2021, 42(4): 144-150
LIU Jianqiao, ZHANG Li, ZOU Yanhua, et al. Identification of correlations between behaviour-forming factors in the SPAR-H method, 2021, 42(4): 144-150 (in Chinese)
- [14] 杨越, 张燕飞, 王建忠. 基于 CREAM 和贝叶斯网络的空管人误概率预测方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 37-43
YANG Yue, ZHANG Yanfei, WANG Jianzhong. ATC human error probability prediction method based on CREAM and Bayesian

- networks[J]. China Production Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 37-43 (in Chinese)
- [15] BANDEIRA M C G S P, CORREIA A R, MARTINS M R. General model analysis of aeronautical accidents involving human and organizational factors[J]. Journal of Air Transport Management, 2008, 69: 137-146
- [16] 李媛. SHELL 模型解读[J]. 山东医药, 2013, 53(45): 96-97
- LI Yuan. SHELL model interpretation[J]. Shandong Medicine, 2013, 53(45): 96-97 (in Chinese)
- [17] 王黎静, 王彦龙. 人的可靠性分析: 人因差错风险评估与控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015
- WANG Lijing, WANG Yanlong. Human reliability analysis: human-caused error risk assessment and control[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015 (in Chinese)
- [18] 许为, 陈勇. 人机工效学在民用客机研发中应用的新进展及建议[J]. 航空科学技术, 2012(6): 18-21
- XU Wei, CHEN Yong. New advances and suggestions on the application of ergonomics in the development of civil airliners[J]. Aviation Science and Technology, 2012(6): 18-21 (in Chinese)
- [19] 罗晓利, 李海龙, 秦凤姣. 基于 JACK 的机务人员工作负荷评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(4): 192-196
- LUO Xiaoli, LI Hailong, QIN Fengjiao. JACK-based workload assessment for mechanics[J]. China Safety Production Science and Technology, 2015, 11(4): 192-196 (in Chinese)
- [20] 卜晓敏. 航空人为因素事故/事件分析模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2008
- BU Xiaomin. Research on aviation human factors accident/incident analysis model[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2008 (in Chinese)
- [21] 黄晗. 基于海南航空的航空风险人为因素分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2019
- HUANG Han. Analysis of human factors of aviation risks based on hainan airlines[D]. Changsha: Hunan University, 2019 (in Chinese)
- [22] 刘瑞萑. 影响飞行员不安全行为的内外因素及其作用机理研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019
- LIU Ruihuan. Research on the internal and external factors affecting pilots' unsafe behavior and their mechanism of action[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019 (in Chinese)
- [23] 吴晓莉. 复杂信息任务界面的出错-认知机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2015
- WU Xiaoli. Error-cognitive mechanisms for complex information task interfaces[D]. Nanjing: Southeast University, 2015 (in Chinese)
- [24] 张力, 彭汇莲. 数字化人机界面操作员听觉失误实验验证研究[J]. 工业工程与管理, 2015, 20(3): 103-108
- ZHANG Li, PENG Huilian. Experimental validation study of auditory failure of digital human machine interface operators[J]. Industrial Engineering and Management, 2015, 20(3): 103-108 (in Chinese)
- [25] 刘启越. 民用飞机驾驶舱人机工效评价方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013
- LIU Qiyue. Study on human-machine ergonomics evaluation method for civilian aircraft cockpit[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese)
- [26] 王磊, 马文意, 吴羽昕. 高校科研团队创造力评价指标体系的实证研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(19): 73-82
- WANG Lei, MA Wenyi, WU Yuxin. An empirical study on the evaluation index system of creativity of research teams in universities[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(19): 73-82 (in Chinese)
- [27] 陈向荣, 吴硕贤. 基于主观评价法的现代剧场满意度评价——以广州大剧院和湖南大剧院为例[J]. 华南理工大学学报, 2013, 41(10): 135-144
- CHEN Xiangrong, WU Shuoxian. Satisfaction evaluation of modern theaters based on subjective evaluation method: taking Guangzhou grand theatre and Hunan grand theatre as examples[J]. Journal of South China University of Technology, 2013, 41(10): 135-144 (in Chinese)
- [28] NADKARNI S, SHENOY P P. A causal mapping approach to constructing bayesian networks[J]. Decision Support Systems, 2004, 38(2): 259-281
- [29] 马德仲, 周真, 于晓洋, 等. 基于模糊概率的多状态贝叶斯网络可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(12): 2607-2611
- MA Dezhong, ZHOU Zhen, YU Xiaoyang, et al. Reliability analysis of multi-state Bayesian networks based on fuzzy probability [J]. Systems Engineering and Electronics Technology, 2012, 34(12): 2607-2611 (in Chinese)
- [30] NADKARNI S, SHENOY P P. A causal mapping approach to constructing Bayesian networks[J]. Decision Support Systems,

2004, 38(2): 259-281

- [31] HSU H M, CHEN C T. Aggregation of fuzzy opinions under group decision making[J]. Fuzzy Sets & Systems, 1996, 79(3): 279-285
- [32] CALDWELL L, CHANDLER J, HARTZLER B. Battling fatigue in aviation: recent advancements in research and practice[J]. Journal of Medical Sciences, 2012, 32(2): 1-12
- [33] 潘卫军, 郑思睿, 梁海军, 等. 飞行员视觉信息易读性研究[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(8): 123-131
PAN Weijun, ZHENG Sirui, LIANG Haijun, et al. A study on the ease of reading visual information for pilots[J]. Mathematical Practice and Understanding, 2020, 50(8): 123-131 (in Chinese)
- [34] IVAN M E N N. Civil aviation rules on crew flight time, flight duty, and rest: comparison of 10 ICAO member states[J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 2009, 80(2): 135-138
- [35] 左孔成, 陈鹏, 王政, 等. 飞机舱内噪声的研究现状[J]. 航空学报, 2016, 37(8): 2370-2384
ZUO Kongcheng, CHEN Peng, WANG Zheng, et al. Current status of research into aircraft cabin noise[J]. Journal of Aviation, 2016, 37(8): 2370-2384 (in Chinese)

A method for evaluating human-machine interface in civil aircraft cockpit based on human factor reliability

XIE Ning^{1,2}, CHEN Dengkai^{1,2}, ZHOU Yao^{1,2}, ZHANG Xian^{1,2}

(1. Institute of Industrial Design, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Key Laboratory of Industrial Design and Human-Machine Ergonomics for
Ministry of Industry and Information Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to reduce the probability of human error in the cockpit of a civil aircraft, based on the SHEL model, this paper classifies performance shaping factors (PSF) that affect the human factor reliability of the human-machine interface. Then it constructs the relevant PSF system and uses the interpretation structure model to establish the corresponding adjacency matrix. When a multi-level recursive structure is obtained, the Noisy-OR model is introduced to construct the Bayesian network, thus establishing the new human-machine interface evaluation method. Real cases are used to verify the effectiveness of the method thus established through causal inference with the Bayesian network. The evaluation method for the reliability of a set of human factors this paper proposes provides a new approach to evaluating the human-machine interface in the cockpit of a civil aircraft.

Keywords: cockpit; human factor error; interpretative structure model; Bayesian network

引用格式: 谢凝, 陈登凯, 周焱, 等. 基于人因可靠性的民机驾驶舱人机界面评价方法[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(6): 1250-1260

XIE Ning, CHEN Dengkai, ZHOU Yao, et al. A method for evaluating human-machine interface in civil aircraft cockpit based on human factor reliability[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(6): 1250-1260 (in Chinese)